

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**GIOVANNI PIETRO CAMARGO ASSUNÇÃO CIVOLANI
PAULO HENRIQUE NAKAYABU**

**AVALIAÇÃO DA GESTÃO ENERGÉTICA DE UMA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA E PROPOSIÇÃO DE MELHORIA ATRAVÉS DE
ELEMENTOS DA INDÚSTRIA 4.0: UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

CURITIBA

2021

**GIOVANNI PIETRO CAMARGO ASSUNÇÃO CIVOLANI
PAULO HENRIQUE NAKAYABU**

**AVALIAÇÃO DA GESTÃO ENERGÉTICA DE UMA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA E PROPOSIÇÃO DE MELHORIA ATRAVÉS DE
ELEMENTOS DA INDÚSTRIA 4.0: UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

**Evaluation of energy management of an automotive industry and proposal for
improvement through industry 4.0 elements: a multi-criteria approach**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Eduardo de Freitas Rocha Loures

CURITIBA

2021



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GIOVANNI PIETRO CAMARGO ASSUNÇÃO CIVOLANI
PAULO HENRIQUE NAKAYABU**

**AVALIAÇÃO DA GESTÃO ENERGÉTICA DE UMA INDÚSTRIA
AUTOMOBILÍSTICA E PROPOSIÇÃO DE MELHORIA ATRAVÉS DE
ELEMENTOS DA INDÚSTRIA 4.0: UMA ABORDAGEM MULTICRITÉRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação,
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 08 de outubro de 2021.

Eduardo de Freitas Rocha Loures, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Jorge Assade Leludak, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Angela Pradella, Dra.
PUC - PR

CURITIBA

2021

Agradecemos aos nossos pais, familiares e amigos por todo apoio e incentivo ao longo de nossa trajetória acadêmica. Este trabalho é dedicado a vocês.

RESUMO

Diante do contexto atual de altos preços da energia elétrica, preocupações ambientais e a necessidade de ser cada vez mais eficiente para ser competitivo no mercado, as indústrias enfrentam o desafio de reduzir seu consumo energético de forma sustentável. Esse grande desafio, junto à necessidade de automatizar os processos de forma integrada, exige que a empresa atue de forma precisa na hora de escolher em quais tecnologias investir. A partir disso, o trabalho em questão avalia quais as melhores tecnologias da indústria 4.0 a serem aplicadas para a indústria em questão fazer da forma mais efetiva a sua gestão energética. O escopo desse trabalho propõe a elaboração de um modelo de avaliação baseado em métodos de avaliação multicritério, que auxiliaram na análise da fase diagnóstica através do AHP (Analytic Hierarchy Process) e na fase de avaliação e priorização das tecnologias através do PROMETHEE. Os resultados obtidos mostram que a indústria automobilística onde o estudo foi conduzido encontra-se em um nível avançado quando se fala em operação e processo, porém em um nível inferior de maturidade nos aspectos de medição e estratégia. A partir disso, foram propostas melhorias utilizando os habilitadores tecnológicos com maior impacto positivo na empresa, “Integração de Sistemas”, Big Data & Analytics” e “Internet das Coisas”.

Palavras-chaves: Indústria 4.0, Quarta Revolução Industrial, métodos multicritério, AHP, PROMETHEE, Gestão Energética, indústria automobilística.

ABSTRACT

Given the current context of high electricity prices, environmental concerns and the need to be increasingly efficient to be competitive in the market, industries face the challenge of reducing their energy consumption in a sustainable way. This great challenge with the need to automate processes in an integrated way, requires the company to be precise when choosing which technologies to invest. The work in question evaluates which are the best technologies of industry 4.0 to be applied for the industry in question to make their energy management in the most effective way. The scope of this work proposes the elaboration of an evaluation model based on multi criteria evaluation methods, which helped in the analysis of the diagnostic phase through the AHP (Analytic Hierarchy Process) and in the evaluation and prioritization phase of technologies through PROMETHEE. The results show that the automotive industry where the study was conducted is at an advanced level when it comes to operation and process, but at a lower level of maturity in terms of measurement and strategy. From this, improvements were proposed using the technological enablers with the greatest positive impact on the company, system Integration, Big Data & Analytics and Internet of Things.

Keywords: Industry 4.0, Fourth Industrial Revolution, Multi Criteria Methods, AHP, PROMETHEE, Energy Management, Automotive Industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução anual do consumo de energia elétrica no mundo.....	15
Figura 2 - Estrutura de desenvolvimento do projeto.....	16
Figura 3 - Participação de energias renováveis na matriz energética brasileira.....	19
Figura 4 - Quem usou a energia no Brasil.....	20
Figura 5 - Consumo de energia na indústria em 2018.	20
Figura 6 - Ciclo PDCA.	22
Figura 7 - Tecnologias habilitadoras.	27
Figura 8 - Revolução dos modelos de produção.....	27
Figura 9 - Lista de tecnologias adotadas.....	28
Figura 10 - Arquitetura para fábricas inteligentes.....	34
Figura 11 - Estrutura geral do processo de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM).	38
Figura 12 - Atividades dos envolvidos dentro do processo de análise multicritério...39	
Figura 13 - Exemplo de estrutura do AHP para definição de geração energética.....44	
Figura 14 - Matriz quadrada gerada no passo três do método AHP.45	
Figura 15 - Exemplo de matriz comparativa com seus pesos atribuídos.45	
Figura 16 - Índice Randômico Médio do método AHP.47	
Figura 17 - Estrutura do AHP para avaliação diagnóstica da gestão energética da empresa53	
Figura 18 - Seção do formulário de avaliação do especialista.54	
Figura 19 - Exemplo da matriz avaliativa da maturidade no método PROMETHEE. 55	
Figura 20 - Exemplo de cálculo dos pesos globais e invertido/normalizado.57	
Figura 21 - Nível de maturidade da empresa.62	
Figura 22 - PROMETHEE Rainbow com nível de maturidade dos critérios.64	
Figura 23 - PROMETHEE Rankings - PROMETHEE II.....65	
Figura 24 - Pesos dos critérios da ISO 50001 e grau de preferência das tecnologias.67	
Figura 25 - Sete menores pesos dos critérios da ISO 50001 ajustados e grau de preferência das tecnologias.....68	

Figura 26 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Medição.	70
Figura 27 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Processo.	71
Figura 28 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Estratégia.	72
Figura 29 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Operação.....	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - PDCA na gestão energética.....	21
Quadro 2 - Adaptação do Modelo de maturidade baseado na ISO 50001.....	23
Quadro 3 - Relatórios de consultorias analisados.....	28
Quadro 4 - Definição das tecnologias.	29
Quadro 5 - Benefícios e limitações dos métodos MCDM.....	37
Quadro 6 - Métodos MCDM - Vantagens, desvantagens e aplicação.....	40
Quadro 7 - Escala de peso utilizada no AHP para definir grau de importância de um critério em relação a outro.....	42
Quadro 8 - Funções de preferência do método PROMETHEE.....	48
Quadro 9 – Filtro para definição dos habilitadores tecnológicos.....	58
Quadro 10 - Nível de inconsistência avaliativa do especialista.....	60
Quadro 11 - Resumo dos resultados da avaliação diagnóstica no AHP.....	61
Quadro 12 - Resumo dos habilitadores tecnológicos recomendados para cada conjunto de critérios.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
ABESCO	Associação Brasileira de Empresas e Serviços de Conservação de Energia
ABIMAQ	Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
CLP	Controlador Lógico Programável
CNI	Confederação Nacional da Indústria
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
I4.0	Indústria 4.0
IoT	<i>Internet of Things</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MCDM	<i>Multicriteria Decision Making</i>
PDCA	<i>Plan-Do-Check-Act</i>
PROMETHEE	<i>Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations</i>
SGE	Sistema de Gestão de Energia
Mtep	Milhões de toneladas equivalentes de petróleo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivos Gerais	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 GESTÃO ENERGÉTICA E A NORMA ABNT NBR ISO 50001	18
2.2 INDÚSTRIA 4.0	26
2.3 GESTÃO ENERGÉTICA E A INDÚSTRIA 4.0	33
2.4 MÉTODOS MCDM (MULTI-CRITERIA DECISION MAKING)	36
2.4.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)	42
2.4.2 PROMETHEE	47
3 DESENVOLVIMENTO	50
3.1 EMPRESA	50
3.2 FASE DIAGNÓSTICA – AHP	51
3.2.1 Modelagem do Método	51
3.2.2 Avaliação dos critérios (<i>Pairwise Comparison</i>)	54
3.3 MATURIDADE E FASE DECISIONAL – PROMETHEE	54
3.3.1 Pesos de cada critério para avaliação da maturidade e etapa decisional	56
3.3.2 Avaliações (<i>Evaluations</i>)	57

4 RESULTADOS	60
4.1 AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA (AHP)	60
4.2 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE (PROMETHEE)	62
4.3 AVALIAÇÃO DECISIONAL (PROMETHEE)	65
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, dois temas vêm sendo alvos de grandes discussões em todo o mundo: Eficiência Energética e Indústria 4.0. Historicamente, com os avanços da tecnologia e com o crescimento populacional, a demanda por energia elétrica vem aumentando significativamente. Dados do *Global Energy Statistical Yearbook* mostram que houve um aumento de 120% no consumo de energia elétrica total entre os anos de 1990 e 2018, sendo o continente Asiático quem demonstrou maior crescimento neste período. Ao tomar como base os últimos dez anos, ainda assim o aumento é bem significativo, com um percentual de crescimento, no período, de 18,7% e média de 2,7% ao ano.

Logo, o assunto energia é de suma importância, pois um aumento descontrolado do consumo e, conseqüentemente, da geração de energia (queima de combustíveis fósseis), pode conduzir o planeta a um caminho sem volta no que diz respeito às conseqüências que isso pode gerar ao meio ambiente. Ao olhar para os níveis de consumo de energia elétrica em território nacional, as conclusões são as mesmas, e destaca-se o consumo oriundo da indústria, a qual possui uma grande parcela de contribuição.

Analisando os dados do Consumo Nacional de Energia Elétrica na Rede por Classe: 1995 - 2018 (Empresa de Pesquisa Energética - EPE), no Brasil a indústria respondeu por mais de 1/3 do consumo total de energia em 2018. Este fato mostra que é imprescindível um olhar mais atento para esse setor, buscando novas formas de se fazer uma gestão energética eficiente nos parques fabris.

Como alternativa para esta demanda, um dos pontos amplamente abordados atualmente são os conceitos relacionados à Indústria 4.0, que promete aumentar a eficiência, tanto operacional quanto energética, das fábricas através da integração de sistemas e do acesso muito maior às informações, com o uso de ferramentas como *Big Data*, Inteligência Artificial, Computação em Nuvem e IoT (*Internet of Things*) .

Segundo Marr (2018), a Indústria 4.0 utilizará o que foi iniciado na terceira Revolução Industrial com a adoção de computadores e automação, e irá melhorá-la acrescentando sistemas inteligentes e autônomos abastecidos com dados e “*machine learning*”, que é um ramo da inteligência artificial pautado na tentativa de fazer com que sistemas aprendam sozinhos a interpretar, identificar padrões e tomar as melhores decisões com o mínimo de intervenção humana.

