

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E EXATAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

DANILO REZENDE PRADO SILVA

PROPOSTA DE MODELO AHP-BWM PARA PONDERAÇÃO DE CRITÉRIOS NA  
MENSURAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE EM ETAPAS DE PROCESSO DE  
MANUFATURA

UBERABA

2021

Danilo Rezende Prado Silva

Proposta de modelo AHP-BWM para ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, área de concentração Qualidade Ambiental, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Lauro Osiro

Co-orientador: Prof. Dr. Márcio de Queiroz Murad

UBERABA

2021

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

S579p Silva, Danilo Rezende Prado  
Proposta de modelo AHP-BWM para ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura / Danilo Rezende Prado Silva. -- 2021.  
128 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) -- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2021  
Orientador: Prof. Dr. Lauro Osiro  
Coorientador: Prof. Dr. Márcio de Queiroz Murad

1. Engenharia mecânica. 2. Engenharia de produção. 3. Sustentabilidade. 4. Desenvolvimento sustentável. 5. Indicadores ambientais. I. Osiro, Lauro. II. Universidade Federal do Triângulo Mineiro. III. Título.

CDU 502.131.1:62

DANILO REZENDE PRADO SILVA

**PROPOSTA DE MODELO AHP-BWM PARA PONDERAÇÃO DE CRITÉRIOS NA  
MENSURAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE EM ETAPAS DE PROCESSO DE  
MANUFATURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 27 de agosto de 2021.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Lauro Osiro  
Orientador - UFTM

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Flávia de Castro Camioto  
Membro Titular - UFTM

Prof. Dr. Francisco Rodrigues Lima Junior  
Membro Titular - UTFPR



Documento assinado eletronicamente por **LAURO OSIRO, Professor do Magistério Superior**, em 27/08/2021, às 17:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **FLAVIA DE CASTRO CAMIOTO, Professor do Magistério Superior**, em 27/08/2021, às 17:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO RODRIGUES LIMA JUNIOR, Usuário Externo**, em 27/08/2021, às 20:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 87, de 17 de agosto de 2021](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.uftm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0585884** e o código CRC **61D79778**.

Aos mais de 560.000 brasileiros ausentes devido ao genocídio em curso no país, causada não só pela pandemia da COVID-19, mas principalmente fruto de um governo que despreza seu povo e sua ciência; estaremos sempre lutando por dias melhores.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Mário e Rosa, e ao meu irmão Guilherme e à sua companheira Nathália, por serem de fundamental importância para que, apesar das adversidades, eu pudesse chegar até aqui.

À minha avó Ilda, que nos deixou no último ano e que deixa uma saudade imensa.

Aos meus queridos amigos, novos e de longa data, nos quais tenho encontrado nos últimos tempos um refúgio e um ombro e em quem, sem sombra de dúvidas, posso confiar sem pestanejar, principalmente em momentos tão obscuros como os quais estamos presenciando.

Aos familiares que a relação com a minha companheira me trouxe, Renata, Beto, Pedro, Sofia, Fernanda e Edson, que me abraçaram e me acolheram como um filho e por quem guardo enorme estima.

A todos os estudantes, técnicos administrativos e docentes que encontrei em minha trajetória pela UFTM, que compartilharam comigo sonhos, esperanças, vários momentos de luta e que jamais vão deixar de lutar pelo certo e pelo justo em qualquer âmbito de suas vidas.

À servidora Luciana, sempre fazendo um trabalho impecável na secretaria do PPGCTA, de maneira gentil e responsável.

Ao meu co-orientador Márcio, que de bom grado aceitou o convite para esta pesquisa e que foi de fundamental importância como referência de profissional e pesquisador na área abordada.

Ao meu orientador Lauro, sempre presente, com extremo companheirismo e compreensão com as particularidades que esta pesquisa e este momento em que vivemos nos exigiu, e que me fez progredir no caminho da Ciência.

Aos professores do PPGCTA cujas disciplinas cursei, Lauro, Deusmaque, Ana Carolina, Ana Paula, Mário, Júlio, Diego e Renato, fundamentais para a minha formação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA), na pessoa do antigo coordenador, prof. Dr. Deusmaque, e da atual coordenadora, professora Dra. Ana Paula, que conduzem este desafio enorme que é o de liderar um grupo de professores e de mestrandos extremamente dispostos a fazer Ciência, apesar das enormes dificuldades que encontram pelo caminho.

Aos camaradas de Norte a Sul, presentes no país inteiro, com quem tenho um imenso orgulho de partilhar ombro a ombro um ideal de uma sociedade mais justa, sem exploração, miséria e fome, onde todos os trabalhadores possam viver de maneira digna.

E por último, mas certamente não de maneira menos importante, agradeço profundamente à minha companheira Marília, por todos os momentos que dividimos até então, sejam alegres, tristes, angustiantes ou esperançosos e que espero que continuem por muitos e muitos anos, com muito amor e admiração crescentes; e à nossa filha, Olga, que vem crescendo de uma maneira linda e admirável, em um ambiente com muito amor, acolhimento e felicidade, e que serve de inspiração constante.

“Se a aparência e a essência das coisas coincidissem, a ciência seria desnecessária.”

Karl Marx

## RESUMO

A preocupação com o meio ambiente está se tornando cada vez mais relevante, levando empresas e organizações a criar estratégias para analisar os impactos ambientais decorrentes de sua atuação e elaborar medidas de intervenção. Nesse sentido, muitas recorrem a técnicas de avaliação da sustentabilidade. O setor de manufatura mecânica é um dos que se beneficia disso, já que agrega diversas atividades que convertem matéria-prima e energia em produtos, gerando resíduos e emissões. Para que as empresas consigam efetuar essa avaliação, muitas recorrem à utilização de métodos de decisão multicritérios, uma vez que permitem a introdução de suas visões e necessidades estratégicas. Dois métodos de decisão multicritérios, *Analytic Hierarchy Process* (AHP) e *Best Worst Method* (BWM) são apresentados, bem como um modelo híbrido formado pelo uso conjunto dos dois. Assim, este trabalho teve por objetivo principal apresentar uma proposta de ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura utilizando o modelo AHP-BWM. Este modelo foi aplicado utilizando a mesma lista de critérios utilizada por Murad (2020), bem como a mesma etapa de processo, que foi a aplicação de revestimento metálico em rolos de moenda de açúcar, e foi feita em duas empresas do ramo sucroalcooleiro. Além disso, também foi realizada revisão bibliográfica sobre propostas de avaliação de sustentabilidade em etapas de processo de manufatura e a revisão sobre a viabilidade da utilização de métodos de decisão multicritérios para a ponderação da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura. Foi verificado que o modelo AHP-BWM obteve resultados positivos na aplicação em etapas de processo de manufatura, além de reduzir consideravelmente a quantidade de comparações pareadas caso tivesse sido utilizado apenas o método AHP. Foi feita também uma análise dos critérios mais importantes em cada empresa, bem como dos pontos mais importantes de Murad (2020) para este trabalho.

Palavras chave: Sustentabilidade; Métodos de decisão multicritérios; Avaliação da Sustentabilidade; AHP; BWM.

## **ABSTRACT**

The concern with the environment is becoming increasingly relevant, leading companies and organizations to create strategies to analyse the environmental impacts arising from their activities and develop interventions. In this sense, many resort to sustainability assessment techniques. The mechanical manufacturing sector is one of those that benefits from this, since it aggregates several activities that convert raw material and energy into products, generating waste and emissions. In order for companies to be able to carry out this assessment, many use multicriteria decision-making methods, since they allow the merge of their strategic needs into the method. Two multicriteria decision methods, Analytic Hierarchy Process (AHP) and Best Worst Method (BWM) are presented, as well as a hybrid model formed by the combined use of them. Thus, the main objective of this work was to present a proposal for weighting criteria in measuring sustainability in manufacturing process stages using the AHP-BWM model. This model was applied using the same list of criteria used by Murad (2020), as well as the same process, which was the deposition of metallic coating in sugar mill rolls, and it was applied in two different companies in the sugar and alcohol industry. In addition, a literature review was also carried out on sustainability assessment proposals in manufacturing processes and the review on the feasibility of using multicriteria decision-making methods for weighting sustainability in manufacturing processes. It was verified that the AHP-BWM model obtained positive results in the application in manufacturing processes, besides considerably reducing the amount of paired comparisons if only AHP method had been used. An analysis was also made of the most important criteria in each company, as well as the most important points of Murad (2020) used in this work.

**Keywords:** Sustainability; Multicriteria decision methods; Sustainability Assessment; AHP; BWM

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>16</b>
2.1 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE .....	16
2.1.1 Métodos de avaliação da sustentabilidade em processos de manufatura.....	18
2.2 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS.....	30
2.2.1 O Método AHP .....	30
2.2.2 O Método BWM .....	37
2.2.3 O Modelo AHP-BWM.....	42
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>46</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>50</b>
4.1 APRESENTAÇÃO DOS CASOS A E B.....	50
4.2 CASO A - APLICAÇÃO DO MODELO.....	51
4.2.1 Primeiro passo (Caso A) – Seleção de KPIs e definição da estrutura hierárquica .....	51
4.2.2 Segundo Passo (Caso A) – Elaboração de matrizes e pares de vetores de comparações pareadas .....	53
4.2.3 Terceiro Passo (Caso A) – Aplicação do questionário .....	54
4.2.3.1 Comparações pareadas para as dimensões da sustentabilidade (Caso A).....	54
4.2.3.2 Comparações pareadas para a dimensão social (Caso A).....	55
4.2.3.3 Comparações pareadas para a dimensão econômica (Caso A) .....	56
4.2.3.4 Comparações pareadas para a dimensão ambiental (Caso A).....	57
4.2.3.5 Comparações pareadas para a dimensão tecnológica (Caso A).....	59
4.2.3.6 Comparações pareadas para a dimensão legal (Caso A).....	60
4.2.4 Quarto Passo (Caso A) – Cálculo das consistências .....	60
4.2.5 Quinto Passo (Caso A) – Obtenção dos vetores de prioridades .....	62

4.2.6 Sexto Passo (Caso A) – Cálculo das importâncias relativas finais.....	65
4.3 CASO B – APLICAÇÃO DO MODELO .....	66
4.3.1 Primeiro passo (Caso B) – Seleção de KPIs e definição da estrutura hierárquica .....	66
4.3.2 Segundo Passo (Caso B) – Elaboração de matrizes e pares de vetores de comparações pareadas .....	67
4.3.3 Terceiro Passo (Caso B) – Aplicação do questionário.....	68
4.3.3.1 Comparações pareadas para as dimensões da sustentabilidade (Caso B).....	68
4.3.3.2 Comparações pareadas para a dimensão social (Caso B) .....	69
4.3.3.3 Comparações pareadas para a dimensão econômica (Caso B) .....	70
4.3.3.4 Comparações pareadas para a dimensão ambiental (Caso B).....	71
4.3.3.5 Comparações pareadas para a dimensão tecnológica (Caso B) .....	72
4.3.3.6 Comparações pareadas para a dimensão legal (Caso B).....	74
4.3.4 Quarto Passo (Caso B) – Cálculo das consistências .....	74
4.3.5 Quinto Passo (Caso B) – Obtenção dos vetores de prioridades.....	77
4.3.6 Sexto Passo (Caso B) – Cálculo das importâncias relativas finais .....	80
4.4 ANÁLISE DOS DADOS .....	81
4.4.1 Análise dos dados do caso A .....	84
4.4.2 Análise dos dados do caso B .....	86
4.4.3 Análise do modelo e de demais aspectos .....	88
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	97
ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS KPIS UTILIZADOS .....	102

## 1 INTRODUÇÃO

A preocupação com o meio ambiente vem se consolidando de maneira cada vez mais relevante nos últimos cinquenta anos devido aos diversos problemas ambientais causados pela crescente ação antrópica, seja pela demanda exorbitante de recursos, seja pela emissão de resíduos em escala insustentável (BARBIERI, 2016). Tendo sido o conceito de desenvolvimento sustentável criado em 1987, possibilitou a junção entre áreas até então distintas, como foi o caso do desenvolvimento econômico com as questões de preservação ambiental, por exemplo, fazendo com que as análises sobre sustentabilidade pudessem se dar de maneira mais holística (COMISSÃO MUNDIAL PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1987).

A partir disso, começaram a surgir algumas iniciativas para se mensurar a sustentabilidade de empresas, produtos e processos, sendo alvo de diversas pesquisas para melhor desenvolver estas técnicas de avaliação. A avaliação da sustentabilidade pode ser definida como uma maneira sistemática de se analisar e avaliar potenciais riscos adversos causados por atividade humana de forma a afetar a sustentabilidade economicamente, socialmente e ambientalmente (RÖDGER; BEY, 2019; SAAD; NAZZAL; DARRAS, 2019).

Uma aplicação relevante para a avaliação da sustentabilidade é na área da manufatura, responsável pela geração de empregos e riqueza e que está envolvida diretamente em atividades que convertem matéria-prima e energia em produtos, gerando resíduos e emissões ambientais (YUAN; ZHAI; DORNFELD, 2012). Em 2010, por exemplo, o setor de manufatura foi responsável por cerca de 19% das emissões mundiais de gás carbônico, gás que contribui com o aumento do efeito estufa (RÖDGER; BEY, 2019).

Diversas técnicas para a mensuração da sustentabilidade vêm sendo desenvolvidas e aplicadas em etapas de processo de manufatura, como por exemplo a avaliação de critérios para determinação de parâmetros de velocidade de corte e vazão de fluido de corte em usinagem criogênica (LU; JAWAHIR, 2015) ou mesmo uma escolha dentre alguns cenários, baseando-se em um conjunto de critérios, para a produção de facas de aço inoxidável (ZHANG; HAAPALA, 2015). Após a realização de uma revisão, os diferentes estudos foram analisados de acordo com alguns critérios, como por exemplo se permitem a ponderação de seus critérios de avaliação e se utilizam métodos de decisão multicritérios. Este interesse em métodos de decisão multicritérios se dá nesse contexto pelo fato de possibilitar a introdução da visão e da

estratégia própria de cada empresa na avaliação da sustentabilidade por meio de ponderações de critérios, fazendo com que ela seja capaz de visualizar as suas preferências de maneira objetiva.

Métodos de decisão multicritérios são técnicas desenvolvidas para auxiliar tomadas de decisão em situações em que há muitos critérios a serem analisados e em que se deseja descobrir as importâncias relativas entre eles, ou seja, quais são mais ou menos importantes (REZAEI, 2015). Um método importante é o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), criado por Thomas Saaty no final da década de 1960 (FORMAN; SELLY, 2020), e que pode ser definido como um método de medição utilizado para obter escalas proporcionais a partir de comparações pareadas, e é constituído por quatro etapas: disposição dos critérios a serem analisados e ponderados em uma hierarquia de decisão; determinação dos pesos relativos de cada critério em relação ao objetivo pretendido; determinação dos níveis de consistência das decisões; e avaliação final das alternativas (SAATY, 1994).

Outro importante método de decisão multicritérios é o *Best Worst Method* (BWM), proposto por Rezaei (2015). Ele também utiliza comparações pareadas, mas com algumas diferenças em relação ao AHP. A utilização do BWM em detrimento do AHP faz com que a quantidade de comparações necessárias entre os critérios a serem analisados seja reduzida drasticamente. Além disso, o BWM supera certas limitações do AHP em relação à consistência resultante das comparações pareadas.

Moslem et al. (2020a) elaboraram um modelo conjunto AHP-BWM ao elencar diversos fatores de risco na conduta de motoristas e, a partir deste modelo híbrido, montam uma estrutura hierárquica de três níveis, calculam as suas preferências relativas e ranqueiam-nos, de acordo com as impressões dos próprios motoristas.

Isto posto, a proposta de intervenção desta pesquisa é aplicar o modelo AHP-BWM na etapa de ponderação dos diversos critérios na mensuração da sustentabilidade em uma etapa de processo de manufatura. A escolha desse modelo híbrido, adaptado de Moslem et al. (2020a), se dá pela robustez, eficiência e pelo fato dos métodos AHP e BWM já terem sido aplicados de maneira satisfatória em outros campos. O método AHP, por exemplo, já foi utilizado para decisões envolvendo escolhas de localidade para instalações, ranqueamento de cidades e países, organização de compatibilidades para transplantes de órgãos e escolhas para o melhor tratamento de pacientes terminais (BRUNELLI, 2015; SAATY, 1987, 1994). O método BWM, mesmo sendo mais recente, também já foi utilizado em diversos campos, como na escolha de produtos, avaliação de fatores de sustentabilidade em cadeias de fornecimento de óleo e gás e

seleção da melhor técnica de conversão termoquímica de biomassa (REZAEI et al., 2016; VAN DE KAA; KAMP; REZAEI, 2017; WAN AHMAD et al., 2017).

O modelo será aplicado em duas empresas do ramo sucroalcooleiro, que possuem em sua linha de produção uma etapa de processo de manufatura que é a deposição de solda (chapisco) em rolos de moenda de cana-de-açúcar.

Sendo assim, o objetivo geral desta pesquisa é apresentar uma proposta de ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura utilizando o modelo AHP-BWM.

Para isso, os objetivos específicos da pesquisa, que serão as categorias de análise, serão os seguintes:

1. efetuar uma revisão bibliográfica sobre propostas de avaliação de sustentabilidade de etapas de processo de manufatura;
2. revisar e verificar a viabilidade da utilização de métodos de decisão multicritérios para a ponderação da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura;
3. aplicar a proposta de avaliação da sustentabilidade em uma etapa de processo de manufatura de duas empresas e analisar os resultados decorrentes desta aplicação.

Esta dissertação possui a seguinte estrutura: este Capítulo 1 contém a Introdução; o Capítulo 2 contém o Referencial Teórico, que se divide em Avaliação de Sustentabilidade e Métodos de Decisão Multicritérios, sendo que o segundo abordará o método AHP, o método BWM e o modelo AHP-BWM; o Capítulo 3 contém a Metodologia; o Capítulo 4 contém os Resultados e Discussão, com a apresentação dos casos A e B, a aplicação do modelo AHP-BWM em cada um deles e a análise dos dados; o Capítulo 5 contém as Considerações Finais; por fim, tem-se as Referências Bibliográficas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE

A necessidade do homem intervir na natureza de maneira a garantir a produção de meios para a sua subsistência por si só não é a causa dos problemas ambientais como conhecemos, mas “o aumento da escala de produção tem sido um importante fator que estimula a exploração dos recursos naturais e eleva a quantidade de resíduos” (BARBIERI, 2016, p. 7).

Em grande parte, esses problemas advêm da exploração de recursos naturais em uma velocidade superior à sua reposição por meios naturais e da não-mitigação do lançamento de resíduos de volta na natureza, que acaba se comportando tanto como fonte como recipiente destes resíduos (BARBIERI, 2016). Dentre as consequências estão a destruição da camada de ozônio, contaminação de corpos d’água, perda da biodiversidade e desregulação do efeito estufa, por exemplo.

A partir disso, algumas iniciativas começam a surgir a fim de analisar os impactos das ações antropogênicas no meio ambiente e de poder elaborar intervenções. Pela primeira vez, em 1987, a partir da Comissão Mundial para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) da Organização das Nações Unidas (ONU), no relatório chamado *Nosso Futuro Comum*, é forjado o conceito de desenvolvimento sustentável, como sendo “aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades” (COMISSÃO MUNDIAL PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1987, p. 41).

Nas últimas décadas, o conceito de desenvolvimento sustentável vem se tornando cada vez mais comum e cada vez mais aplicado a produtos, serviços e ações em geral. Além disso, foram integrados ao conceito da CMMAD, por exemplo, a ligação entre desenvolvimento econômico e manutenção da capacidade ecológica, e depois a conexão com valores e objetivos sociais. Desta forma, para as empresas não basta, apenas, preocupar-se com a questão ambiental, por mais válido que seja, uma vez que há outros fatores que são cruciais para que ela sobreviva, cumpra suas funções e para que seja, de fato, sustentável. Elkington (1997) foi o primeiro a sistematizar os esparsos conceitos acerca do desenvolvimento sustentável para o nível empresarial, formulando o conceito do *Triple Bottom Line* (TBL), que integra três pilares fundamentais, que são a prosperidade econômica, qualidade ambiental e justiça social. Desde

então, esse conceito passou a ser cada vez mais difundido no meio empresarial, sendo utilizado nas mais diversas situações gerenciais, bem como em análises de atividades operacionais (FIKSEL; MCDANIEL; SPITZLEYN, 1998; HUANG; BADURDEEN, 2017, 2018; POPE; ANNANDALE; MORRISON-SAUNDERS, 2004).

Outros autores se empenharam na elaboração de outras visões sobre as dimensões envolvidas no conceito de sustentabilidade. Jovane, Westkamper e Williams (2009) propuseram a inclusão de dois pilares adicionais ao TBL – tecnológico e legal – por entenderem que, desta forma, os pilares “originais” seriam mais representativos ao seu significado, além desta modificação incluir mais aspectos relevantes para a sustentabilidade. Yüksel (2012) investiga, a partir de um modelo composto pelos métodos de decisão multicritérios *Analytic Hierarchy Process (AHP)*, *Analytic Network Process (ANP)* e *Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL)*, a sustentabilidade em uma empresa na Turquia, por meio de fatores derivados da análise PESTEL (*Political, Economic, Social, Technological, Environmental, Legal*), cujas dimensões principais são política, econômica, sociocultural, tecnológica, ambiental e legal; esta análise tanto identifica estes fatores a partir de como a empresa opera, quanto fornece dados e informações que permitem a empresa prever situações que possa encontrar no futuro. Zhang et al. (2020), tendo percebido a necessidade de desenvolver um paradigma de sustentabilidade aplicável para o caso a ser estudado, utilizam as dimensões energia, ambiental e econômica, uma vez que analisam o ciclo de vida em atividades de manufatura.

A fim de verificar o desempenho de processos, produtos e empresas inteiras sob a ótica destas visões a respeito da sustentabilidade, surgem diversas metodologias que se utilizam de diferentes ferramentas para quantificar e/ou explicitar este desempenho. A avaliação da sustentabilidade pode ser descrita como uma metodologia de apoio para tomada de decisões com o objetivo de fazer a sociedade mais sustentável (SAAD; NAZZAL; DARRAS, 2019). Pode ser descrita também como uma maneira sistemática de se analisar e avaliar potenciais riscos adversos causados por atividade humana de forma a afetar a sustentabilidade economicamente, socialmente e ambientalmente (RÖDGER; BEY, 2019). Segundo Pope, Annandale e Morrison-Saunders (2004), a avaliação da sustentabilidade demanda um conceito claro sobre o que ela é, definindo-a a partir de critérios em relação aos quais ela será avaliada e que servirão para separar as consequências sustentáveis das não-sustentáveis. Ou seja, a avaliação depende do objetivo em questão, e dos pilares ou dimensões levadas em consideração, e vem sendo utilizada nos mais diversos contextos e escopos, desde processos específicos, como por exemplo a avaliação de sustentabilidade de processo de usinagem criogênica (LU;

JAWAHIR, 2015), ou mesmo comparação de níveis de sustentabilidade entre plantas fabris de uma mesma empresa em países diferentes (WINROTH; ALMSTRÖM; ANDERSSON, 2012).

A manufatura, justamente por englobar produtos, processos e empresas, além de ser um setor relevante na geração de empregos e de riqueza, configura-se como uma área importante para se avaliar a sustentabilidade e, conseqüentemente, torná-la cada vez mais sustentável competitiva (JOVANE; WESTKAMPER; WILLIAMS, 2009). É uma atividade que converte matéria-prima e energia em produtos, e essa conversão gera simultaneamente resíduos e emissões ambientais (YUAN; ZHAI; DORNFELD, 2012). Por outro lado, outra motivação para deixar essa atividade mais sustentável é o alto impacto na natureza. Por exemplo, em 2010, o setor de manufatura contribuiu com aproximadamente 19% das emissões mundiais de gás carbônico, e este índice vem crescendo em uma velocidade maior que o tamanho da população mundial (RÖDGER; BEY, 2019). Pesquisas recentes nas áreas de sistemas e tecnologias em manufatura estão conectando cada vez mais a eficiência no uso de recursos à avaliação ambiental, além das já consideradas implicações econômicas (DESPEISSE et al., 2012).

Veremos no item a seguir que, respaldando-se em algum tipo de configuração de dimensões ou pilares da sustentabilidade, diversos autores vêm desenvolvendo métodos e técnicas para avaliar a sustentabilidade de produtos, processos e linhas de produção fabris, especificamente na área da manufatura, a fim de auxiliar as empresas a encontrarem pontos de melhoria nas dimensões observadas

### **2.1.1 Métodos de avaliação da sustentabilidade em processos de manufatura**

Segundo Lu e Jawahir (2015), a avaliação do impacto dos processos de manufatura deve considerar os aspectos econômico, social e ambiental da sustentabilidade. Ou seja, para se tornar sustentável, a manufatura precisa garantir impacto ambiental reduzido, maior eficiência na utilização de recursos, fornecendo segurança para todos os envolvidos, enquanto melhora a qualidade de processos e produtos (LU; JAWAHIR, 2015).

De acordo com Ghadimi et al. (2013), esta avaliação pode ser feita baseando-se tanto em análise quantitativa, utilizando indicadores objetivos, quanto em análise qualitativa, utilizando conhecimento e experiência de especialistas. Na pesquisa acerca da manufatura sustentável, diversas métricas e ferramentas vêm sendo desenvolvidas para análise de performance ambiental dos processos envolvidos, e os que levam em consideração um conceito mais amplo de sustentabilidade vêm crescendo (YUAN; ZHAI; DORNFELD, 2012). Desta

forma, serão apresentados alguns estudos que contenham métodos oportunos de avaliação da sustentabilidade e que contribuirão com os objetivos específicos delimitados no escopo deste trabalho. Além de contribuir com a construção de uma revisão bibliográfica sobre propostas de avaliação de sustentabilidade de etapas de processo de manufatura, eles servirão, também, para verificar a viabilidade da utilização de métodos de decisão multicritérios para mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura. Os métodos abordados que têm por escopo linhas de produção ao invés de processos individuais se fazem presentes pelo fato de serem passíveis de serem utilizados, também, para o caso de processos individuais.

Huang e Badurdeen (2018), através dos conceitos de TBL, ciclo de vida, 6R e manufatura sustentável, e notando que havia falta de estudos que os cobrissem de maneira a avaliar o desempenho da sustentabilidade na manufatura no nível de linha de produção, elaboraram uma proposta de índice de sustentabilidade composta pelas seguintes etapas: identificação de métricas e indicadores de sustentabilidade existentes para o escopo de linhas de produção e de planta, definição de uma estrutura hierárquica de cinco níveis – métricas, *sub-clusters*, *clusters*, sub-índice para cada dimensão do TBL e índice -, mensuração das métricas, normalização, ponderação e agregação. Para validar o método, ele foi aplicado em uma linha de produção de antenas parabólicas, composta pelos processos de estampagem, lavagem, pintura, forno de cura, tampografia e embalagem.

Apoiando-se em conceitos como TBL, ciclo de vida do produto, abordagem 6R e manufatura sustentável, Faulkner e Badurdeen (2014) tomaram uma técnica de Lean Manufacturing chamada Mapeamento de Fluxo de Valor (VSM), geralmente utilizada para identificar geração de desperdícios, e adaptaram-na para identificar métricas e avaliar a performance sustentável na manufatura, composta pelas dimensões econômica, social e ambiental, tendo sido aplicada, também, em um estudo de caso envolvendo uma fábrica de antenas parabólicas.

Ao examinar a usinagem criogênica e suas vantagens em relação aos processos de usinagem convencional, Lu e Jawahir (2015) elaboraram uma metodologia (ProcSI) que abarcou e agregou de forma quantitativa tanto critérios analíticos quanto subjetivos a fim de determinar uma faixa de valores ótimos dos parâmetros velocidade de corte e vazão de fluido de corte para maximizar a sustentabilidade do processo. Para isso, foi elaborado um conjunto de métricas e a definição de limites do sistema em questão a fim de auxiliar os fabricantes a chegar nos parâmetros ótimos para a sustentabilidade e eficiência final - que foram alcançadas com altos valores de velocidade de corte e quantidade de fluido equivalente à da mínima quantidade de fluido (MQL).

Levando em consideração fatores econômicos, ambientais e sociais (TBL) e o conceito de análise de ciclo de vida, Zhang e Haapala (2015) propõem uma abordagem de avaliação de sustentabilidade de um produto em uma linha de produção manufatureira, que no caso analisado, é composta por um operador, duas fresadoras CNC, uma máquina de medição de coordenadas e uma fresa de chanfro, e tem como produto facas de aço inoxidável. Desta forma, utilizando os métodos de decisão multicritério AHP e PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment of Evaluations*), as métricas obtidas são ponderadas e os diferentes cenários de produção são analisados e ranqueados.

A partir do contexto da China em que estratégias de economia circular se fazem cada vez mais necessárias para melhor conservação dos recursos, a remanufatura se sobressai sobre as demais como uma opção viável de processo de restauração. Sendo assim, Peng et al. (2019) desenvolveram uma abordagem de tomada de decisão multicritérios utilizando o método TOPSIS (*Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution*) e a aplicaram para selecionar a tecnologia de restauração mais adequada para a remanufatura de virabrequins, utilizando três dimensões de sustentabilidade: impacto ambiental, custo econômico e atributos tecnológicos.

Depois de investigar as lacunas existentes na área de pesquisa da avaliação de sustentabilidade nas atividades de manufatura mecânica, Saad, Nazzal e Darras (2019) formularam um novo *framework* para avaliar a sustentabilidade em processos de usinagem, levando em consideração as dimensões econômica, ambiental e social. O *framework* contém diretrizes para seleção e quantificação de indicadores, ponderação por métodos objetivos ou subjetivos, normalização e ranqueamento das alternativas em análise, com orientações e sugestões para qual ou quais métodos de decisão multicritérios devem ser utilizados, seguido de análise de sensibilidade para verificar se o método utilizado deveria ser alterado.

Utilizando o *benchmarking* como metodologia de análise para gestão do uso de energia, e após observarem o grande consumo de energia e a baixa eficiência no seu uso nos processos de manufatura mecânica na indústria, caracterizando um grande potencial para melhoria, Cai et al. (2017) elaboraram um método multi-objetivo para previsão e avaliação do consumo de energia nesse tipo de atividade. Para tal, utilizam o método de decisão multicritérios TOPSIS em conjunção com a ponderação por entropia.

Murad (2020) propõe um novo modelo para mensuração da sustentabilidade, baseando-se no conceito de TBL, e analisou uma etapa de processo de manufatura específica em uma usina do setor sucroalcooleiro localizada no estado de Minas Gerais. A análise de seu trabalho foi feita para comparar a sustentabilidade de uma mesma etapa de processo realizada de

maneiras diferentes em duas empresas distintas, a partir da mensuração de uma série de KPIs (*Key Performance Indicators*) quantitativos e posterior agregação dos mesmos.

Yuan, Zhai e Dornfeld (2012) apresentam um sistema de abordagem com três dimensões - tecnologia, energia e material - para avaliar a sustentabilidade de manufatura a partir da perspectiva ambiental, principalmente no que diz respeito à prevenção de poluição. O método foi validado em um estudo de caso envolvendo uma tecnologia de nano-manufatura de semicondutores por deposição de filmes finos chamada ALD (*atomic layer deposition*).

Com o objetivo de conciliar benefícios ambientais e econômicos, Qian, Huang e Yan (2007) formulam uma abordagem de projeto a partir do ciclo de vida (LCA) e do custo do ciclo de vida (LCC) de um produto químico e, para isso, utilizam o método AHP para avaliar os critérios e estruturá-los e um método de pesos flutuantes para ponderação e cálculo de um índice geral de sustentabilidade. Para validação, a abordagem foi aplicada em um estudo de caso envolvendo a limpeza de reatores utilizados para deposição de filmes finos na manufatura de circuitos integrados.