Sob esta perspectiva, é de suma importância que as empresas comecem a se mover em direção às novas tendências trazidas pela Indústria 4.0, pois esta será um grande diferencial estratégico e trará benefícios não só para o setor industrial, com a redução de custos operacionais e otimização de seus processos, mas também ao meio ambiente, tornando possível uma gestão mais eficiente dos recursos energéticos.

Deste modo, este trabalho visa desenvolver um modelo de avaliação multicritério da gestão energética de uma indústria automobilística e propor melhorias sob requisitos da Indústria 4.0.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Este projeto de pesquisa propõe analisar, através de uma abordagem multicritério, o nível de maturidade energética de uma empresa e propor, sob aspectos da Indústria 4.0, ferramentas que poderão contribuir para uma melhor gestão energética da mesma. Para isso, tomou-se como caso de aplicação uma fábrica de motores de uma empresa do ramo automobilístico situada na cidade de Curitiba (PR).

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

Segundo a ABIMAQ (Associação Brasileira da Indústria de Máquinas e Equipamentos), devido ao baixo investimento ao longo das últimas décadas no parque industrial brasileiro, o país possui máquinas e equipamentos muito antigos e defasados em relação às necessidades do setor, fato que contribui para piorar os indicadores tanto de produtividade como de consumo energético em relação a outros países.

Em um estudo feito pela ABDI (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial), a estimativa anual de redução de custos industriais no Brasil, a partir da migração da indústria para o conceito 4.0, será de, no mínimo, R\$ 73 bilhões/ano. Essa economia envolve ganhos de eficiência, redução nos custos de manutenção de máquinas e consumo de energia.

A partir disso, nota-se que a indústria 4.0 e a eficiência energética possuem papéis fundamentais quando se trata de modernização, efetividade e redução de custos de uma planta industrial.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivos Gerais

Desenvolver um modelo multicritério para avaliação da Gestão Energética de uma empresa do ramo automobilístico, sob uma perspectiva diagnóstica com base em modelo de maturidade, e decisória na recomendação de requisitos e habilitadores tecnológicos da Indústria 4.0 para aprimoramento do nível de maturidade.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Revisar bibliografia a respeito da Gestão Energética, Indústria 4.0 e métodos *Multi Criteria Decision Making* (MCDM);
- Estruturar abordagem para diagnóstico da maturidade da Gestão Energética com base no método AHP;
- Estruturar abordagem decisional com base no método PROMETHEE II considerando requisitos e habilitadores tecnológicos da Indústria 4.0;
- Avaliar a proposição de melhoria da Gestão Energética sob a base decisional proposta por meio de caso de aplicação.

1.4 JUSTIFICATIVA

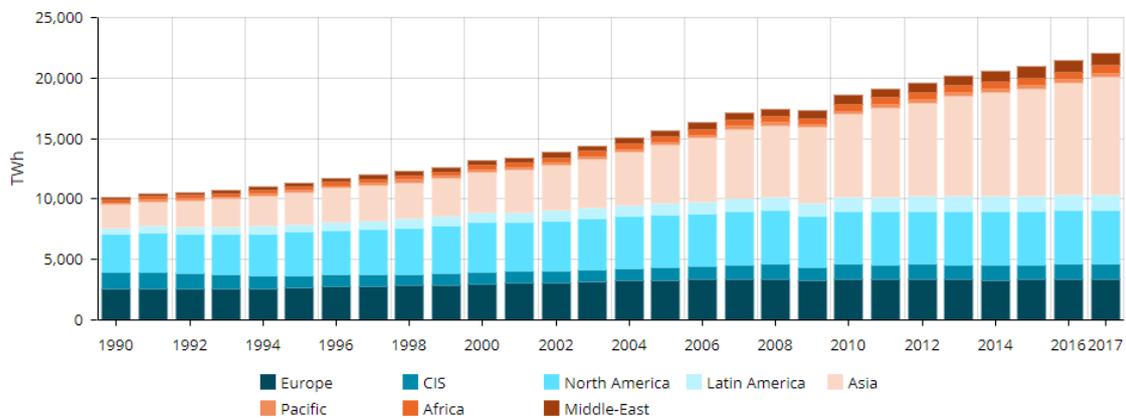
A indústria, como um todo, vem se aprimorando cada vez mais na busca por processos de produção e gerenciamento mais eficientes. Isso, aliado ao ritmo acelerado do surgimento de novas tecnologias, tem gerado demandas que, aos poucos, tornar-se-ão imprescindíveis para a sobrevivência de empresas em determinados segmentos da indústria, como a automobilística, por exemplo.

A indústria tem sido um motor para o crescimento, prosperidade e inovação nos países ao redor do mundo, sendo a precoce industrialização um dos fatores que mais contribuíram para a ascensão das maiores economias atuais, como Alemanha, Japão e Estados Unidos (*World Economic Forum*, 2018). Segundo o relatório “*Readiness for the Future of Production Report 2018*” do Fórum Econômico Mundial, que mostra como está a preparação dos países para o futuro, o Brasil, a Argentina e a África do Sul, possuem os menores níveis de preparação para o futuro da produção

dentro do G20 (países que respondem por cerca de 80% do valor agregado na Manufatura). Como barreiras que contribuem para essa colocação no ranking, o relatório define como principais a falta de competências da força de trabalho na área de habilidades digitais, engenharia e pensamento crítico.

A questão energética e os impactos ambientais gerados por ela são assuntos recorrentes em território nacional e ao redor do mundo.

Figura 1 - Evolução anual do consumo de energia elétrica no mundo.



Fonte: *Global Energy Statistical Yearbook (2018)*

Segundo dados do Consumo Anual de Energia Elétrica por Classe, relatório feito pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a Indústria respondeu por 36% do consumo total de energia elétrica no Brasil. Esse número, analisado em conjunto com os dados do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), mostra que ao considerar as indústrias, residências e comércio, o desperdício de energia chega a 22 milhões de kW, o que representa cerca de US\$ 1,54 bilhões por ano, refletindo a grande relevância que o assunto gestão energética possui atualmente.

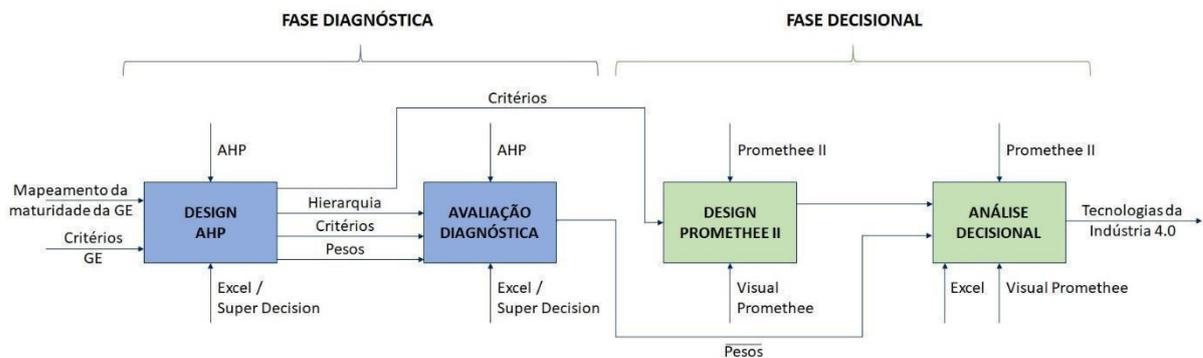
Diante dos pontos levantados, percebe-se que estudos nas áreas de desenvolvimento tecnológico e energia são de suma importância para que o Brasil continue a crescer de forma sustentável.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento se deu pelo estudo e pesquisa dos assuntos relacionados à Gestão Energética, Indústria 4.0 e aos métodos de análise multicritério. Para isso, foi caracterizado um grupo de pesquisa, onde fazem parte o próprio orientador, uma doutora com tese dentro do mesmo tema, e os dois alunos responsáveis por este trabalho de conclusão de curso.

O projeto teve duas fases, sendo uma diagnóstica e outra decisória, as quais podem ser vistas com maiores detalhes na figura 2.

Figura 2 - Estrutura de desenvolvimento do projeto.



Fonte: Autoria própria, 2019

Na fase diagnóstica, mais especificamente no design do método AHP, o software *Excel / Super Decision* foi utilizado como ferramenta para implementação do método, que teve como *input* os critérios de avaliação da maturidade da Gestão Energética extraídos da norma ISO 50001 (quadro 2). As saídas desta etapa serviram como entradas para a avaliação diagnóstica e para o design do método PROMETHEE, sendo a primeira uma etapa onde os especialistas avaliaram os critérios par a par, com o intuito de verificar os pesos relativos de cada um deles, e a segunda etapa a construção da estrutura para que a avaliação dos critérios em relação às tecnologias habilitadoras descritas no quadro 5 fosse realizada.

A última etapa do processo foi a Análise Decisional, onde foi utilizado o software *Visual PROMETHEE* para, através do método PROMETHEE, criar o ranqueamento das tecnologias mais bem avaliadas em relação aos critérios pelos especialistas.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho de conclusão de curso foi estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução, onde foram explanadas as motivações para este projeto, bem como seus objetivos, procedimentos e cronograma de execução;
- Capítulo 2 – Referencial Teórico, onde consta todo o estudo e pesquisa realizada para suportar o que foi desenvolvido neste trabalho;
- Capítulo 3 – Desenvolvimento, onde está disponível todas as análises e tratamentos de dados que foram realizados;
- Capítulo 4 – Resultados, onde constam as decisões a respeito de quais tecnologias da Indústria 4.0 são mais eficazes para sanar os problemas da Gestão Energética da empresa e melhorar o seu nível;
- Capítulo 5 – Conclusão, onde a equipe fez suas considerações a respeito dos resultados obtidos e os aprendizados adquiridos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A revisão bibliográfica realizada busca clarificar e fundamentar os assuntos tratados neste trabalho, de forma que todas as etapas descritas no capítulo 3 (Desenvolvimento) possam ser compreendidas sem maiores problemas. A pesquisa e levantamento teórico foram baseados na análise de livros e artigos de autores relevante dentro das áreas de Gestão Energética, Indústria 4.0 e Métodos MCDM.

2.1 GESTÃO ENERGÉTICA E A NORMA ABNT NBR ISO 50001

A energia é um insumo extremamente importante para a operação das organizações. Além dos impactos econômicos, a eficiência energética remete a importantes impactos ambientais. Qualquer fonte energética, mesmo as renováveis, tem impactos ambientais significativos.

A partir da revolução industrial, ao fim do século XVIII e principalmente durante o século XX, a atividade humana exerceu grande impacto ao meio ambiente. O crescimento populacional e consumo pessoal, majoritariamente em países desenvolvidos, gerou diversos problemas ambientais unindo pesquisadores, ambientalistas, governos, organizações não governamentais e comunidades a fim de buscar uma resposta.

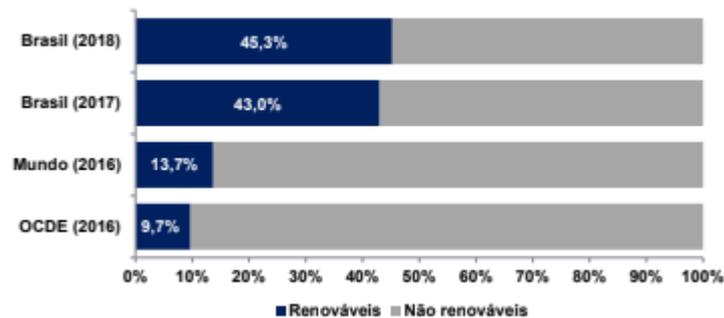
A utilização de energia e a exploração exacerbada representa grande parte dos problemas. No processo de geração de energia, é causado alguns efeitos como poluição, chuva ácida, destruição da cama de ozônio, aquecimento da terra e destruição da fauna e flora (Consumo Sustentável, 2015)¹.

Em 2015, entrou em vigor o sistema de bandeiras tarifárias (ANEEL, 2013), onde é incluído na conta de energia elétrica dos consumidores, uma sobretaxa nos custos como acréscimo pelo uso das termelétricas para a geração de energia. Em outubro de 2015 o Governo Federal adotou medidas com o Decreto nº 8.540 (BRASIL, 2015) que, em seu artigo quarto, trata da implementação de ações com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica.

¹ Acesso disponível em:
https://www.mma.gov.br/estruturas/educamb/_arquivos/consumo_sustentavel.pdf

Estas medidas importantes foram tomadas para redução do consumo de energia no Brasil, e em seu Balanço Energético Nacional (BEN) de 2019, ano base 2018, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) registrou uma diminuição de 1,0% na produção de energia total no Brasil em relação ao ano anterior, enquanto que o uso de energias renováveis na matriz brasileira cresceu de 43,0% em 2017 para 45,3% em 2018. O maior causador disso foi o aumento da geração de energia eólica e hidráulica.

Figura 3 - Participação de energias renováveis na matriz energética brasileira.



Fonte: BEN, 2019

Segundo a ABESCO (Associação Brasileira de Empresas e Serviços de Conservação de Energia), o Brasil desperdiçou 60 mil GWh de energia em 2017, o maior número desde que a ABESCO iniciou o monitoramento dos dados em 2008.

Atualmente, a produção industrial e o transporte de carga/passageiros correspondem a 64,4% da utilização total de energia no Brasil.

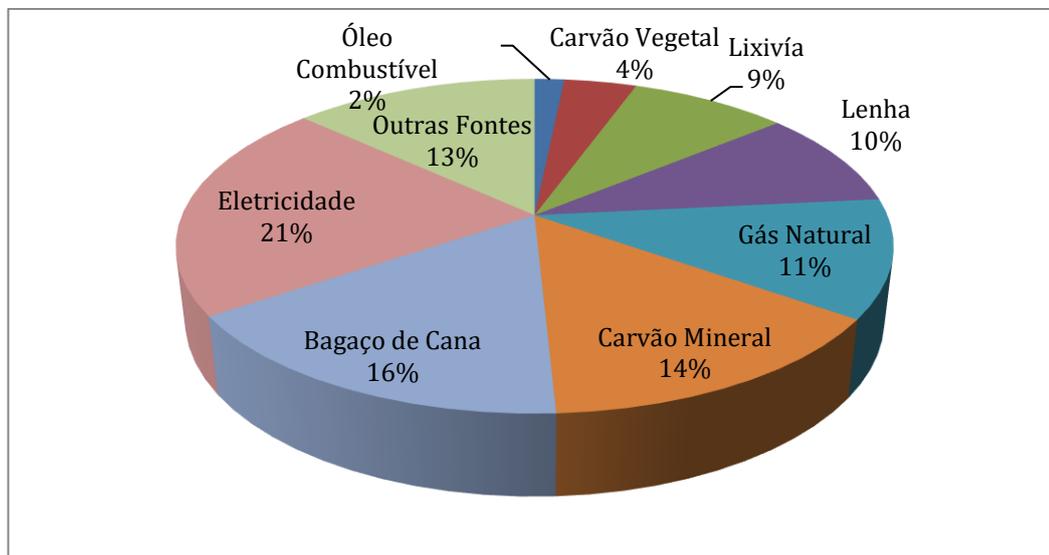
Figura 4 - Quem usou a energia no Brasil.



Fonte: BEN, 2019

Na Indústria nacional, do ano de 2017 para o ano de 2018, o consumo de energia caiu 4,8%, de 85,1 Mtep em 2017 para 80,9 Mtep em 2018.

Figura 5 - Consumo de energia na indústria em 2018.



Fonte: Adaptado de BEM, 2019

A racionalização do uso dos recursos energéticos e as ações de redução do consumo e melhora na eficiência causam grandes benefícios para melhoria do desempenho energético de uma organização (SGS Sustentabilidade)².

² Acesso disponível em: <https://sgssustentabilidade.com.br/eficiencia-energetica/>

Em 2011, foi lançada no Brasil a norma ABNT NBR ISO 50001 – Sistema de Gestão de Energia (SGE) - que tem como objetivo permitir que as organizações estabeleçam os sistemas e processos necessários para melhorar continuamente o desempenho energético, incluindo a eficiência energética, o uso da energia e o consumo da energia.

Os resultados da aplicação da norma incluem a redução dos custos de produção e o aumento da segurança energética. Indiretamente, são reduzidas as emissões de gases do efeito estufa e, assim, atenuadas as mudanças climáticas. (Guia para aplicação da norma ABNT NBR ISO 50001 Gestão de Energia, 2015)³

O SGE é baseado na estrutura de melhoria contínua Plan-Do-Check-Act (PDCA). Segundo a norma, no contexto de gestão de energia, a abordagem do PDCA pode ser descrita conforme quadro 1.

Quadro 1 - PDCA na gestão energética.

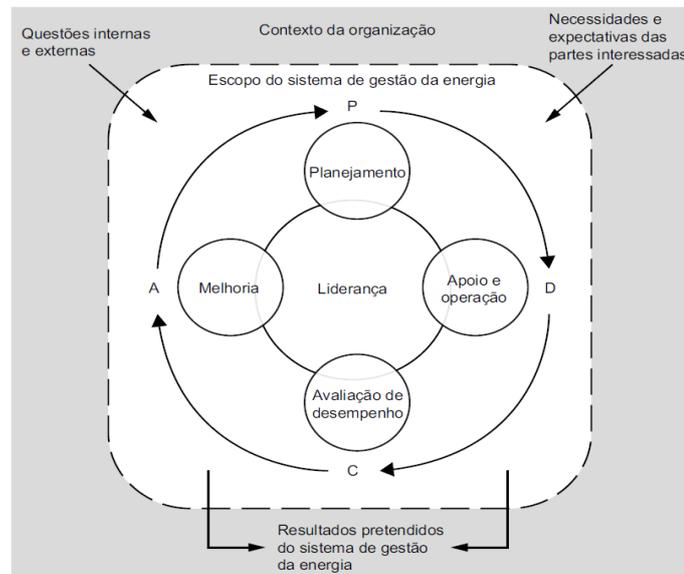
Plan (Planejar)	Compreender o contexto da organização, estabelecer uma política energética e uma equipe de gestão da energia, considerar as ações para enfrentar os riscos e oportunidades, conduzir uma revisão energética, identificar os usos significativos de energia (USE), os indicadores de desempenho energético (IDE), a(s) linha(s) de base energética(s) (LBE), objetivos e metas energéticas, e planos de ação necessários para obter resultados que levarão à melhoria do desempenho energético de acordo com a política energética da organização.
Do (Fazer)	Implementar os planos de ação, controles de operação e manutenção, e comunicação, assegurar competências e considerar o desempenho energético no projeto e aquisição.
Check (Checar)	Monitorar, medir, analisar, avaliar, auditar e realizar análise(s) crítica(s) pela direção do desempenho energético e do SGE.
Act (Agir)	Adotar ações para tratar não conformidades e melhorar continuamente o desempenho energético e o SGE.

Fonte: NBR ISO 50001, 2011

A figura 6 mostra uma representação do Ciclo PDCA em uma organização do ponto de vista da gestão energética.

³ Acesso disponível em: <https://www.procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/4/2018/03/mot-guia-gestao-de-energia.pdf>

Figura 6 - Ciclo PDCA.



Fonte: NBR ISO 50001

Com uma abordagem sistemática, a implementação eficiente do método para acentuar o desempenho energético, pode-se alterar como é realizado o gerenciamento de energia das organizações.

Quando a gestão de energia é inserida às atividades dos negócios, as organizações podem estabelecer uma melhoria contínua no desempenho energético. Com a melhora no desempenho energético, em conjunto com a redução dos custos de energia, aumenta-se a competitividade entre as organizações. E além dos motivos já citados, a implementação pode ajudar as organizações a atender suas metas climáticas, com a redução da emissão de gases de efeito estufa relacionadas ao uso da energia (ISO 50001).

Pode-se obter os seguintes benefícios para as organizações através da gestão dos recursos energéticos:

- Melhores práticas para gestão da energia elétrica;
- Com a implementação de novas tecnologias, permite-se realizar melhorias estruturais, nas instalações e, também no sistema de produção das empresas;
- Redução da emissão de gases de efeito estufa;
- Política interna de bom consumo de energia elétrica;
- Ações tomadas a partir de dados sobre consumo e fontes de energia utilizadas na empresa;

- Promove melhorias contínuas nas organizações.

Quadro 2 - Adaptação do Modelo de maturidade baseado na ISO 50001.

Processo ISO 50001	Fase PDCA	Nível de Maturidade		
		Nível 1: Inicial	Nível 2: Gerenciado	Nível 3: Definido
Estabelecimento do Sistema de Gestão da Energia (SGE)	Plan	SGE não foi implementado	Alguns procedimentos do SGE foram implementados	Todos os requisitos do SGE foram atendidos e descritos em manual
A AD demonstra comprometimento com a gestão da energia	Plan	O comprometimento não existe	O comprometimento é focado em requisitos legais e problemas maiores. Recursos com alocação Ad-hoc	O comprometimento existe, o desempenho energético é considerado no planejamento a longo prazo. Recursos são alocados
Indicar Gestor Energético	Plan	Gestor energético não existe	O gestor energético existe, mas essa não é sua função principal. Seu papel não foi precisamente definido	O gestor energético existe e possui papel bem definido
Definição da política energética	Plan	Não há política energética	A política energética considera apenas requisitos legais. A política não é comunicada	A política energética existe. A política energética é comunicada internamente, revisada e atualizada
Planejamento Energético	Plan	Não há planejamento energético	Alguns usos de energia são informalmente planejados	O planejamento energético é documentado, oportunidades de melhoria são revisadas
Identificação e avaliação de requisitos legais para energia	Plan / Check	Requisitos legais não foram identificados	Os requisitos legais foram identificados, mas não são aplicados	Requisitos legais foram documentados e aplicados
Revisão Energética (RE)	Plan	Não há revisão energética	A revisão energética inclui apenas fontes de energia e usos, ocasionalmente gravados	Fontes de energia, uso passado e atual, usuários significativos de energia, parâmetros influentes, previsão de futuras oportunidades de uso e melhoria são documentados