Utilizando os dez estudos apresentados até então, é possível construir um quadro para auxiliar na caracterização dos mesmos. São elas: presença de método de ponderação; se a ponderação é feita por meio de métodos de decisão multicritérios; quais dimensões da sustentabilidade utiliza. Assim, tem-se o Quadro 1 abaixo.

Para além de trabalhos que analisassem a sustentabilidade em processos, foram apresentados, também, estudos que abordassem linhas de produção por se tratarem de sequências de processos, em sua maioria, de manufatura mecânica, como por exemplo fabricação de engrenagens (CAI et al., 2017), facas de aço inoxidável (ZHANG; HAAPALA, 2015) ou mesmo de antenas parabólicas (FAULKNER; BADURDEEN, 2014) e que, além disso, fossem compostas por poucos processos. Assim, é possível analisá-los conjuntamente de modo que consideremos seus critérios similares.

Dos dez estudos apresentados, seis utilizam algum método de ponderação de critérios de acordo com as necessidades de suas metodologias. A presença de um método de ponderação é importante porque mostra que a sustentabilidade naquele estudo pode ser quantificada e expressa em forma numérica, possibilitando comparações com outros processos similares ou com o mesmo processo no decorrer de um determinado intervalo de tempo.

Quadro 1 – Quadro comparativo de estudos de avaliação de sustentabilidade em processos de manufatura

<b>Estudo</b>	<i>Apresenta ponderação de critérios?</i>	<i>Se sim, utiliza métodos de decisão multicritérios na ponderação? Qual?</i>	<i>Dimensões de sustentabilidade</i>
Huang e Badurdeen (2018)	S <sup>1</sup>	AHP	Econômico, Ambiental, Social
Faulkner e Badurdeen (2014)	N	-	Econômico, Ambiental, Social
Lu e Jawahir (2015)	S <sup>1</sup>	N	Econômico, Ambiental, Social
Zhang e Haapala (2015)	S	AHP	Econômico, Ambiental, Social
Peng et al. (2019)	S	AHP, Entropia	Econômico, Ambiental, Tecnológico
Saad, Nazzal e Darras (2019)	S	AHP, ANP ( <i>Analytical Network Process</i> ), <i>Grey Relation Analysis</i> , TOPSIS, Entropia, ELECTRE ( <i>'ELimination Et Choix Traduisant la REalité</i> ), COPRAS ( <i>Complex Proportional Assessment Method</i> ) <sup>2</sup>	Econômico, Ambiental, Social
Cai et al. (2017)	N	-	Energética
Murad (2020)	N	-	Econômico, Ambiental, Social, Tecnológico, Legal
Yuan, Zhai e Dornfeld (2012)	N	-	Ambiental
Qian, Huang e Yan (2007)	S	N	Econômico, Ambiental

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota: <sup>1</sup> Os estudos possuem método de ponderação, mas, nos casos analisados, utilizam pesos iguais;

<sup>2</sup> O estudo em questão apresenta diversos métodos de decisão multicritérios, que ficam à disposição de acordo com cada necessidade.

Destes seis estudos, um utiliza o método AHP (ZHANG; HAAPALA, 2015), um abre opção entre utilização de pesos iguais ou utilização do método AHP (HUANG; BADURDEEN, 2018), um mescla a utilização entre o método AHP e o método por entropia (PENG et al., 2019) e um permite a escolha de um método de decisão multicritérios dentre um conjunto pré-selecionado para que o usuário possa utilizar o que melhor couber à sua necessidade (SAAD; NAZZAL; DARRAS, 2019). Além disso, estes dois últimos têm como escopo um processo de manufatura, entretanto o trabalho de Peng et al. (2019) não analisa um processo especificamente, e sim auxilia na escolha do melhor processo de remanufatura de virabrequins. A utilização de métodos de decisão multicritérios para ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade se mostra viável, uma vez que agrega a possibilidade do alinhamento estratégico da empresa ao método por possibilitar a tomada de decisões por meio tanto da experiência de especialistas na área analisada quanto de medições e cálculos prévios de determinados critérios.

Os outros quatro estudos não utilizam originalmente nenhum método de ponderação de critérios. Cai et al. (2017) não utilizam nem permitem a utilização de métodos de ponderação por se tratar de um método de *benchmarking*, ou seja, uma avaliação baseada em normalizações e valores padronizados, sem espaço para decisões gerenciais na mensuração da sustentabilidade. Faulkner e Badurdeen (2014) utilizam o método VSM que identifica a geração de resíduos e fluxo de valores, não possuindo critérios ponderáveis. Yuan, Zhai e Dornfeld (2012) não propõem um índice específico para a avaliação da sustentabilidade, possuindo principalmente análises qualitativas.

Dentre os estudos que não utilizam métodos de ponderação, o único que permite a sua utilização e, além disso, possui métricas para análise dos KPIs, com fácil aplicação em chão de fábrica e de maneira rápida, além de possuir uma metodologia que pode ser aplicada a qualquer etapa de processo de manufatura é o estudo de Murad (2020). O autor, inclusive, coloca como uma proposta para um futuro trabalho que se utilize um método de ponderação – especificamente o método AHP – para verificar a intervenção da visão das empresas na avaliação da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura.

O autor utiliza um conjunto de 42 KPIs pré-definidos, todos de caráter quantitativo e com regras definidas para sua avaliação, sendo muitos deles baseados em normas e em legislações específicas para a respectiva área, possibilitando uma maior objetivação da mensuração da sustentabilidade, bem como um alinhamento com os parâmetros legais vigentes no momento da avaliação (MURAD, 2020). Isso possibilita, também, que não só os gestores, mas também os operadores possam alimentar o sistema com os dados obtidos diretamente da etapa de processo em que estiverem atuando. Desta forma, alguns elementos destes estudos serão abordados mais profundamente adiante neste trabalho para que o modelo proposto seja aplicado de maneira a aproveitar as contribuições do estudo realizado pelo autor.

Os KPIs utilizados por Murad (2020) serão descritos brevemente a seguir, baseando-se nas descrições feitas em seu trabalho, para facilitar a compreensão e possibilitar análises posteriores. As definições completas e faixas de valores de cada KPI estão presentes no Anexo A. Eles se encontram divididos entre cinco dimensões da sustentabilidade, de acordo com a categorização realizada por Murad (2020): social, ambiental, econômica, tecnológica e legal.

Na dimensão social, há doze KPIs ao todo, dispostos no Quadro 2. São eles: insalubridade, risco de acidentes, treinamento, nível de escolaridade, taxa de frequência, taxa de gravidade, grau de satisfação, nível salarial, periculosidade, ergometria, rotatividade e absenteísmo.

Quadro 2 – Quadro dos KPIs utilizados com descrições baseadas em Murad (2020), referentes à dimensão social da sustentabilidade

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
A1	Insalubridade	São consideradas atividades ou operações insalubres as que se desenvolvem, acima dos limites de tolerância (LT) na presença de agentes como ruído contínuo ou intermitente, ruídos de impacto, exposição ao calor, radiações ionizantes, poeiras, condições hiperbáricas, agentes químicos, agentes biológicos, radiações não ionizantes, vibrações, frio e umidade (MTE, 2019). Desta forma, a etapa de processo é avaliada mediante cada uma destas variáveis para que seja possível atribuir um valor para o KPI que demonstre se a atividade pode ser considerada insalubre e, se puder, qual o grau de intensidade dessa insalubridade.
A2	Risco de acidentes	Este KPI é mensurado baseando-se em uma técnica chamada Análise Preliminar de Riscos (APR), e que depende tanto da frequência de acidentes quanto da severidade dos mesmos (CICCO; FANTAZZINI, 2003).
A3	Treinamento	A mensuração do KPI Treinamento se dá pela verificação se há ou não treinamento dos trabalhadores envolvidos na etapa de processo de manufatura analisada, e, caso haja, por quantas horas em média anualmente eles recebem os devidos treinamentos.
A4	Nível de escolaridade	Este KPI é medido a partir do nível de formação escolar dos trabalhadores envolvidos na etapa de processo.
A5	Taxa de gravidade	Segundo a norma NBR 14280, a taxa de gravidade exprime a quantidade de tempo de trabalho perdido por possíveis trabalhadores acidentados e por possíveis casos de morte ou incapacidade permanente (ABNT, 2001).
A6	Taxa de frequência	A mensuração deste KPI se dá a partir da norma NBR 14280, que expressa o número de acidentes por milhão de horas-homem de exposição ao risco laboral, em um determinado período (ABNT, 2001).
A7	Grau de satisfação	Este KPI se trata de auto avaliações de cada trabalhador envolvido na etapa de processo, bem como nas avaliações dos mesmos feitas por chefes imediatos e outros trabalhadores de postos próximos, além de clientes e fornecedores (CHIAVENATO, 2002).
A8	Nível salarial	Este KPI é mensurado de maneira a comparar a média dos salários dos trabalhadores envolvidos na etapa de processo analisada com o maior salário da empresa, ou seja, quanto maior a diferença porcentual, menor o desempenho deste KPI.
A9	Periculosidade	A Norma Regulamentadora 15 (NR15) apresenta doze perigos que afetam a saúde do trabalhador. São eles: o ruído contínuo ou intermitente, o ruído de impacto, a exposição ao calor, a radiações ionizantes; as poeiras minerais, as condições hiperbáricas, os agentes químicos, os agentes biológicos, as radiações não ionizantes, as vibrações, o frio e a umidade. Na Norma Regulamentadora 16

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
		(NR16) - Atividades e Operações Perigosas - são apresentadas seis classificações de perigos. São elas: as atividade e operações com explosivos, com inflamáveis, com radiações ionizantes, com exposição a roubos (ou outras espécies de violência física nas atividades profissionais de segurança pessoal ou patrimonial), com energia elétrica e com motocicletas (MTE, 2019). Sendo assim, este KPI é mensurado de acordo com a quantidade de perigos ao qual os trabalhadores atribuídos à etapa de processo analisada estão submetidos.
A10	Ergometria	A mensuração deste KPI se dá pela avaliação da carga física do trabalho necessária para a etapa de processo analisada, sendo medida a partir da carga cardiovascular de trabalho.
A11	Rotatividade	O cálculo deste KPI se dá a partir da proporção entre o volume de entradas e saídas de pessoal - obtido no setor de recursos humanos da empresa - e o número médio de trabalhadores efetivos na etapa de processo analisada (CHIAVENATO, 2002).
A12	Absenteísmo	Mede-se o absenteísmo a partir da porcentagem de tempo não-trabalhado devido às ausências de trabalhadores, em relação ao volume de atividade planejada pela empresa (CHIAVENATO, 2002).

Fonte: Adaptado de Murad (2020)

Já na dimensão econômica, Murad (2020) apresenta nove KPIs, dispostos no Quadro 3. São eles: custo com acidentes, custo com absenteísmo, custo com rotatividade, treinamento, custo com não-conformidades, custo com mão de obra, custo com energia elétrica, custo com consumo de água e custo com matéria-prima.

Quadro 3 – Quadro dos KPIs utilizados com descrições baseadas em Murad (2020), referentes à dimensão econômica da sustentabilidade

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
B1	Custo com acidentes	A mensuração do KPI de custo com acidentes é baseada nos índices de taxa de gravidade e taxa de frequência para revelar o nível do impacto econômico causado economicamente na empresa devido à frequência e severidade dos acidentes (NIOSH, 1999).
B2	Custo com absenteísmo	O custo com absenteísmo guarda relação direta com o índice de absenteísmo, sendo caracterizado como o impacto econômico deste na empresa.
B3	Custo com rotatividade	Da mesma forma, o custo com a rotatividade é mensurado a partir do índice de rotatividade verificado entre os trabalhadores alocados no posto de trabalho referente à etapa de processo analisada.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
B4	Custo com treinamento	Para a mensuração deste KPI, é consultado o departamento de recursos humanos da empresa para verificar o custo do treinamento necessário para que os trabalhadores exerçam as atividades demandadas para o posto de trabalho.
B5	Custo com não-conformidade	Este KPI se refere à frequência do retrabalho realizado na etapa de processo analisada no período de um ano, o que interfere diretamente nos custos envolvidos.
B6	Custo com mão de obra	O custo de mão de obra é mensurado a partir da comparação entre o custo da empresa com cada trabalhador na etapa de processo analisada e o custo médio da mão de obra praticado para todos os trabalhadores do mesmo nível de operação.
B7	Custo com consumo de energia elétrica	Para a obtenção deste KPI, a etapa de processo de manufatura analisada tem seu consumo de energia elétrica quantificado e comparado com a etapa de processo com o menor consumo de energia elétrica dentre todos os existentes na empresa.
B8	Custo com consumo de água	Analogamente ao anterior, este KPI é obtido a partir da quantificação do consumo de água da etapa de processo analisada e posterior comparação com a etapa de processo que possua o menor consumo de água dentre todos os existentes na empresa.
B9	Custo com matéria-prima	Da mesma forma que os dois anteriores, este KPI é obtido a partir da quantificação do consumo de insumos e matéria-prima da etapa de processo analisada e posterior comparação com a etapa de processo que possua o menor consumo de insumos e matéria-prima da empresa.

Fonte: Adaptado de Murad (2020)

Na dimensão ambiental, há nove KPIs disponíveis para ponderação, apresentados no Quadro 4, sendo eles os seguintes: treinamento ambiental, resíduos perigosos, resíduos inertes e não-inertes, emissões atmosféricas, plano de emergência contra acidentes ambientais, eficiência no uso da água, emissão de água residual, descarte de água residual, emissão de gases de efeito estufa (GEE).

Quadro 4 – Quadro dos KPIs utilizados com descrições baseadas em Murad (2020), referentes à dimensão ambiental da sustentabilidade

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
C1	Treinamento ambiental	Este KPI é mensurado de acordo com a quantidade de horas anuais de treinamento de trabalhadores para ações que contribuam com a preservação do meio ambiente, de maneira relativa à etapa de processo analisada.

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
C2	Resíduos perigosos	A avaliação deste KPI se dá de maneira a analisar os resíduos gerados pela etapa de processo em questão e verificar se são considerados perigosos ou não, de acordo com a norma ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004).
C3	Resíduos inertes e não-inertes	Também a partir da norma ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004), é possível observar a classificação dos resíduos não-perigosos em inertes e não-inertes. Os resíduos inertes são aqueles que, quando submetidos a um contato dinâmico ou estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não têm nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Já os não-inertes são aqueles que possuem propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Sendo assim este KPI é mensurado de acordo com as propriedades dos resíduos não-perigosos gerados pela etapa de processo analisada.
C4	Emissões atmosféricas	Este KPI é mensurado de acordo com o nível de emissão de poluentes atmosféricos gerados na etapa de processo analisada, quando comparado com os limites máximos previstos nas resoluções 382 e 436 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (BRASIL, 2010).
C5	Plano de emergência contra acidentes ambientais	Para a avaliação deste KPI, foi verificada a existência e o nível de implantação de ações previamente elaboradas para atender a ocorrência de acidentes com produtos químicos que sejam relativos à etapa de processo analisada.
C6	Eficiência no uso da água	Este KPI é mensurado de acordo com o nível das ações aplicadas à etapa de processo analisada voltadas para a melhoria da eficiência do uso da água.
C7	Emissão de água residual	O KPI emissão de água residual é mensurado a partir da avaliação da etapa de processo de manufatura analisada no que tange a detecção de geração de água residual e se necessitam ou não de tratamento.
C8	Descarte de água residual	Este KPI é avaliado levando em consideração o tipo de destinação da água gerada pela etapa de processo analisada.
C9	Emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE)	Este KPI é mensurado utilizando a metodologia contida na norma ABNT ISO/TS 14067 (ABNT, 2015), que versa sobre quantificação da pegada de carbono de produtos. Desta forma, é calculada a pegada de carbono média mensal da etapa de processo analisada, delimitando apropriadamente os limites de controle.

Fonte: Adaptado de Murad (2020)

A dimensão tecnológica utilizada por Murad (2020) possui sete KPIs: são eles nível de automação, programa 5S ou similar, Kaizen, gestão de manutenção, gestão da qualidade, motores de alta performance e treinamento operacional (Quadro 5).

Quadro 5 – Quadro dos KPIs utilizados com descrições baseadas em Murad (2020), referentes à dimensão tecnológica da sustentabilidade

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
D1	Nível de automação	Este KPI é avaliado de acordo com o nível de automação empregada na etapa de processo analisada, ou, inversamente, de acordo com a necessidade de intervenção humana.
D2	Programa 5S ou similar	Este KPI quantifica o nível da aplicação de práticas na empresa que tenham por objetivo a manutenção da organização de áreas e recursos inerentes à etapa de processo analisada, além de promover a qualidade de vida dos trabalhadores e diminuir desperdícios, reduzindo custos e aumentando a produtividade.
D3	Kaizen	A mensuração deste KPI se dá pela análise do grau de implementação do programa Kaizen na empresa em relação à etapa de processo analisada, ou seja, se há a promoção de melhorias contínuas que visem o atendimento à satisfação dos funcionários e clientes, além da eliminação de sobrecarga de trabalho e redução de perdas.
D4	Gestão de manutenção	Este KPI se refere ao nível de planejamento de manutenção industrial presente na etapa de processo analisada, sendo mensurado de acordo com a aplicação de ações de manutenção corretivas, preventivas e/ou preditivas.
D5	Gestão da qualidade	A gestão de qualidade é um conjunto de ações estratégicas que contribuem de forma significativa para a melhoria do desempenho global da organização, e seu respectivo KPI é mensurado de acordo com o nível de implementação dessas ações no processo analisado.
D6	Motores de alta performance	Este KPI é mensurado de acordo com o nível de implementação de motores de alta eficiência energética na etapa de processo analisada.
D7	Treinamento operacional	O KPI referente ao treinamento operacional é obtido através da quantidade média de horas de treinamento específico para a etapa de processo analisada por ano, por trabalhador.

Fonte: Adaptado de Murad (2020)

Por fim, a dimensão legal possui cinco KPIs definidos por Murad (2020): NR12.4, processos trabalhistas, autuações ambientais, autuações no Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) e treinamento em segurança no trabalho (Quadro 6).

Quadro 6 – Quadro dos KPIs utilizados com descrições baseadas em Murad (2020), referentes à dimensão tecnológica da sustentabilidade

<b>Código</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
E1	NR12.4 (atendimento ao item 12.4 da NR12)	Este KPI se refere ao atendimento a um item específico presente na Norma Regulamentadora 12 (NR12), que consiste na necessidade de adoção de medidas de proteção na etapa de processo analisada, na seguinte ordem de prioridade: medidas de proteção coletiva, medidas administrativas ou de organização do trabalho, e medidas de proteção individual (MTE, 2019). Desta forma, o KPI é mensurado de acordo com o nível de atendimento a este item da norma NR12.
E2	Processos trabalhistas	Este KPI é mensurado de acordo com a quantidade de ações trabalhistas movidas contra a empresa, que tenham relação com a etapa de processo analisada, nos últimos cinco anos.
E3	Autuações no Ministério do Trabalho e Emprego (MTE)	A mensuração deste KPI se dá analisando a quantidade de multas recebidas pela empresa, exclusivamente em relação à etapa de processo estudada, nos últimos cinco anos.
E4	Autuações ambientais	Analogamente, a mensuração deste KPI se dá de maneira a analisar a quantidade de multas aplicadas pelo Ministério do Meio Ambiente à empresa, relativas à etapa de processo analisada, nos últimos cinco anos.
E5	Treinamento em segurança no trabalho	Este KPI é avaliado de acordo com o nível de capacitação, providenciado pelo empregador, fornecido aos trabalhadores envolvidos na etapa de processo analisada de maneira a abranger os riscos a que estão expostos e as medidas de proteção existentes e necessárias para a prevenção de acidentes e doenças, nos termos da norma NR12 (MTE, 2019).

Fonte: Adaptado de Murad (2020)

A seguir, serão apresentados os métodos de decisão multicritérios que serão utilizados no modelo proposto neste trabalho para ponderar os KPIs relativos à etapa de processo de manufatura em questão.

## 2.2 MÉTODOS DE DECISÃO MULTICRITÉRIOS

### 2.2.1 O Método AHP

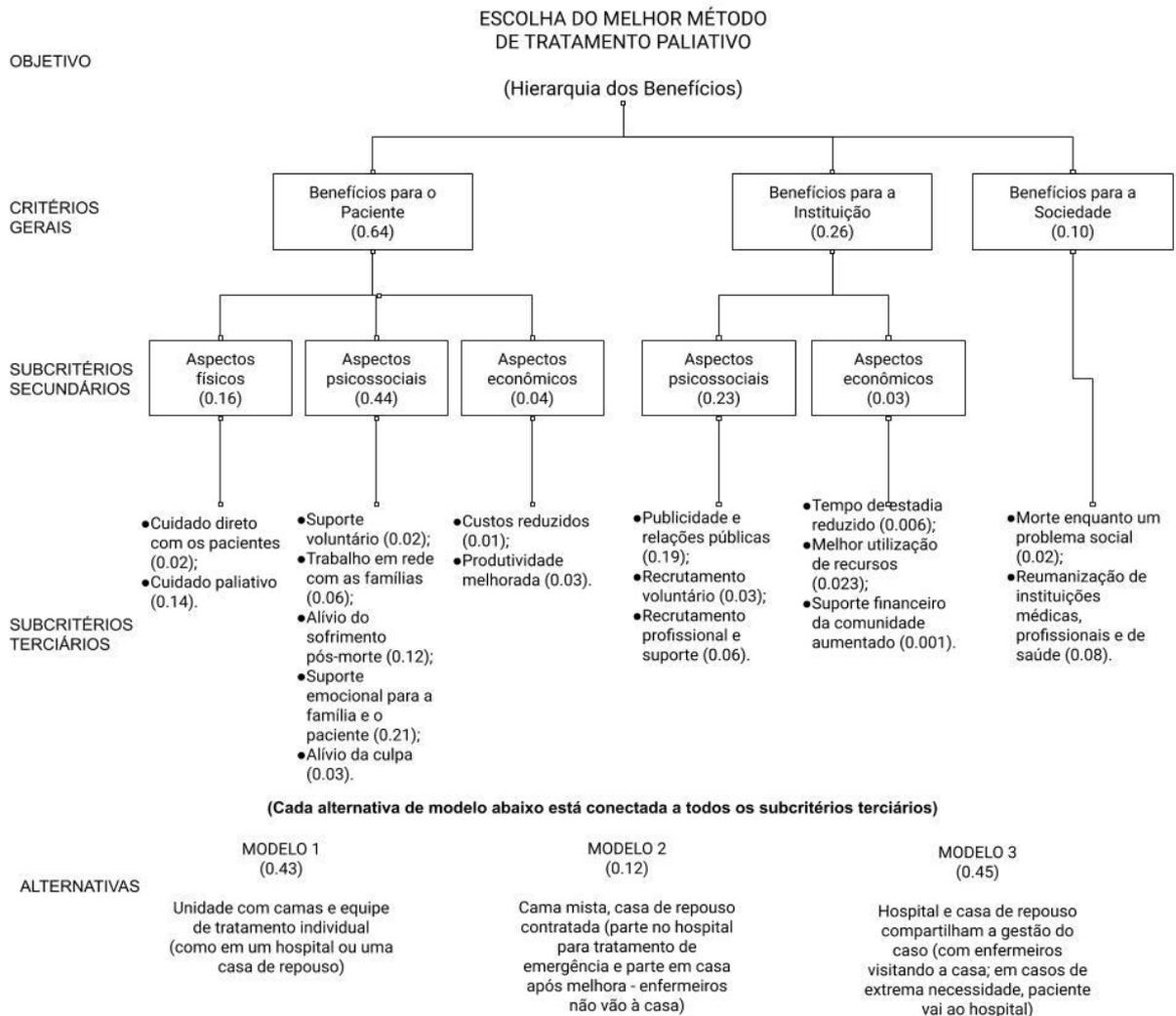
O método *Analytic Hierarchy Process* (AHP), segundo Saaty (1987), é uma teoria geral de medição, usada para obter escalas proporcionais a partir de comparações pareadas, de modo a aliar aspectos objetivos e subjetivos em relação à capacidade do ser humano em efetuar avaliações. Essa técnica é utilizada largamente como método de decisão multicritérios, inclusive no planejamento e alocação de recursos, além de resoluções de conflitos.

Handfield et al. (2002) utilizam o método AHP como um modelo para suporte de decisão para que gerentes de compra possam avaliar e selecionar fornecedores de uma maneira estratégica e que pudesse levar em consideração fatores ambientais. Briozo e Musetti (2015) fizeram uso do AHP para determinar a melhor posição geográfica de uma unidade de pronto-atendimento em um município do interior de São Paulo. Chitsaz e Azarnivandi (2017) utilizam o AHP conjuntamente com a chamada “análise SWOT” (*Strength-Weakness-Opportunity-Threat*), que é uma técnica de planejamento utilizada por empresas para identificarem forças, fraquezas, oportunidades e ameaças para a organização, para identificar as fontes de problemas na gestão da água em uma região árida no Irã.

Ao se utilizar o método AHP para tomadas de decisão, deve-se seguir, basicamente, quatro passos: estruturação hierárquica da decisão, determinação da importância relativa dos diferentes critérios em relação ao objetivo pretendido, determinação das consistências das decisões e avaliação final das alternativas (SAATY, 1994).

Inicialmente, para se tomar uma decisão, considerando custos e benefícios, deve-se ter em mente se estes se sobrepõem àqueles. De acordo com Saaty (1994, p. 23, tradução nossa), “se sim, então ou os benefícios são tão mais importantes que os custos fazendo com que a decisão seja baseada simplesmente nos benefícios, ou a importância dos dois são tão próximas que ambos deverão ser considerados”. Desta forma, deve-se montar uma ou mais hierarquias, de acordo com a necessidade do problema e com as demandas dos tomadores de decisão, como exemplificado pela Figura 1.

Figura 1 - Exemplo de hierarquia que organiza os critérios necessários para decidir qual o melhor método de tratamento paliativo de pacientes terminais



Fonte: Adaptado de Saaty (1994)

Segundo Brunelli (2015), no método AHP, uma hierarquia é uma forma gráfica e intuitiva de se estruturar o problema, composta por um objetivo, um conjunto de critérios, um conjunto de alternativas e pela relação entre estes elementos. O objetivo é disposto no primeiro nível; o segundo nível é composto pelos critérios gerais a serem utilizados para a avaliação do problema, podendo haver ramificações em forma de subcritérios em alguns ou em todos os critérios para um melhor detalhamento dos componentes do processo decisório; o terceiro nível é composto pelas alternativas, definidas *a priori* pelos tomadores de decisão (SAATY, 1977, 1994). Caso seja preciso estruturar uma hierarquia para os benefícios e outra para os custos, por exemplo, deverão ser obtidas, ao final do processo decisório, as razões entre benefícios e custos

para cada alternativa analisada para que possam, enfim, ser ranqueadas e para que a decisão final possa ser tomada.

O exemplo da Figura 1 aborda a disposição de critérios relativos à escolha do melhor tratamento paliativo para pacientes terminais, organizados por um hospital nos Estados Unidos (SAATY, 1994). Dada a complexidade do problema e da sensibilidade do tema escolhido, foi necessário estruturar a hierarquia dos critérios de modo a representar todos os aspectos que envolvem a avaliação das três alternativas possíveis para o tratamento. A organização em quatro níveis se deu pela complexidade dos critérios, uma vez que não bastaria, por exemplo, analisar os “aspectos psicossociais” nos “benefícios para o paciente” apenas de uma maneira geral, tendo sido necessário subdividi-los em cinco critérios específicos.

Depois de definida a estrutura hierárquica da decisão, deve-se determinar qual será a importância relativa dos itens de um mesmo nível da hierarquia, que estejam ligados ao mesmo item imediatamente superior, com relação a ele, ou seja, qual será a magnitude da influência de cada fator para o objetivo principal. Isso significa que os critérios gerais deverão ser comparados entre si levando-se em consideração o objetivo da decisão; que, quando houver, os subcritérios deverão ser comparados entre si em relação aos respectivos critérios gerais aos quais estão atrelados; e que cada alternativa deverá ser avaliada em relação a cada critério geral, ou, quando houver, a cada subcritério. Desta forma, os tomadores de decisão irão, a partir de seus conhecimentos e experiência, atribuir valores, de acordo com os dispostos no Quadro 7, para cada comparação, que é a “representação numérica da relação entre dois elementos que compartilham o mesmo pai” (SAATY, 1994, p. 25, tradução nossa). Monta-se uma tabela dispondo os itens a serem avaliados tanto na primeira linha quanto na primeira coluna, e cada comparação é feita dois a dois, comparando o item referente à linha  $i$  com o item da coluna  $j$ , gerando uma matriz quadrada  $\mathbf{A}$  de ordem  $n$  para cada grupo de itens, onde  $n$  é o número de itens que estão sob análise naquele instante, como mostrado na Equação (1). Importante salientar duas questões: que haverá uma série de valores iguais a 1, ou por serem resultado de uma comparação de um item com ele mesmo, ou por serem resultado de comparações entre itens de mesma importância; que, por definição, os valores recíprocos a cada  $a_{ij}$  serão iguais ao seu inverso, ou seja,  $a_{ji} = 1/a_{ij}$  (SAATY, 1987).

$$\mathbf{A} = [a_{ij}] = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ 1/a_{12} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/a_{1n} & 1/a_{2n} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Quadro 7 - Valores a serem atribuídos em comparações pareadas no método AHP

Intensidade	Definição	Explicação
1	Igual importância	As duas atividades contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada	Experiência e julgamento favorecem ligeiramente uma atividade em relação à outra.
5	Forte importância	Experiência e julgamento favorecem fortemente uma atividade em relação à outra.
7	Muito forte importância	Uma atividade é favorecida muito fortemente em relação à outra, seu domínio é demonstrado na prática.
9	Importância extrema	As evidências favorecendo uma atividade em relação à outra é da maior ordem de afirmação possível.
2, 4, 6, 8	Para valores de importância intermediários aos valores discriminados acima	Às vezes faz-se necessário interpolar um julgamento numericamente por não haver uma boa palavra para descrevê-lo.
Recíprocos aos valores acima	Se a atividade $i$ foi atribuída com um dos valores não-nulos acima quando comparada à atividade $j$ , então $j$ tem o valor recíproco quando comparada à atividade $i$	

Fonte: Adaptado de Saaty (1994)

Com a matriz de comparações pareadas  $\mathbf{A}$ , deve-se determinar os valores das importâncias relativas dos critérios analisados, que formarão o chamado “vetor de prioridades”. Segundo Brunelli (2015), há diversas maneiras de se obter esse vetor, sendo que dois métodos são mais utilizados: o método do autovetor e o método das médias geométricas.

O método do autovetor, proposto por Saaty (1977), mostra que o vetor de prioridades pode ser estimado a partir do autovetor associado ao autovalor positivo de módulo mais elevado da matriz de comparações pareadas  $\mathbf{A}$ . Partindo do pressuposto que os termos  $a_{ij}$  da matriz  $\mathbf{A}$ , no caso de uma matriz totalmente consistente, seriam iguais a  $w_i/w_j$ , pode-se afirmar que multiplicando a matriz pelo vetor de prioridades  $\mathbf{w}$ , resultaria em um múltiplo do próprio vetor, sendo o valor  $n$  um autovalor da matriz  $\mathbf{A}$  (Equação 2). Entretanto, como não se tem as

prioridades de cada critério de antemão, quando tomadores de decisão realizam as comparações pareadas, há perturbações nos valores  $a_{ij}$  em relação aos “ideais”, o que faz com que a matriz  $A'$  seja ligeiramente diferente, e faz também com que o valor escalar que multiplica o vetor  $\mathbf{w}'$  do outro lado da equação também seja diferente de  $n$ ; o valor será o autovalor máximo  $\lambda_{max}$  (Equação 3). Assim, normalizando o vetor de prioridades de forma que a soma de seus componentes seja igual a 1, obtém-se o vetor  $\mathbf{w}$ .