Estabelecimento da Linha de Base Energética (LBE)	Plan	A LBE não foi estabelecida	A LBE foi estabelecida para alguns processos	A LBE foi documentada e é ajustada
Definir Indicadores de Desempenho Energético (IDE)	Plan	IDE não foram definidos	Alguns indicadores energéticos foram definidos	Os indicadores de energia foram documentados para todos os usuários significativos de energia, bem como a metodologia de monitoramento.
Definição dos Objetivos, Metas e Planos de Ação	Plan	Objetivos, metas e planos de ação não existem	Objetivos e metas existem, mas não há planos de ação para alcançá-los	Objetivos, metas e planos de ação são documentados. Os planos de ação são revisados.
Implementação do Planejamento Energético	Do	O planejamento não foi definido	Alguns planos definidos são aplicados	Os planos são implementados e alcançados
Envolvimento dos Funcionários na Gestão da Energia	Do	Envolvimento pessoal, conscientização e treinamento não existem	Envolvimento pessoal existe parcialmente. Existe consciência. Alguns treinamentos são fornecidos. Competências não planejadas são revisadas	O envolvimento pessoal está documentado. O pessoal é competente e consciente. As habilidades são melhoradas através do treinamento. A eficácia do treinamento é monitorada
Comunicação Interna e Externa	Do	Não há comunicação	A comunicação interna é informal	A comunicação interna é documentada. Qualquer um pode dar sugestões para melhorias de desempenho energético
Gerenciamento de documentação e de registros da energia	do	O gerenciamento de documentação e registros não existe.	O gerenciamento de documentação e registros existe parcialmente	O gerenciamento de documentação e registros é formalizado. Todos os documentos e registros do SGE necessários existem.
Controle operacional que afeta o desempenho energético	do	O controle operacional não existe	Alguns processos que afetam significativamente o uso de energia são definidos, bem como alguns critérios de trabalho efetivo.	O controle operacional foi documentado através de procedimentos. Os processos que afetam significativamente o uso de energia são definidos e os critérios de trabalho efetivo são aplicados.

Design e renovação de instalações, equipamentos, sistemas e processos de eficiência energética	do	Design e renovação não consideram o impacto no desempenho energético.	Design e renovação consideram o impacto no desempenho energético, mas nem sempre, nem documentado.	Design e renovação consideram o impacto no desempenho energético. Existem registros sobre os resultados.
Compras insumos energéticos/equipamentos com critério eficiência energética	do	Não existem aquisições eficientes em termos energéticos.	Existe uma oferta de eficiência energética, mas nem sempre é aplicada	A aquisição de energia eficiente está documentada. O uso de energia é um dos critérios de aquisição. Os fornecedores são informados de que o desempenho energético é um critério de avaliação.
Monitoramento, medição e análise de indicadores de energia	check	Monitoramento, medição e análise não existem.	Os indicadores são periodicamente monitorados, mas sem um plano de medição. A análise é limitada.	O monitoramento, a medição e a análise estão documentadas. Os indicadores são monitorados, medidos e analisados. Existe um plano de medição. O equipamento está calibrado.
Auditoria interna do sistema de gestão da energia	check	A auditoria interna não existe.	A auditoria interna existe parcialmente, mas sem um plano.	A auditoria interna está documentada e registrada. O plano de auditoria e o cronograma são definidos. Os auditores são competentes e imparciais.
Implementação da ação corretiva e preventiva relacionada à energia	check	Ações corretivas e preventivas não estão implementadas	As ações corretivas são implementadas somente para grandes não-conformidades, mas ações preventivas não são implementadas	As ações corretivas / preventivas estão documentadas. As não-conformidades são revisadas à medida que elas ocorrem. As ações corretivas são realizadas e registradas em resposta a não-conformidades. As ações preventivas são limitadas.
Revisão da gestão da energia/Análise crítica AD	act	A revisão da gestão da energia não existe	A revisão da gestão é parcialmente realizada, mas sem plano.	A revisão da gestão é documentada e conduzida a intervalos planejados. As ações resultantes das tendências observadas são realizadas.

2.2 INDÚSTRIA 4.0

A evolução da tecnologia levou a mudanças na forma de produção. Três marcos históricos foram definidos como Revoluções Industriais, estudados após acontecerem (LASI et al., 2014). As primeiras três revoluções industriais ocorreram num período de quase 200 anos. A primeira revolução industrial (1780) ocorreu pela concepção dos teares mecânicos dirigidos por motores a vapor e causou a centralização do processo de produção em fábricas; a segunda aconteceu cerca de 100 anos depois e tem como marca as linhas de produção e a construção do Ford T; a terceira ocorreu em 1969, quando foi apresentado o primeiro Controlador Lógico Programável (CLP), que permitiu a programação de sistemas digitais (DRATH; HORCH, 2014).

O termo “Indústria 4.0” ficou conhecido publicamente em 2011 a partir de uma iniciativa do governo alemão que promovia a ideia como uma abordagem para fortalecer a competitividade de suas indústrias de transformação (Hermann et al., 2016).

A incorporação da digitalização à atividade industrial resultou no conceito de Indústria 4.0 e em referência ao que seria a 4ª revolução industrial. Caracterizada pela integração e controle da produção a partir de sensores e equipamentos conectados em rede e da fusão do mundo real, o surgimento de tecnologias avançadas e recentes trouxe novas oportunidades que impactam na forma de produzir e gerenciar nas indústrias (INDÚSTRIA, 2016).

Para a revolução, existem algumas principais tecnologias que foram essenciais, como a internet das coisas, o big data, a computação em nuvem, a robótica avançada, a inteligência artificial, novos materiais e as novas tecnologias de manufatura aditiva, como impressão 3D e manufatura híbrida que são as funções aditivas e de usinagem em uma mesma máquina.

Figura 7 - Tecnologias habilitadoras.



Fonte: Portal da Indústria, 2016⁴

Nas indústrias inteligentes, máquinas e insumos interagem durante as ações dos processos industriais com escala e flexibilidade, ocorrendo de forma autônoma. Dispositivos locais ou em áreas distintas da empresa podem conversar entre si e trocar informações causando uma otimização logística, aproximando mais os elos de uma cadeia produtiva. A ideia de Indústria 4.0 é mais do que a integração dos processos ligados a produção e distribuição, também envolve elementos ligados a cadeia de valor, do desenvolvimento de novos produtos, como projeto, desenvolvimento, testes e até mesmo a simulação das condições de produção, até o pós-venda.

Figura 8 - Revolução dos modelos de produção.



Fonte: Portal da Indústria, 2016⁵

⁴ Acesso disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>

⁵ Acesso disponível em: <https://www.portaldaindustria.com.br/publicacoes/2016/8/desafios-para-industria-40-no-brasil/>

Quatro relatórios foram tomados como base para levantar as tecnologias associadas à I4.0, que podem ser observados no quadro 3.

A partir disso, obteve-se 27 tecnologias distintas a serem utilizadas para analisar o panorama da organização que será implementada o método.

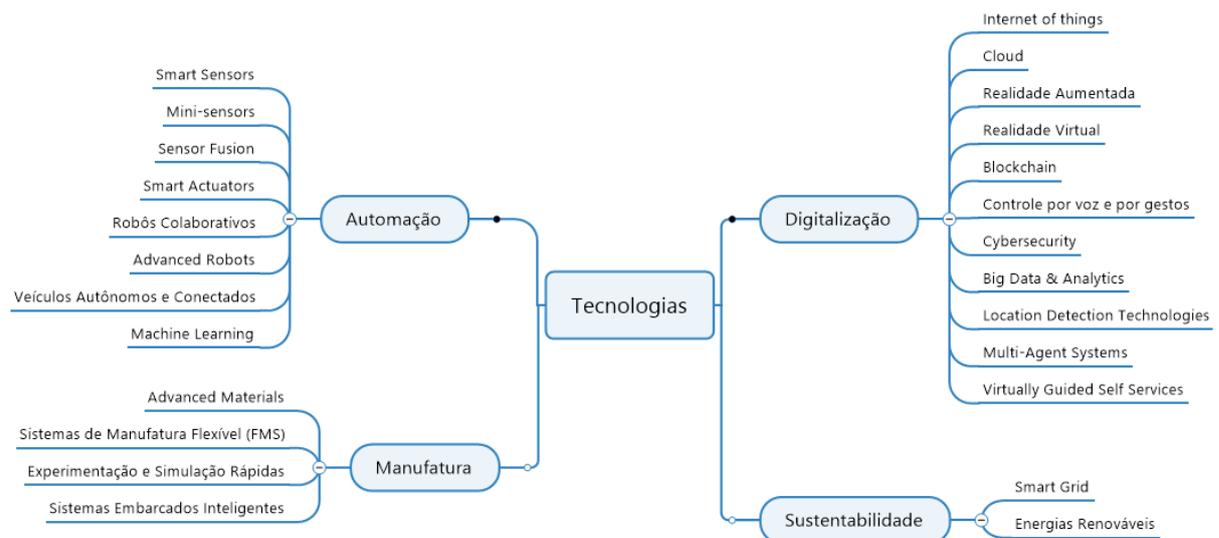
Quadro 3 - Relatórios de consultorias analisados.

Título do Relatório	Empresa(s)	Número de Tecnologias	Referências
"Industry 4.0 - The Capgemini Consulting View"	Capgemini Consulting	7	(Bechtold et al., 2014)
"Industry 4.0: Building the digital enterprise"	Price Waterhouse Coopers	11	(Reinhard et al., 2016)
"Industry 4.0: The new industrial revolution How Europe will succeed"	Roland Berger Strategy Consultants	13	(Dujin et al., 2014)
"Industry 4.0 - how to navigate digitization of the manufacturing sector"	McKinsey & Company	26	(Wee et al., 2015)

Fonte: Autoria própria, 2019

Para facilitar sua organização, essas tecnologias foram divididas em quatro áreas: Automação, Digitalização, Manufatura e Sustentabilidade. A listagem dessas tecnologias, assim como a sua respectiva área, pode ser observada na Figura 9.

Figura 9 - Lista de tecnologias adotadas.



Fonte: Adaptado de BRUNHEROTO (2019)

Em relação as definições das tecnologias listadas na Figura 9, elas podem ser observadas no quadro 4 mais detalhadas.

Quadro 4 - Definição das tecnologias.

Tecnologias		Definição
Automação	Advanced Robots	São robôs equipados com "sentidos aprimorados, destreza e inteligência". Exemplo: robôs capazes de reconhecer padrões (pattern recognition) e reavaliar uma tarefa de montagem independentemente da posição das peças em uma mesa de trabalho (Kopacek, 2015; Pfeiffer, 2016).
	Machine Learning	O aprendizado automático explora o estudo e construção de algoritmos que podem aprender com seus erros e fazer previsões sobre dados. Tais algoritmos operam construindo um modelo a partir de entradas a fim de fazer previsões ou tomar decisões guiadas pelos dados em vez de simplesmente seguindo inflexíveis e estáticas instruções programadas (Bishop, 2013; Miškuf & Zolotová, 2016).
	Mini-Sensors	Sensores com áreas de detecção ativas abaixo de 1 μm^2 . Exemplo: nanosensores (Dahlin, 2012).
	Robôs Colaborativos	Robôs que auxiliam operadores humanos, trabalhando em conjunto com eles, complementando suas capacidades e os aliviando de tarefas mais árduas, como, por exemplo, o levantamento de cargas pesadas (Rosenberg et al., 2015; Sitek & Martinec, 2016).
	Sensor Fusion	É a combinação de dados de diferentes sensores com diferentes grandezas, de modo que a informação resultante tenha menos incerteza do que seria possível se as mesmas fossem usadas individualmente. Exemplo: utilização de diversos sensores para o reconhecimento do ambiente, como por exemplo, em carros autônomos que usam sensores de imagem, proximidade, velocidade, aceleração e localização para entenderem o ambiente ao redor e seus riscos (Elmenreich, 2002).
	Smart Actuators	São atuadores que adaptam o seu comportamento ao perfil não-linear dos sistemas nos quais são aplicados, armazenando seus parâmetros em função da posição e carga, supervisionando todos os elementos relevantes e realizando diagnósticos de falha automaticamente. Exemplo: os atuadores de um acelerador permitem o controle automático da velocidade do motor para reduzir o ruído e as emissões e também melhorar a economia de combustível (Hozdic, 2015).

	Smart Sensors	São sensores com algum tipo de inteligência embutida, capazes de desempenhar funções mais avançadas do que sensores comuns, que apenas realizam a medição de uma determinada grandeza física. Exemplos de funções mais avançadas incluem: condicionamento de sinal incorporado, auto-calibração, auto-identificação, auto-diagnóstico e conectividade em rede (Mattoli et al., 2010; Torres, 2014).
	Veículos Autônomos e Conectados	São veículos que utilizam qualquer uma das várias tecnologias de comunicação para se comunicar com o motorista, outros carros na estrada (V2V - veículo a veículo), infra-estrutura rodoviária (V2I - veículo a infra-estrutura) e a "nuvem". Esta tecnologia pode ser usada não só para melhorar a segurança do veículo, mas também para melhorar a eficiência do veículo e os tempos de viagem. Exemplos: veículos autônomos, AGVs (Automated Guided Vehicles) e SGVs (Self Guided Vehicles), dentre outros (Chai et al., 2017; Zhang et al., 2018).
Digitalização	Internet Of Things (IoT)	IoT refere-se à interconexão em rede de objetos cotidianos via Internet, que muitas vezes são equipadas com algum tipo de inteligência, integrando cada objeto para interação um com o outro e levando a uma rede de dispositivos que interagem com seres humanos (Rüßmann et al., 2015; Xia et al., 2012).
	Cloud	Cloud Computing descreve aplicações e soluções de infra-estrutura entregues como serviços de redes públicas ou privados em uma base de pagamento por uso, acessíveis em qualquer lugar e a qualquer momento (Bechtold et al., 2014; Yue et al., 2015).
	Realidade Aumentada (AR)	Realidade aumentada (Augmented Reality - AR) é a sobreposição de informações geradas virtualmente em uma perspectiva de um ambiente real, cujos elementos são sensorialmente aumentados por som, vídeo, gráficos ou dados GPS. Exemplo: uso de uma câmera de um dispositivo móvel para capturar imagens do mundo real e à partir disso acrescenta um pouco mais de informação que pode ser interessante em certos contextos, como avaliar se um móvel representado virtualmente fica bem em um ambiente a partir de uma foto do mesmo (Paelke, 2014).
	Realidade Virtual (VR)	Realidade virtual (Virtual Reality - VR) é a simulação de um ambiente real de forma virtual, permitindo que usuários interajam com essa simulação. Exemplo: uso de simuladores em casos que fazer com que uma pessoa treine uma certa tarefa pode ser muito difícil, muito caro e muitas vezes simplesmente impossível de ser feito (simulador de aeronaves) (Gorecky et al., 2015; Quint et al., 2015).

Blockchain	O blockchain (também conhecido como “o protocolo da confiança”) é uma tecnologia que visa a descentralização como medida de segurança. São bases de registros e dados distribuídos e compartilhados que possuem a função de criar um índice global para todas as transações que ocorrem em um determinado domínio de aplicação. Funciona como um livro-razão, só que de forma pública, compartilhada e universal, que cria consenso e confiança na comunicação direta entre duas partes, ou seja, sem o intermédio de terceiros. Exemplo: Bitcoin (Biswas & Muthukkumarasamy, 2016; Boulos et al., 2018).
Controle Por Voz e Gestos	São Interfaces Homem-Máquina (IHMs, que incluem qualquer dispositivo ou software que permite interação com uma máquina) que aceitam entradas na forma de gestos corporais ou por meio de comandos de voz (Gorecky et al., 2014).
Cybersecurity	É o corpo de tecnologias, processos e práticas projetados para proteger redes, computadores, programas e dados contra ataques, danos ou acessos não autorizados. Em um contexto computacional, a segurança inclui tanto a segurança cibernética quanto a segurança física. Por exemplos, defesa em profundidade (defense-in-depth), que atribui um grau de proteção a cada informação corporativa dependendo de sua classificação, usando tecnologias como Firewalls, IPS/IDS (Intrusion Prevention System/Intrusion Detection System), controle de acesso e criptografia, dentre outros (Kobara, 2016; Rüßmann et al., 2015).
Big Data & Analytics	Softwares e sistemas que podem interpretar e analisar dados recebidos em massa (Big Data). O Analytics se refere à análise dessa grande massa de dados de forma a encontrar relações entre os dados que possam fornecer melhores insights para a melhoria de processos e produtos e a exploração de novos mercados (Kang et al., 2016; Rüßmann et al., 2015).
Location Detection Technologies	Tecnologias que fornecem informações em tempo real sobre a localização de dispositivos, máquinas, equipamentos, produtos, materiais e outros elementos físicos. Por exemplo: GPS, WiFi, endereços IP e outros (Australian Law Reform Commission, 2008).
Semantics Visualization	São tecnologias que permitem a criação de visualizações interativas assistidas por computador para buscas exploratórias, compreensão do domínio do conhecimento e tomada de decisão baseada no significado de um conjunto de dados. Exemplos: softwares como Tableau e PowerBI, que permitem que dados de um questionário possam ser inseridos em um mapa para permitir a visualização da quantidade de

		respondentes por região do mapa (Nazemi et al., 2015).
	Multi-Agent Systems	Um sistema multi-agente é uma rede de entidades de resolução de problemas ligeiramente acopladas que trabalham juntas para encontrar respostas a problemas que estão além das capacidades individuais ou conhecimento de cada entidade. Exemplo: considerando cada processo de fabricação em sequência como um agente, uma parada inesperada em algum desses processos acarretará na parada automática dos processos anteriores, que se comunicariam para coordenar essa parada (Kadera & Novák, 2015; Wang et al., 2015).
	Virtually Guided Self-Services (VGSS)	São tecnologias que apoiam a execução assistida de serviços que tem como objetivo melhorar as áreas mais comuns de uma organização, como o desempenho e a configuração de sistemas de informação, o gerenciamento de grandes volumes de dados, o gerenciamento de mudanças, e a otimização e segurança e processos de negócios. Exemplos: sistemas Oracle e SAP que embutem assistentes para algumas tarefas, como por exemplo, um processo de compras e seus formulários (Costa et al., 2016; Klaus et al., 2000; Shkurskii & Sabel'nikova, 2011)
Manufatura	Advanced Materials	Materiais avançados referem-se a todos os novos materiais e modificações a materiais existentes para obter desempenho superior em uma ou mais características que são críticas para produtos ou processos. Exemplos: ligas de Alumínio de alta resistência, compósitos de matriz de metal, polímeros de alta temperatura e alta resistência (PEEK e PPS, por exemplo), dentre outros (Maine & Garnsey, 2006).
	Sistemas de Manufatura Flexível (FMS)	Sistemas de fabricação flexíveis consistem em um conjunto de máquinas flexíveis (robôs, máquinas multifunções ou estações de trabalho), um sistema de transporte automático e alguma tecnologia de tomada de decisão para decidir em cada instante (quando) o que tem que ser feito (o que) e em qual máquina (onde). A flexibilidade pode estar associada à máquina, ao manuseio e uso de materiais, à operação, ao processo, ao produto, ao roteamento da produção, ao volume, à expansão ou ao programa de produção, dentre outros. Exemplo: máquinas CNC associadas a robôs e esteiras transportadoras (Niggemann & Kroll, 2014).

	Impressão 3D	Também chamada de manufatura aditiva, refere-se à produção de objetos tridimensionais diretamente de modelos virtuais. Isso permite prototipagem rápida e processos de produção altamente descentralizados: o modelo do produto pode ser simplesmente enviado para o local de "impressão" mais próximo do cliente, eliminando etapas intermediárias de fabricação, transporte e armazenagem (Bechtold et al., 2014; Kang et al., 2016).
	Experimentação e Simulação Rápida	A lógica é que ao introduzir simulações no início do processo de design do produto, um design de produto ruim pode ser eliminado em uma fase anterior e as iterações de desenvolvimento e design tornam-se mais rápidas. Assim, o tempo para se levar produtos ao mercado pode ser reduzido. Exemplo: simulações fluidodinâmicas (CFD-Simulation) ou simulações do comportamento término de edificações (Constantinescu et al., 2015; Rüßmann et al., 2015).
	Sistemas Embarcados Inteligentes	São sistemas que operam de forma autônoma, coletando dados sobre seu próprio desempenho, carga de uso ou ambiente para melhorar seu desempenho e vida útil, aumentar a qualidade ou garantir a satisfação do cliente. Exemplo: manutenção inteligente de atuadores, que regulam sua forma de operação a diferentes perfis de carga de forma a aumentar sua vida útil (Jazdi, 2014).
Sustentabilidade	Smart Grid	Smart Grid é uma filosofia de gestão da rede de distribuição de energia elétrica que busca modernizar e otimizar essa rede para que seja mais eficiente, segura e ambientalmente sustentável. Um Smart Grid é baseado em elementos para o armazenamento de energia elétrica, sensores que detectam distúrbios e aplicativos inteligentes que podem desligar em resposta a flutuações de frequência, dentre outros (Siemens, 2010).