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & \dots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & \dots & w_2/w_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \dots & w_n/w_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} nw_1 \\ nw_2 \\ \vdots \\ nw_n \end{pmatrix} = n \cdot \mathbf{w} \quad (2)$$

$$\mathbf{A}' \cdot \mathbf{w}' = \lambda_{max} \cdot \mathbf{w}' \quad (3)$$

Outro método bastante utilizado para estimar  $\mathbf{w}$  é o método das médias geométricas, proposto por Crawford (1987). De acordo com o autor, como mostrado na Equação (4), cada componente  $w_i$  deste vetor será obtido dividindo um termo correspondente à média geométrica entre os elementos  $a_{ij}$  da linha  $i$  de uma matriz quadrada de ordem  $n$  – onde  $n$  é o número de critérios em questão – por um termo correspondente à soma das médias geométricas de todas as linhas, a fim de normalizar o vetor e fazer com que a soma dos valores  $w_i$  seja igual a 1 (BRUNELLI, 2015).

$$w_i = \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} / \sum_{i=1}^n \left( \prod_{j=1}^n a_{ij} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Há uma discussão sobre qual desses dois métodos para a obtenção do vetor de prioridades seria o mais adequado, uma vez que é possível justificar o uso de qualquer um dos dois a partir de diferentes conjuntos de axiomas (BRUNELLI, 2015). Um dos exemplos é trazido por Bana e Costa e Vansnick (2008), em que mostram como, ao utilizar o método do autovetor, é possível e até relativamente comum, o vetor de prioridades resultante não respeitar o que chamam de “condição de preservação da ordem” (COP), ou seja, violam a relação abaixo (Equação 5), o que causa inversões no ranqueamento dos critérios analisados, como verificado por eles em exemplos fornecidos pelo próprio Saaty (1977). Entretanto, é importante notar que

matrizes de comparações pareadas sempre possuirão termos  $a_{ij}$  que difiram de  $w_i/w_j$ , o que seria uma simples expressão da inconsistência natural que existe e é tolerável pelo método AHP, e não algo que invalidaria nem o método de obtenção do vetor de prioridades nem o próprio método AHP.

$$a_{ij} > a_{kl} \Rightarrow \frac{w_i}{w_j} > \frac{w_k}{w_l} \quad \forall i, j, k, l. \quad (5)$$

Ao fim do processo de obtenção dos pesos de cada critério, deve-se calcular a consistência para cada matriz de comparações pareadas formada. Isso é justificado porque, segundo Saaty (1994), em julgamentos provocados por terceiros, os entrevistados podem dar respostas incertas, e por isso pode-se fazer com que eles deem respostas redundantes a fim de validar o resultado, mas isso pode causar inconsistências numéricas.

Tabela 1 - Julgamentos dos critérios gerais, com relação à decisão sobre qual o melhor método de tratamento paliativo de pacientes terminais, referentes ao exemplo mostrado na Figura 1

<b>Escolha do melhor método</b>	<b>Benefícios para o Paciente</b>	<b>Benefícios para a Instituição</b>	<b>Benefícios para a Sociedade</b>	<b>Prioridades</b>
<b>Benefícios para o Paciente</b>	1	3	5	0,64
<b>Benefícios para a Instituição</b>	1/3	1	3	0,26
<b>Benefícios para a Sociedade</b>	1/5	1/3	1	0,11

Fonte: Adaptado de Saaty (1994)

Nota: A soma dos três valores de prioridades deve ser igual 1, mas decidiu-se que a tabela seria reproduzida como está no artigo de origem, fazendo apenas a devida tradução.

O próprio autor dá um exemplo relativo ao caso representado pela Figura 1. De acordo com Saaty (1994), ao se comparar os 3 critérios gerais entre si, foram respondidos questionamentos, dois a dois, sobre qual deles era mais importante em relação ao objetivo pretendido e com qual magnitude, conforme mostra a Tabela 1. Quando se compararam os benefícios para o paciente (x) em relação aos benefícios para a instituição (y) e em relação aos benefícios para a sociedade (z), obteve-se os valores 3 e 5, respectivamente. Assim, se x

corresponde a  $3y$  e a  $5z$ , teríamos, teoricamente,  $y = \frac{5}{3}z$ . Caso os julgamentos fossem totalmente consistentes, os tomadores de decisão teriam atribuído o valor  $\frac{5}{3}$  ao compararem os benefícios para a instituição com os benefícios para a sociedade, mas, ao invés disso, atribuíram o valor 3 na matriz correspondente, configurando uma inconsistência; neste caso, ou em qualquer outro, não é possível saber quais julgamentos são mais precisos e quais são as fontes da inconsistência, mas ela por si só é inerente ao processo de julgamento. Ainda segundo o autor, a inconsistência no processo decisório pode ser considerada um erro tolerável apenas se sua ordem de magnitude for inferior à dos valores medidos, ou seja, deve ser menor do que 10% (SAATY, 1994).

Uma dada matriz de comparações pareadas  $A$  é totalmente consistente se, e apenas se, o seu autovalor máximo,  $\lambda_{max}$ , é igual à sua ordem  $n$  (SAATY, 1977). Assim sendo, o autor define a fórmula para o cálculo do chamado índice de consistência (C.I.), presente na Equação (6). Uma forma de se estimar o autovalor  $\lambda_{max}$  é utilizando a Equação (7) (SANTOS; OSIRO; LIMA, 2017).

$$CI(A) = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{w_j a_{ij}}{w_i} \quad (7)$$

A fim de que os valores calculados das consistências sejam comparáveis entre matrizes de comparações pareadas de ordens distintas, é, então, calculada a razão de consistência (C.R.), que é o quociente entre C.I. e um valor chamado índice de consistência aleatório ( $RI_n$ ), que é obtido através da média dos valores de C.I. de um conjunto suficientemente grande de matrizes de ordem  $n$  geradas aleatoriamente a partir do intervalo de números naturais  $[1,9]$  e seus correspondentes recíprocos (Equação 8); isso na prática faz com que matrizes que tenham valor de C.R. maior que 10%, limite determinado por Saaty, possam ser descartadas, uma vez que é como se elas tivessem sido, de fato, geradas aleatoriamente (BRUNELLI, 2015). Alguns valores de  $RI_n$  estão expressos na Tabela 2.

$$CR(A) = \frac{CI(A)}{RI_n} \quad (8)$$

Tabela 2 - Valores de  $RI_n$ 

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$RI_n$	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1987)

O último passo para que se obtenha um resultado para a decisão é sintetizar os dados resultantes: as prioridades, ou pesos, em cada nível da hierarquia, e as preferências por cada alternativa, relativas a cada subcritério existente. Desta forma, multiplicando a prioridade obtida de cada subcritério pelas prioridades dos critérios nos respectivos níveis superiores a ele, a soma das prioridades de todos os subcritérios em um mesmo nível será igual a 1.

Para isso, existem dois modos, o modo distributivo e o modo ideal: no modo distributivo, as preferências de cada alternativa em relação a cada subcritério têm soma igual a um, e é utilizado geralmente quando há dependência entre as alternativas; já no modo ideal, é escolhida, para cada subcritério, a melhor alternativa, e lhe é atribuído o valor unitário, sendo os valores de preferências das outras alternativas divididos pelo valor original da alternativa escolhida como a melhor naquele caso (SAATY, 1994). Em ambos os modos, é feita uma soma ponderada com os valores de cada alternativa relativos aos pesos de cada subcritério para se chegar a um valor final para cada uma delas. Como em casos como o analisado por Saaty, quando se tem mais de uma estrutura hierárquica, depois desse processo, deve-se dividir os valores de benefício e de custo de cada alternativa para se obter suas respectivas razões “custo-benefício” (SAATY, 1994). Assim, a alternativa com a maior razão deverá ser a escolhida.

### 2.2.2 O Método BWM

O método chamado *Best Worst Method* (BWM) foi proposto por Rezaei (2015) a fim de resolver problemas de tomadas de decisão multicritérios. Assim como o AHP, ele também utiliza comparações pareadas, mas surge com o intuito de superar algumas deficiências observadas pelo autor no próprio método AHP, principalmente em relação à inconsistência inerente ao processo, gerada pela maneira como é estruturado, e à quantidade de comparações pareadas necessárias (REZAEI, 2015).

Mesmo sendo um método criado recentemente, o BWM já possui um amplo espectro de aplicações. Wan Ahmad et al. (2017) utilizaram o BWM para analisar, através de questionários fornecidos a especialistas na área da indústria de óleo e gás, a influência causada

na gestão de cadeias de fornecimento sustentável nesse ramo causada por seis fatores externos: estabilidade econômica, estabilidade política, pressão das partes interessadas, competição, transição energética e regulamentações. Van De Kaa, Kamp e Rezaei (2017), em um contexto em que algumas alternativas tecnológicas de conversão de biomassa disputam espaço entre si na Holanda, utilizam o BWM para auxiliar nessa decisão, baseando em doze fatores de relevância e na opinião de especialistas na área. Pamučar et al. (2020) utilizam uma versão alterada do BWM, em que há mais de um critério escolhido para ser o “mais importante” ou o “menos importante” para ponderar critérios no campo de energias renováveis, e os ranqueia.

O criador deste método traz algumas considerações importantes sobre o funcionamento de comparações pareadas. Ao realizar uma comparação entre dois elementos, um tomador de decisões expressa seu julgamento de  $i$  em relação a  $j$  tanto com uma determinada direção quanto com uma intensidade; embora a direção de uma preferência seja bem clara na maioria das vezes, determinar a sua intensidade se mostra uma tarefa mais difícil, e pode se tornar uma grande fonte de inconsistências (REZAEI, 2015). Podemos observar a Figura 2 utilizada pelo autor para ilustrar essa questão.

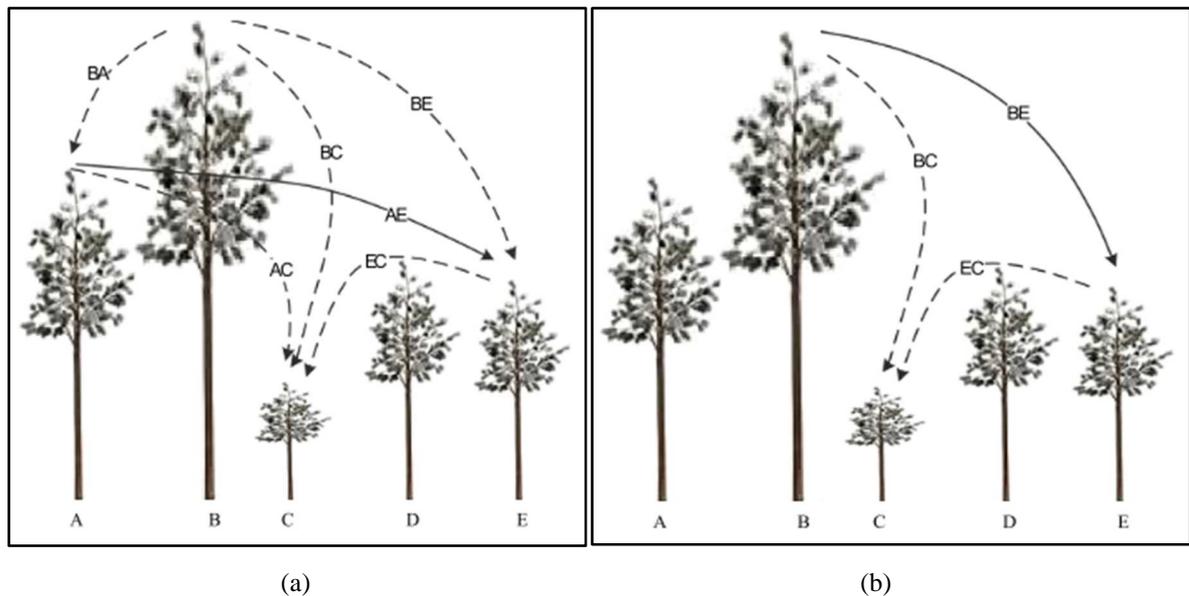
Analisando a Figura 2a, é fácil notar que a árvore A é mais baixa que a árvore B e mais alta que as demais, o que mostra o aspecto da direção da comparação. No entanto, atribuir uma intensidade para uma comparação é algo mais complexo, uma vez que o tomador de decisões deverá ter em mente, ao mesmo tempo, outras comparações levando em consideração os demais elementos presentes para que consiga se decidir de uma maneira minimamente coerente com a realidade (REZAEI, 2015).

Tomando a comparação da árvore A em relação à árvore E mostrada na Figura 2a como exemplo, utilizando o intervalo de números naturais  $[1,9]$  para efetuar a comparação, é claro que a árvore A é maior que a E, então o tomador de decisão atribuirá um valor maior que 1 para esta comparação, mas menor que 9, uma vez que há uma árvore (B) maior que A e uma menor que E – a árvore C (REZAEI, 2015). Por outro lado, caso se queira comparar a árvore B em relação à árvore E (Figura 2b), B já é visualmente maior que as demais, então o tomador de decisões precisará efetuar comparações implícitas apenas em relação à árvore C a fim de atribuir um valor adequado para seu julgamento, fazendo com que, ao invés de realizar seis julgamentos para apenas uma comparação como no primeiro caso, realize-se, apenas três julgamentos, justamente pelo fato de um dos elementos no segundo caso ser caracterizado como “melhor” ou “mais relevante” (REZAEI, 2015).

Rezaei (2015) mostra que isso acontece porque foi feita uma comparação de referência, que ele define como uma comparação pareada em que ao menos um dos elementos é o pior ou

melhor, ou seja, o menos ou mais influente. O autor mostra também que é possível realizar todas as comparações necessárias em uma tomada de decisão com  $n$  critérios realizando apenas comparações de referência, uma vez que comparações secundárias  $a_{ij}$ , que não se enquadram naquela classificação, podem ser obtidas a partir de produtos utilizando comparações de referência previamente realizadas:  $a_{melhor,i} \times a_{ij} = a_{melhor,j}$  ou  $a_{ij} \times a_{j,pior} = a_{i,pior}$ . Assim, a quantidade de comparações pareadas que devem ser feitas, levando em conta uma mesma matriz  $A$  (Equação 1) é reduzida de  $n(n - 1)/2$ , no caso do método AHP, para  $2n - 3$  (REZAEI, 2015).

Figura 2 - Um exemplo de comparações: (a) comparação de A em relação a E; (b) comparação de B em relação a E



Fonte: Adaptado de Rezaei (2015)

De acordo com Rezaei (2015), o BWM consiste em basicamente cinco etapas, descritas a seguir. A primeira é constituída pela escolha, pelos tomadores de decisão, do conjunto dos  $n$  critérios de decisão  $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$  que serão comparados entre si para se estimar a influência de cada um na decisão.

Em seguida, os tomadores de decisão irão identificar o que serão chamados de “melhor” critério e “pior” critério. O melhor critério será aquele tido como o mais importante, o que será mais determinante dentre todos os demais, enquanto o pior critério será aquele que sabidamente terá o menor impacto na tomada de decisão.

Na terceira etapa, são determinadas as preferências do melhor critério, B, em relação a cada um dos demais critérios  $j$ , utilizando números naturais do intervalo  $[1,9]$  com os

significados descritos no Quadro 1, gerando o seguinte vetor Melhor-para-Outros, formados pelos diferentes termos  $a_{Bj}$  (Equação 9):

$$A_B = \{a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}\} \quad (9)$$

Depois, são determinadas as preferências de todos os critérios  $j$  em relação ao pior critério,  $W$ . Neste caso, também é utilizado o mesmo intervalo de números para atribuir valores às comparações pareadas, mas desta vez é gerado o seguinte vetor Outros-para-Pior, formados pelos diferentes termos  $a_{jW}$  (Equação 10):

$$A_W = \{a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW}\}^T \quad (10)$$

Importante salientar que tanto  $a_{BB}$  quanto  $a_{WW}$  têm valores iguais a 1 por se tratarem de comparações entre critérios iguais, ou seja, critérios de mesma importância.

Ao final destas etapas preliminares, na quinta etapa, é realizado o cálculo do vetor com os pesos ótimos  $\mathbf{W}^* = \{w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*\}$ . Segundo Rezaei (2015, p. 51-52, tradução nossa), “o peso ótimo para um critério é aquele que, para cada par  $w_B/w_j$  e  $w_j/w_W$ , tem-se  $w_B/w_j = a_{Bj}$  e  $w_j/w_W = a_{jW}$ . Para satisfazer estas condições para todo  $j$ , deve-se encontrar a solução onde as máximas diferenças absolutas  $\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right|$  e  $\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right|$  sejam minimizadas.” Adicionando condições de não-negatividade de cada  $w_j$  e de que a soma de todos os  $w_j$  deve ser igual a 1, formula-se o seguinte problema de otimização (11), a ser resolvido com o auxílio da ferramenta *solver*, do *software* Microsoft Excel:

min ( $\xi$ )

Sujeito a:

$$\left| \frac{w_B}{w_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \forall j$$

$$\left| \frac{w_j}{w_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \forall j$$

$$\sum_j w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \forall j$$

(11),

obtendo-se, assim, o vetor de prioridades ótimo  $\mathbf{W}^*$  e o valor  $\xi^*$  (REZAEI, 2015).

Um dos desdobramentos da solução deste problema é que, para cada critério  $j$ , existe uma faixa de valores que  $w_j$  pode assumir de maneira que a solução do problema de otimização (11) acima ainda se mantenha verdadeira, sendo possível calcular os extremos de cada intervalo e, conseqüentemente, seu centro e sua largura (REZAEI, 2016). Assim, uma das formas de se determinar a prioridade de cada critério seria tomar o centro de cada intervalo. Entretanto, Rezaei (2016) oferece uma alternativa para a formulação do problema de otimização de modo que ele retorne uma única solução, que é o modelo linear apresentado no Problema (12) de otimização abaixo:

$$\min (\xi^L)$$

Sujeito a:

$$|w_B - a_{Bj}w_j| \leq \xi^L, \forall j$$

$$|w_j - a_{jW}w_W| \leq \xi^L, \forall j$$

$$\sum_j w_j = 1$$

$$w_j \geq 0, \forall j$$

(12)

Segundo Rezaei (2015), diferentemente do método AHP em que há um limite que a razão de consistência (C.R.) não deva ultrapassar para que os resultados se mantenham válidos, as decisões tomadas utilizando o BWM sempre serão consistentes, mesmo que não totalmente. Após a resolução do processo de minimização de  $\xi^*$ , mostrado no sistema de equações (6), que é considerado o maior valor de discrepância entre os pesos encontrados e os termos  $a_{ij}$  frutos das comparações dos tomadores de decisão, basta dividi-lo pelo índice de consistência (C.I.), como mostrado na Equação 13 (REZAEI, 2015). Assim, o C.R. pode variar entre 0 e 1, sendo que o valor zero mostra comparações mais consistentes, enquanto o valor um mostra que as comparações foram menos consistentes. Na Tabela 3, o valor  $a_{BW}$  se refere ao maior valor atribuído a uma comparação em todo o problema pelo tomador de decisão.

$$CR = \frac{\xi^*}{CI} \tag{13}$$

Tabela 3 – Relação de valores do índice de consistência (C.I.) referentes ao método BWM

$\alpha_{BW}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Índice de consistência	0,00	0,44	1,00	1,63	2,30	3,00	3,73	4,47	5,23

Fonte: Adaptado de Rezaei (2015)

### 2.2.3 O Modelo AHP-BWM

Há diversos registros de métodos de decisão multicritérios utilizados em conjunto com outros. Wittstruck e Teuteberg (2012) desenvolveram um modelo de decisão baseado em *fuzzy-AHP* e em *Technique in Order of Preference by Similarity do Ideal Solution* (TOPSIS) para auxiliar a gestão de cadeias de fornecimento sustentável no ramo da reciclagem, de maneira a levar em consideração fatores econômicos, ambientais e sociais. Ren et al. (2015) combinaram a estrutura de avaliação sustentável do ciclo de vida com o uso dos métodos de decisão multicritérios AHP e VIKOR escolher o melhor cenário de produção de bioetanol na China, baseando-se nas preferências das partes interessadas. Abdel-Basst, Mohamed e Elhoseny (2020), utilizando conjuntamente BWM e TOPSIS, elaboraram um modelo de tomada de decisões para diagnosticar a COVID-19, síndrome causada pelo corona vírus Sars-CoV-2, e diferenciá-la de outras doenças virais torácicas baseando nos sintomas e em tomografias computadorizadas, atingindo 98% de precisão.

Para além dos exemplos mencionados, alguns autores também utilizaram em conjunto os métodos AHP e BWM. Moslem et al. (2020a) elencam diversos fatores de risco na conduta de motoristas no trânsito em Budapeste e, a partir do modelo híbrido AHP-BWM, montam uma estrutura hierárquica de três níveis, calculam as suas preferências relativas e ranqueiam-nos, de acordo com as impressões dos próprios motoristas. Moslem et al. (2020b) calculam a qualidade do serviço de transporte público de uma cidade da Jordânia a partir de um questionário feito majoritariamente com seus usuários em que, dentre outras questões, são feitas perguntas com comparações pareadas entre diversos critérios, e depois, feita a devida ponderação dos mesmos a partir do método AHP-BWM. Rezaur Rahman et al. (2019) resolve um problema de escolha de escola de ensino médio em Bangladesh ao selecionar critérios relevantes, ponderá-los e utilizá-los para se escolher dentre as alternativas possíveis, e compara a resolução deste problema entre o uso de *fuzzy-AHP* e o uso de AHP-BWM.

Enquanto que para Rezaur Rahman et al. (2019) o método AHP é utilizado de maneira adaptada, apenas para avaliação final das alternativas, Moslem et al. (2020a, 2020b) de fato utiliza conjuntamente AHP e BWM. As principais deficiências do AHP que são supridas pelo BWM, e que, segundo os autores, justificam o uso deste, é a diferença na quantidade de comparações pareadas e na consistência das matrizes de comparações pareadas. No BWM, a quantidade de comparações necessárias em relação ao AHP é tão menor quanto maior for o número  $n$  de elementos comparados, além de possuírem comparações quase sempre consistentes, não possuindo o limite de 10% do AHP para validação (REZAEI, 2015). Mesmo com essas desvantagens para o AHP, as suas contribuições também são relevantes para o método híbrido, uma vez que a estruturação da decisão em forma de hierarquia e a quantidade de informações fornecidas a partir de sua utilização justificam seu uso (MOSLEM et al., 2020a), além de já ser um método robusto e largamente utilizado.

Moslem et al. (2020a) estabelecem que, para matrizes de comparações pareadas de ordem  $n \geq 4$ , o método BWM deve ser utilizado, e para as demais, o método a ser utilizado deverá ser o AHP; isso se deveria à maior exigência cognitiva por parte de quem fosse preenchê-la, o que poderia causar maior inconsistência nos julgamentos.

Uma das principais justificativas que os autores utilizam para embasar seus argumentos está presente na teoria de Saaty sobre a quantidade de termos que podem ser comparados ao mesmo tempo (BRUNELLI, 2015; SAATY, 1977; SAATY; OZDEMIR, 2003). Segundo Saaty e Ozdemir (2003), a regra “ $7 \pm 2$ ” foi formulada pensando no que foi chamado de “inconsistência relativa”, a partir da sensibilidade em que os seres humanos possuem ao comparar opções; caso haja um número reduzido de critérios a serem comparados, a proporção entre a inconsistência presente nos julgamentos e o número de critérios é elevada, o que facilita a percepção do impacto de cada julgamento em relação ao objetivo analisado, mas, caso haja um grande número de critérios a serem comparados, a proporção entre a inconsistência nos julgamentos e o número de critérios é baixa, fazendo com que haja maior dificuldade de percepção do impacto de cada julgamento em relação ao objetivo pretendido. Desta forma, chegou-se à conclusão de que a faixa ideal que a ordem de matrizes de comparações pareadas devem possuir para que haja uma melhor percepção da mente humana é  $5 \leq n \leq 9$ . Ou seja, de fato, quanto menor o número de critérios analisados, mais consistente a matriz tenderá a ser e mais fácil será para os tomadores de decisão por haver menor número de comparações a serem realizadas, mas é nota-se que há uma faixa aceitável maior do que a posta por Moslem et al. (2020a).

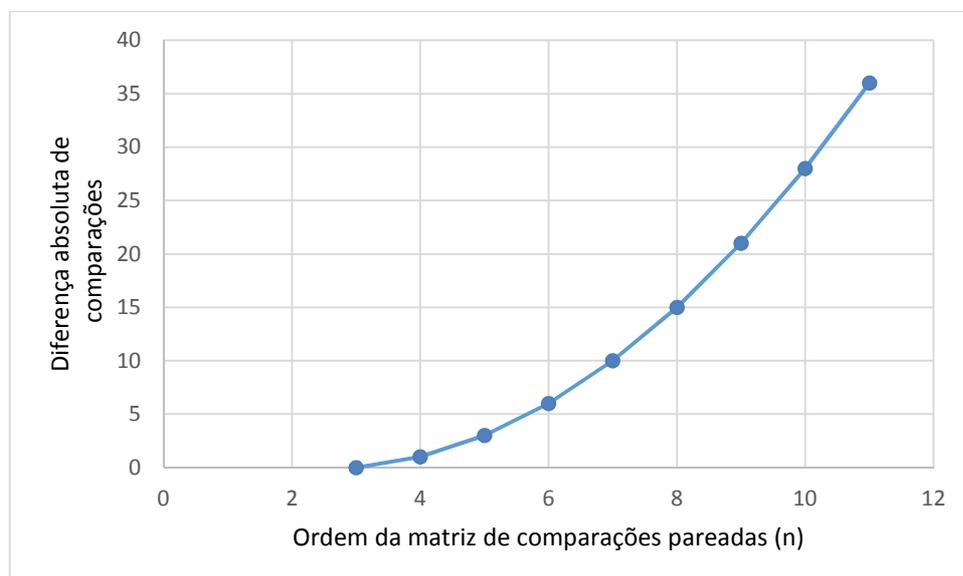
Outra justificativa utilizada por Moslem et al. (2020a) para determinar tal limite de critérios para o uso do AHP é uma propriedade matemática chamada eficiência de Pareto, definida como um estado atingido por uma solução de um problema de otimização em que não haja outra alternativa em que seja possível melhorar a posição de um elemento sem piorar a posição dos demais; aplicando aos métodos multicritérios, diz-se que uma solução atinge a eficiência de Pareto quando ela é a melhor possível, não podendo haver alterações nos pesos dos critérios partindo das condições de otimização impostas previamente (DULEBA; MOSLEM, 2019). Duleba e Moslem (2019), ao elencar diversas características que influenciam a qualidade do serviço de transporte público e ponderá-las a partir de comparações pareadas feitas pelos usuários, propõem uma maneira de se aplicar o método AHP de forma que a eficiência de Pareto seja alcançada.

Duleba e Moslem (2019) demonstram que, para  $n \leq 3$ , as matrizes de comparações pareadas sempre atingirão a eficiência de Pareto, cabendo testes para as matrizes de ordem  $n \geq 4$ , sendo que, quanto maior a ordem, menor a eficiência resultante (MOSLEM et al., 2020a), e, nesses casos em que a eficiência total não é atingida, há mudança na distribuição dos pesos de cada critério, podendo até haver inversões no ranqueamento dos mesmos (DULEBA; MOSLEM, 2019). Isso fez com que Moslem et al. (2020a) reforçassem a necessidade de que o uso do AHP fosse restrito a matrizes de ordem baixa – a saber,  $n \leq 4$ . Importante salientar que a conclusão do artigo de Duleba e Moslem (2019) é de que, a partir do uso do AHP otimizado com o princípio de Pareto, há sim uma correção nos pesos dos critérios, mas de fato muito discreta, sendo recomendado o emprego deste princípio apenas para casos onde a alta precisão for um fator importante, o que não será o caso neste trabalho.

Dito isto, levando em consideração as mesmas referências utilizadas por Moslem et al. (2020a) para justificar a escolha do método de decisão multicritérios de acordo com a ordem da matriz de comparações pareadas, propomos no presente trabalho uma modificação no parâmetro de seleção do método de decisão a partir da quantidade de critérios envolvidos. Enquanto Moslem et al. (2020a) estipulam que o método AHP deve ser utilizado para matrizes de ordem  $n \leq 4$  e o BWM, para matrizes de ordem  $n > 4$ , definimos que o método AHP deve ser utilizado para matrizes de ordem  $n \leq 5$  e o método BWM deve ser utilizado para matrizes de ordem  $n > 5$ , configurando o acréscimo das matrizes 5x5 no rol das que devem ser processadas por meio do AHP. Isso se deve à necessidade de restringir o uso do BWM para quando, de fato, há perdas significativas no tempo despendido para as entrevistas com os tomadores de decisão ou perda de rigor metodológico.

Por um lado, como já mostrado, não há prejuízo nessa alteração visto que as comparações pareadas resultantes do uso do AHP em matrizes 5x5 se encontram na faixa recomendável de  $5 \leq n \leq 9$  (SAATY; OZDEMIR, 2003) e que conservam bem a inconsistência relativa entre seus elementos, além de haver irrisória interferência de sua falta de eficiência de Pareto. Por outro lado, o aumento na quantidade de comparações de 7 para 10, além de ser proporcionalmente pequeno, também o é em absoluto, e ganha-se na qualidade de informações apreendidas das comparações.

Figura 3 – Gráfico da diferença da quantidade de comparações pareadas entre os métodos AHP e BWM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

A Figura 3 acima traz um gráfico da diferença da quantidade de comparações pareadas, para um mesmo conjunto de critérios  $n$ , entre a utilização do método AHP e a utilização do método BWM, e sua função é a diferença entre  $n(n - 1)/2$  e  $2n - 3$ . Como visto na figura, vê-se que, caso houvesse também inclusão de matrizes de ordens superiores na utilização do método AHP, acabaria por se tornar prejudicial para o modelo como um todo, visto que a quantidade de comparações pareadas aumentaria na ordem de  $n^2$  – no caso de matrizes 6x6, a quantidade de comparações já aumentaria para 15, por exemplo.

Tendo sido apresentados importantes conceitos acerca da avaliação da sustentabilidade, bem como seus métodos aplicados em etapas de processo de manufatura, além abordar os métodos AHP e BWM e trazer discussões pertinentes sobre sua utilização e funcionamento, no item a seguir será exposto o processo metodológico utilizado neste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

A pesquisa teve por objetivo apresentar uma proposta de uso de um modelo AHP-BWM para ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura.