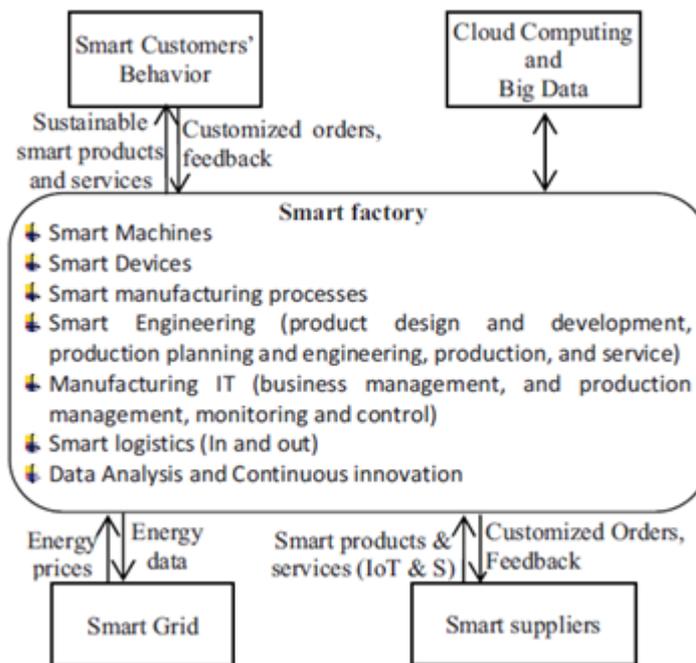
Fonte: Autoria própria, 2019

2.3 GESTÃO ENERGÉTICA E A INDÚSTRIA 4.0

A gestão energética é um dos pilares da indústria 4.0 devido a uma combinação de aspectos ambientais, redução de custos e leis ambientais mais rígidas. Visto que a falta de conhecimento à respeito do consumo energético de uma planta fabril seja a principal razão para não se conseguir melhorar a sua eficiência energética, as tecnologias provenientes da Indústria 4.0 podem ser amplamente

aplicadas para determinar “quem”, “onde”, “quando” e “quanto” tem se desperdiçado de energia. Habilitadores como a Internet das coisas (IoT – Internet of Things) terão papel importante no que diz respeito à medição inteligente e coleta de dados, em tempo real, do consumo energético de uma empresa (Shrouf et al., 2014), proporcionando ao gestor a capacidade de tomar decisões mais rápidas e assertivas. A figura 10 representa uma estrutura possível para fábricas inteligentes.

Figura 10 - Arquitetura para fábricas inteligentes.



Fonte: Schrouf et al., 2014

Com as tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como sensores, sistemas de supervisão e atuadores inteligentes, objetiva-se melhorar a sustentabilidade do negócio nas suas mais diversas áreas, internas e externas, aumentando sua flexibilidade e previsibilidade, monitoramento, conscientização, tomada de decisão e, principalmente, a percepção de valor para o cliente final.

Algumas das tecnologias mais utilizadas atualmente para suportar a gestão energética estão descritas a seguir.

- i) *Industrial Internet of Things (IIoT)*: trata-se de um dos conceitos mais difundidos no meio atualmente, sendo muitas vezes utilizadas como sinônimo para a Indústria 4.0. Segundo Hounshell (2018), o termo *Internet of Things*, ou IoT, como é mais conhecido, se refere a uma “rede

de dispositivos físicos embarcados com sensores, atuadores, eletrônica e conectividade, possibilitando a integração do mundo físico aos sistemas informatizados”. Na gestão energética, essa tecnologia se aplica na conectividade entre medidores e toda a estrutura de automação e informação das organizações, potencializando as capacidades de coleta de dados, comunicação e no armazenamento de uma grande massa de dados relacionados ao consumo, transformação e geração energética.

- ii) *Big Data*: com o auxílio de sensores e sistemas de supervisão, uma grande massa de dados gerados pelas máquinas e sistemas existentes dentro de uma organização podem ser capturados e armazenados, fornecendo ao gestor um grande embasamento para resoluções de problemas complexos e crônicos. Segundo Pimentel (2018), na gestão energética e utilidades, instrumentos de medição sofisticados, cujo custo de compra e instalação têm reduzido cada vez mais, são capazes de coletar e analisar grandezas físicas que permitem o conhecimento e compreensão dos processos existentes, sendo possível o monitoramento de variáveis que “vão desde a potência aplicada, por exemplo, até harmônicas que descrevem a qualidade da energia elétrica consumida”;
- iii) *Data Analytics e Machine Learning*: apenas possibilitar a coleta e armazenamento de grande quantidade de dados provenientes de máquinas e sistemas, sem uma inteligência capaz de efetuar as análises necessárias, não faz com que o potencial analítico e, conseqüentemente, de resolução de problemas que as tecnologias da Indústria 4.0 podem fornecer, seja atingido. Por este motivo, habilitadores como *Data Analytics* e *Machine Learning*, serão essenciais para uma gestão energética mais eficiente.

O crescente desenvolvimento de recursos computacionais tem possibilitado a implementação de técnicas de Aprendizagem de Máquina e Análise de Dados, com o objetivo de prever variáveis e identificar padrões relacionados aos problemas, suportando a organização na tomada de ações mais assertivas e rápidas, poupando tempo e recursos.

Segundo Pimentel (2018), os dados disponíveis podem ter como saída, por exemplo, os três itens descritos a seguir:

- a) modelos para previsão do consumo de energia (ou sua geração) nas operações, tendo como base os volumes planejados de produção e de outras variáveis;
- b) modelos que mostrem ao gestor quais as formas mais eficientes, do ponto de vista energético, de utilizar seus recursos dentro da operação;
- c) modelos de análise de eficiência energética dentro dos processos, através do conhecimento das entradas e saídas do mesmo, bem como dos processos intermediários.

2.4 MÉTODOS MCDM (MULTI-CRITERIA DECISION MAKING)

Decisões devem ser tomadas a todo momento, e para que a melhor escolha seja feita, muitos fatores devem ser avaliados para garantir que todas as necessidades de quem está tomando a decisão sejam atendidas. Como seres humanos, à medida que o número de elementos a serem levados em consideração aumenta, a nossa capacidade de processar, enxergar as contradições e condicionar as interfaces entre cada um deles torna-se cada vez mais limitada, potencializando a possibilidade de uma escolha incorreta.

Pavan e Todeschini (2015, p. 591) descrevem que um processo de decisão pode ser organizado em três fases:

1. Identificação e estruturação do problema, que consiste na identificação do propósito da decisão, no reconhecimento do problema a ser resolvido, no diagnóstico das relações de causa e efeito para a situação da decisão e na identificação dos critérios de julgamento.
2. Desenvolvimento e uso do modelo, que inclui o desenvolvimento de modelos formais da preferência do tomador da decisão para comparar entre si as alternativas ou ações em consideração de uma forma sistemática e transparente.
3. Desenvolvimento do plano de ação, uma vez que a análise não resolve a decisão.

Diante deste cenário, os Métodos Multicritérios de Tomada de Decisão (MMTD), do inglês Multi-Criteria Decision Making (MCDM), como é mais conhecido, surge como uma excelente opção. Através do MCDM é possível tratar problemas envolvendo múltiplos critérios que impactam a escolha final (MOHAMED et al., 2015), resultando em tomadas de decisões onde as melhores soluções são escolhidas, ou seja, quando se seleciona a opção onde os pontos positivos gerados são maiores que as possíveis perdas do problema que temos em mãos (PAVAN et al., 2009).

Vale ressaltar que decisões não são somente para definir uma alternativa ou caminho a se seguir, mas as decisões também estão presentes quando há a necessidade de priorizar as alternativas disponíveis para fazer uma melhor alocação dos recursos da empresa (PAVAN et al., 2015).

Recentemente, pode-se perceber que muitos métodos MCDM têm surgido (MILANOVIC, et al., 2019), cada qual com as suas especificidades e melhores casos para implementação (FADAEI, et al., 2016). O quadro 5 exemplifica alguns dos métodos disponíveis atualmente, bem como os seus benefícios.

Quadro 5 - Benefícios e limitações dos métodos MCDM.

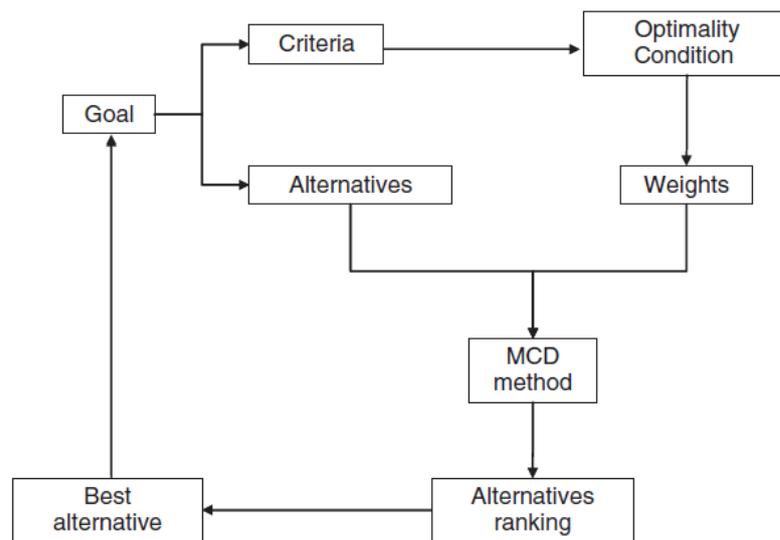
Núm.	Método	Benefícios
1	AHP	<p>Simplicidade e transparência (Anagnostopoulos e Vavatsikos, 2006).</p> <p>Realismo, capacidade, flexibilidade, fácil de usar, oportunidade e rentabilidade (Palcic e Lalic, 2009).</p> <p>Versatilidade para uma variedade de projetos ou alternativas e critérios (Kwok, 2011).</p> <p>Efetivo e prático para licitações complexas, fazendo uso da análise de comparação par a par, a qual é simples e preciso (Padumadasa e Rehan, 2009).</p> <p>A importância de cada critério pode ser vista claramente, na forma de uma estrutura hierárquica, enquanto o teste de consistência reduz o viés na tomada de decisões (Aruldoss et al., 2013).</p>

2	ANP	Independência entre elementos não é requerido e a predição é precisa as prioridades são melhoradas por feedback (Aruldoss et al. 2013)
3	Fuzzy AHP	Capacidade de lidar com ambiguidade, e gerenciar dados quantitativos e qualitativos simultaneamente usando números fuzzy (Hwang et al., 2005; Mahmoodzadeh et al., 2007).
4	TOPSIS	Capaz de mensurar o critério relativo de resultados alternativos de uma forma matemática (Mahmoodazdeh et al., 2007)

Fonte: Adaptado de Lamsali, et al., 2015

Pavan e Todeschini (2015, p. 593) propõem uma estrutura geral para o processo MCDM, o qual pode ser visualizado na figura 11.

Figura 11 - Estrutura geral do processo de Tomada de Decisão Multicritério (MCDM).