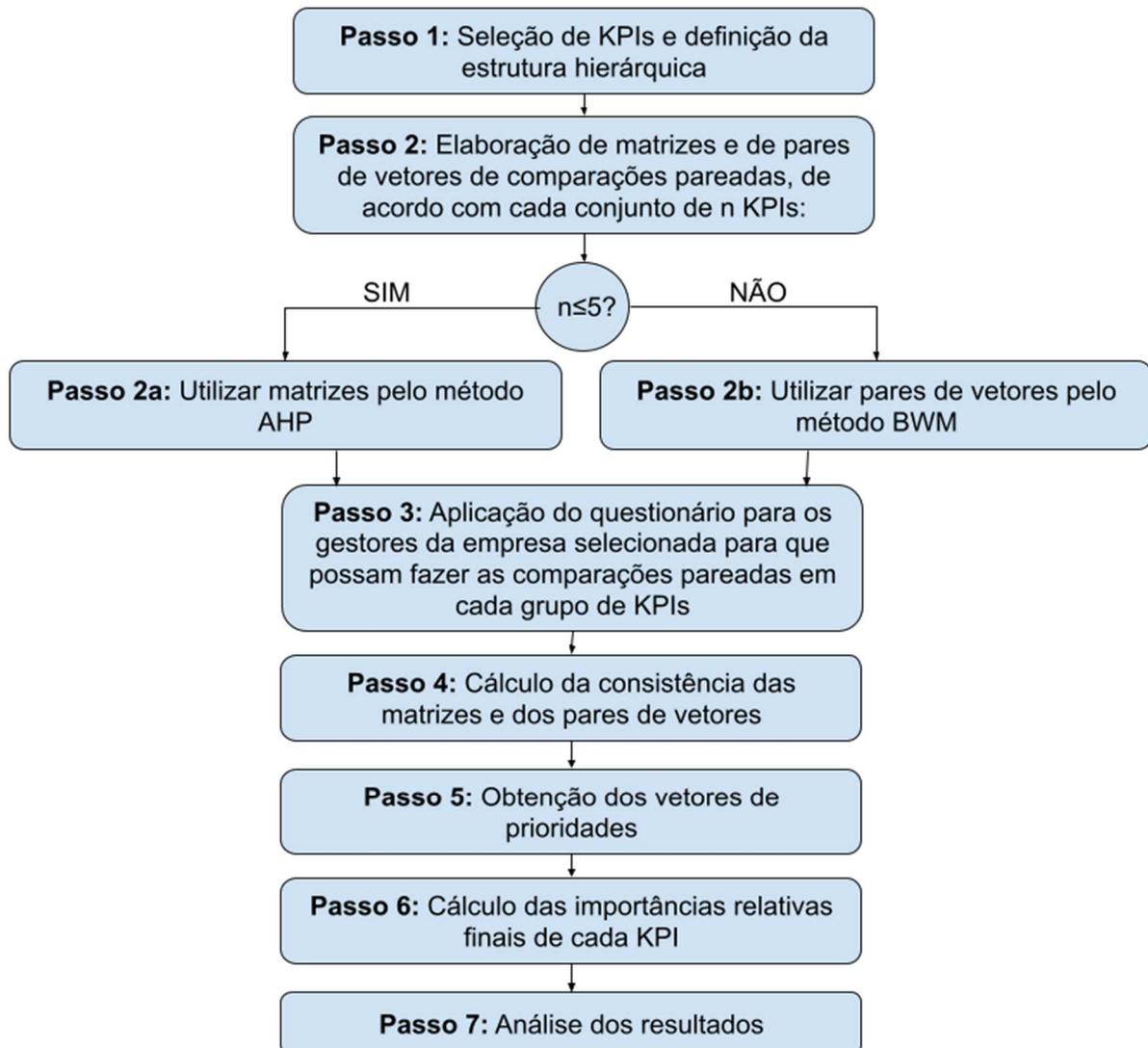
Foi feita uma revisão bibliográfica sobre diversas propostas de avaliação de sustentabilidade a fim de verificar a presença de alguns elementos de relevância e identificar lacunas para desenvolver a pesquisa.

Depois, foi feita uma revisão bibliográfica da utilização do modelo híbrido AHP-BWM para que pudessem ser verificadas quais as regras comumente adotadas. Este modelo foi escolhido para a resolução deste tipo de problema por se tratar de uma combinação de dois métodos de decisão multicritérios ainda pouco utilizada mas cujos métodos que o compõem já têm aplicações diversas e funcionamento robusto, além de ser bastante eficiente em priorizar critérios a partir da análise e de julgamentos de especialistas. Adicionalmente, é um modelo que ainda não foi utilizado para ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em uma etapa de processo de manufatura.

A aplicação do modelo proposto seguiu o *framework* apresentado na Figura 4. Em primeiro lugar, deve-se escolher o conjunto de KPIs a serem analisados e determinar a relação hierárquica entre eles, dispondo o objetivo geral no topo e os critérios nos níveis abaixo, utilizando de subníveis quando necessário. A escolha dos KPIs deve se dar juntamente com os tomadores de decisão e baseando-se na realidade da empresa.

No segundo passo, a partir da estrutura hierárquica da decisão e da escolha dos KPIs, deve-se elaborar as matrizes e os vetores de comparações pareadas com as importâncias relativas em cada nível da hierarquia, a depender da quantidade de critérios em cada nível. Para isso, deve ser verificada a quantidade de critérios em cada nível, e esta divisão será diferente da realizada por Moslem et al. (2020a): se for  $n \leq 5$ , deverão ser montadas as matrizes de comparações pareadas que serão processadas posteriormente pelo método AHP; caso  $n > 5$ , deverão ser montados pares de vetores de comparações pareadas que serão processados mais tarde pelo método BWM.

Figura 4 – *Framework* do modelo AHP-BWM proposto



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

No terceiro passo, com as matrizes e os vetores de comparações pareadas prontos, há a elaboração do questionário e posterior aplicação para os gestores da empresa selecionada, que tenham a experiência necessária, por meio de entrevista estruturada realizada na plataforma *Google Meet*, para que possam fazer as devidas comparações pareadas e obter os pesos de cada KPI e de cada pilar da sustentabilidade. Segundo Marconi e Lakatos (2003), a entrevista é considerada como um instrumento de investigação social, realizada de maneira metódica, a qual permite que o entrevistado forneça as informações necessárias para a pesquisa, e que pode ser utilizada em diversas áreas do conhecimento. Desta forma, foi aplicada a entrevista de maneira estruturada uma vez que ela se deu de maneira a seguir o roteiro previamente estabelecido

(MARCONI; LAKATOS, 2003), tratando-se do questionário elaborado com as comparações pareadas a serem realizadas. Nesta modalidade, o pesquisador não é livre para adaptar suas perguntas de acordo com determinada situação, para alterar a ordem dos tópicos ou para fazer outras perguntas. Sendo assim, no caso das matrizes, será aplicado o AHP, fazendo com que os tomadores de decisão façam todas as comparações pareadas possíveis, e no caso dos pares de vetores, será aplicado o BWM, sendo perguntado, primeiramente, qual KPI é o mais relevante e qual é o menos relevante para, em seguida, prosseguir às comparações pareadas baseando-se neles.

Aqui, ao pedir para que os tomadores de decisão realizem as comparações pareadas para determinar as prioridades relativas de cada KPI, será utilizada a perspectiva *top-down*, que consiste no alinhamento entre objetivos e prioridades competitivas para alocação de recursos de maneira cuidadosamente implementada pelos gestores, de modo que os membros da empresa localizados hierarquicamente abaixo contribuam para tal nas atividades que lhes competirem (KIM; STING; LOCH, 2014), ou seja, é uma perspectiva onde as tomadas de decisão são feitas nos altos níveis hierárquicos da empresa, pelo fato de conseguirem ter uma ampla visão de todos os processos existentes. Sendo aplicada ao modelo proposto, significa que a ponderação dos KPIs se dará levando em consideração a empresa como um todo; a contribuição dos elementos próprios da etapa de processo analisada, em um caso em que fosse necessário de fato calcular o índice de sustentabilidade para uma etapa de processo de manufatura, se daria por meio da mensuração de cada KPI.

O quarto passo consiste no cálculo das consistências das matrizes de comparações pareadas utilizando as Equações (6), (7) e (8), e no cálculo das consistências dos pares de vetores de comparações pareadas utilizando a Equação (13). No caso do AHP, caso alguma matriz tenha tido um nível de consistência  $CR \leq 0,10$ , será necessário realizar novamente alguma(s) comparação(ões), a fim de se encontrar e solucionar possíveis fontes de elevada inconsistência.

No quinto passo, calcula-se o vetor de prioridades de cada conjunto de KPIs analisado e do conjunto de pilares de sustentabilidade. Para as matrizes de comparações pareadas, será utilizado o método das médias geométricas, proposto por Crawford (1987), e cada componente  $w_i$  do vetor será expresso pela Equação (4). Para os pares de vetores de comparações pareadas, o sistema de equações (12) de otimização será utilizado para cada grupo de KPIs e serão obtidas soluções únicas para cada um, fazendo com que cada KPI tenha apenas um valor ótimo de  $w_i$ .

No sexto passo, com base nos pesos relativos calculados de cada KPI e de cada pilar de sustentabilidade, são calculadas as importâncias relativas finais de cada KPI, multiplicando o peso relativo previamente calculado pelo peso relativo da dimensão da sustentabilidade à qual ele pertence. Após o cálculo, os resultados numéricos passam por validação do tomador de decisão, para que possam verificar se os pesos condizem com a estratégia da empresa.

Por fim, será feita a análise dos resultados obtidos, confrontando com a revisão bibliográfica realizada.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de validar a proposta apresentada na seção anterior, ela foi aplicada em uma mesma etapa de processo de manufatura em duas empresas distintas, e os procedimentos estão detalhados a seguir separadamente para cada caso – passos 1 a 6. Depois, no sétimo passo, os resultados foram analisados e confrontados conjuntamente com a bibliografia revisada neste trabalho.

### 4.1 APRESENTAÇÃO DOS CASOS A E B

A etapa de processo de manufatura analisada é a aplicação de chapisco (Figura 5), um revestimento metálico duro, por meio de soldagem, em um rolo de moenda de cana-de-açúcar, que faz com que haja a correta extração de caldo de cana a partir da matéria-prima inicial e diminuição do desgaste e dos custos envolvidos na manutenção de componentes (MURAD, 2020).

Figura 5 – Processo de aplicação de chapisco em rolo de moenda de cana-de-açúcar por meio de eletrodo revestido



Fonte: TECNOLOGIA (2019)

Neste trabalho, analisamos duas empresas distintas que apresentam a mesma etapa de processo de manufatura – a aplicação de chapisco em rolos de moenda de cana-de-açúcar.

No caso A, iremos tratar de uma empresa nacional, produtora de álcool, açúcar, bioetanol e leveduras, cujas unidades produtoras geram cerca de 4 mil empregos diretos e mais 12 mil empregos indiretos. Ela possui certificação de qualidade ISO 9001 para as atividades de recepção, análise e pesagem de cana-de-açúcar, análise físico-química do açúcar e álcool - anidro e hidratado - e pesagem de produto. Em 2013, a empresa chegou à marca aproximada de moagem de cana-de-açúcar da ordem de 10 milhões de toneladas, com produções aproximadas de 540 mil toneladas de açúcar bruto e 130 mil m<sup>3</sup> de álcool anidro, bem como 303MWh de energia elétrica.

Já no caso B, iremos abordar uma empresa com atuação multinacional, mas com atuação no setor sucroalcooleiro também situada no Brasil. Ela mantém um total de 11 usinas localizadas nas regiões Sudeste, Norte e Centro-Oeste do país, com capacidade de moagem de cana em 2019 de 32 milhões de toneladas por ano. Ela possui 8 mil colaboradores e 6 mil profissionais indiretos e fornecedores. Sua produção de açúcar é de 1,7 milhões de toneladas, a de etanol é de aproximadamente 1,7 milhões m<sup>3</sup> e gera 1,4 milhões MWh de energia elétrica por ano para exportação.

## 4.2 CASO A - APLICAÇÃO DO MODELO

A seguir, o modelo proposto foi aplicado no caso A, seguindo o passo-a-passo presente no *framework* da Figura 4.

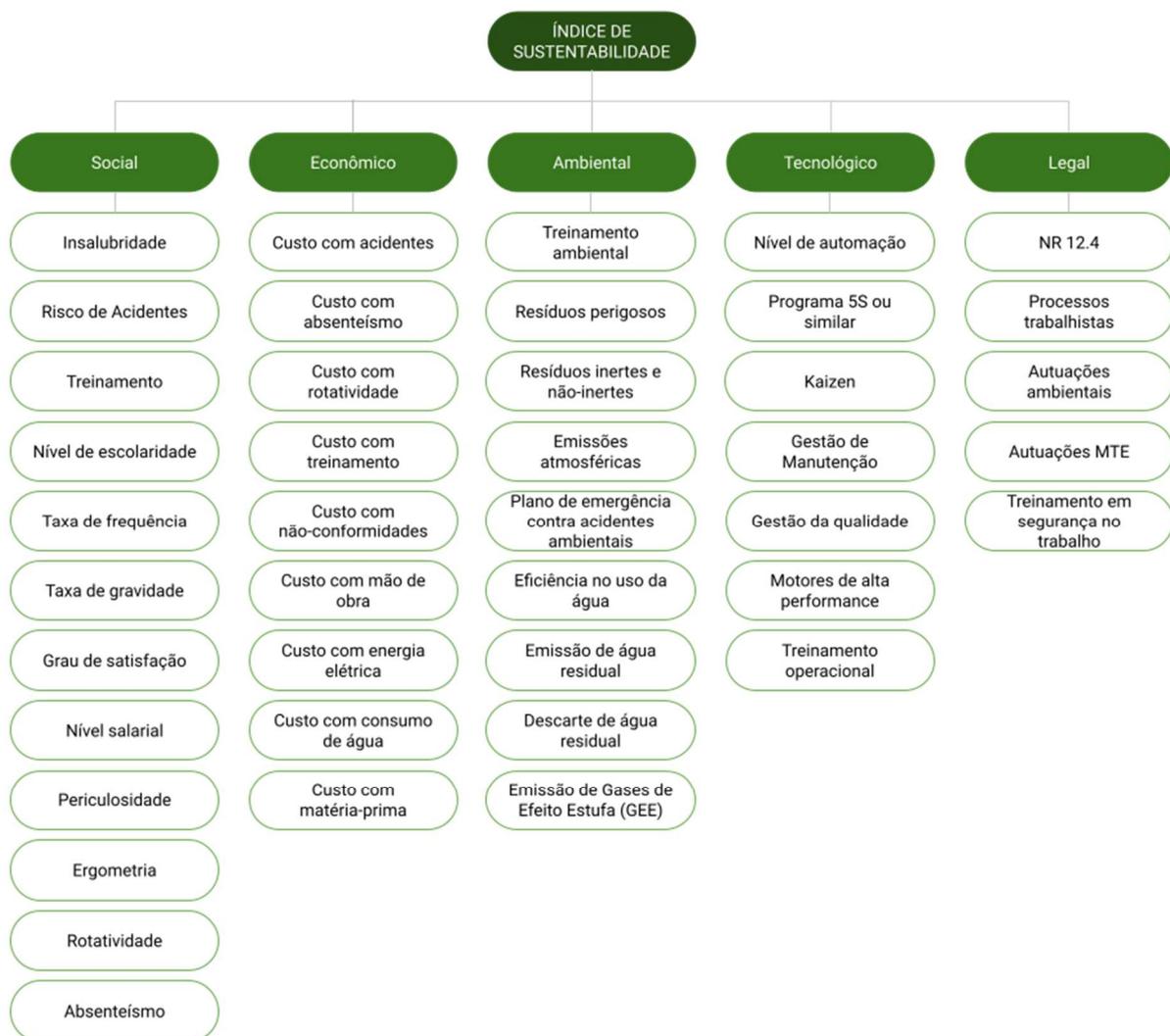
### 4.2.1 Primeiro passo (Caso A) – Seleção de KPIs e definição da estrutura hierárquica

Foi apresentada aos tomadores de decisão uma lista pré-definida de KPIs para que pudessem selecionar os que mais fossem condizentes com o processo a ser analisado, com a liberdade, também, de poderem adicionar outros que não estivessem presentes na lista, caso percebessem a necessidade de descrever aspectos importantes do processo e que fossem relevantes para a avaliação da sustentabilidade do mesmo. Cada um dos KPIs podem ser

categorizados em uma dimensão de sustentabilidade, ou seja, considera-se que influenciam a sustentabilidade a partir de uma determinada característica própria.

Desta forma, neste primeiro passo, foi apresentada a lista pré-definida de KPIs utilizada por Murad (2020) em seu trabalho, já apresentados nos Quadros 2 a 6, para que quem fosse efetuar as comparações pareadas na empresa A pudesse efetuar a seleção.

Figura 6 – Estrutura hierárquica composta pelos KPIs utilizados para mensurar a sustentabilidade do processo de manufatura em questão



Fonte: Adaptado de Murad (2020)

No caso A, foram selecionados todos os 42 KPIs apresentados, e também não houve necessidade por parte dos tomadores de decisão em se acrescentar outros KPIs. Então, foi elaborada uma estrutura hierárquica que abarcasse todos os critérios escolhidos, de acordo com

as dimensões da sustentabilidade às quais eles pertenceriam, baseando-se já na classificação proposta por Murad (2020), de modo que o índice de sustentabilidade se encontrasse no primeiro nível, as dimensões da sustentabilidade no segundo, e os KPIs, no terceiro nível. Ela está apresentada na Figura 6.

#### 4.2.2 Segundo Passo (Caso A) – Elaboração de matrizes e pares de vetores de comparações pareadas

Neste passo, a partir dos KPIs selecionados e da estrutura hierárquica estabelecida, são elaboradas as matrizes e pares de vetores de comparação pareadas, de acordo com cada conjunto de critérios. Assim, é preciso verificar a quantidade de critérios em cada um destes grupos para que se adote o método de decisão multicritérios adequado, como pode ser verificado no Quadro 8 abaixo.

Quadro 8 – Quadro de determinação do método de decisão multicritérios a ser adotado para cada grupo de critérios da estrutura hierárquica

<b>Grupo</b>	<b>Quantidade n de critérios</b>	<b>Método de decisão multicritérios</b>
Dimensões da sustentabilidade	5	AHP
Dimensão econômica	9	BWM
Dimensão ambiental	9	BWM
Dimensão tecnológica	7	BWM
Dimensão legal	5	AHP
Dimensão social	12	BWM

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Como pode ser visto, para os grupos de KPIs das dimensões social, econômica, ambiental e tecnológica será utilizado o método BWM e, conseqüentemente, será formado um par de vetores de comparações pareadas para cada grupo: o par 12x1 e 1x12 para a dimensão social, totalizando 21 comparações; o par 9x1 e 1x9 para a dimensão econômica, totalizando 15 comparações; o par 9x1 e 1x9 para a dimensão ambiental, totalizando 15 comparações; e o par 7x1 e 1x7 para a dimensão tecnológica, totalizando 11 comparações. Já para o grupo de

KPIs da dimensão legal e para o grupo de dimensões da sustentabilidade, por possuírem o número de critérios  $n \leq 5$ , será utilizado o método AHP e será formada uma matriz de comparações pareadas para cada grupo destes, ou seja, uma matriz 5x5 para a dimensão legal e uma matriz 5x5 para o grupo composto pelas cinco dimensões da sustentabilidade utilizadas, totalizando 10 comparações pareadas para cada grupo. Desta forma, no total, foram realizadas 82 comparações pareadas.

### 4.2.3 Terceiro Passo (Caso A) – Aplicação do questionário

No terceiro passo, foi feita a aplicação do questionário com um especialista da empresa A<sup>1</sup>. A aplicação do questionário se deu de maneira dirigida por entrevista estruturada e por meio da plataforma *Google Meet* para que pudessem ser obtidos os valores de cada comparação pareada do especialista.

Seguem abaixo as comparações pareadas efetuadas pelo tomador de decisão separadas por grupos de critérios, utilizando os valores de referência para comparações estabelecidos no Quadro 7 para os casos em que se empregar o método AHP e que se empregar o método BWM, sendo que, no caso do uso do BWM, serão utilizados apenas os valores de 1 a 9 estabelecidos no Quadro 7. Seguindo a perspectiva *top-down*, as comparações pareadas entre as dimensões da sustentabilidade foram realizadas pelo especialista de modo que abrangesse toda a empresa, enquanto as comparações nos grupos de KPIs foram realizadas pensando especificamente na etapa de processo de manufatura delimitada.

#### 4.2.3.1 Comparações pareadas para as dimensões da sustentabilidade (Caso A)

Este primeiro grupo, formado pelas cinco dimensões da sustentabilidade a partir das quais os KPIs foram classificados, teve suas comparações pareadas estruturadas a partir do método AHP, tendo sido elaborada uma matriz para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações necessárias em relação à importância da contribuição de cada dimensão para a

---

<sup>1</sup> Devido às condições de isolamento social decorrentes da pandemia de COVID-19 e por problemas de ordem pessoal, não foi possível colocar em prática o planejamento prévio em se aplicar o questionário com um grupo de tomadores de decisão, ao invés de apenas um tomador de decisão, que tivessem a experiência necessária para tal.

sustentabilidade como um todo para a empresa. Os valores das comparações estão presentes na Tabela 4 abaixo, sendo que cada valor  $a_{ij}$  é referente à comparação feita entre a dimensão da linha  $i$  e a dimensão da coluna  $j$ .

Tabela 4 – Comparações pareadas feitas entre as cinco dimensões da sustentabilidade para o caso A

Dimensão da sustentabilidade	Social	Econômica	Ambiental	Tecnológica	Legal
Social	1				
Econômica	2	1			
Ambiental	2	1	1		
Tecnológica	2	1	1	1	
Legal	2	1/2	1/2	1/2	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota: Os espaços em preto não constavam para preenchimento no questionário pelo fato dos termos se referirem ao inverso de seus respectivos termos simétricos ( $a_{ji} = 1/a_{ij}$ )

#### 4.2.3.2 Comparações pareadas para a dimensão social (Caso A)

Utilizando a estruturação do método BWM para os KPIs deste grupo, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com a sua experiência, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI declarado como mais importante foi risco de acidentes, enquanto o KPI declarado como menos importante neste caso foi nível de escolaridade. Os dados estão presentes nas Tabelas 5 e 6 abaixo. Cada valor da Tabela 5 é referente à comparação entre o KPI risco de acidentes (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 6 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI nível de escolaridade (igualmente ou menos importante que os demais).

Tabela 5 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão social da sustentabilidade para o caso A

	Insalubridade	Risco de acidentes	Treinamento	Nível de escolaridade	Taxa de Frequência	Taxa de Gravidade
<b>Melhor critério: <u>RISCO DE ACIDENTES</u></b>	9	1	9	9	9	9
	Grau de Satisfação	Nível Salarial	Periculosidade	Ergometria	Rotatividade	Absenteísmo
	9	9	9	9	9	9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 6 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão social da sustentabilidade para o caso A

KPI	Pior critério: <u>NÍVEL DE ESCOLARIDADE</u>
Insalubridade	7
Risco de acidentes	9
Treinamento	8
<b>Nível de escolaridade</b>	1
Taxa de Frequência	9
Taxa de Gravidade	9
Grau de Satisfação	7
Nível Salarial	6
Periculosidade	9
Ergometria	7
Rotatividade	7
Absenteísmo	5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.2.3.3 Comparações pareadas para a dimensão econômica (Caso A)

Utilizando a estruturação do método BWM para os KPIs também deste grupo, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI tido como mais importante foi custo com acidentes, enquanto o KPI que menos contribui com a sustentabilidade a partir da dimensão econômica é o custo com consumo de água. Os dados referentes a essas

comparações pareadas estão presentes nas Tabelas 7 e 8 abaixo. Os valores da Tabela 7 são referentes às comparações entre o KPI custo com acidentes (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 8 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI custo com consumo de água (igualmente ou menos importantes que os demais).

Tabela 7 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão econômica da sustentabilidade para o caso A

	<b>Custo com acidentes</b>	Custo com absenteísmo	Custo com rotatividade	Custo com treinamento	Custo com não-conformidade
<b>Melhor critério: CUSTO COM ACIDENTES</b>	1	9	9	9	9
	Custo com mão de obra	Custo com energia elétrica	Custo com consumo de água	Custo com matéria-prima	
	1	9	9	1	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 8 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão econômica da sustentabilidade para o caso A

<b>KPI</b>	<b>Pior critério: CUSTO COM CONSUMO DE ÁGUA</b>
Custo com acidentes	9
Custo com absenteísmo	1
Custo com rotatividade	1
Custo com treinamento	9
Custo com não-conformidade	7
Custo com mão de obra	9
Custo com energia elétrica	7
<b>Custo com consumo de água</b>	1
Custo com matéria-prima	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.2.3.4 Comparações pareadas para a dimensão ambiental (Caso A)

Novamente utilizando a estruturação do método BWM, também para os KPIs deste grupo, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI tido como mais importante foi resíduos perigosos, enquanto o KPI que menos contribui com a sustentabilidade a partir da dimensão ambiental é o treinamento ambiental. Os dados referentes a essas comparações pareadas estão presentes nas Tabelas 9 e 10 abaixo. Os valores da Tabela 9 são referentes às comparações entre o KPI resíduos perigosos (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 10 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI treinamento ambiental (igualmente ou menos importantes que os demais).

Tabela 9 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão ambiental da sustentabilidade para o caso A

	Treinamento Ambiental	<b>Resíduos perigosos</b>	Resíduos inertes e não-inertes	Emissões atmosféricas	Plano de emergência para acidentes ambientais
<b>Melhor critério: RESÍDUOS PERIGOSOS</b>	9	1	8	7	7
	Eficiência no uso da água	Emissão de água residual	Descarte de água residual	Emissão de gases do efeito estufa (GEE)	
	7	6	6	5	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 10 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão ambiental da sustentabilidade para o caso A

KPI	<b>Pior critério: TREINAMENTO AMBIENTAL</b>
<b>Treinamento ambiental</b>	1
Resíduos perigosos	9
Resíduos inertes e não-inertes	8
Emissões atmosféricas	8
Plano de emergência para acidentes ambientais	7
Eficiência no uso da água	7

Emissão de água residual	6
Descarte de água residual	6
Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE)	7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.2.3.5 Comparações pareadas para a dimensão tecnológica (Caso A)

Para os KPIs deste grupo, empregando a estruturação do método BWM, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão da empresa A pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI tido como mais importante foi nível de automação, enquanto o KPI que menos contribui com a sustentabilidade a partir da dimensão tecnológica foi o Kaizen. Os dados referentes a essas comparações pareadas estão presentes nas Tabelas 11 e 12 abaixo. Os valores da Tabela 11 são referentes às comparações entre o KPI nível de automação (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 12 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI Kaizen (igualmente ou menos importantes que os demais).

Tabela 11 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão tecnológica da sustentabilidade para o caso A

	Nível de automação	Programa 5S ou similar	Kaizen	Gestão de manutenção
<b>Melhor critério:</b> <b><u>NÍVEL DE AUTOMAÇÃO</u></b>	1	6	7	1
	Gestão de qualidade	Motores de alta performance	Treinamento operacional	
	2	7	1	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 12 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão tecnológica da sustentabilidade para o caso A

KPI	Pior critério: KAIZEN
Nível de automação	9
Programa 5S ou similar	7
<b>Kaizen</b>	1
Gestão de manutenção	9
Gestão de qualidade	7
Motores de alta performance	4
Treinamento operacional	9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.2.3.6 Comparações pareadas para a dimensão legal (Caso A)

Já os KPIs deste grupo foram estruturados de acordo com o método AHP, tendo sido elaborada uma matriz de comparações pareadas para que o tomador de decisão pudesse efetuar todas as comparações necessárias em relação a contribuição relativa de cada KPI a partir da dimensão legal. Os valores das comparações estão presentes na Tabela 13 abaixo, sendo que cada valor  $a_{ij}$  é referente à comparação feita entre o KPI da linha  $i$  e o KPI da coluna  $j$ .

Tabela 13 – Comparações pareadas feitas entre os KPIs da dimensão legal da sustentabilidade para o caso A

KPI	NR 12.4	Processos trabalhistas	Autuações ambientais	Autuações MTE	Treinamento em segurança no trabalho
NR 12.4	1				
Processos trabalhistas	1	1			
Autuações ambientais	1	1	1		
Autuações MTE	1	1	1	1	
Treinamento em segurança no trabalho	1	1	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota: Os espaços em preto não constavam para preenchimento no questionário pelo fato dos termos se referirem ao inverso de seus respectivos termos simétricos ( $a_{ji} = 1/a_{ij}$ )

#### 4.2.4 Quarto Passo (Caso A) – Cálculo das consistências

Neste passo, foram calculadas as razões de consistência (C.R.) dos pares de vetores de comparações pareadas, utilizando a Equação (13), referentes às dimensões social ( $a_{Bj1}$  e  $a_{jW1}$ ), econômica ( $a_{Bj2}$  e  $a_{jW2}$ ), ambiental ( $a_{Bj3}$  e  $a_{jW3}$ ) e tecnológica ( $a_{Bj4}$  e  $a_{jW4}$ ) e das matrizes de comparações pareadas, utilizando as Equações (6), (7) e (8), referentes à dimensão legal ( $A_5$ ) e às dimensões da sustentabilidade ( $A_6$ ), após completá-las apropriadamente.

$$\begin{aligned} a_{Bj1} &= [9 \ 1 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9]; \\ a_{jW1}^T &= [7 \ 9 \ 8 \ 1 \ 9 \ 9 \ 7 \ 6 \ 9 \ 7 \ 7 \ 5]; \\ C.R. &= 0,0305. \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned} a_{Bj2} &= [1 \ 9 \ 9 \ 9 \ 9 \ 1 \ 9 \ 9 \ 1]; \\ a_{jW2}^T &= [9 \ 1 \ 1 \ 9 \ 7 \ 9 \ 7 \ 1 \ 1]; \\ C.R. &= 0,0253. \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} a_{Bj3} &= [9 \ 1 \ 8 \ 7 \ 7 \ 7 \ 6 \ 6 \ 5]; \\ a_{jW3}^T &= [1 \ 9 \ 8 \ 8 \ 7 \ 7 \ 6 \ 6 \ 7]; \\ C.R. &= 0,0282. \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} a_{Bj4} &= [1 \ 6 \ 7 \ 1 \ 2 \ 7 \ 1]; \\ a_{jW4}^T &= [9 \ 7 \ 1 \ 9 \ 7 \ 4 \ 9]; \\ C.R. &= 0,0161. \end{aligned} \tag{17}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0. \tag{18}$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 1/2 & 1/2 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0,0130. \tag{19}$$

Como colocado anteriormente no item 2.2.2, os julgamentos realizados utilizando o método BWM sempre são consistentes, sendo o C.R um índice não-limitante. Mesmo assim, os pares de vetores referentes às comparações realizadas nas dimensões social (14), econômica (15), ambiental (16) e tecnológica (17) tiveram seus valores de C.R. calculados e foi verificado que se encontram bem próximos de zero, mostrando que as comparações em cada uma destas dimensões da sustentabilidade tiveram um alto grau de consistência. No caso dos julgamentos realizados utilizando o método AHP, foi verificado que tanto na matriz de comparações pareadas relativas à dimensão legal (18) quanto na matriz referente à comparação entre as dimensões da sustentabilidade (19) a razão de consistência foi inferior a 0,10, sendo atendido o critério do método para validar as matrizes e, desta forma, foi possível prosseguir aos próximos passos do modelo.

#### 4.2.5 Quinto Passo (Caso A) – Obtenção dos vetores de prioridades

Prosseguindo, o quinto passo consistiu no cálculo para a obtenção dos vetores de prioridades de cada par de vetores e de cada matriz de comparações pareadas, sendo que, para estes, foi utilizado o método das médias geométricas expresso na Equação (4), enquanto que para aqueles foi utilizado o problema de otimização expresso no sistema de equações (12). Os dados estão presentes nas Tabelas 14 a 19 abaixo. Neste passo, a soma das prioridades dentro de cada um dos seis grupos é igual a um.

Tabela 14 – Prioridades relativas das dimensões da sustentabilidade

Dimensão (código)	Valor da prioridade calculada
Dimensão social (A)	0.10856
Dimensão econômica (B)	0.24940
Dimensão ambiental (C)	0.24940
Dimensão tecnológica (D)	0.24940
Dimensão legal (E)	0.14324
<b>SOMA</b>	1.00000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 15 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão social da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Insalubridade (A1)	0.05973
Risco de acidentes (A2)	0.37832
Treinamento (A3)	0.05973
Nível de escolaridade (A4)	0.02434
Taxa de Frequência (A5)	0.05973
Taxa de Gravidade (A6)	0.05973
Grau de Satisfação (A7)	0.05973
Nível Salarial (A8)	0.05973
Periculosidade (A9)	0.05973
Ergometria (A10)	0.05973
Rotatividade (A11)	0.05973
Absenteísmo (A12)	0.05973
<b>SOMA</b>	1.00000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 16 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão econômica da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Custo com acidentes (B1)	0.28477
Custo com absenteísmo (B2)	0.01987
Custo com rotatividade (B3)	0.04636
Custo com treinamento (B4)	0.04636
Custo com não-conformidade (B5)	0.04636
Custo com mão de obra (B6)	0.31126
Custo com energia elétrica (B7)	0.04636
Custo com consumo de água (B8)	0.04636
Custo com matéria-prima (B9)	0.15232
<b>SOMA</b>	1.00000

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 17 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão ambiental da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Treinamento ambiental (C1)	0.02685
Resíduos perigosos (C2)	0.38939

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Resíduos inertes e não-inertes (C3)	0.06714
Emissões atmosféricas (C4)	0.07673
Plano de emergência para acidentes ambientais (C5)	0.07673
Eficiência no uso da água (C6)	0.07673
Emissão de água residual (C7)	0.08951
Descarte de água residual (C8)	0.08951
Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (C9)	0.10742
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 18 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão tecnológica da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Nível de automação (D1)	0.21928
Programa 5S ou similar (D2)	0.05060
Kaizen (D3)	0.01928
Gestão de manutenção (D4)	0.25783
Gestão de qualidade (D5)	0.15181
Motores de alta performance (D6)	0.04337
Treinamento operacional (D7)	0.25783
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 19 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão legal da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
NR 12.4 (E1)	0,20000
Processos trabalhistas (E2)	0,20000
Autuações ambientais (E3)	0,20000
Autuações MTE (E4)	0,20000
Treinamento em segurança no trabalho (E5)	0,20000
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.2.6 Sexto Passo (Caso A) – Cálculo das importâncias relativas finais

O sexto passo consistiu no cálculo das importâncias relativas finais de cada KPI. Isso se dá multiplicando a prioridade de cada KPI, presente nas Tabelas 15 a 19, pela prioridade da dimensão da sustentabilidade à qual ele está atrelado, presente na Tabela 14. Ou seja, multiplicar a prioridade de cada KPI pela prioridade do item que está localizado um nível acima de cada KPI na estrutura hierárquica representada na Figura 6. Desta forma, temos as seguintes prioridades relativas finais de cada KPI para o caso A, dispostas na Tabela 20. Depois, estes dados foram validados pelo especialista, de modo que são condizentes com as necessidades e visão da empresa A.

Tabela 20 – Tabela com as prioridades relativas finais de cada KPI no caso A

Dimensão	Peso da dimensão	KPI	Peso inicial	Prioridade relativa final	Prioridade relativa final (%)
Social	0.10856	Insalubridade (A1)	0.05973	0.00648	0.648%
		Risco de acidentes (A2)	0.37832	0.09435	9.435%
		Treinamento (A3)	0.05973	0.01490	1.490%
		Nível de escolaridade (A4)	0.02434	0.00607	0.607%
		Taxa de Frequência (A5)	0.05973	0.00856	0.856%
		Taxa de Gravidade (A6)	0.05973	0.00648	0.648%
		Grau de Satisfação (A7)	0.05973	0.00648	0.648%
		Nível Salarial (A8)	0.05973	0.00648	0.648%
		Periculosidade (A9)	0.05973	0.00648	0.648%
		Ergometria (A10)	0.05973	0.00648	0.648%
		Rotatividade (A11)	0.05973	0.00648	0.648%
		Absenteísmo (A12)	0.05973	0.00648	0.648%
Econômica	0.24940	Custo com acidentes (B1)	0.28477	0.07102	7.102%
		Custo com absenteísmo (B2)	0.01987	0.00495	0.495%
		Custo com rotatividade (B3)	0.04636	0.01156	1.156%
		Treinamento (B4)	0.04636	0.01156	1.156%
		Custo com não-conformidade (B5)	0.04636	0.01156	1.156%
		Custo com mão de obra (B6)	0.31126	0.07763	7.763%
		Custo com energia elétrica (B7)	0.04636	0.01156	1.156%
		Custo com consumo de água (B8)	0.04636	0.01156	1.156%
Ambiental	0.24940	Custo com matéria-prima (B9)	0.15232	0.03799	3.799%
		Treinamento ambiental (C1)	0.02685	0.00670	0.670%

Dimensão	Peso da dimensão	KPI	Peso inicial	Prioridade relativa final	Prioridade relativa final (%)
		Resíduos perigosos (C2)	0.38939	0.09711	9.711%
		Resíduos inertes e não-inertes (C3)	0.06714	0.01674	1.674%
		Emissões atmosféricas (C4)	0.07673	0.01914	1.914%
		Plano de emergência para acidentes ambientais (C5)	0.07673	0.01914	1.914%
		Eficiência no uso da água (C6)	0.07673	0.01914	1.914%
		Emissão de água residual (C7)	0.08951	0.02232	2.232%
		Descarte de água residual (C8)	0.08951	0.02232	2.232%
		Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (C9)	0.10742	0.02679	2.679%
Tecnológica	0.24940	Nível de automação (D1)	0.21928	0.05469	5.469%
		Programa 5S ou similar (D2)	0.05060	0.01262	1.262%
		Kaizen (D3)	0.01928	0.00481	0.481%
		Gestão de manutenção (D4)	0.25783	0.06430	6.430%
		Gestão de qualidade (D5)	0.15181	0.03786	3.786%
		Motores de alta performance (D6)	0.04337	0.01082	1.082%
		Treinamento operacional (D7)	0.25783	0.06430	6.430%
Legal	0.14324	NR 12.4 (E1)	0.20000	0.02865	2.865%
		Processos trabalhistas (E2)	0.20000	0.02865	2.865%
		Autuações ambientais (E3)	0.20000	0.02865	2.865%
		Autuações MTE (E4)	0.20000	0.02865	2.865%
		Treinamento em segurança no trabalho (E5)	0.20000	0.02865	2.865%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

### 4.3 CASO B – APLICAÇÃO DO MODELO

A seguir, está apresentada a aplicação do modelo proposto para o caso B, seguindo o passo a passo mostrado no *framework* da Figura 4.

#### 4.3.1 Primeiro passo (Caso B) – Seleção de KPIs e definição da estrutura hierárquica

Da mesma forma como no caso A, neste caso B foi apresentada aos tomadores de decisão uma lista pré-definida de KPIs, proposta por Murad (2020) e apresentados nos Quadros 2 a 6, para que pudessem selecionar os que mais fossem condizentes com o processo a ser analisado, com a liberdade, também, de poderem adicionar outros que não estivessem presentes na lista, caso percebessem a necessidade de descrever aspectos importantes do processo e que fossem relevantes para a avaliação da sustentabilidade do mesmo.

No caso B, de maneira análoga à empresa A, foram escolhidos os 42 KPIs apresentados, e também não foram acrescentados outros pelos tomadores de decisão. Desta forma, a estrutura hierárquica elaborada para o caso B será idêntica à apresentada para o caso A, estando apresentada na Figura 6, contendo o índice de sustentabilidade no primeiro nível, as cinco dimensões da sustentabilidade no segundo nível e os 42 KPIs dispostos no terceiro nível, cada um hierarquicamente abaixo de sua respectiva dimensão.

#### **4.3.2 Segundo Passo (Caso B) – Elaboração de matrizes e pares de vetores de comparações pareadas**

No segundo passo, a partir dos KPIs selecionados e da estrutura hierárquica estabelecida, são elaboradas as matrizes e pares de vetores de comparação pareadas, de acordo com cada conjunto de critérios. Como os KPIs e a estrutura hierárquica são os mesmos dos apresentados no caso A, então cada grupo de critérios será submetido aos mesmos métodos de decisão multicritérios utilizados no caso A, seguindo o Quadro 8. Desta forma, para os grupos de KPIs das dimensões social, econômica, ambiental e tecnológica será utilizado o método BWM e, conseqüentemente, será formado um par de vetores de comparações pareadas para cada grupo: o par 12x1 e 1x12 para a dimensão social, totalizando 21 comparações; o par 9x1 e 1x9 para a dimensão econômica, totalizando 15 comparações; o par 9x1 e 1x9 para a dimensão ambiental, totalizando 15 comparações; e o par 7x1 e 1x7 para a dimensão tecnológica, totalizando 11 comparações. Já para o grupo de KPIs da dimensão legal e para o grupo de dimensões da sustentabilidade, por possuírem o número de critérios  $n \leq 5$ , será utilizado o método AHP e será formada uma matriz de comparações pareadas para cada grupo destes, ou seja, uma matriz 5x5 para a dimensão legal e uma matriz 5x5 para o grupo composto pelas cinco dimensões da sustentabilidade utilizadas, totalizando 10 comparações pareadas para cada grupo. Desta forma, no total, foram realizadas 82 comparações pareadas, como no caso A.

### 4.3.3 Terceiro Passo (Caso B) – Aplicação do questionário

No terceiro passo, foi aplicado o questionário com especialista<sup>2</sup> da empresa B que tivesse a experiência necessária. A aplicação do questionário se deu de maneira dirigida por entrevista estruturada e por meio da plataforma *Google Meet* para que pudessem ser obtidos os valores de cada comparação pareada do especialista em questão.

Seguem abaixo as comparações pareadas efetuadas por grupos de critérios, seguindo os valores de referência para comparações estabelecidos no Quadro 7 para os casos em que se empregar o método AHP e que se empregar o método BWM, sendo que, no caso do uso do BWM, serão utilizados apenas os valores de 1 a 9 estabelecidos no Quadro 7. Seguindo a perspectiva *top-down*, as comparações pareadas entre as dimensões da sustentabilidade foram realizadas pelo especialista de modo que abrangesse toda a empresa, enquanto as comparações nos grupos de KPIs foram realizadas pensando especificamente na etapa de processo de manufatura delimitada.

#### 4.3.3.1 Comparações pareadas para as dimensões da sustentabilidade (Caso B)

O primeiro grupo, formado pelas cinco dimensões da sustentabilidade a partir das quais os KPIs foram classificados, teve suas comparações pareadas estruturadas a partir do método AHP, tendo sido elaborada uma matriz para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações necessárias em relação à importância da contribuição de cada dimensão para a sustentabilidade como um todo na empresa B. Os valores das comparações estão presentes na Tabela 21 abaixo, sendo que cada valor  $a_{ij}$  é referente à comparação feita entre a dimensão da linha  $i$  e a dimensão da coluna  $j$ .

Tabela 21 – Comparações pareadas entre as cinco dimensões da sustentabilidade no caso B

Dimensão da sustentabilidade	Social	Econômica	Ambiental	Tecnológica	Legal
------------------------------	--------	-----------	-----------	-------------	-------

<sup>2</sup> Analogamente ao ocorrido na empresa A, devido às condições de isolamento social decorrentes da pandemia de COVID-19 e por problemas de ordem pessoal, não foi possível colocar em prática o planejamento prévio em se aplicar o questionário com um grupo de tomadores de decisão, ao invés de apenas um tomador de decisão, que tivessem a experiência necessária para tal.

Social	1				
Econômica	2	1			
Ambiental	2	5	1		
Tecnológica	1/3	3	1/5	1	
Legal	3	1/3	1/5	5	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota: Os espaços em preto não constavam para preenchimento no questionário pelo fato dos termos se referirem ao inverso de seus respectivos termos simétricos ( $a_{ji} = 1/a_{ij}$ )

#### 4.3.3.2 Comparações pareadas para a dimensão social (Caso B)

Utilizando a estruturação do método BWM para os KPIs deste grupo, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI declarado como mais importante foi taxa de gravidade, enquanto o KPI declarado como menos importante neste caso foi nível salarial. Os dados estão presentes nas Tabelas 22 e 23 abaixo. Os valores da Tabela 22 são referentes às comparações entre o KPI taxa de gravidade (mais importante) e cada um dos outros KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 23 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI nível salarial (igualmente ou menos importante que os demais).

Tabela 22 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão social da sustentabilidade no caso B

	Insalubridade	Risco de acidentes	Treinamento	Nível de escolaridade	Taxa de Frequência	Taxa de Gravidade
<b>Melhor critério: TAXA DE GRAVIDADE</b>	3	1	5	5	9	1
	Grau de Satisfação	Nível Salarial	Periculosidade	Ergometria	Rotatividade	Absenteísmo

	5	7	3	7	7	9
--	---	---	---	---	---	---

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 23 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão social da sustentabilidade no caso B

KPI	Pior critério: <u>NÍVEL SALARIAL</u>
Insalubridade	7
Risco de acidentes	9
Treinamento	5
Nível de escolaridade	3
Taxa de Frequência	7
Taxa de Gravidade	7
Grau de Satisfação	3
<b>Nível Salarial</b>	1
Periculosidade	7
Ergometria	5
Rotatividade	3
Absenteísmo	3

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.3.3.3 Comparações pareadas para a dimensão econômica (Caso B)

Utilizando a estruturação do método BWM para os KPIs deste grupo, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI tido como mais importante foi custo com não-conformidade, enquanto o KPI que menos contribui com a sustentabilidade a partir da dimensão econômica é o custo com treinamento. Os dados referentes a essas comparações pareadas estão presentes nas Tabelas 24 e 25 abaixo. Cada valor da Tabela 24 é referente à comparação entre o KPI custo com não-conformidade (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 25 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI custo com treinamento (igualmente ou menos importantes que os demais).

Tabela 24 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão econômica da sustentabilidade no caso B

	Custo com acidentes	Custo com absenteísmo	Custo com rotatividade	Custo com treinamento	<b>Custo com não-conformidade</b>
<b>Melhor critério: <u>CUSTO COM NÃO-CONFORMIDADE</u></b>	3	5	5	5	1
	Custo com mão de obra	Custo com energia elétrica	Custo com consumo de água	Custo com matéria-prima	
	3	1	1	1	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 25 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão econômica da sustentabilidade no caso B

<b>KPI</b>	<b>Pior critério: <u>CUSTO COM TREINAMENTO</u></b>
Custo com acidentes	7
Custo com absenteísmo	5
Custo com rotatividade	5
<b>Custo com treinamento</b>	5
Custo com não-conformidade	9
Custo com mão de obra	7
Custo com energia elétrica	7
Custo com consumo de água	7
Custo com matéria-prima	7

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.3.3.4 Comparações pareadas para a dimensão ambiental (Caso B)

Utilizando a estruturação do método BWM também para os KPIs deste grupo, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI tido como mais importante foi resíduos perigosos, enquanto o KPI que menos contribui com a sustentabilidade a partir da dimensão ambiental é o emissão de água residual. Os dados referentes a essas comparações pareadas estão presentes nas Tabelas 26 e 27 abaixo. Os valores da Tabela 26 são

referentes às comparações entre o KPI resíduos perigosos (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 27 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI emissão de água residual (igualmente ou menos importantes que os demais).

Tabela 26 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão ambiental da sustentabilidade no caso B

	Treinamento Ambiental	<b>Resíduos perigosos</b>	Resíduos inertes e não-inertes	Emissões atmosféricas	Plano de emergência para acidentes ambientais
<b>Melhor critério: RESÍDUOS PERIGOSOS</b>	5	1	3	1	3
	Eficiência no uso da água	Emissão de água residual	Descarte de água residual	Emissão de gases do efeito estufa (GEE)	
	1	5	1	1	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 27 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão ambiental da sustentabilidade no caso B

KPI	<b>Pior critério: EMISSÃO DE ÁGUA RESIDUAL</b>
Treinamento ambiental	7
Resíduos perigosos	9
Resíduos inertes e não-inertes	7
Emissões atmosféricas	9
Plano de emergência para acidentes ambientais	5
Eficiência no uso da água	9
<b>Emissão de água residual</b>	1
Descarte de água residual	9
Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE)	9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.3.3.5 Comparações pareadas para a dimensão tecnológica (Caso B)

Para os KPIs deste grupo, empregando a estruturação do método BWM, foram formulados dois vetores para que o tomador de decisão da empresa B pudesse efetuar as comparações pareadas, primeiramente escolhendo os KPIs mais e menos importantes de acordo com suas experiências, para em seguida compará-los com cada outro KPI. O KPI tido como mais importante foi gestão de manutenção, enquanto o KPI que menos contribui com a sustentabilidade a partir da dimensão tecnológica é motores de alta performance. Os dados referentes a essas comparações pareadas estão presentes nas Tabelas 28 e 29 abaixo. Os valores da Tabela 28 são referentes às comparações entre o KPI gestão de manutenção (mais importante) e cada um dos KPIs do grupo (igualmente ou menos importantes). Já os valores da Tabela 29 são referentes às comparações entre cada um dos KPIs e o KPI motores de alta performance (igualmente ou menos importantes que os demais).

Tabela 28 – Comparações pareadas do vetor Melhor-para-Outros dos KPIs da dimensão tecnológica da sustentabilidade no caso B

	Nível de automação	Programa 5S ou similar	Kaizen	Gestão de manutenção
<b>Melhor critério: GESTÃO DE MANUTENÇÃO</b>	1	5	5	1
	Gestão de qualidade	Motores de alta performance	Treinamento operacional	
	1	5	5	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 29 - Comparações pareadas do vetor Outros-para-Pior dos KPIs da dimensão tecnológica da sustentabilidade no caso B

KPI	Pior critério: MOTORES DE ALTA PERFORMANCE
Nível de automação	9
Programa 5S ou similar	7
Kaizen	7
Gestão de manutenção	7
Gestão de qualidade	7
<b>Motores de alta performance</b>	1
Treinamento operacional	5

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.3.3.6 Comparações pareadas para a dimensão legal (Caso B)

Tabela 30 – Comparações pareadas feitas entre os KPIs da dimensão legal da sustentabilidade no caso B

KPI	NR 12.4	Processos trabalhistas	Autuações ambientais	Autuações MTE	Treinamento em segurança no trabalho
NR 12.4	1				
Processos trabalhistas	1/5	1			
Autuações ambientais	1	1/5	1		
Autuações MTE	1/5	1	1	1	
Treinamento em segurança no trabalho	7	5	1	1	1

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota: Os espaços em preto não constavam para preenchimento no questionário pelo fato dos termos se referirem ao inverso de seus respectivos termos simétricos ( $a_{ji} = 1/a_{ij}$ )

Por outro lado, os KPIs deste grupo foram estruturados de acordo com o método AHP, tendo sido elaborada uma matriz de comparações pareadas para que o tomador de decisão da empresa B pudesse efetuar todas as comparações necessárias em relação a contribuição relativa de cada KPI a partir da dimensão legal. Os valores das comparações estão presentes na Tabela 30 acima, sendo que cada valor  $a_{ij}$  é referente à comparação feita entre o KPI da linha  $i$  e o KPI da coluna  $j$ .

#### 4.3.4 Quarto Passo (Caso B) – Cálculo das consistências

No quarto passo, foram calculadas as razões de consistência (C.R.) dos pares de vetores de comparações pareadas, utilizando a Equação (13), referentes às dimensões social ( $b_{Bj1}$  e  $b_{jW1}$ ), econômica ( $b_{Bj2}$  e  $b_{jW2}$ ), ambiental ( $b_{Bj3}$  e  $b_{jW3}$ ) e tecnológica ( $b_{Bj4}$  e  $b_{jW4}$ ) e das matrizes de comparações pareadas, utilizando as Equações (6), (7) e (8), referentes à dimensão legal ( $B_5$ ) e às dimensões da sustentabilidade ( $B_6$ ), após completá-las apropriadamente.

$$\begin{aligned}
b_{Bj1} &= [3 \ 1 \ 5 \ 5 \ 9 \ 1 \ 5 \ 7 \ 3 \ 7 \ 7 \ 9]; \\
b_{jW1}^T &= [7 \ 9 \ 5 \ 3 \ 7 \ 7 \ 3 \ 1 \ 7 \ 5 \ 3 \ 3]; \\
C.R. &= 0,0174.
\end{aligned} \tag{20}$$

$$\begin{aligned}
b_{Bj2} &= [3 \ 5 \ 5 \ 5 \ 1 \ 3 \ 1 \ 1 \ 1]; \\
b_{jW2}^T &= [7 \ 5 \ 5 \ 5 \ 9 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7]; \\
C.R. &= 0,0293.
\end{aligned} \tag{21}$$

$$\begin{aligned}
b_{Bj3} &= [5 \ 1 \ 3 \ 1 \ 3 \ 1 \ 5 \ 1 \ 1]; \\
b_{jW3}^T &= [7 \ 9 \ 7 \ 9 \ 5 \ 9 \ 1 \ 9 \ 9]; \\
C.R. &= 0,0109.
\end{aligned} \tag{22}$$

$$\begin{aligned}
b_{Bj4} &= [1 \ 5 \ 5 \ 1 \ 1 \ 5 \ 5]; \\
b_{jW4}^T &= [9 \ 7 \ 7 \ 7 \ 7 \ 1 \ 5]; \\
C.R. &= 0,0200.
\end{aligned} \tag{23}$$

$$B_5 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 1 & 5 & 1/7 \\ 1/5 & 1 & 5 & 1 & 1/5 \\ 1 & 1/5 & 1 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 7 & 5 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0,5002. \tag{24}$$

$$B_6 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 & 1/3 \\ 1 & 1 & 1/5 & 1/3 & 3 \\ 1 & 5 & 1 & 5 & 5 \\ 1/3 & 3 & 1/5 & 1 & 1/5 \\ 3 & 1/3 & 1/5 & 5 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0,3999. \tag{25}$$

Como já comentado anteriormente, os julgamentos realizados utilizando o método BWM sempre são consistentes. Mesmo assim, os pares de vetores referentes às comparações realizadas nas dimensões social (20), econômica (21), ambiental (22) e tecnológica (23) tiveram seus valores de C.R. calculados e foi verificado que se encontram bem próximos de zero, mostrando que as comparações em cada uma destas dimensões da sustentabilidade tiveram um alto grau de consistência. No caso dos julgamentos realizados utilizando o método AHP, entretanto, foi verificado que tanto na matriz de comparações pareadas relativas à dimensão

legal (24) quanto na matriz referente à comparação entre as dimensões da sustentabilidade (25) a razão de consistência foi superior a 0,10, não sendo atendido o critério do método para validar as matrizes.

Por isso, foi aplicado novamente o questionário para que o tomador de decisão pudesse realizar uma nova rodada de comparações pareadas para os grupos referentes aos KPIs da dimensão legal da sustentabilidade e às dimensões da sustentabilidade, formando duas novas matrizes de comparações ( $B'_5$  e  $B'_6$ , respectivamente).

$$B'_5 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 3 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0,2181. \quad (26)$$

$$B'_6 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1 & 1 & 3 & 3 \\ 1 & 1 & 1 & 3 & 1 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 & 1/3 \\ 1 & 1/3 & 1 & 3 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0,0909. \quad (27)$$

Como pode ser observado, a matriz de comparações pareadas  $B'_6$  teve sua razão de consistência menor que 0,10. Entretanto, a matriz  $B'_5$  ainda teve sua consistência acima do valor limite. Desta forma, para eliminar o excesso de inconsistência em suas comparações pareadas, foram verificados os maiores termos  $(w_j \cdot a_{ij})/w_i$  obtidos durante o cálculo do CR para esta matriz para que a nova aplicação do questionário pudesse se dar de maneira dirigida. Assim, foram identificados que os termos  $a_{41}$  (autuações MTE em relação a NR12.4),  $a_{52}$  (treinamento em segurança no trabalho em relação a processos trabalhistas) e  $a_{54}$  (treinamento em segurança no trabalho em relação a autuações MTE) deveriam ser revistos pelo tomador de decisão, de maneira a preservar o que ele pensava sobre a relação entre esses KPIs, mas que levasse em consideração as respostas que já havia dado.

Estas três comparações pareadas foram refeitas e foi obtida a nova matriz  $B''_5$  (28), além de calculada sua razão de consistência (C.R.). Os termos alterados em relação à versão anterior da matriz estão em destaque.

$$B''_5 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 3 & 2 & 3 \\ 1/5 & 1 & 1 & 1 & 2 \\ 1/3 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1/2 & 1 & 1 & 1 & 1/2 \\ 1/3 & 1/2 & 1/3 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \quad C.R. = 0,0965. \quad (28)$$

Finalmente, calculando-se o C.R., verificou-se que ficou abaixo de 0,10, validando a matriz  $B''_5$  para os cálculos posteriores. Assim, para se obter os vetores de prioridades no item seguinte, serão utilizados os pares de vetores presentes em (20), (21), (22) e (23) e as matrizes  $B''_5$  (28) e  $B'_6$  (27).

#### 4.3.5 Quinto Passo (Caso B) – Obtenção dos vetores de prioridades

Seguindo adiante, o quinto passo consistiu no cálculo para a obtenção dos vetores de prioridades de cada par de vetores e de cada matriz de comparações pareadas para o caso B, sendo que, para estes, foi utilizado o método das médias geométricas expresso na Equação (4), enquanto que para aqueles foi utilizado o problema de otimização expresso no sistema de equações (12). Os dados estão presentes nas Tabelas 31 a 36 abaixo. Neste passo, a soma das prioridades dentro de cada um dos seis grupos é aproximadamente igual a um.

Tabela 31 – Prioridades relativas das dimensões da sustentabilidade

Dimensão (código)	Valor da prioridade calculada
Dimensão social (A)	0.28430
Dimensão econômica (B)	0.22822
Dimensão ambiental (C)	0.22822
Dimensão tecnológica (D)	0.07607
Dimensão legal (E)	0.18320
<b>SOMA</b>	<b>1.00001</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 32 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão social da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Insalubridade (A1)	0.10287
Risco de acidentes (A2)	0.21718
Treinamento (A3)	0.06172
Nível de escolaridade (A4)	0.06172
Taxa de Frequência (A5)	0.03429
Taxa de Gravidade (A6)	0.21718
Grau de Satisfação (A7)	0.06172
Nível Salarial (A8)	0.01796
Periculosidade (A9)	0.10287
Ergometria (A10)	0.04409
Rotatividade (A11)	0.04409
Absenteísmo (A12)	0.03429
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 33 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão econômica da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Custo com acidentes (B1)	0.10204
Custo com absenteísmo (B2)	0.06122
Custo com rotatividade (B3)	0.06122
Custo com treinamento (B4)	0.06122
Custo com não-conformidade (B5)	0.15306
Custo com mão de obra (B6)	0.10204
Custo com energia elétrica (B7)	0.15306
Custo com consumo de água (B8)	0.15306
Custo com matéria-prima (B9)	0.15306
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 34 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão ambiental da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Treinamento ambiental (C1)	0.03610
Resíduos perigosos (C2)	0.12350
Resíduos inertes e não-inertes (C3)	0.06016

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Emissões atmosféricas (C4)	0.17669
Plano de emergência para acidentes ambientais (C5)	0.06016
Eficiência no uso da água (C6)	0.17669
Emissão de água residual (C7)	0.01330
Descarte de água residual (C8)	0.17669
Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (C9)	0.17669
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 35 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão tecnológica da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
Nível de automação (D1)	0.22648
Programa 5S ou similar (D2)	0.06620
Kaizen (D3)	0.06620
Gestão de manutenção (D4)	0.27526
Gestão de qualidade (D5)	0.27526
Motores de alta performance (D6)	0.02439
Treinamento operacional (D7)	0.06620
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Tabela 36 – Prioridades relativas dos KPIs da dimensão legal da sustentabilidade

Nome do KPI (código)	Valor da prioridade calculada
NR 12.4 (E1)	0.43192
Processos trabalhistas (E2)	0.14621
Autuações ambientais (E3)	0.17561
Autuações MTE (E4)	0.13309
Treinamento em segurança no trabalho (E5)	0.11316
<b>SOMA</b>	<b>1.00000</b>

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.3.6 Sexto Passo (Caso B) – Cálculo das importâncias relativas finais

O sexto passo consistiu no cálculo das importâncias relativas finais de cada KPI. Isso se dá multiplicando a prioridade de cada KPI, presentes nas Tabelas 32 a 36, pela prioridade da dimensão da sustentabilidade à qual ele está atrelado, presente na Tabela 31. Ou seja, multiplicar a prioridade de cada KPI pela prioridade do item que está localizado um nível acima de cada KPI na estrutura hierárquica representada na Figura 6. Desta forma, temos as seguintes prioridades relativas finais de cada KPI para o caso B, dispostas na Tabela 37. Posteriormente, estes dados foram validados pelo especialista, de modo que condizem com as necessidades e visão da empresa B.

Tabela 37 – Tabela com as prioridades relativas finais de cada KPI para o caso B

Dimensão	Peso da dimensão	KPI	Peso inicial	Prioridade relativa final	Prioridade relativa final (%)
Social	0.28430	Insalubridade (A1)	0.10287	0.02925	2.925%
		Risco de acidentes (A2)	0.21718	0.06174	6.174%
		Treinamento (A3)	0.06172	0.01755	1.755%
		Nível de escolaridade (A4)	0.06172	0.01755	1.755%
		Taxa de Frequência (A5)	0.03429	0.00975	0.975%
		Taxa de Gravidade (A6)	0.21718	0.06174	6.174%
		Grau de Satisfação (A7)	0.06172	0.01755	1.755%
		Nível Salarial (A8)	0.01796	0.00511	0.511%
		Periculosidade (A9)	0.10287	0.02925	2.925%
		Ergometria (A10)	0.04409	0.01253	1.253%
		Rotatividade (A11)	0.04409	0.01253	1.253%
		Absenteísmo (A12)	0.03429	0.00975	0.975%
Econômica	0.22822	Custo com acidentes (B1)	0.10204	0.02329	2.329%
		Custo com absenteísmo (B2)	0.06122	0.01397	1.397%
		Custo com rotatividade (B3)	0.06122	0.01397	1.397%
		Treinamento (B4)	0.06122	0.01397	1.397%
		Custo com não-conformidade (B5)	0.15306	0.03493	3.493%
		Custo com mão de obra (B6)	0.10204	0.02329	2.329%
		Custo com energia elétrica (B7)	0.15306	0.03493	3.493%
		Custo com consumo de água (B8)	0.15306	0.03493	3.493%
Ambiental	0.22822	Treinamento ambiental (C1)	0.03610	0.00824	0.824%

Dimensão	Peso da dimensão	KPI	Peso inicial	Prioridade relativa final	Prioridade relativa final (%)
		Resíduos perigosos (C2)	0.12350	0.02818	2.818%
		Resíduos inertes e não-inertes (C3)	0.06016	0.01373	1.373%
		Emissões atmosféricas (C4)	0.17669	0.04032	4.032%
		Plano de emergência para acidentes ambientais (C5)	0.06016	0.01373	1.373%
		Eficiência no uso da água (C6)	0.17669	0.04032	4.032%
		Emissão de água residual (C7)	0.01330	0.00304	0.304%
		Descarte de água residual (C8)	0.17669	0.04032	4.032%
		Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (C9)	0.17669	0.04032	4.032%
Tecnológica	0.07607	Nível de automação (D1)	0.22648	0.01723	1.723%
		Programa 5S ou similar (D2)	0.06620	0.00504	0.504%
		Kaizen (D3)	0.06620	0.00504	0.504%
		Gestão de manutenção (D4)	0.27526	0.02094	2.094%
		Gestão de qualidade (D5)	0.27526	0.02094	2.094%
		Motores de alta performance (D6)	0.02439	0.00186	0.186%
		Treinamento operacional (D7)	0.06620	0.00504	0.504%
Legal	0.18320	NR 12.4 (E1)	0.43192	0.07913	7.913%
		Processos trabalhistas (E2)	0.14621	0.02679	2.679%
		Autuações ambientais (E3)	0.17561	0.03217	3.217%
		Autuações MTE (E4)	0.13309	0.02438	2.438%
		Treinamento em segurança no trabalho (E5)	0.11316	0.02073	2.073%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

#### 4.4 ANÁLISE DOS DADOS

Murad (2020) organiza os KPIs propostos para se analisar a sustentabilidade de uma etapa de processo de manufatura a partir de cinco dimensões distintas: social, econômica, ambiental, tecnológica e legal. As três primeiras compõem o TBL e já são consagradas na literatura por conseguirem descrever os principais aspectos da sustentabilidade (ELKINGTON, 1997). Já as dimensões tecnológica e legal foram inspiradas em discussões realizadas por Jovane, Westkamper e Williams (2009). A dimensão tecnológica é relevante, uma vez que o

desenvolvimento tecnológico pode se dar de maneira a favorecer a elaboração de processos mais sustentáveis, enquanto a dimensão legal, ou política, se refere à capacidade facilitadora de agentes legisladores em se estabelecer limites mais sustentáveis para os processos produtivos (MURAD, 2020).