Fonte: Pavan, et al. (2015)

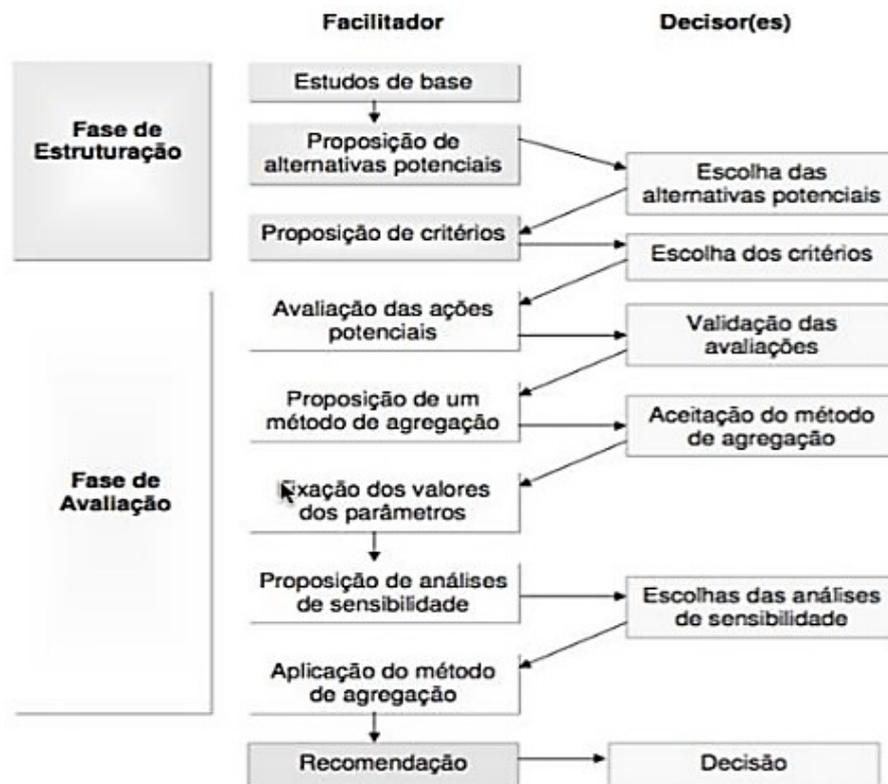
A partir da análise da figura 11 e fazendo uma correlação com o que descreve Soares (2003), tem-se as seguintes ações dentro de cada etapa do fluxograma:

- i. *Goal*: trata-se da decisão propriamente dita, o problema a ser resolvido;
- ii. *Alternatives*: os especialistas consultados dentro do processo levantam um conjunto de opções que sanam o problema proposto;
- iii. *Criteria*: critérios de avaliação, os quais devem permitir a avaliação dos efeitos causados pelas alternativas escolhidas;

- iv. *Weights*: valor atribuído a cada um dos critérios, de forma a elencá-los de acordo com a sua importância na tomada de decisão;
- v. *MCDM Method*: Especialistas no assunto abordado preenchem a matriz de avaliação dos critérios. Um modelo matemático é responsável por efetuar a agregação destes critérios e, após a avaliação e comparação da pontuação dos critérios para cada uma das alternativas disponíveis, sugere uma classificação ordenada (Pareto) das alternativas;
- vi. *Best Alternative*: Etapa onde a decisão é realizada.

A figura 12 mostra também, de forma clara, as ações dos envolvidos dentro do processo de tomada de decisão multicritério (facilitador e decisor).

Figura 12 - Atividades dos envolvidos dentro do processo de análise multicritério.



Fonte: Vilas Boas , 2018

Como visto anteriormente, muitos métodos MCDM existem, sendo que cada um deles atende a um tipo de análise específico. Para atender as demandas deste trabalho, conforme proposta feita no capítulo 1, os métodos mais utilizados atualmente são o AHP, PROMETHEE, ELECTRE e TOPSIS. Hester e Velásquez (2013)

realizaram um levantamento destes métodos, listando as vantagens, desvantagens e áreas de aplicação para cada um deles, o que pode ser verificado no quadro 6.

Quadro 6 - Métodos MCDM - Vantagens, desvantagens e aplicação.

Método	Vantagens	Desvantagens	Áreas de Aplicação
Analytic Hierarchy Process (AHP)	Fácil de usar; escalável; Estrutura hierárquica pode facilmente se ajustar para tratar problemas de diversos tamanhos; Necessidade de poucos dados.	Problemas devido a interdependência entre critérios e alternativas; pode levar a inconsistências entre julgamento e critérios ranqueados.	Problemas relacionados à performance, gestão de recursos, estratégia e política corporativa, políticas públicas, estratégia política e planejamento.
PROMETHEE	Fácil de usar; não exige suposição de que os critérios sejam proporcionais.	Não fornece um método claro pelo qual se avaliam os pesos.	Meio Ambiente, Hidrologia, Gestão da água, negócios e finanças, química, logística e transporte, manufatura e montagem, energia, agricultura.
ELECTRE	Levam a incerteza e indecisões em conta.	Seu processo e resultado podem ser difíceis de explicar em termos simples; as alternativas fortes e fracas não são diretamente identificadas.	Energia, economia, meio ambiente, gestão da água e problemas de transporte.
Technique for Order Preferences	Tem um processo simples; fácil de usar e programar; o	Seu uso da Distância Euclidiana não considera a correlação	Gestão da cadeia de suprimentos, engenharia,

by Similarity to ideal Solutions (TOPSIS)	número de etapas permanece o mesmo independentemente do número de atributos.	dos atributos; dificuldade para dar peso e manter a consistência do julgamento.	sistemas de manufatura, negócios e marketing, meio ambiente, recursos humanos e gestão dos recursos da água.
---	--	---	--

Fonte: adaptado de Hester et al., 2013

Sendo o escopo do trabalho a avaliação da gestão energética de uma empresa automobilística e a proposição de habilitadores tecnológicos da Indústria 4.0 para uma melhor gestão, vê-se a necessidade de construir uma estrutura hierárquica para os critérios que serão levados em consideração no processo. Para definir qual o método mais adequado para o estudo proposto, utilizar-se-á a estrutura do Process Approach (PLATTS, 1993), o qual leva em consideração três critérios principais:

- i) Factibilidade: valida-se o critério se o método escolhido pode ser seguido (PLATTS, 1993). Para que a avaliação possua um nível maior de 'factibilidade do processo', recomenda-se o uso de diferentes especialistas responsáveis no julgamento dos critérios inseridos no método selecionado;
- ii) Usabilidade: o método deve ser claro quanto às avaliações necessárias e à forma como a sua condução é realizada (PLATTS, 1993). Para tal finalidade, questionários (abertos ou fechados) podem ser utilizados para se ter um diagnóstico do grau de maturidade da área analisada;
- iii) Utilidade: pode ser avaliada indiretamente, levando em conta os objetivos definidos para a gestão energética, identificação dos problemas durante o processo e pelos planos de ação gerados.

Logo, partindo dessa estrutura de decisão, este trabalho direciona-se à utilização do método AHP, devido à facilidade e clareza durante a utilização e a sua adaptação à problemas de diferentes tamanhos e por sua abordagem diagnóstica. Para a formação da matriz decisional e análise das alternativas existentes de acordo com os pesos atribuídos a cada critério dentro do método AHP, utilizar-se-á o método

PROMETHEE. A estrutura aqui definida pode ser verificada com mais detalhes no capítulo 1 (figura 2).

Os métodos selecionados para suportar este trabalho são apresentados a seguir.

2.4.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

Introduzido por Thomas L. Saaty, o AHP é caracterizado como um dos métodos MCDM mais utilizados atualmente quando se deseja obter um diagnóstico relacionado a um determinado assunto. Como ressaltado no quadro 3, o AHP é muito utilizado devido à sua facilidade de uso, transparência e adaptabilidade a problemas de diversos tamanhos (Lamsali et al., 2015). Segundo Saaty (2008), “o AHP é uma teoria de medição através de comparações par a par, e depende do julgamento de especialistas para obter escalas de prioridade”. Logo, as comparações, antes de serem realizadas, necessitam que seus critérios recebam pesos através dos julgamentos dos especialistas envolvidos, a fim de que o método, através de uma modelagem matemática, possa informar o quanto um elemento se sobressai a um outro elemento (Saaty, 2008).

Segundo Saaty (2008), “para fazer comparações é necessária uma escala de número que indiquem quantas vezes mais importante, ou dominante, um elemento é sobre outro elemento”. Dentro do método AHP, para dar peso aos critérios comparados, utiliza-se uma escala conhecida como Escala Saaty. Essa escala define qual o grau de prioridade de um elemento em relação ao outro, em que o nível um indica um mesmo grau de importância e o nível nove define um dos critérios como extremamente mais importante que o outro. O quadro 7 representa os índices utilizados dentro do método AHP.

Quadro 7 - Escala de peso utilizada no AHP para definir grau de importância de um critério em relação a outro.

Intensidade da importância	Definição	Explicação
1	Mesma importância	Duas atividades contribuem igualmente para o objetivo

2	Importância fraca	-
3	Importância moderada	Experiência e julgamento levemente a favor de uma atividade em relação a outra
4	Importância moderada "plus"	-
5	Importância forte	Experiência e julgamento fortemente a favor de uma atividade em relação a outra
6	Importância forte "plus"	-
7	Importância muito forte	Uma atividade é fortemente favorecida em relação à outra; sua dominância é demonstrada na prática
8	Importância muito, muito forte	-
9	Importância extrema	A evidência que favorece uma atividade em detrimento de outra é da mais alta ordem possível de afirmação
Recíprocos dos valores acima de zero	Se uma atividade i tem um número não nulo que lhe é atribuído quando comparado com uma atividade j, então j tem um valor de reciprocidade	Suposição razoável
1.1 – 1.9	Se as atividades são muito próximas	Apesar de ser difícil atribuir o melhor valor devido a homogeneidade de grau de importância das atividades, esta escala é necessária para manter a consistência do modelo.

Fonte: Saaty, 2008

Para que uma decisão seja tomada de uma forma organizada, Saaty (2008) definiu que a decisão precisa ser decomposta nos seguintes passos:

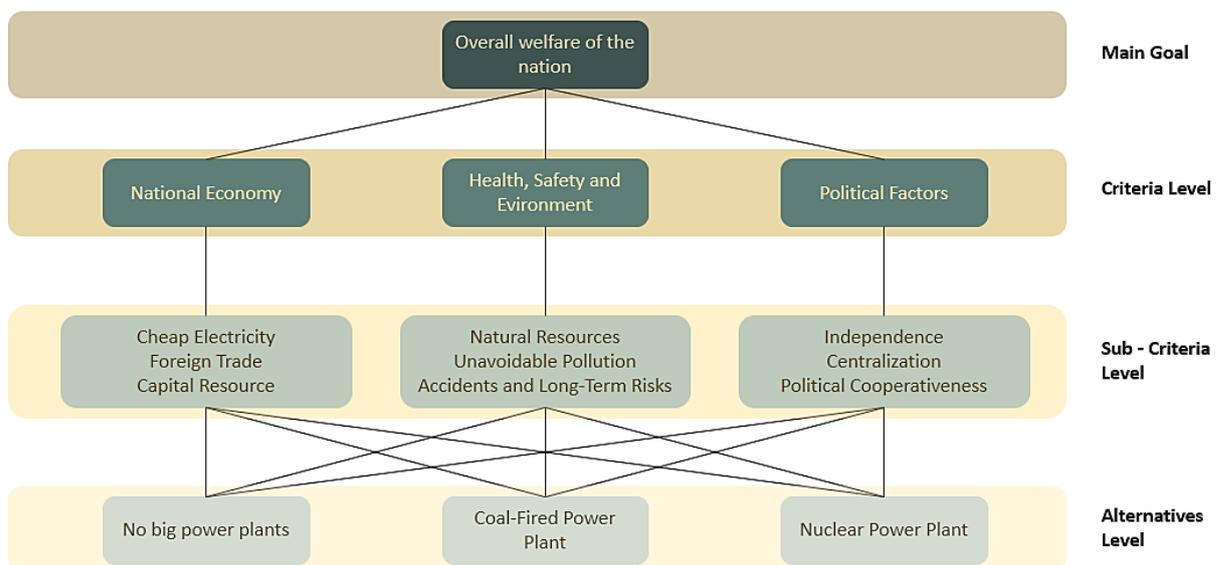
- i) Definir o problema e determinar o tipo de conhecimento procurado;
- ii) Estruturar a hierarquia de decisão pelo topo com os objetivos da decisão, e após isso os objetivos em uma perspectiva mais ampla, através dos

níveis intermediários (critérios dos quais os elementos subsequentes dependem) para os níveis mais baixos (que geralmente é um grupo de alternativas);

- iii) Construir um grupo de matrizes de comparação par a par. Cada elemento em um nível superior é usado para comparar os elementos no nível imediatamente abaixo tomando-o como referência;
- iv) Usar as prioridades obtidas nas comparações para pesar as prioridades no nível imediatamente abaixo. Faça isso para cada elemento. Em seguida, para cada elemento no nível abaixo, adicione seus valores ponderados e obtenha sua prioridade geral ou global. Continue esse processo de pesagem e adição até que as prioridades finais das alternativas no nível mais baixo sejam obtidas.