Como consequência disso, podemos analisar a composição dos KPIs nestas dimensões da sustentabilidade. Os KPIs nível de automação, programa 5S ou similar, Kaizen, gestão de manutenção, gestão da qualidade, motores de alta performance e treinamento operacional, localizados sob a dimensão tecnológica, estão diretamente relacionados com o nível do desenvolvimento tecnológico da empresa na etapa de processo analisada, bem como com o cuidado com o ambiente de trabalho e com os equipamentos em si, visando sempre o ganho de eficiência dos processos. Já os KPIs localizados sob a dimensão legal da sustentabilidade – NR12.4, processos trabalhistas, autuações ambientais, autuações MTE e treinamento em segurança no trabalho – estimulam, seja de maneira preventiva ou ostensiva, a garantia da adequação da empresa às normas vigentes que visem uma maior sustentabilidade da etapa de processo analisada.

Para possibilitar algumas análises, a partir dos estudos dos casos A e B, as Tabelas 20 e 37 foram compiladas na Tabela 38 abaixo de modo que os KPIs ponderados em ambos os casos estão dispostos em ordem decrescente de prioridade relativa. Os itens 4.4.1 e 4.4.2 localizados logo em seguida irão conter, respectivamente, as análises específicas dos casos A e B, enquanto o item 4.4.3 irá conter alguns elementos referentes ao modelo utilizado e a características em comum entre ambos os casos, todos referentes ao passo 7 da aplicação do modelo proposto para cada caso

Tabela 38 – Prioridades relativas dos KPIs dos dois casos analisados, em ordem decrescente

#	KPIs – Caso A	Prioridade relativa final (%)	#	KPIs – Caso B	Prioridade relativa final (%)
1°	<u>Resíduos perigosos (C2)</u>	<u>9.711%</u>	1°	<u>NR 12.4 (E1)</u>	<u>7.913%</u>
2°	<u>Risco de acidentes (A2)</u>	<u>9.435%</u>	2°	<u>Taxa de Gravidade (A6)</u>	<u>6.174%</u>
3°	<u>Custo com mão de obra (B6)</u>	<u>7.763%</u>		<u>Risco de acidentes (A2)</u>	<u>6.174%</u>
4°	<u>Custo com acidentes (B1)</u>	<u>7.102%</u>	4°	<u>Eficiência no uso da água (C6)</u>	<u>4.032%</u>
5°	<u>Gestão de manutenção (D4)</u>	<u>6.430%</u>		<u>Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (C9)</u>	<u>4.032%</u>

#	KPIs – Caso A	Prioridade relativa final (%)	#	KPIs – Caso B	Prioridade relativa final (%)
	<u>Treinamento operacional (D7)</u>	<u>6.430%</u>		<u>Emissões atmosféricas (C4)</u>	<u>4.032%</u>
7°	<u>Nível de automação (D1)</u>	<u>5.469%</u>		<u>Descarte de água residual (C8)</u>	<u>4.032%</u>
8°	<u>Custo com matéria-prima (B9)</u>	<u>3.799%</u>	8°	<u>Custo com não-conformidade (B5)</u>	<u>3.493%</u>
9°	<u>Gestão de qualidade (D5)</u>	<u>3.786%</u>		<u>Custo com consumo de água (B8)</u>	<u>3.493%</u>
10°	<u>NR 12.4 (E1)</u>	<u>2.865%</u>		<u>Custo com matéria-prima (B9)</u>	<u>3.493%</u>
	<u>Processos trabalhistas (E2)</u>	<u>2.865%</u>		<u>Custo com energia elétrica (B7)</u>	<u>3.493%</u>
	<u>Autuações ambientais (E3)</u>	<u>2.865%</u>	12°	<u>Autuações ambientais (E3)</u>	<u>3.217%</u>
	<u>Autuações MTE (E4)</u>	<u>2.865%</u>	13°	<u>Periculosidade (A9)</u>	<u>2.925%</u>
	<u>Treinamento em segurança no trabalho (E5)</u>	<u>2.865%</u>		<u>Insalubridade (A1)</u>	<u>2.925%</u>
15°	<u>Emissão de Gases do Efeito Estufa (GEE) (C9)</u>	<u>2.679%</u>	15°	<u>Resíduos perigosos (C2)</u>	<u>2.818%</u>
16°	<u>Emissão de água residual (C7)</u>	<u>2.232%</u>	16°	<u>Processos trabalhistas (E2)</u>	<u>2.679%</u>
	<u>Descarte de água residual (C8)</u>	<u>2.232%</u>	17°	<u>Autuações MTE (E4)</u>	<u>2.438%</u>
18°	<u>Eficiência no uso da água (C6)</u>	<u>1.914%</u>	18°	<u>Custo com mão de obra (B6)</u>	<u>2.329%</u>
	<u>Plano de emergência para acidentes ambientais (C5)</u>	<u>1.914%</u>		<u>Custo com acidentes (B1)</u>	<u>2.329%</u>
	<u>Emissões atmosféricas (C4)</u>	<u>1.914%</u>	20°	<u>Gestão de manutenção (D4)</u>	<u>2.094%</u>
21°	<u>Resíduos inertes e não-inertes (C3)</u>	<u>1.674%</u>		<u>Gestão de qualidade (D5)</u>	<u>2.094%</u>
22°	<u>Treinamento (A3)</u>	<u>1.490%</u>	22°	<u>Treinamento em segurança no trabalho (E5)</u>	<u>2.073%</u>
23°	<u>Programa 5S ou similar (D2)</u>	<u>1.262%</u>	23°	<u>Grau de Satisfação (A7)</u>	<u>1.755%</u>
24°	<u>Custo com consumo de água (B8)</u>	<u>1.156%</u>		<u>Nível de escolaridade (A4)</u>	<u>1.755%</u>
	<u>Custo com não-conformidade (B5)</u>	<u>1.156%</u>		<u>Treinamento (A3)</u>	<u>1.755%</u>

#	KPIs – Caso A	Prioridade relativa final (%)	#	KPIs – Caso B	Prioridade relativa final (%)
	Custo com rotatividade (B3)	1.156%	26°	Nível de automação (D1)	1.723%
	Custo com energia elétrica(B7)	1.156%	27°	Custo com rotatividade (B3)	1.397%
	Treinamento (B4)	1.156%		Treinamento (B4)	1.397%
29°	Motores de alta performance (D6)	1.082%		Custo com absenteísmo (B2)	1.397%
30°	Taxa de Frequência (A5)	0.856%	30°	Resíduos inertes e não-inertes (C3)	1.373%
31°	Treinamento ambiental (C1)	0.670%		Plano de emergência para acidentes ambientais (C5)	1.373%
32°	Taxa de Gravidade (A6)	0.648%	32°	Ergometria (A10)	1.253%
	Grau de Satisfação (A7)	0.648%		Rotatividade (A11)	1.253%
	Ergometria (A10)	0.648%	34°	Absenteísmo (A12)	0.975%
	Periculosidade (A9)	0.648%		Taxa de Frequência (A5)	0.975%
	Rotatividade (A11)	0.648%	36°	Treinamento ambiental (C1)	0.824%
	Absenteísmo (A12)	0.648%	37°	Nível Salarial (A8)	0.511%
	Insalubridade (A1)	0.648%	38°	Programa 5S ou similar (D2)	0.504%
	Nível Salarial (A8)	0.648%		Kaizen (D3)	0.504%
40°	Nível de escolaridade (A4)	0.607%		Treinamento operacional (D7)	0.504%
41°	Custo com absenteísmo (B2)	0.495%	41°	Emissão de água residual (C7)	0.304%
42°	Kaizen (D3)	0.481%	42°	Motores de alta performance (D6)	0.186%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Nota: Os KPIs que possuem prioridade relativa superior ao valor de referência de 2,381% estão sublinhados.

#### 4.4.1 Análise dos dados do caso A

Em relação às prioridades obtidas dos KPIs, cujo conjunto analisado é extenso, mais profícuo que analisar apenas o primeiro e/ou o segundo KPI mais importante para cada caso analisado, por exemplo, foi analisar os resultados como um todo, a partir de certas categorizações que se mostraram pertinentes para mostrar suas relações de maneira mais relevante.

Considerando que a soma total de todos os pesos é de aproximadamente 100% para cada caso, foi obtido um valor percentual de ponderação em relação ao total para cada KPI, a partir da multiplicação entre seus pesos obtidos diretamente dos pares de vetores ou matrizes correspondentes e os pesos da dimensão da sustentabilidade ao qual eles estão ligados na estrutura hierárquica proposta. Desta forma, foi possível ranqueá-los tal qual apresentado na Tabela 38.

Para o caso A, os cinco KPIs que mais influenciam a sustentabilidade na empresa dentre os 42 KPIs comparados, de acordo com os tomadores de decisão, são, em ordem decrescente, resíduos perigosos (C2), risco de acidentes (A2), custo com mão de obra (B6), custo com acidentes (B1) e gestão de manutenção (D4), cuja soma é igual a 40,442%. É digno de nota que, caso os 42 KPIs tivessem pesos iguais, como em Murad (2020), cada um teria um peso de aproximadamente 2,381%, e cinco deles teriam o peso combinado de 11,905%, o que faz com que, proporcionalmente, estes cinco KPIs de fato despontem dos demais. Também é importante notar que estes cinco KPIs pertencem a quatro dimensões da sustentabilidade distintas e, mesmo que elas próprias tenham pesos bastante distintos, variando de 10,856% a 24,940%, não impediu que a dimensão com menor peso – social – pudesse colocar um KPI como um dos mais importantes, mostrando que no caso A, da maneira como foi estruturado, a ponderação de elementos localizados em posições hierárquicas elevadas não influencia de maneira total a ponderação dos elementos localizados abaixo.

Dentre os 42 KPIs comparados, para o caso A, 15 deles obtiveram pesos acima do valor de referência de 2,381%, ou seja, 15 KPIs possuem pesos acima do que seria o valor médio caso tivesse sido atribuído o mesmo peso a todos os 42 KPIs. Dividindo-os em relação às dimensões da sustentabilidade a que pertencem e somando-os por dimensão, tem-se as seguintes somas para cada uma: 9,435% para a dimensão social, 18,664% para a dimensão econômica, 12,390% para a dimensão ambiental, 22,115% para a dimensão tecnológica e 14,324% para a dimensão legal. A prioridade somada destes 15 KPIs tem o valor de 76,929%, o que significa que aproximadamente 1/3 dos KPIs são responsáveis por aproximadamente 3/4 de toda a preocupação com a sustentabilidade.

Dentre estes 15 KPIs, frisa-se que estão todos os 5 KPIs da dimensão legal da sustentabilidade. Isso se deve ao fato de que os tomadores de decisão atribuíram pesos iguais aos cinco na respectiva matriz de comparação pareada (Equação 18) e, além disso, ao fato de que, ao realizar as comparações pareadas entre as dimensões da sustentabilidade, a prioridade relativa da dimensão legal foi tal que permitiu que o peso final de cada um de seus KPIs fosse

superior a 2,381%, sendo igual a 2,865%. Como todos os cinco KPIs têm relação com o atendimento a normas e legislações, é compreensível que os tomadores de decisão optem por dar o mesmo peso a eles, uma vez que a intenção da empresa pode ser simplesmente o de atender devidamente às normas, evitando possíveis autuações.

Para além de analisar os KPIs dentro de suas respectivas dimensões da sustentabilidade, é importante utilizar algumas formas alternativas de classificação para verificar alguns detalhes das percepções dos tomadores de decisão quanto a algumas prioridades na sustentabilidade. Por exemplo, é possível verificar que existem 5 KPIs que fazem menção a “treinamento”, ou seja, têm a ver com a capacitação dos trabalhadores envolvidos na etapa de processo analisada: treinamento (A3), custo com treinamento (B4), treinamento ambiental (C1), treinamento operacional (D7) e treinamento em segurança no trabalho (E5). A soma das prioridades relativas destes KPIs no caso A é de 12,611%, ligeiramente maior que o valor de referência para cinco KPIs, que é 11,905%, mostrando que a empresa A possui uma preocupação relevante em capacitar seus trabalhadores na etapa de processo analisada.

Outra forma alternativa de classificação relevante guarda relação com a segurança no trabalho, uma vez que KPIs de três dimensões da sustentabilidade distintas se relacionariam direta e indiretamente com este tema. Ao menos nove KPIs foram identificados de modo a pertencer a essa categoria, sendo eles risco de acidentes (A2), custo com acidentes (B1), NR12.4 (E1), treinamento em segurança no trabalho (E5), taxa de frequência (A5), taxa de gravidade (A6), ergometria (A10), periculosidade (A9) e insalubridade (A1): para além dos KPIs que tratam diretamente sobre acidentes de trabalho (A2, B1, A5 e A6), estão aqui contidos também aqueles que tratam da prevenção de acidentes (E1 e E5), bem como de riscos ocupacionais, contidos em Normas Regulamentadoras (A1, A9 e A10) (MTE, 2019). A soma entre eles é igual a 25,717% e, comparando com o valor de referência (que seria o valor de referência para um KPI caso todos tivessem o mesmo peso multiplicado pelo número de KPIs da soma) de 21,429%, é possível perceber que também para esse agrupamento alternativo de KPIs os tomadores de decisão da empresa A têm uma preocupação importante com a segurança dos trabalhadores envolvidos na etapa de processo analisada e, além disso, relacionam a segurança no trabalho com a sustentabilidade.

#### **4.4.2 Análise dos dados do caso B**

Analogamente à análise do caso A, serão investigados os resultados obtidos na ponderação dos KPIs para o caso B, que também estão contidos na Tabela 38, não de maneira individual, mas como um todo, procurando relações que auxiliem na interpretação dos dados.

Os cinco KPIs que mais influenciam a sustentabilidade, segundo os tomadores de decisão da empresa B, são, em ordem decrescente, NR12.4 (E1), taxa de gravidade (A6), risco de acidentes (A2), eficiência no uso da água (C6) e emissão de gases do efeito estufa (C9), cuja soma é igual a 28,326%. Importante notar que o valor de referência para cinco KPIs, já calculado no item anterior, é igual a 11,905%, o que mostra que a distribuição de pesos está menos concentrada do que no caso A, mas ainda assim seus pesos são bem superiores ao valor de referência caso os KPIs tivessem todos o mesmo peso. Estes cinco KPIs pertencem a três dimensões da sustentabilidade diferentes, cujos pesos variam entre 18,320% e 28,430%, sendo que a dimensão legal possui o menor destes pesos, o que não impediu que o KPI NR12.4 figurasse como o mais importante em relação aos demais. Isso foi possível uma vez que o peso relativo deste KPI em relação aos demais da mesma dimensão teve um valor elevado. Como no caso A, isso revela que nenhum dos dois elementos (o peso da dimensão e o peso relativo do KPI dentro da dimensão analisada) é totalmente determinante no desempenho de cada KPI.

Dentre os 42 KPIs, 17 obtiveram pesos acima do valor de referência de 2,381%. Dividindo-os em relação às dimensões da sustentabilidade a que pertencem e somando-os por dimensão, tem-se as seguintes somas para cada uma: 18,198% para a dimensão social, 13,972% para a dimensão econômica, 18,948% para a dimensão ambiental, 16,247% para a dimensão legal e 0% para a dimensão tecnológica, resultando numa soma de 67,365%. Ou seja, os aproximadamente 40% dos KPIs mais importantes possuem um peso de aproximadamente 2/3 de toda a sustentabilidade. Chama a atenção que, dentre os 17 KPIs com pesos acima do valor de referência, nenhum é da dimensão tecnológica, muito por conta do peso atribuído à dimensão como um todo – 7,607%. Uma suposição é que a etapa de processo analisada já tenha atingido um bom nível de desenvolvimento tecnológico, a ponto que outros aspectos do processo mereçam mais atenção por parte da empresa, e contribuam mais para a sustentabilidade, que os KPIs dessa dimensão.

Analogamente à análise do caso A, ao menos nove KPIs foram identificados de modo a pertencer à categoria de segurança no trabalho, sendo eles risco de acidentes (A2), custo com acidentes (B1), NR12.4 (E1), treinamento em segurança no trabalho (E5), taxa de frequência (A5), taxa de gravidade (A6), ergometria (A10), periculosidade (A9) e insalubridade (A1), inclusive com 3 deles figurando entre os mais importantes no caso B. A soma destes nove é

igual a 32,741%, praticamente um terço do total, o que mostra uma elevada preocupação com a segurança dos trabalhadores da empresa.

#### 4.4.3 Análise do modelo e de demais aspectos

O modelo AHP-BWM proposto traz algumas vantagens e inovações. Em relação ao modelo originalmente proposto por Moslem et al. (2020a), ele havia sido utilizado até então apenas para avaliar o comportamento de motoristas ou a qualidade do transporte público, sendo a primeira vez que seria utilizado para a ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em uma etapa de processo de manufatura e, como temos visto no decorrer de sua aplicação, funcionou de maneira satisfatória.

Outra alteração em relação ao modelo proposto por Moslem et al. (2020a) foi no critério de seleção do método a ser utilizado. Como já abordado, Moslem et al. (2020a) estabeleceram que, para grupos com elementos  $n \leq 4$ , o método AHP deveria ser utilizado, senão, caso  $n > 4$ , deveria ser utilizado o método BWM. Entretanto, caso tomássemos este critério para este trabalho, com os KPIs e estrutura hierárquica definidos da maneira como foi apresentado nos estudos de caso, surgiriam duas situações que demandariam uma resolução. Primeiramente, por não haver nenhum grupo com quatro ou menos elementos, seria utilizado apenas o método BWM, comprometendo a verificação do devido funcionamento do modelo conjunto AHP-BWM. Em segundo lugar, o BWM também seria utilizado no grupo formado pelas dimensões da sustentabilidade, o que exigiria dos tomadores de decisão que escolhessem a dimensão da sustentabilidade “mais importante” e a “menos importante”, em relação à sustentabilidade geral, o que não era desejável para a aplicação do modelo neste grupo de critérios. Assim, idealmente, seria melhor que o método utilizado para este grupo, independentemente do número de elementos, fosse o AHP.

Desta forma, foram investigadas as motivações que levaram Moslem et al. (2020a) a estabelecer este corte no valor de  $n$  para o uso de um ou outro método. Sendo assim, a partir da revisão feita no item 2.2.3, verificou-se que seria possível estabelecer que, para  $n \leq 5$ , poderia ser utilizado o método AHP, e para  $n > 5$ , o método BWM, sem qualquer prejuízo sensível, e de modo que o modelo poderia ser devidamente implementado nos estudos de caso escolhidos. Assim, tanto o grupo dos KPIs da dimensão legal quanto o grupo das dimensões da sustentabilidade poderiam ser avaliados a partir do método AHP, de modo que, também, a

quantidade de comparações não aumentaria consideravelmente, além de se obter mais informações a partir das comparações efetuadas nestes grupos.

Em relação à quantidade de comparações pareadas efetuadas, como já foi mencionado, para cada aplicação do modelo mostrada foram realizadas 82 comparações com o uso combinado dos métodos AHP e BWM. Considerando que, para cada grupo de  $n$  elementos, teríamos  $n(n - 1)/2$  comparações pareadas caso tivéssemos utilizado apenas o método AHP, teria sido necessário efetuar 179 comparações, mais que o dobro das efetuadas a partir do modelo AHP-BWM. Ou seja, o modelo garante mais rapidez na aplicação do questionário. Também, dada a formulação realizada para a obtenção das prioridades relativas, possibilita a implementação de programas computacionais para que se torne ainda mais prático o cálculo dos pesos dos KPIs.

Em relação à consistência das comparações pareadas realizadas tanto pelo método AHP quanto pelo método BWM, percebeu-se que foi um parâmetro importante para a validação das mesmas. O método BWM, por definição, sempre retorna resultados consistentes (REZAEI, 2015), mas mesmo assim fornece um cálculo para saber o grau dessa consistência. Assim, foi possível verificar que todos os pares de vetores avaliados de ambos os casos tiveram um C.R. de, no máximo, 0,0305 (valor referente à consistência do par de vetor de comparações pareadas do grupo de KPIs da dimensão social do caso A), valor este que é muito próximo de zero, demonstrando que os tomadores de decisão, nestes casos, conseguiram utilizar satisfatoriamente o método BWM para realizar as comparações pareadas de modo que o resultado final tivesse alto grau de coerência.

Já o método AHP possui uma limitação metodológica para que as comparações pareadas sejam validadas, uma vez que o valor da razão de consistência (C.R.) não pode ultrapassar 0,10 em cada matriz (SAATY, 1994). No caso A, tanto a matriz  $A_5$  quanto a matriz  $A_6$  são consideradas consistentes, uma vez que atenderam a esse requisito. Para o caso B, no entanto, foram verificadas inconsistências relevantes em ambas as matrizes  $B_5$  e  $B_6$ . Procedeu-se, então, a uma nova rodada de comparações pareadas nesses mesmos grupos com o objetivo de reduzir o C.R. de suas respectivas matrizes. A matriz referente às dimensões da sustentabilidade conseguiu alcançar o grau de consistência necessário ( $B'_6$ ), porém a matriz de comparações pareadas dos KPIs da dimensão legal ( $B'_5$ ) continuou com alto valor de C.R. Assim, para que a nova tentativa tivesse mais chances de sucesso, foram investigados quais os termos eram as maiores fontes de inconsistência, a partir do cálculo de todos os termos  $(w_j \cdot a_{ij})/w_i$  da matriz  $B'_5$ : os termos  $a_{41}$  (autuações MTE em relação a NR12.4),  $a_{52}$  (treinamento em segurança no

trabalho em relação a processos trabalhistas) e  $a_{54}$  (treinamento em segurança no trabalho em relação a autuações MTE). Desta forma, eles deveriam ser revistos pelos tomadores de decisão, de maneira a preservar o que eles pensam sobre a relação entre esses KPIs, mas que levassem em consideração as respostas que já haviam dado, de modo a alterar apenas a intensidade das comparações. Assim, obteve-se a nova matriz  $B''_5$ , com valor de C.R. igual a 0,0965, atendendo o requisito estabelecido. Esta situação de inconsistência demonstra que nem sempre ela ocorre quando falta a experiência necessária para os tomadores de decisão, podendo ser apenas um requisito matemático; no entanto, este requisito é o que garante a validade das comparações e da obtenção *a posteriori* das prioridades relativas dos KPIs envolvidos. Demonstra também uma das fragilidades do método AHP, que pode apresentar inconsistências mesmo em matrizes de ordem baixa, como foi o caso.

Um dos pontos de importantes da aplicação do modelo foi a utilização da perspectiva *top-down* na ponderação dos KPIs. Geralmente utilizada como estratégia de gestão para elaboração de planos de ação, baseada em tomadas de decisão com fluxo descendente na hierarquia da empresa, ela pode ser utilizada de maneira positiva na aplicação do modelo proposto neste trabalho.

O escopo deste trabalho é a ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura, mas a escolha por realizar esta ponderação com a estratégia *top-down*, sempre tendo em mente a sustentabilidade da empresa como um todo ao se realizar as comparações pareadas, permitiu que esta mesma ponderação seja utilizada para qualquer etapa de processo da empresa. A variação da mensuração da sustentabilidade entre cada processo caberia, apenas, à variação da mensuração dos KPIs para cada processo. Isso garante uma grande facilidade na aplicação do modelo em uma determinada empresa, uma vez que possui a capacidade de ser intercambiável entre os diversos processos, aproveitando a mesma ponderação para todos eles. Outra vantagem da estratégia *top-down* é a maior agilidade na tomada de decisões, por elas se darem de maneira mais centralizada (SIGGELKOW; LEVINTHAL, 2003).

Segundo Kim, Sting e Loch (2014), baseando-se nas características competitivas em um determinado ramo de negócios, cada empresa irá escolher um plano de ação com critérios escolhidos que a auxiliem a alocar recursos de forma a melhorar sua performance no mercado. Isso também ajuda a explicar por que cada empresa irá escolher de maneira distinta quais KPIs são mais importantes para que ela atue de maneira mais sustentável, sendo um ponto positivo a existência de ponderação destes KPIs em qualquer método de mensuração da sustentabilidade.

Comparando o modelo AHP-BWM proposto neste trabalho com os métodos de ponderação utilizados nos estudos de avaliação de sustentabilidade em processos de manufatura levantados no Quadro 1, tanto utilizando métodos de decisão multicritérios (PENG et al., 2019; ZHANG; HAAPALA, 2015) quanto utilizando outros tipos de métodos (HUANG; BADURDEEN, 2018; LU; JAWAHIR, 2015; QIAN; HUANG; YAN, 2007), ele se coloca como uma opção viável por aliar o método AHP, largamente utilizado em diversas áreas, com o método BWM, que vem sendo cada vez mais utilizado por reduzir consideravelmente o número de comparações pareadas e não possuir limite metodológico para consistência.

Em relação às dimensões da sustentabilidade, no caso A, as dimensões econômica, ambiental e tecnológica tiveram os maiores pesos, no valor de 24,94% cada, enquanto que no caso B a dimensão social figurou como a mais importante, tendo um peso de 28,43%, seguida pelas dimensões ambiental e econômica, ambas com 22,822%. Uma vez que as dimensões ambiental e econômica são comuns às duas empresas dentre as dimensões mais importantes, é importante notar que, no caso A, a dimensão tecnológica aparece, demonstrando uma preocupação e uma necessidade por parte da empresa A em modernizar o seu aparato tecnológico de maneira a respeitar a sustentabilidade. Já na empresa B, a dimensão social aparece entre as mais importantes, o que é compreensível para uma empresa multinacional, visto que é possível que já tenha alcançado um certo nível de desenvolvimento tecnológico e, uma vez que está presente em diversos países, precisa se atentar a questões trabalhistas e de segurança, inclusive para manter uma imagem positiva para atuais e futuros investidores.

Um ponto de versatilidade no trabalho de Murad (2020) é a utilização de uma lista pré-definida de KPIs, a serem apresentados às empresas. A princípio, visando a objetividade e a dinamicidade do ambiente empresarial, e também a possibilidade de comparação da sustentabilidade de uma mesma etapa de processo em empresas e organizações distintas, uma lista pré-definida de critérios facilita a aplicação de seu método e garante praticidade. Por outro lado, caso os gestores da empresa percebam a necessidade em se alterar a composição dos KPIs, retirando ou acrescentando elementos, isso também se faz possível.

Em relação aos KPIs, foram identificados, simultaneamente nos dois casos, dentre os que possuem peso acima do valor de referência estabelecido (2,381%), oito KPIs, sendo eles: NR12.4 (E1), risco de acidentes (A2), emissão de gases do efeito estufa (C9), custo com matéria-prima (B9), autuações ambientais (E3), resíduos perigosos (C2), processos trabalhistas (E2) e autuações MTE (E4). Estas seriam as principais preocupações em relação à sustentabilidade de ambas as empresas. Como elas se tratam de empresas produtoras de açúcar

e álcool de grande porte, é plausível que estes KPIs tenham despontado em ambos os casos, visto que, ao pensar de maneira sustentável, as principais preocupações que surgiram foram as que tenham a ver com a segurança dos trabalhadores, com o respeito às normas vigentes, com a eficiência econômica dos processos e com o possível lançamento de resíduos prejudiciais ao ambiente.

O modelo também se coloca como uma alternativa para os estudos em que, originalmente, não há ponderação de critérios, como é o caso de Murad (2020), mas que se propõem a adotar a ponderação por entender a importância estratégica em sua utilização pelas empresas que possuam processos de manufatura. O estudo de Murad (2020) tinha como alguns de seus objetivos: propor uma mensuração individual passível de ser aplicada a qualquer etapa do processo produtivo de uma empresa, a fim de identificar pontos de melhoria, focar em etapas de processo de fabricação; obter um método que fosse flexível e de fácil e rápida aplicação; ter um método cuja metodologia conseguisse abarcar o TBL; apresentar propostas de métricas para análise individual dos KPIs. Este último ponto, destacado, é uma das grandes vantagens de seu estudo, visto que utiliza apenas KPIs quantitativos, facilmente calculáveis mediante fórmulas e normas pré-definidas, como pode ser visto no Anexo A, o que elimina a possibilidade de interferências subjetivas na avaliação de cada KPI, o que também possibilita a fácil aplicação do método proposto pelo autor em qualquer empresa que possua algum processo de manufatura. Assim, ao tomar este estudo para se aplicar o que pode ser considerada uma proposta de melhoria – uma vez que, originalmente, ele tenha utilizado pesos iguais -, a partir do uso do mesmo conjunto de KPIs e da mesma estrutura hierárquica, o presente trabalho também se beneficiou disso.

Assim, a combinação do modelo AHP-BWM de ponderação de critérios com a proposta de mensuração da sustentabilidade em etapa de processo de manufatura de Murad (2020) resultou em uma proposta de mensuração de sustentabilidade para uma etapa de processo de manufatura, com ponderação de critérios utilizando o modelo AHP-BWM, que se mostrou coesa e apta a se alinhar às escolhas estratégicas da empresa analisada.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo geral apresentar uma proposta de ponderação de critérios na mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura utilizando o modelo AHP-BWM. Para isso, os objetivos específicos foram os seguintes: efetuar uma revisão bibliográfica sobre propostas de avaliação de sustentabilidade de etapas de processo de manufatura; revisar e verificar a viabilidade da utilização de métodos de decisão multicritérios para a ponderação da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura; aplicar a proposta de avaliação da sustentabilidade em uma etapa de processo de manufatura de duas empresas e analisar os resultados decorrentes desta aplicação.

A preocupação com os impactos crescentes da ação humana no ambiente e em nossa própria sociedade com o passar dos anos motivaram diversos estudos e elaborações teóricas (BARBIERI, 2016; COMISSÃO MUNDIAL PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1987; ELKINGTON, 1997), dentre elas o desenvolvimento de formas de se mensurar este impacto, a fim de reduzi-lo, transferi-lo ou até eliminá-lo. Assim, a avaliação da sustentabilidade pode ser definida como uma maneira sistemática de se avaliar potenciais riscos adversos causados por atividade humana de forma a afetar a sustentabilidade economicamente, socialmente e ambientalmente (RÖDGER; BEY, 2019).

Um dos setores que merecem atenção para que se avalie seus impactos é a manufatura, uma vez que é um setor que engloba muitos produtos, processos e empresas e gera muitos empregos (JOVANE; WESTKAMPER; WILLIAMS, 2009). Por isso, escolheu-se como foco deste trabalho a mensuração da sustentabilidade em etapas de processos de manufatura. Dentre os diversos estudos levantados, três permitiam a utilização de ponderação de critérios e utilizavam métodos de decisão multicritérios (MURAD, 2020; WEI; RODRÍGUEZ; LI, 2019; ZHANG; HAAPALA, 2015). O de Murad (2020) foi escolhido para que pudéssemos realizar uma proposta de intervenção, uma vez que preenchia certos requisitos como KPIs estritamente quantitativos, aplicação em chão de fábrica e de maneira rápida, além de poder ser utilizado em qualquer etapa de processo de manufatura.

Para elaborar esta proposta de intervenção, foi escolhido o modelo AHP-BWM, composto pelos métodos de decisão multicritérios AHP (SAATY, 1994) e BWM (REZAEI, 2015), sendo baseado no modelo originalmente proposto por Moslem (2020a). Nele, utiliza-se a estrutura hierárquica do AHP e, a partir da formação dos diversos grupos de elementos a serem comparados, a depender da quantidade de elementos, escolhe-se se as comparações

pareadas serão realizadas utilizando o método AHP ou o método BWM. Este modelo traz a vantagem de diminuir consideravelmente a quantidade de comparações, ao passo que introduz o método BWM, que é sempre consistente.

Desta forma, foi elaborado um *framework* com o passo-a-passo para se obter as prioridades relativas dos KPIs a serem analisados. Foram escolhidas duas empresas do ramo sucroalcooleiro que contivessem a mesma etapa de processo de manufatura - a aplicação de um revestimento metálico (chapisco), por meio de soldagem, em um rolo de moenda de cana-de-açúcar – para que fossem devidamente ponderados os KPIs.

A aplicação do modelo AHP-BWM rendeu resultados distintos para cada caso, de acordo com a estratégia adotada por cada empresa, porém com diversas semelhanças, o que era esperado, uma vez que uma mesma etapa de processo de manufatura foi analisada. Uma das maneiras escolhidas para se analisar as prioridades relativas obtidas foi verificar quais KPIs obtiveram um peso acima do valor de referência equivalente ao caso em que os pesos fossem todos iguais, que seria de 2,381%. Oito KPIs ficaram acima deste valor simultaneamente para ambos os casos: NR12.4 (E1), risco de acidentes (A2), emissão de gases do efeito estufa (C9), custo com matéria-prima (B9), autuações ambientais (E3), resíduos perigosos (C2), processos trabalhistas (E2) e autuações MTE (E4). Este resultado foi tido como plausível, visto que é esperado que empresas do porte das analisadas que haja uma preocupação com a segurança dos trabalhadores, com o respeito às normas vigentes, com a eficiência econômica dos processos e com o possível lançamento de resíduos prejudiciais ao ambiente, com esta última sendo um impacto ambiental mais “visível” que os demais impactos ambientais. Além disso, em relação às dimensões da sustentabilidade, as dimensões econômica e ambiental estiveram simultaneamente entre as três mais importantes nos dois casos. No caso A, a dimensão tecnológica também aparece dentre as três mais importantes, demonstrando uma preocupação por parte da empresa A em modernizar o seu aparato tecnológico de maneira a respeitar a sustentabilidade. Já na empresa B, a dimensão social está entre as três mais importantes, o que é compreensível para uma empresa do seu porte, visto que, uma vez que está presente em diversos países, precisa se atentar a questões trabalhistas e de segurança, inclusive para manter uma imagem positiva para atuais e futuros investidores.

A partir da aplicação do modelo AHP-BWM, foi possível verificar a redução considerável na quantidade de comparações pareadas, o que fez com que a aplicação dos questionários com os tomadores de decisão fosse mais eficiente, o que é bem visto no meio empresarial. Além disso, foi possível conferir a consistência das comparações pareadas

realizadas a cada matriz ou a cada par de vetor analisados. Dito isto, todas as comparações pareadas realizadas a partir do método BWM em ambos os casos foram consideradas consistentes, e com alto grau de consistência – valores próximos de zero. Já nas comparações pareadas realizadas utilizando o método AHP, foi possível notar que houve consistência no caso A e inconsistências no caso B, sendo estas sanadas após duas rodadas adicionais de novas comparações. Isto não prejudicou o andamento da aplicação do modelo, tendo em vista que é algo que pode ocorrer na utilização do AHP.

Uma contribuição importante deste trabalho é a discussão em torno da seleção que deve ser feita entre AHP e BWM no modelo, a depender do número de elementos de cada grupo, uma vez que foi possível flexibilizá-la e continuar a seguir os mesmos princípios de Moslem (2020a).

Além disso, como já foi dito, o modelo AHP-BWM também se coloca como uma alternativa para os estudos em que, originalmente, não há ponderação de critérios, como é o caso de Murad (2020), mas que se propõem a adotar a ponderação por entender a importância estratégica em sua utilização pelas empresas que possuam processos de manufatura (KIM; STING; LOCH, 2014). Um dos pontos alcançados por Murad (2020), como elaborar um método que fosse flexível e de fácil e rápida aplicação, em conjunto com uma proposta de métricas para análise individual dos KPIs, é uma das grandes vantagens de seu estudo, visto que utiliza apenas KPIs quantitativos, facilmente calculáveis mediante fórmulas e normas pré-definidas.

O modelo AHP-BWM se coloca como viável e de desempenho bastante positivo em relação ao uso isolado do AHP ou do BWM na ponderação de critérios para a mensuração da sustentabilidade em etapas de processo de manufatura. Consegue aliar a solidez do AHP e sua proposta de estrutura hierárquica com a dinamicidade do BWM e sua capacidade de fornecer resultados sempre consistentes para comparações realizadas com maior número de elementos em uma nova área de aplicação, sendo esta uma importante contribuição deste trabalho.

Assim, a combinação do modelo AHP-BWM de ponderação de critérios com a proposta de mensuração da sustentabilidade em etapa de processo de manufatura de Murad (2020) resultou em uma proposta de mensuração de sustentabilidade para uma etapa de processo de manufatura, com ponderação de critérios utilizando o modelo AHP-BWM, que se mostrou coesa e apta a se alinhar às escolhas estratégicas da empresa analisada.

Como proposta de trabalhos futuros, podemos mencionar o aprofundamento do uso de métodos de decisão multicritérios na ponderação de critérios para a mensuração de

sustentabilidade para outras etapas de processo de manufatura, bem como a elaboração de uma proposta de índice de avaliação de sustentabilidade que abarque não só a ponderação, mas também a mensuração de critérios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-BASST, M.; MOHAMED, R.; ELHOSENY, M. A model for the effective COVID-19 identification in uncertainty environment using primary symptoms and CT scans. **Health Informatics Journal**, v. 26, n. 4, p. 3088–3105, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14280 (2001): Cadastro de acidente do trabalho - Procedimento e classificação. 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 10004 (ABNT, 2004): Resíduos sólidos—classificação. Rio de Janeiro, p. 9-11, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR ISO 9001 (ABNT, 2015): Requisitos para sistemas de gestão da qualidade. Rio de Janeiro, 2015.
- BANA E COSTA, C. A.; VANSNICK, J. C. A critical analysis of the eigenvalue method used to derive priorities in AHP. **European Journal of Operational Research**, v. 187, n. 3, p. 1422–1428, 2008.
- BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 4. ed. São Paulo: [s.n.].
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, DF, 2010.
- BRIOZO, R. A.; MUSETTI, M. A. Método multicritério de tomada de decisão: Aplicação ao caso da localização espacial de uma Unidade de Pronto Atendimento-UPA 24 h. **Gestao e Producao**, v. 22, n. 4, p. 805–819, 2015.
- BRUNELLI, M. **Introduction to the Analytic Hierarchy Process**. 1. ed. [s.l.] Springer International Publishing, 2015.
- CAI, W. et al. An energy management approach for the mechanical manufacturing industry through developing a multi-objective energy benchmark. **Energy Conversion and Management**, v. 132, p. 361–371, 2017.
- CICCO, F., FANTAZZINI, M. L. **Tecnologias Consagradas de Gestão de Risco**, São Paulo: Risk Tecnologia, 2003.
- CHIAVENATO, I. **Recursos humanos**. 7.ed. São Paulo: Atlas, p. 157-165; p.323-359. 2002.
- CHITSAZ, N.; AZARNIVAND, A. Water Scarcity Management in Arid Regions Based on an Extended Multiple Criteria Technique. **Water Resources Management**, v. 31, n. 1, p. 233–250, 2017.
- COMISSÃO MUNDIAL PARA O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future**. 1. ed. Oxford: Oxford University Press, 1987.

CRAWFORD, G. B. The geometric mean procedure for estimating the scale of a judgement matrix. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 327–334, 1987.

DESPEISSE, M. et al. Industrial ecology at factory level - A conceptual model. **Journal of Cleaner Production**, v. 31, p. 30–39, 2012.

DULEBA, S.; MOSLEM, S. Examining Pareto optimality in analytic hierarchy process on real Data: An application in public transport service development. **Expert Systems with Applications**, v. 116, p. 21–30, 2019.

ELKINGTON, J. **Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business**. 1. ed. Oxford: Capstone, 1997.

FAULKNER, W.; BADURDEEN, F. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 8–18, 2014.

FIKSEL, J.; MCDANIEL, J.; SPITZLEYN, D. Measuring Product Sustainability. **The Journal of Sustainable Product Design**, n. July 1998, p. 7–18, 1998.

FORMAN, E. H.; SELLY, M. A. **Decision by objectives: How to convince others that you are right**. Disponível em: <<https://professorforman.com/home/decision-by-objectives-textbook/>>. Acesso em: 8 ago. 2020.

GHADIMI, P. et al. Methodologies for Measuring Sustainability of Product/Process: A Review. **Pertanika Journal Science & Technology**, v. 21, n. 2, p. 303–325, 2013.

HANDFIELD, R. et al. Applying environmental criteria to supplier assessment: A study in the application of the Analytical Hierarchy Process. **European Journal of Operational Research**, v. 141, n. 1, p. 70–87, 2002.

HUANG, A.; BADURDEEN, F. Metrics-based hierarchical approach for sustainable manufacturing systems performance evaluation. **24th International Conference on Production Research, ICPR 2017**, n. Icpr, p. 672–677, 2017.

HUANG, A.; BADURDEEN, F. Metrics-based approach to evaluate sustainable manufacturing performance at the production line and plant levels. **Journal of Cleaner Production**, v. 192, p. 462–476, 2018.

JOVANE, F.; WESTKAMPER, E.; WILLIAMS, D. **The ManuFuture Road: Towards Competitive and Sustainable High-Adding-Value Manufacturing**. [s.l.] Springer, 2009. v. 53

KIM, Y. H.; STING, F. J.; LOCH, C. H. Top-down, bottom-up, or both? Toward an integrative perspective on operations strategy formation. **Journal of Operations Management**, v. 32, n. 7–8, p. 462–474, 2014.

LU, T.; JAWAHIR, I. S. Metrics-based sustainability evaluation of cryogenic machining.

**Procedia CIRP**, v. 29, p. 520–525, 2015.

MARCONI, M. DE A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: [s.n.].

MINISTERIO DO TRABALHO E EMPREGO DO BRASIL - MTE - Normas Regulamentadoras. Brasília. Disponível em: <http://trabalho.gov.br/index.php/seguranca-e-saude-notrabalho/normatizacao/normas-regulamentadoras>. Acesso em julho de 2019.

MOSLEM, S. et al. Application of the AHP-BWM model for evaluating driver behavior factors related to road safety: A case study for Budapest. **Symmetry**, v. 12, n. 2, 2020a.

MOSLEM, S. et al. An integrated decision support model for evaluating public transport quality. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 12, p. 1–19, 2020b.

MURAD, M. Q. **Proposta de uma metodologia para avaliação do índice de sustentabilidade para processos de fabricação**. 2020. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

NIOSH. Identifying high-risk small business industries: the basis for preventing occupational injury, illness, and fatality. Cincinnati: National Institute for Occupational Safety and Health, 1999.

PAMUČAR, D. et al. Application of improved best worst method (BWM) in real-world problems. **Mathematics**, v. 8, n. 8, 2020.

PENG, S. et al. An integrated decision model of restoring technologies selection for engine remanufacturing practice. **Journal of Cleaner Production**, v. 206, p. 598–610, 2019.

POPE, J.; ANNANDALE, D.; MORRISON-SAUNDERS, A. Conceptualising sustainability assessment. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 24, n. 6, p. 595–616, 2004.

QIAN, Y.; HUANG, Z.; YAN, Z. Integrated Assessment of Environmental and Economic Performance of Chemical Products Using Analytic Hierarchy Process Approach. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 15, n. 1, p. 81–87, 2007.

REN, J. et al. Prioritization of bioethanol production pathways in China based on life cycle sustainability assessment and multicriteria decision-making. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 6, p. 842–853, 2015.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega**, v. 53, p. 49–57, 2015.

REZAEI, J. et al. A supplier selection life cycle approach integrating traditional and environmental criteria using the best worst method. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 577–588, 2016.

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method: Some properties and a linear model. **Omega (United Kingdom)**, v. 64, p. 126–130, 2016.

REZAUR RAHMAN, N. S. M. et al. Fusion of BWM and AHP MCDM Methods to Choose the Most Suitable Secondary School for an Individual in the Context of Bangladesh. **Vietnam Journal of Computer Science**, v. 06, n. 03, p. 311–328, 2019.

RÖDGER, J. M.; BEY, N. **Sustainability assessment in manufacturing and target setting in highly automated production**. [s.l.] Springer International Publishing, 2019.

SAAD, M. H.; NAZZAL, M. A.; DARRAS, B. M. A general framework for sustainability assessment of manufacturing processes. **Ecological Indicators**, v. 97, n. September 2018, p. 211–224, 2019.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987.

SAATY, T. L. A scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of Mathematical Psychology**, v. 15, n. 3, p. 234–281, 1977.

SAATY, T. L. How to Make a Decision: The Analytic Hierarchy Process. **Interfaces**, v. 24, n. 6, p. 19–43, 1994.

SAATY, T. L.; OZDEMIR, M. S. Why the magic number seven plus or minus two. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 38, n. 3–4, p. 233–244, 2003.

SANTOS, L. F. DE O. M.; OSIRO, L.; LIMA, R. H. P. A model based on 2-tuple fuzzy linguistic representation and Analytic Hierarchy Process for supplier segmentation using qualitative and quantitative criteria. **Expert Systems with Applications**, v. 79, p. 1339–1351, 2017.

SIGGELKOW, N.; LEVINHAL, D. A. Temporarily Divide to Conquer: Centralized, Decentralized, and Reintegrated Organizational Approaches to Exploration and Adaptation. **Organization Science**, v. 14, n. 6, 2003.

TECNOLOGIA revolucionária de “chapisco” reduz custo e aumenta eficiência das unidades sucroenergéticas. **CanaOnline**, Ribeirão Preto, 07 de mai. de 2019. Disponível em: <<http://www.canaonline.com.br/conteudo/tecnologia-revolucionaria-de-chapisco-reduz-custo-e-aumenta-eficiencia-das-unidades-sucroenergeticas.html>>. Acesso em: 21 de jul. de 2021.

VAN DE KAA, G.; KAMP, L.; REZAEI, J. Selection of biomass thermochemical conversion technology in the Netherlands: A best worst method approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 166, p. 32–39, 2017.

WAN AHMAD, W. N. K. et al. Evaluation of the external forces affecting the sustainability of oil and gas supply chain using Best Worst Method. **Journal of Cleaner Production**, v. 153, p. 242–252, 2017.

WEI, C.; RODRÍGUEZ, R. M.; LI, P. Note on entropies of hesitant fuzzy linguistic term sets and their applications. **Information Sciences**, 2019.

WINROTH, M.; ALMSTRÖM, P.; ANDERSSON, C. Sustainable indicators at factory level - A framework for practical assessment. **62nd IIE Annual Conference and Expo 2012**, n. May, p. 490–503, 2012.

WITTSTRUCK, D.; TEUTEBERG, F. Integrating the concept of sustainability into the partner selection process: A fuzzy-AHP-TOPSIS approach. **International Journal of Logistics Systems and Management**, v. 12, n. 2, p. 195–226, jun. 2012.

YUAN, C.; ZHAI, Q.; DORNFELD, D. A three dimensional system approach for environmentally sustainable manufacturing. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 39–42, 2012.

YÜKSEL, I. Developing a Multi-Criteria Decision Making Model for PESTEL Analysis. **International Journal of Business and Management**, v. 7, n. 24, p. 52–66, 2012.

ZHANG, H.; HAAPALA, K. R. Integrating sustainable manufacturing assessment into decision making for a production work cell. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 52–63, 2015.

ZHANG, X. et al. A review on energy, environment and economic assessment in remanufacturing based on life cycle assessment method. **Journal of Cleaner Production**, v. 255, p. 120160, 2020.

## ANEXO A – DESCRIÇÃO DOS KPIS UTILIZADOS

de material e conservação de energia (GEISSDOERFER *et al.*, 2017), 10 KPIS foram selecionados com base neste novo paradigma, entre eles: resíduos perigosos, resíduos inertes e não inertes, emissões atmosféricas, eficiência no uso de energia elétrica, eficiência no uso de água, emissão de água residual, descarte de água residual, nível de automação, programa 5S ou similar e programa Kaizen ou similar.

### 3.2 Descrição e Forma de Mensuração dos KPIS

As descrições dos KPIS foram divididas nos pilares: sociais, ambientais, econômicos, tecnológicos e legais e subdivididas em:

#### 3.2.1 Pilar Social

O pilar social é subdividido em:

##### 3.2.1.1 KPI Insalubridade

São consideradas atividades ou operações insalubres as que se desenvolvem, acima dos limites de tolerância (LT) na presença de agentes como ruído contínuo ou intermitente, ruídos de impacto, exposição ao calor, radiações ionizantes, poeiras, condições hiperbáricas, agentes químicos, agentes biológicos, radiações não ionizantes, vibrações, frio e umidade. Para a elaboração deste procedimento não serão consideradas os agentes Radiações Ionizantes e Condições Hiperbáricas por não serem comuns às atividades de manufatura, foco deste estudo (MTE, 2019). As operações que se desenvolvem, acima dos limites de tolerância (LT), são caracterizadas como insalubridade de grau máximo, médio e mínimo.

Limite de Tolerância (LT) é a concentração ou intensidade máxima ou mínima, relacionada com a natureza e o tempo de exposição ao agente, que não causará danos à saúde do trabalhador, durante a sua vida laboral. Valor Teto (VT) são relativos aos agentes químicos, previstos na NR15 que as exposições a trabalhadores não podem ultrapassar os limites ali descritos, devido ao grave dano a esta exposição (MTE, 2019).

Na Tabela 3.1, são apresentadas a escala de valores para o KPI referente a Insalubridade, valores estes que variam de 1 a 5, conforme descrição apresentada.

**Tabela 3.1: Insalubridade**

<b>Valor</b>	<b>Descrição</b>
1	VT é ultrapassado
2	Atividade é caracterizada como insalubridade de grau máximo
3	Atividade é caracterizada como insalubridade de grau médio
4	Atividade é caracterizada como insalubridade de grau mínimo
5	Atividade não oferece nenhum risco ao trabalhador

Para a mensuração deste KPI, são levantados quais os agentes insalubres presentes na operação avaliada. A relação destes, é prevista na Normas Regulamentadora 15. Após a identificação dos agentes, foram verificados os níveis de intensidade de cada agente e os limites de tolerância (LT) e valor teto (VT) definidos para cada agente:

a) Ruído Contínuo ou Intermitente e Ruídos de Impacto

Para mensuração do ruído contínuo ou intermitente e do ruído de impacto, a metodologia utilizada foi baseada na norma NHO-01: Avaliação da Exposição Ocupacional ao Ruído (FUNDACENTRO, 2001a) e o anexos 1 e 2 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019). O equipamento para realização das avaliações foi o Densímetro Digital Portátil - Instrutherm modelo DOS-600.

b) Exposição ao Calor

A exposição ocupacional ao calor é avaliada pela metodologia contida norma NHO-06: Avaliação da Exposição Ocupacional ao Calor (FUNDACENTRO, 2001b) e o anexo 3 da Norma Regulamentadora (MTE, 2019). O equipamento para realização destas avaliações foi o TGD-300 - Instrutherm com RS-232 e datalogger.

c) Poeiras Minerais

Para a avaliação de aerodispersóides foram utilizadas as normas NHO-08 (FUNDACENTRO, 2009), NHO-03 (FUNDACENTRO, 2001c) e NHO-04 (FUNDACENTRO, 2001d), as quais fornecem a metodologia para avaliação de exposição ocupacional a material aerodispersóides (poeiras, fibras e fumos) e também foi utilizado o anexo 12 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019). O equipamento Bomba gravimétrica de amostragem, modelo BDX-II, marca Sensidyne, Faixa de operação: 500 a 3000 cm<sup>3</sup>/min, foi utilizado para realização das avaliações.

Fonte: MURAD (2020)

d) Agentes Químicos

Para avaliação de exposição ocupacional a agentes químicos a metodologia utilizada está descrita na norma NHO-02: Método de Ensaio - análise qualitativa da fração volátil (vapores orgânicos) (FUNDACENTRO, 2017) e os anexos 11, 13 e 13A da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019).

O equipamento para realização das avaliações foi o equipamento Bomba gravimétrica de amostragem, modelo BDV-II, marca Sensidyne, Faixa de operação: 500 a 3000 cm<sup>3</sup>/min.

e) Agentes Biológicos

Para a exposição ocupacional a agentes biológicos utiliza-se a metodologia do anexo 14 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019). Segundo a norma, as atividades que envolvem agentes biológicos é caracterizada pela avaliação qualitativa no local de trabalho.

f) Radiação Não Ionizante

O anexo 7 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019) fornece a metodologia para avaliação a exposição ocupacional a este agente. São consideradas as exposições sem proteção adequada, a radiações micro-ondas, ultravioletas e laser, conforme caracterizado no texto da legislação. Segundo a norma, a caracterização se dá pela avaliação qualitativa *in loco*.

g) Vibração

Para avaliação de exposição ocupacional à vibração, as metodologias utilizadas foram: a) anexo 8 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019), b) norma NHO 09 – Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibração de Corpo Inteiro (FUNDACENTRO, 2013a) e c) NHO-10: Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibração em Mãos e Braços (FUNDACENTRO, 2013b).

O equipamento para realização das avaliações foi o Medidor de Vibração Ocupacional VCI e VMB, marca Criffer, modelo Vibrate.

Fonte: MURAD (2020)

## h) Frio

A exposição ocupacional ao frio, é dada pela metodologia do anexo 9 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019), caracterizada pela avaliação qualitativa em local de trabalho.

## i) Umidade

Para avaliação de exposição ocupacional à umidade, a metodologia utilizada foi o anexo 11 da Norma Regulamentadora 15 (MTE, 2019). Segundo a norma, as atividades que envolvem este agente são caracterizadas pela avaliação qualitativa.

## 3.2.1.2 KPI Risco de Acidentes

A mensuração do conceito de risco de acidente será realizada por uma técnica clássica de gerenciamento de risco, conhecida como Análise Preliminar de Riscos (APR), originada de Preliminary Hazard Analysis, que consiste na mensuração de riscos em sistemas (CICCO; FANTAZZINI, 2003).

A APR é realizada na identificação de duas variáveis fundamentais: frequência de acidentes (obtida com auxílio da Tab. 3.2) e da severidade do acidente (Tab. 3.3).

Tabela 3.2 – Determinação da Severidade do Acidente

Descrição	Categoria
Não degrada o sistema ou seu funcionamento, não causa lesões	Desprezível (I)
Degradação moderada, causa lesões leves, é compensável ou controlável	Marginal (II)
Degradação crítica, lesões críticas, danos substanciais, pode colocar o sistema em risco. Necessidade de correção imediata	Crítica (III)
Séria degradação ao sistema/meio produtivo Perdas no sistema, mortes ou lesões permanentes.	Catastrófica (IV)

Fonte: Cicco e Fantazzini (2003)

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.2 – Determinação da Frequência dos Acidentes

Faixa de Frequência	Categoria
≥ 10 anos	Extremamente remota (A)
10 anos a 1 ano	Remota (B)
1 mês a 1 ano	Pouco provável (C)
1 dia a 1 mês	Provável (D)
≤ 1 dia	Frequente (E)

Fonte: Cicco e Fantazzini (2003)

Com os resultados obtidos das Tabelas 3.2 e 3.3, a partir destas variáveis é determinado o Grau de Risco (Tab. 3.4). Deste pode-se obter os seguintes resultados: o Risco Desprezível (D), o Risco Menor (ME) o, o Risco Moderado (M), o Risco Sério (S) e o Risco Crítico (C).

Tabela 3.4 – Determinação do Grau de Risco

Severidade		Frequência				
		A	B	C	D	E
IV III II I	IV	ME	M	S	C	C
	III	D	ME	M	C	C
	II	D	D	ME	M	S
	I	D	D	D	ME	M

Fonte: Cicco e Fantazzini (2003)

Com os resultados obtidos na Tabela 3.4, é mensurado o valor do KPI riscos de acidentes conforme apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Risco de Acidentes

Valor	Descrição
1	Risco Catastrófico
2	Risco Sério
3	Risco Moderado
4	Risco Menor
5	Risco Desprezível

### 3.2.1.3 KPI Treinamento

A excelência só é obtida quando existirem investimentos no campo da gestão de pessoal, treinamento e desenvolvimento, ações estas que geram resultados gerenciais destinados a melhorar o desempenho de indivíduos e grupos em ambiente organizacional.

Fonte: MURAD (2020)

Para a caracterização deste KPI é aplicada a Tabela 3.6, que apresenta uma escala variando de 1 a 5, a escolher. Caso ocorra a existência de vários trabalhadores, será realizada uma média aritmética para obtenção do valor deste. Para obtenção dos dados em campo, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para a coleta de dados relativos aos treinamentos ministrados pela organização ao trabalhador, no período de um ano.

Tabela 3.6: Treinamento

Valor	Descrição
1	Nunca foi treinado
2	Recebeu treinamento informal
3	Recebe menos que 5h de treinamento no ano
4	Recebe entre 5 e 30h de treinamento no ano
5	Recebe mais que 30h de treinamento no ano

#### 3.2.1.4 KPI Nível de Escolaridade

A mensuração do KPI nível de escolaridade é realizada diretamente na Tabela 3.7 e nesta é apresentada uma escala de valores referentes à formação escolar dos trabalhadores que atuam na etapa do processo analisado. Caso ocorra a existência de vários trabalhadores, é realizada uma média ponderada, para obtenção do valor deste KPI. Para obtenção deste dado, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa e realiza-se coleta de dados relativos ao histórico escolar do trabalhador.

Tabela 3.7: Nível de Escolaridade do Trabalhador

Valor	Descrição
1	Não apresenta nenhum nível escolar
2	Ensino Fundamental Incompleto
3	Ensino Fundamental
4	Ensino Médio
5	Nível Técnico

#### 3.2.1.5 KPI Taxa de Gravidade

A taxa de gravidade visa exprimir, em relação a um milhão de horas-homem de exposição ao risco, os dias perdidos por todos os acidentados (vítimas de incapacidade temporária ou permanente) mais os dias debitados relativos aos casos de morte ou

Fonte: MURAD (2020)

incapacidade permanente. A Norma NBR 14280 (ABNT, 2001) sugere o cálculo da taxa de gravidade pela fórmula demonstrada na Eq. 3.1.

$$G = (T \cdot 10^6) \div H \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Sendo que:  $G$  é a taxa de gravidade;  $T$  é o tempo perdido computado;  $H$  representa as horas-homem de exposição ao risco.

Com o resultado obtidos na Eq. 3.1, é mensurado o valor do KPI taxa de gravidade conforme apresentado na Tabela 3.8. Estas taxas são classificadas segundo a *International Labour Organization* (ILO, 1971).

Para obtenção deste dado, foi realizada uma análise da atividade laboral do trabalhador, afim de obter os valores de  $H$  e o valor de  $T$  foi obtido junto ao setor de recursos humanos da empresa (RH) da empresa.

Tabela 3.8: Taxa de Gravidade

Valor	Descrição
1	$2000,1 \leq G$
2	$1000,1 \leq G \leq 2000$
3	$500,1 \leq G \leq 1000$
4	$0,1 \leq G \leq 500$
5	$G = 0$

### 3.2.1.6 KPI Taxa de Frequência de Acidentes

A mensuração do KPI taxa de taxa de frequência de acidentes ( $F_A$ ) obtida pela norma NBR 14280 - Cadastro de Acidente do Trabalho - Procedimento e Classificação Formação Profissional. Esta sugere o número de acidentes por milhão de horas-homem de exposição ao risco, em determinado período.  $F_A$  pode ser calculada pela Eq. 3.2 (ABNT, 2001).

$$F_A = (N \cdot 10^6) \div H \quad (\text{Eq. 3.2})$$

Sendo que:  $N$  é o número de acidentes;  $H$  representa as horas-homem de exposição ao risco.

Fonte: MURAD (2020)

A *International Labour Organization* (ILO), sugere uma escala para a mensuração da taxa de frequência (ILO, 1971), assim com o resultado obtido na Eq. 3.2, é mensurado o valor do KPI taxa deste item, conforme apresentado na Tabela 3.9.

Para a obtenção do valor de N, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para a coleta de dados relativos aos acidentes ocorridos nesta etapa do processo. Para o valor de H foi realizada uma análise da atividade laboral do trabalhador.

Tabela 3.9: Frequência de Acidentes

Valor	Descrição
1	$600,1 \leq F_A$
2	$400,1 \leq F_A \leq 600$
3	$200,1 \leq F_A \leq 400$
4	$0,1 \leq F_A \leq 200$
5	$F_A = 0$

### 3.2.1.7 KPI Grau de Satisfação

Um das formas utilizadas para a avaliação das eficiências pessoais de trabalhadores, na atualidade, é descrita na literatura como Avaliação de Desempenho 360°, que consiste em um tipo de análise na qual o avaliado se auto avalia e recebe *feedback* de todos os que interagem com ele, como: clientes, pares, subordinados, superiores e fornecedores (CHIAVENATO, 2002).

De uma forma semelhante, para adequar-se à mensuração de satisfação dos operadores desta etapa do processo analisada, foram realizadas entrevistas com trabalhadores envolvidos, com chefe imediato destes trabalhadores e com outros trabalhadores que trabalham em processos distintos, mas próximos ao avaliado. Nesta, foram solicitados aos entrevistados que dessem uma nota com escala de 1 a 5. Com os resultados destas entrevistas é realizada uma média ponderada do grau de satisfação (GS) deste item, conforme Tabela 3.10, e assim sendo possível mensurar o valor do KPI.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.10: Satisfação

Valor	Descrição
1	GS > 1
2	$1,1 \leq GS \leq 2$
3	$2,1 \leq GS \leq 3$
4	$3,1 \leq GS \leq 4$
5	GS > 4,1

### 3.2.1.8 KPI Nível Salarial

Para obtenção do KPI nível salarial, é comparado o valor correspondente dos salários dos trabalhadores da etapa de processo analisada, em porcentagem, ao valor salarial dos demais trabalhadores da empresa, ou seja, o maior valor de salário da empresa representará o valor teto (100%). Assim o valor deste será obtido conforme escala de 1 a 5, apresentado na Tabela 3.11. Para obtenção deste KPI, o departamento de recursos humanos da empresa é consultado para a coleta de dados relativos a faixa salarial dos operadores.

Tabela 3.11: Nível Salarial

Valor	Descrição
1	Faixa salarial até 20%
2	Faixa salarial de 21 a 40%
3	Faixa salarial de 41 a 60%
4	Faixa salarial de 61 a 80%
5	Faixa salarial de 81 a 100%

### 3.2.1.9 KPI Periculosidade

A Norma Regulamentadora 15 (NR15) apresenta doze perigos que afetam a saúde do trabalhador. São eles: o ruído contínuo ou intermitente, o ruído de impacto, a exposição ao calor, a radiações ionizantes; as poeiras minerais, as condições hiperbáricas, os agentes químicos, os agentes biológicos, as radiações não ionizantes, as vibrações, o frio e a umidade. Na Norma Regulamentadora 16 (NR16) - Atividades e Operações Perigosas são apresentadas em seis classificações de perigos, são eles as atividade e operações com explosivos, com inflamáveis, com radiações ionizantes, com exposição a roubos (ou outras espécies de Violência Física nas Atividades Profissionais de Segurança Pessoal ou Patrimonial), com energia elétrica e com motocicletas (MTE, 2019).

Fonte: MURAD (2020)

Considerando que o risco à saúde e à segurança do trabalhador aumentam com a quantidade de exposição simultânea a vários perigos, a forma de mensuração deste KPI sofre variação proporcional à quantidade de perigos, conforme Tabela 3.12. Assim, para determinar este KPI, será avaliado quantos perigos os trabalhadores desta etapa do processo estão expostos.

Tabela 3.12: Periculosidade

Valor	Descrição
1	Exposto a mais de 10 perigos
2	Entre 6 e 9 perigos
3	Entre 2 e 5
4	Exposto a pelo menos um perigo
5	Não é exposto a nenhum perigo

#### 3.2.1.10 KPI Ergometria

A mensuração KPI ergometria será realizada pela mensuração da carga física de trabalho e foi classificada de acordo com a metodologia proposta pelo pesquisador Apud em 1999.

Foi coletada a variação de batimento cardíaco do trabalhador (frequência cardíaca de repouso (FCR) e frequência cardíaca de trabalho (FCT)) durante um período específico de tempo. Através dos dados coletados, determinou-se a carga cardiovascular no trabalho (CCV), que corresponde à porcentagem da frequência cardíaca durante o trabalho, em relação à frequência cardíaca máxima utilizável. Para calcular a carga cardiovascular, utilizou-se a Equação 3.3.

$$CCV = ((FCT - (FCR \times 100)) \div (220 - idade - FCR)) \quad (Eq.3.3)$$

Sendo que: CCV = carga cardiovascular, em porcentagem; FCT = frequência cardiovascular de trabalho, em bpm (batimentos por minuto); FCR = frequência cardíaca em repouso; em bpm (batimentos por minuto) e Idade = Idade do trabalhador analisado.

As atividades laborais que exigem frequência cardíaca média inferior a 75 bpm deve ser classificado como muito leve, de 76 a 100 bpm como medianamente pesado, de 101 a 125 bpm como pesado e de 126 a 150 bpm como extremamente pesado. Quando a carga cardiovascular ultrapassa 40%, são necessárias ações imediatas para a recuperação da

Fonte: MURAD (2020)

frequência cardíaca do trabalhador em atividade (BAČIĆ *et al.*, 2018). Assim, a forma de mensuração deste KPI será variada proporcionalmente à porcentagem de CVV, variando conforme escala apresentada na Tabela 3.13.

Para a mensuração da quantidade de batimentos cardíacos do trabalhador foi utilizado um relógio Polar A 370 com frequência cardíaca contínua, conforme Figura 3.6. O período de análise foi de 8,48 horas (um dia de trabalho)

Tabela 3.13: Ergometria

Valor	Descrição
1	CVV > 40% - Trabalho pesado sem adoção de descanso
2	CVV > 40% - Trabalho pesado com adoção de descanso
3	20% < CVV < 40% - Trabalho pesado
4	10% < CVV < 20% - Trabalho moderado
5	CVV < 10% - Trabalho leve

#### 3.2.1.11 KPI Nível de Rotatividade

O cálculo do nível de índice de rotatividade (R) é baseado no volume de entradas e saídas de pessoal em relação aos recursos humanos disponíveis nas empresas, dentro de determinado período de tempo e em termos percentuais Neste caso, faz-se uso da Equação 3.4 proposta por Chiavenato (2002):

$$R = [(A+D) \div 2] \div (EM) \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Sendo que: A = admissões de pessoas dentro do período considerado (entradas); D = desligamentos de pessoal dentro do período considerado (saídas) e EM = efetivo médio dentro do período considerado (pode ser obtido pela soma dos efetivos de empregados existentes no início e no final do período, dividido por dois).

Assim, a mensuração deste KPI será realizada conforme Tabela 3.14. Para obtenção deste KPI, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para a coleta de dados A, D e EM, durante o período de um ano.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.14: Nível de Rotatividade

Valor	Descrição
1	R > 30,1% - Muito Ruim
2	30% > R > 20,1% - Ruim
3	20% > R > 10,1% - Aceitável
4	10% > R > 5,1% - Bom
5	R < 5% - Ideal

### 3.2.1.12 KPI Nível de Absenteísmo

O nível de absenteísmo ( $A_b$ ) reflete a porcentagem de tempo perdido (não trabalhado) devido às ausências de colaboradores, em relação ao volume de atividade planejada pela empresa. Ela é calculada pela Equação 3.5, proposta por Chiavenato (2002). A mensuração do KPI será realizada conforme Tabela 3.15

Para obtenção deste KPI, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para a coleta das horas perdidas nesta etapa do processo, durante o período de um ano.

$$A_b (\%) = (\text{Horas Perdidas} \div \text{Horas Trabalhadas}) \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Tabela 3.15: Absenteísmo

Valor	Descrição
1	$A_b > 10,1\%$ - muito ruim
2	$5,1\% < A_b < 10\%$ - ruim
4	$0,1\% < A_b < 5\%$ - aceitável
5	$A_b = 0\%$ - ideal

### 3.2.2 Pilar Econômico

O pilar econômico é subdividido em:

#### 3.2.2.1 KPI Índice de Custo com Acidentes (ICA)

A metodologia adotada é baseada na proposta da *National Institute for Occupational Safety and Health* (NIOSH, 1999), que sugere considerar a ordenação (scores) obtida nos índices " taxa de gravidade" e "taxa de frequência". O índice de "taxa de gravidade", por incorporar a principal consequência do acidente (morte, invalidez permanente, entre outros), deve ter um peso maior na determinação do indicador deste custo.

Fonte: MURAD (2020)

A Equação 3.6, proposta pela NIOSH, apresenta uma proposta de classificação do custo relativo a acidentes de trabalho desta fase do processo com bases nos valores obtidos dos KPIs taxa de gravidade (Tab. 3.7) e taxa de frequência (Tab. 3.8).

$$\text{ICA} = 0,65 \text{ Valor do KPI (G)} + 0,35 \times \text{KPI (F}_a) \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Portanto, mensuração deste KPI será realizada conforme escala apresentada na Tabela 3.16.

Tabela 3.16: Custo de Acidentes

Valor	Descrição
5	ICA < 0,9
4	1,9 < ICA < 1
3	2,9 < ICA < 2
2	4,9 < ICA < 3
1	ICA > 4,9

### 3.2.2.2 KPI Custo com Absenteísmo

O índice do absenteísmo reflete diretamente no custo da empresa, em decorrência das ausências de mão-de-obra em relação ao volume de atividade planejada. Consequentemente, o custo relativo a este reflete de maneira negativa na instituição. Neste contexto, para determinar o KPI relativo ao índice de custo de absenteísmo baseia-se no valor obtido na Tabela 3.15 (KPI nível de absenteísmo). Ele é mensurado conforme Tabela 3.17.

Tabela 3.17: Custo com Absenteísmo

Valor	Descrição
1	$A_b > 10,1\%$
2	$10\% < A_b < 5,1\%$
3	$5\% < A_b < 2,1\%$
4	$5\% < A_b < 2,1\%$
5	$A_b = 0\%$

### 3.2.2.3 KPI Custo com Rotatividade

O índice de custo relativo à rotatividade tem como base o valor obtido na Tabela 3.14 (KPI nível de rotatividade).

Fonte: MURAD (2020)

Assim, para determinar o KPI relativo ao índice de custo de rotatividade baseia-se no valor obtido e sua mensuração ocorre conforme Tabela 3.18.

Tabela 3.18: Custo com Rotatividade

Valor	Descrição
1	Rotatividade > 20%
2	20.1% < Rotatividade < 10%
4	10,1% < Rotatividade < 5%
5	Rotatividade < 5.1%

#### 3.2.2.4 KPI Custo com Treinamento

O KPI relativo ao índice de custo relativo ao treinamento necessário para a execução da operação desta etapa de produção será baseado no valor obtido na Tabela 3.19.

Para obtenção deste KPI, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para se obter os dados relativos a função dos trabalhadores locados nesta etapa do processo.

Tabela 3.19: Custo com Treinamento

Valor	Descrição
1	Necessita de formação escolar de nível técnico
2	Necessita de treinamento com carga horária acima de 10 horas
3	Necessita de treinamento com carga horária até de 10 horas
4	O aperfeiçoamento técnico é obtido com outros operadores
5	Não necessita de nenhum aperfeiçoamento técnico

#### 3.2.2.5 KPI Custo com Não Conformidade

Para determinar o KPI relativo ao índice de custo relativo a não conformidade, ou seja, ao retrabalho de produtos ou serviços, toma-se por base o valor obtido na Tabela 3.20.

Os dados são obtidos após avaliação do processo produtivo, em que buscou-se identificar se existem esforços despendidos para a realização de tarefas relativas a retrabalho, durante o período de um ano. Considera-se, para esta avaliação, se são disponibilizados equipamentos, mão-de-obra e insumos para a realização de retrabalho.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.20: Custo de Não Conformidade

Valor	Descrição
1	Atividades de retrabalho são realizadas diariamente
2	Atividades de retrabalho são realizadas em períodos mensais
4	Algumas ações esporádicas para realização de atividades de retrabalho no mês
5	Não ação relacionada a retrabalho

### 3.2.2.6 KPI Custo com Mão-de-Obra

O KPI índice de custo relativo a mão de obra (IMO) é obtido em comparação com o valor médio da mão de obra praticada pela empresa para o nível de operadores, na qual utilizou-se a Tabela 3.11 para levantamento destes valores, e será mensurado conforme a Tabela 3.21.

Tabela 3.21: KPI índice de custo relativo ao custo da mão de obra

Valor	Descrição
1	IMO > 80,1%
2	60,1% > IMO > 80%
3	40,1% > IMO > 60%
4	20,1% > IMO > 40%
5	20% > IMO

### 3.2.2.7 KPI Custo com Consumo Energia Elétrica

O KPI índice de consumo de energia elétrica (IE) é mensurado conforme a Tab. 3.22. Para obtenção deste KPI, foi analisado e quantificado o consumo elétrico desta etapa do processo e comparado com a etapa de processo com menor consumo de energia elétrica, que foi tido como referência (IEr), em valores percentuais.

Tabela 3.22: Custo com Consumo Energia Elétrica

Valor	Descrição
1	100,1% ≤ IEr
2	75,1% ≤ IEr ≤ 100%
3	50,1 ≤ IEr ≤ 75%
4	0,1 ≤ IEr ≤ 50%
5	IE é o menor valor em % da empresa

Fonte: MURAD (2020)

### 3.2.2.8 KPI Custo com Consumo de Água

O KPI relativo ao índice de consumo de água (IA) foi mensurado conforme a Tab. 3.23. Foi analisado e quantificado o consumo água desta etapa do processo e comparado com a etapa de processo com menor consumo de água, que foi tido como referência (IAr), em valores percentuais.

Tabela 3.23: Custo com Consumo de Água

Valor	Descrição
1	$100,1 \leq IAr$
2	$75,1 \leq IAr \leq 100\%$
3	$50,1 \leq IAr \leq 75\%$
4	$0,1 \leq IAr \leq 50\%$
5	IA é o menor valor em % da empresa

### 3.2.2.9 KPI Custo com Matéria Prima e Insumos

O KPI relativo ao índice de custo relativo ao custo de matéria prima e insumos (IMP) é mensurado conforme a Tabela 3.24. Após uma análise e quantificação do consumo é comparado com a etapa de processo com menor consumo, que foi tido como referência (IMPr), em valores percentuais, durante um período de um ano.

Tabela 3.24: Custo com Matéria Prima

Valor	Descrição
1	$IMP \geq IMPr$
3	$IMP = IMPr$
5	$IMP \leq IMPr$

## 3.2.3 Pilar Tecnológico

O pilar tecnológico é subdividido em: KPI Nível de Automação

### 3.2.3.1 KPI Nível de Automação

Dentro de um ambiente fabril, o uso da automação é descrito como a tecnologia empregada para execução de uma ou mais atividades, ou até mesmo a execução de todo um processo sem a necessidade da intervenção humana. Como benefícios, a automação de um

Fonte: MURAD (2020)

processo, quando realizada de maneira eficaz, resulta no aumento da qualidade e eficiência do mesmo, fornecendo um incremento na produtividade com resultados constantes, além de permitir condições mais seguras e salubres aos operadores.

Considera-se que o nível de automação seja uma prática que contribui para a sustentabilidade do processo, uma vez que proporciona benefícios aos operadores, a redução de resíduos e, em consequência, traz vantagens econômicas. Para a mensuração do nível de automação será adotada a escala apresentada na Tabela 3.25. Para a avaliação deste KPI, foi feita uma análise da etapa do processo produtivo.

Tabela 3.25: Automação

Valor	Descrição
1	Sistema totalmente manual
2	Alguns equipamentos automatizados
4	Alguns equipamentos manuais
5	Sistema totalmente automatizado

### 3.2.3.2 KPI Programa 5S ou similar

A filosofia 5S, em uma empresa tem por princípio a manutenção da limpeza e organização de todas as áreas e recursos a elas inerentes, envolvendo, de um modo geral, todos os funcionários que colaboram no processo, independente do seu nível hierárquico. Seu objetivo é promover variadas ações que contribuam com a qualidade de vida dos trabalhadores, além de reduzir custos, diminuir desperdícios, aumentar a produtividade e contribuir para um ambiente de trabalho mais agradável, seguro e saudável. Para a mensuração do nível de programa 5S ou similar, será adotada a escala apresentada na Tabela 3.26. Para a mensuração deste KPI, foi feita uma análise da etapa do processo produtivo.

Tabela 3.26: 5S ou Similar

Valor	Descrição
1	Nenhum programa implantado
2	Nenhum programa implantado, porém existem práticas executadas
4	Programa implantado, porém os resultados não são satisfatórios
5	Programa implantado, com resultados satisfatórios

Fonte: MURAD (2020)

### 3.2.3.3 KPI Programa Kaizen ou Similar

A filosofia Kaizen, em uma empresa, promove constantes melhorias, através de um conjunto de valores que orientam o comportamento do seu quadro de colaboradores. A busca pela melhoria contínua visa à satisfação da organização como um todo, desde os funcionários, clientes internos e externos, e é baseada, em especial, no aumento da produtividade no local de trabalho com a redução e a eliminação da sobrecarga de trabalho; desperdício de tempo, produtos e materiais; e irregularidade nas ações/atividades, enfim, redução e eliminação das perdas. Todos estes elementos contribuem com a evolução empresarial em prol de uma manufatura sustentável.

Na mensuração do nível de programa Kaizen ou similar, será adotada a escala apresentada na Tabela 3.27. Para a mensuração deste KPI, foi feita uma análise da etapa do processo produtivo.

Tabela 3.27: Kaizen ou Similar

Valor	Descrição
1	Programa não implantado na empresa
2	Programa implantado – sem melhorias proposto a etapa do processo
4	Programa implantado, ultima melhoria a mais de 1 ano
5	Programa implantado, melhorias anuais.

### 3.2.3.4 KPI Gestão da Manutenção

Implantação de planos de ação orientados para a manutenção industrial, são capazes de proporcionar ganhos de eficiência, como i) redução da taxa de acidentes pessoais; ii) elevação das disponibilidades físicas das plantas; iii) redução no orçamento da manutenção e iv) redução de resíduos e retrabalhos.

Para mensuração do nível de gestão de manutenção na etapa do processo analisado, aplicou-se a Tabela 3.28. Para a mensuração deste KPI, é feita uma análise da etapa do processo produtivo, na qual foi analisado o grau de evolução das técnicas relativas à gestão da manutenção.

Tabela 3.28: Gestão da Manutenção

Valor	Descrição
1	Nenhuma gestão implantada, atua de forma emergencial
2	Realiza manutenções corretivas
3	Realiza planejamento de manutenção corretiva
4	Realiza planejamento de manutenção corretiva, preventiva e preditiva
5	Gestão de manutenção consolidado

### 3.2.3.5 KPI Gestão da Qualidade

A adoção de um sistema de gerenciamento da qualidade é uma decisão estratégica que contribui de forma significativa à organização no sentido de melhorar seu desempenho global e prover uma base sólida para iniciativas de desenvolvimento sustentável.

Para a mensuração do nível de gestão de qualidade no processo estudado, foi adotada a escala apresentada na Tabela 3.29, após uma análise do processo produtivo.

Tabela 3.29: Gestão da Qualidade

Valor	Descrição
1	Nenhuma gestão implantada
3	Sistema de qualidade implantada na empresa, porém as ações nesta etapa do processo não são padronizadas.
5	Todas as ações previstas nesta etapa do processo são padronizadas no plano de qualidade

### 3.2.3.6 KPI Motores de Alta Performance

A adoção de motores de alto rendimento em substituição aos da linha tradicionais é principalmente justificada na redução do consumo de energia elétrica, além de se destacarem nas vantagens relacionadas a custos de manutenção. De um modo geral, os motores de alto rendimento possuem melhor eficiência, embora seu custo seja maior. No entanto, estes são justificados para utilização acima de 2200h/ano, que proporcionará uma redução de energia favorável na relação dos custos de aquisição, de manutenção e na redução de consumo como benefícios originados. Foi utilizada a Tabela 3.30 para obter o valor do KPI motores de alta performance. Uma análise da etapa do processo produtivo, permitiu a identificação da porcentagem destes equipamentos.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.30: Motores de Alto Rendimento

Valor	Descrição
1	Nenhum motor de alto rendimento instalado
2	Menos que 50% dos motores instalados são de alto rendimento
4	Mais que 50% dos motores instalados são de alto rendimento
5	Todos os motores instalados são de alto rendimento

### 3.2.3.7 KPI Treinamento Operacional

Investimento em treinamentos de uma equipe para obter um grau de excelência é uma das melhores garantias de sucesso ao longo prazo. Funcionários treinados são mais comprometidos com os objetivos da empresa.

A obtenção deste KPI foi resultante da quantidade de horas de treinamento específicos para a etapa de processo estudada, em que utilizou-se a Tabela 3.31.

Tabela 3.31: Treinamento Operacional

Valor	Descrição
1	Nenhum treinamento registrado no ano
2	Menos de 2 horas de treinamento registrado no ano por funcionário
4	De 2 a 10 horas de treinamento registrado no ano por funcionário
5	Mais de 10 horas de treinamento registrado no ano por funcionário

Para obtenção deste KPI, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para a coleta das horas perdidas nesta etapa do processo, durante o período de um ano.

### 3.2.4 Pilar Legal

O pilar legal é subdividido em: KPI Atendimento à NR12, KPI Ações Trabalhistas, etc...

#### 3.2.4.1 KPI Atendimento à NR12 (Item 12.4)

Segundo o item 12.4 da Norma Regulamentadora 12, são consideradas medidas de proteção a serem adotadas nessa ordem de prioridade: a) medidas de proteção coletiva; b) medidas administrativas ou de organização do trabalho; e c) medidas de proteção individual (MTE, 2019).

Fonte: MURAD (2020)

Neste contexto, o KPI atendimento à NR12 (Item 12.4) foi obtido a partir da aplicação da escala apresentada na Tabela 3.32. Para a mensuração deste KPI, foi feita uma análise da etapa do processo produtivo, na qual foi analisado o grau de atendimento ao item 12.4 da Norma Regulamentadora 12.

Tabela 3.32: NR12.4

Valor	Descrição
1	Não foi evidenciado uso de EPI, proteção coletiva ou medidas administrativas
2	Apenas uso de EPI
4	Uso de EPI e algumas ações administrativas
5	Foi evidenciado uso de EPI, proteção coletiva ou medidas administrativas

#### 3.2.4.2 KPI Ações Trabalhistas

O KPI ações trabalhistas é mensurado pela quantidade de ações trabalhistas impetradas à empresa, exclusivas ao processo estudado, conforme escala apresentada na Tabela 3.33. Para a obtenção das quantidades de ações trabalhistas, é consultado o departamento de recursos humanos, jurídico e administrativo da empresa e coletado o número de ações trabalhistas ocorridas durante o período de cinco anos.

Tabela 3.33: Ações Trabalhistas

Valor	Descrição
1	Mais de 5 ações trabalhistas nos últimos 60 meses
2	De duas a quatro ações trabalhista nos últimos 60 meses
4	Pelo menos uma ação trabalhista nos últimos 60 meses
5	Nenhuma ação trabalhista nos últimos 60 meses

#### 3.2.4.3 KPI Atuações pelo Ministério do Trabalho e Emprego (MTE)

O KPI autuações pelo MTE será mensurado pela quantidade de multas recebidas, exclusivas ao processo estudado, conforme escala apresentada na Tabela 3.34. Para a obtenção deste KPI, consulta-se o departamento administrativo e jurídico da empresa e coleta-se informação relativa a esta etapa do processo, durante o período de cinco anos.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.34: Autuações MTE

Valor	Descrição
1	Mais de 3 autuações pelo MTE nos últimos 60 meses
2	3 autuações pelo MTE nos últimos 60 meses
3	2 autuações pelo MTE nos últimos 60 meses
4	1 autuação pelo MTE nos últimos 60 meses
5	Nenhuma autuação pelo MTE registrada

#### 3.2.4.4 KPI Autuações pelo Ministério do Meio Ambiente (MA)

O KPI autuações pelo MA é mensurado pela quantidade de multas recebidas, conforme escala apresentada na Tabela 3.35. Para a obtenção deste KPI, consulta-se o departamento administrativo e jurídico da empresa para coletar dados relativos a esta etapa do processo, durante o período de 5 anos.

Tabela 3.35: Autuações MA

Valor	Descrição
1	Mais de 3 autuações pelo MA nos últimos 60 meses
2	3 autuações pelo MA nos últimos 60 meses
3	2 autuações pelo MA nos últimos 60 meses
4	1 autuação pelo MA nos últimos 60 meses
5	Nenhuma autuação pelo MA registrada

#### 3.2.4.5 KPI Treinamento Relativo a Segurança do Trabalho

Segundo o item 12.136 da Norma Regulamentadora 12, os trabalhadores envolvidos na operação, manutenção, inspeção e demais intervenções em máquinas e equipamentos devem receber capacitação providenciada pelo empregador e compatível com suas funções. A capacitação deve abordar os riscos a que estão expostos e as medidas de proteção existentes e necessárias, nos termos desta Norma, para a prevenção de acidentes e doenças (MTE, 2019).

Para obtenção do valor do KPI relacionado a este tópico é aplicada a Tabela 3.36, que apresenta uma escala variando de 1 a 5, a escolher. Caso ocorra a existência de vários trabalhadores, será realizada uma média aritmética, para a obtenção do valor deste KPI.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.36: Treinamento Relativo a Segurança do Trabalho

Valor	Descrição
1	Nunca foi treinado
2	Recebeu treinamento informal
3	Recebe menos que 5h de treinamento no ano
4	Recebe entre 5 e 30h de treinamento no ano
5	Recebe mais que 30h de treinamento no ano

### 3.2.5 Pilar Ambiental

O pilar ambiental é subdividido em: KPI Treinamento em Aspectos Ambientais,

#### 3.2.5.1 KPI Treinamento em Aspectos Ambientais

O KPI treinamento em aspectos ambientais é mensurado pela quantidade de horas de treinamento específico em ações que contribuam com a preservação do meio ambiente, relativas para a etapa de processo estudada. Foi utilizada a escala apresentada na Tabela 3.37.

Para a obtenção deste KPI, consulta-se o departamento de recursos humanos da empresa para a coleta das horas destinadas a treinamentos relativos a aspectos ambientais, nesta etapa do processo, durante o período de um ano. As horas foram estimadas por funcionário envolvido no processo avaliado.

Tabela 3.37: Treinamento em Aspectos Ambientais

Valor	Descrição
1	Nenhum treinamento registrado no ano
2	Menos de 2 horas de treinamento registrado no ano
4	De 2 a 10 horas de treinamento registrado no ano
5	Mais de 10 horas de treinamento registrado no ano

#### 3.2.5.2 KPI Resíduos Perigosos

Segundo a Norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004b), a classificação de resíduos sólidos perigosos, está associada às características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e patogenicidade. Neste contexto a mensuração do KPI resíduos perigosos é apresentada na Tabela 3.38. Para a mensuração deste KPI, foi feita uma avaliação da etapa do processo produtivo.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.38: Resíduos Perigosos

Valor	Descrição
1	Gera produtos considerados perigosos em grandes quantidades
2	Gera produtos considerados perigosos em baixas quantidades
4	Resíduos gerados não são perigosos conforme ABNT NBR 10.004
5	Etapa do processo não gera nenhum resíduo

### 3.2.5.3 KPI Resíduos Inertes e Não Inertes

Segundo a Norma ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004b), a classificação de resíduos sólidos não perigosos são subdivididos em duas classes, os produtos inertes e não inertes. Estas normas os define como:

- a) Resíduos classe II A - Não inertes são aqueles que possuem propriedades como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- b) Resíduos classe II B - Inertes são aqueles quando submetidos a um contato dinâmico ou estático com água destilada ou deionizadas, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

Neste contexto o KPI resíduos inertes e não inertes são obtidos conforme escala apresentada na Tabela 3.39. Para a mensuração deste KPI é feita uma avaliação da etapa do processo produtiva com o objetivo de identificar a existência de tais resíduos.

Tabela 3.39: Resíduos Inertes e Não Inertes

Valor	Descrição
1	Gera resíduos não inertes em grandes quantidades
2	Gera resíduos não inertes em baixas quantidades
3	Gera resíduos inertes em grandes quantidades
4	Gera resíduos inertes em baixas quantidades
5	Etapa do processo não gera nenhum resíduo

### 3.2.5.4 KPI Emissão Atmosférica

As resoluções CONAMA nº 382 e 436, estabelecem os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, em que se fixa limites específicos de emissão para cada tipo de fonte ou combustível utilizado.

Fonte: MURAD (2020)

Aplicando a Tabela 3.40, foi possível a mensuração do KPI emissões atmosféricas.

Tabela 3.40: Emissões Atmosféricas

Valor	Descrição
1	Valores emitidos acima da norma
3	Valores emitidos dentro da norma
5	Etapa do processo não emite

### 3.2.5.5 KPI Plano de Emergência

O Plano de Emergência é um conjunto de planos de ação previamente elaborados para atender a ocorrência de acidentes com produtos químicos. O objetivo é estabelecer estratégias e requisitos mínimos de planejamento das ações que serão empregadas no atendimento de situações de emergências entre órgãos e instituições públicas, privadas e comunidade.

O KPI Plano de Emergência é obtido conforme escala apresentada na Tabela 3.41.

Para a mensuração deste KPI, foi feita uma avaliação da etapa do processo produtivo que se buscou evidências da existência de planos de emergências e foram realizadas auditorias a fim de verificar a aderência ao plano proposto.

Tabela 3.41: Plano de Emergência

Valor	Descrição
1	Inexistência de um de plano e ações emergência
2	Funcionários conhecem as ações (mas não existe plano de emergência implantado)
4	Existência de plano de emergência (sem evidência de treinamento)
5	Plano de emergência implantado e todos os funcionários treinados

### 3.2.5.6 KPI Eficiência no Uso de Água

A aplicação da Tabela 3.42, fornece a forma de obter o KPI eficiência no uso de água.

Para a mensuração deste KPI, foi feita uma avaliação da etapa do processo produtivo em que se objetivou a detecção de ações que contribuam para ações de eficiência no uso de água, como a presença de desperdícios (como vazamentos) e a existência de mecanismo de reuso.

Fonte: MURAD (2020)

Tabela 3.42: Uso de Água

Valor	Descrição
1	Nenhuma água é reaproveitada
2	Quantidade grande de água não reaproveitada
4	Quantidade insignificante de água não reaproveitada
5	Reaproveitamento total de água na etapa do processo

### 3.2.5.7 KPI Geração de Águas Residuais

O KPI eficiência no uso de água, é obtido conforme escala apresentada na Tabela 3.43. Para a mensuração deste KPI, foi feita uma avaliação da etapa do processo produtivo em que se objetivou a detecção da geração de águas residuais.

Tabela 3.43: Geração de Água Residuais

Valor	Descrição
1	Grandes quantidades geradas com necessidade de tratamento
2	Baixas quantidades de águas residuais geradas com necessidade de tratamento
4	Águas residuais geradas podem ser descartas sem prejuízo ao meio ambiente
5	Etapa do processo não gera águas residuais

### 3.2.5.8 . KPI Descarte de Águas Residuais

O KPI Descarte de Águas Residuais é mensurado conforme escala apresentada na Tabela 3.44. Para a mensuração deste KPI, foi feita uma avaliação da etapa do processo produtivo a qual objetivou a detecção e destinação das mesmas.

Tabela 3.44: Descarte Águas Residuais

Valor	Descrição
1	Geração sem destinação dentro da própria empresa
3	Geração com destinação dentro da própria empresa
5	Etapa do processo não gera águas residuais

### 3.2.5.9 KPI Emissão de Gás de Efeito Estufa (GEE)

O KPI GEE foi calculado utilizando a metodologia ABNT ISO/TS 14067 (ABNT, 2013).

Fonte: MURAD (2020)

Como cada etapa do processo tem sua particular característica, foi analisado e determinado o limite de controle por meio da identificação das atividades a serem consideradas no cálculo da pegada de carbono, procedeu-se à escolha de dados referentes às emissões de GEE relativas a cada uma das atividades durante os doze meses.

Com os dados obtidos e tratados, opera-se a conversão em kg de CO<sub>2</sub> eq utilizando-se a metodologia da norma. A Equação 3.7 representa a fórmula genérica utilizada no cálculo da pegada de carbono da empresa.

$$PG \text{ (kg de CO}_2\text{ eq)} = \Sigma GEE \times PAG \quad \text{Eq. 3.7}$$

Sendo que: GEE representa as emissões do gás com efeito de estufa da atividade analisada (kg); PAG é o potencial de aquecimento global do gás com efeito de estufa extraído da ABNT ISO/TS 14067 (ABNT, 2013).

Os resultados do cálculo da pegada de carbono foram agrupados de acordo com o tipo de emissão (diretos ou indiretos) associado a cada uma das atividades consideradas, conforme descrito na ABNT ISO/TS 14067 (ABNT, 2013).

Assim, o KPI GEE será obtido em comparação em porcentagem ao valor do GEE<sub>R</sub> (GEE de referência), ou seja, do GEE de outra opção de processo de fabricação distinta ao processo analisado. O valor será mensurado conforme a Tabela 3.45.

Tabela 3.45: GEE

Valor	Descrição
1	$2 \text{ GEE}_R \leq \text{GEE}$
2	$1,51 \text{ GEE}_R \leq \text{GEE} \leq 2 \text{ GEE}_R$
3	$1,21 \text{ GEE}_R \leq \text{GEE} \leq 1,5 \text{ GEE}_R$
4	$\text{GEE}_R \text{ } 0,1 \leq \text{GEE} \leq 1,2 \text{ GEE}_R$
5	GEE é o menor valor em % da empresa

### 3.3 Consolidação dos Resultados dos KPIs

Após a mensuração dos 42 KPIs, obtém-se o nível de sustentabilidade de cada KPI. Eles são apresentados em forma de relatório, conforme a Figura 4.2 e as Tabelas 4.1 a 4.5. O nível de sustentabilidade de cada KPI pode variar gradativamente de 1 (um), que corresponde a pior situação; até o valor 5, melhor situação.

Fonte: MURAD (2020)