A figura 13 é um exemplo de representação da estrutura do AHP após completados os passos um e dois definidos por SAATY (2008). A estrutura demonstra como o objetivo definido, os critérios, sub-critérios e as opções (alternativas) estão hierarquizadas.

Figura 13 - Exemplo de estrutura do AHP para definição de geração energética.



Fonte: Adaptado de SAATY, 1987

Os passos três e quatro utilizam-se dos julgamentos dos especialistas para o seu desenvolvimento, sendo divididos em três categorias (RODRIGUES, 2010 *apud* PRADELLA, 2018):

- i. Matrizes Comparativas;
- ii. Normalização e Cálculo dos Pesos;
- iii. Razão de Consistência.

i. Matrizes Comparativas

Nesta etapa de construção das Matrizes Comparativas, os especialistas realizam a avaliação de um critério em relação ao outro, atribuindo os pesos do quadro 4. Dessa forma, as Matrizes Comparativas no método AHP sempre serão matrizes quadradas, conforme mostrado na figura 14. A figura 15 demonstra uma matriz comparativa preenchida, onde foram inseridos os pesos (prioridades) para os critérios A, B, C e D.

Figura 14 - Matriz quadrada gerada no passo três do método AHP.

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & A_{2n} \\ A_{n1} & A_{n2} & A_{nn} \end{bmatrix}$$

Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 15 - Exemplo de matriz comparativa com seus pesos atribuídos.

<i>Iluminação</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
<i>A</i>	1	5	6	7
<i>B</i>	1/5	1	4	6
<i>C</i>	1/6	1/4	1	4
<i>D</i>	1/7	1/6	1/4	1

Fonte: Autoria própria, 2021

A partir da matriz, nota-se que para o valor atribuído ao elemento A_{12} terá, no elemento A_{21} , o seu valor inversamente proporcional, e deve ser lido como “o elemento A é 5 vezes mais dominante que o elemento B”.

O número de julgamentos necessários, conforme a dimensão da matriz construída, se dá pela seguinte expressão:

N° de Julgamentos = $\frac{n(n-1)}{2}$, onde n é o número de linhas e colunas da matriz

ii. Normalização e Cálculo dos Pesos

A normalização dos elementos da matriz deve ser realizada, e para isso efetua-se a divisão de cada um dos elementos pela soma dos elementos encontrados em sua coluna na matriz. Esse processo é evidenciado pela expressão:

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \text{ onde } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Para obter os pesos de cada elemento, realizam-se os cálculos da matriz ponderada relativa, conforme a função a seguir:

$$W_i = \frac{\sum_{i=1}^n a_{ij}}{n}, \text{ onde } i = 1, 2, 3, \dots, n$$

Visto que os resultados obtidos representam valores relativos de cada um dos elementos da matriz, a soma de todos os elementos deve ser igual a 1.

Segundo Saaty (1987), o próximo cálculo a ser efetuado é o da consistência das informações coletadas e fornecidas pelos especialistas. Para este cálculo, obtém-se, primeiramente, o valor da soma dos pesos, o qual se dá pela multiplicação da Matriz Comparativa (A) e o seu auto vetor respectivo (W_i).

$$W = A * W_i$$

Concluída esta etapa, calcula-se o auto vetor da matriz resultante λ_{max} , que se dá pela soma dos valores relativos (W) e do autor vetor W_i , conforme a seguinte expressão:

$$\lambda_{max} = \frac{W}{W_i * n}$$

iii. Razão de Consistência

O cálculo da razão de consistência, segundo Saaty (1987), considera o IC (índice de consistência) e o IR (Índice Randômico), o qual sofre variação conforme o tamanho n da matriz.

A expressões a seguir demonstram como são efetuados os cálculos do Índice de consistência, sendo que este índice deve ser inferior a 10% para que a matriz seja validada, caso contrário é recomendado que os julgamentos feitos pelos especialistas

sejam refeitos até que o índice se enquadre dentro deste valor, Índice Randômico e Razão de Consistência, respectivamente.

$$I.C. = \text{Índice de Consistência} = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

$$I.R. = \text{Índice Randômico} = \text{Valores tabelados}$$

Figura 16 - Índice Randômico Médio do método AHP.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Fonte: SAATY (1991)

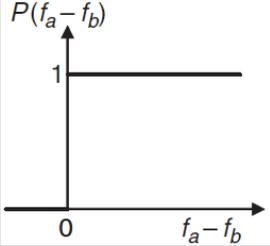
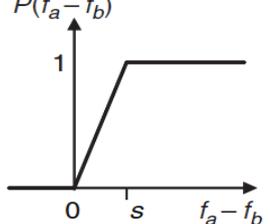
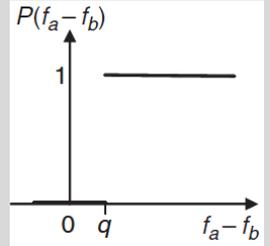
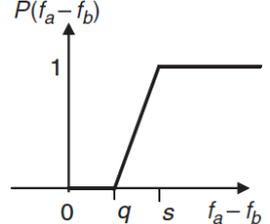
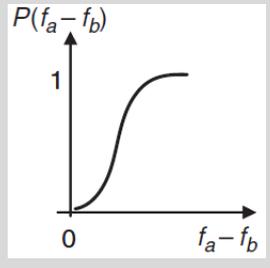
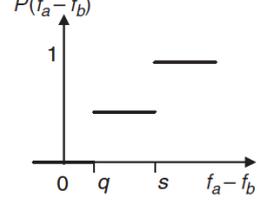
$$R.C. = \text{Razão de Consistência} = \frac{I.C.}{I.R. \text{ conforme } n}$$

2.4.2 PROMETHEE

O *Preference Ranking Organisation Method (Promethee)* foi desenvolvido por Jean Pierre Brans e PH. Vincke (1985), e é um método utilizado para realizar o ranqueamento de possíveis soluções (alternativas) para um determinado objetivo através de critérios pré-estabelecidos. Trata-se de um método de ranqueamento simples em sua concepção e aplicação quando comparados com outros métodos de análise multicritério, e se adapta muito bem a problemas que possuem um número finito de alternativas (DAGDEVIREN, 2008)

A implementação do PROMETHEE se inicia com a tabela de avaliação, onde as alternativas serão avaliadas sob diferentes critérios. Segundo Albadvi et al (2007), a implementação deste método requer dois tipos adicionais de informação: (i) importância relativa (pesos) do critério considerado e (ii) função de preferência do tomador de decisão, que ele/ela utiliza quando compara a contribuição das alternativas em termos de cada critério separado. As funções de preferência são divididas em seis tipos diferentes: *Usual*, *V-Shape*, *U-Shape*, *V-Shape with Indifference*, *Gaussian* e *Level*. O quadro 9 mostra cada uma das funções citadas anteriormente.

Quadro 8 - Funções de preferência do método PROMETHEE.

Tipo de Função	Descrição	Representação Gráfica	Parâmetros
<i>Usual</i>	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1, & d > 0 \end{cases}$		-
<i>V-Shape</i>	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ \frac{d}{p}, & 0 < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$		p
<i>U-Shape</i>	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ 1, & d > q \end{cases}$		q
<i>V-Shape with Indifference</i>	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d - q}{p - q}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$		q e p
<i>Gaussian</i>	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}}, & d > 0 \end{cases}$		s
<i>Level</i>	$P(d) = \begin{cases} 0, & d \leq q \\ \frac{d}{p}, & q < d \leq p \\ 1, & d > p \end{cases}$		q e p

Fonte: Adaptado de Dagdeviren, 2018

Os passos descritos a seguir são exigidos para a implementação do PROMETHEE:

- i. Comparação, paritária, das alternativas para cada critério. Para este projeto, a avaliação será fornecida pelo método AHP;
- ii. Formação de um índice de preferência multicritério para cada par de alternativas, como uma média ponderada das preferências correspondentes calculadas na etapa um. O índice $\Pi(a,b)$ expressa a preferência da alternativa “a” sobre a alternativa “b” ao considerar todos os critérios. Os fatores de ponderação expressam a relativa importância de cada critério, e são escolhidos pelo tomador de decisão (ALBADVI et al, 2007);
- iii. As alternativas podem ser classificadas das seguintes maneiras:
 - a. A soma dos índices $\Pi(a,i)$ indicando a preferência da alternativa “a” sobre todas as outras. É denominado “fluxo de saída” $\Phi^+(a)$ e mostra quão “bom” é a alternativa “a”;
 - b. A soma dos índices $\Pi(i,a)$ indicando a preferência de todas as alternativas comparadas à alternativa “a”. É denominado “fluxo de entrada” $\Phi^-(a)$ e mostra quão “inferior” é a alternativa “a”.

Segundo Albadvi et al (2007), o método PROMETHEE tem sido aplicado em diferentes áreas, tais como estratégias de design de IT (*Information Technology*) e planejamento e produção de energias renováveis.

3 DESENVOLVIMENTO

A etapa de desenvolvimento deste trabalho, à luz do modelo IDEF0 apresentado na figura 3, está dividida em três partes, as quais estão descritas a seguir:

- Parte um (empresa): breve apresentação da empresa onde a análise conduzida por este trabalho foi realizada;
- Parte dois (avaliação diagnóstica): descritivo dos passos para a estruturação do AHP dentro do software *Super Decision* e como se deu a avaliação par-a-par (*pairwise comparison*) dos critérios da ISO 50001;
- Parte três (avaliação de maturidade e decisional): descritivo dos passos para a estruturação do método Promethee e a avaliação da aderência dos habilitadores tecnológicos selecionados em relação a cada um dos critérios, utilizando para isso o software *Visual PROMETHEE*.

3.1 EMPRESA

O desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso foi realizado em uma empresa automobilística multinacional situada na Cidade Industrial de Curitiba, a qual se dedica ao projeto, fabricação e comercialização de veículos de carga e transporte, bem como de motores para geradores e embarcações de pequeno/médio porte.

Globalmente, possui 19 plantas de fabricação e está presente em 190 países através dos seus serviços, totalizando mais de 100 mil funcionários. Das 19 plantas, três delas estão situadas no Brasil, sendo duas na cidade de Curitiba e a outra na cidade de Pederneiras (São Paulo), empregando mais de 6 mil pessoas.

Devido às dimensões da organização, optou-se por focar o estudo da Gestão Energética na fábrica de Motores e Caixas de Câmbio localizada em Curitiba (PR), conhecida como fábrica de *Powertrain*. Esta possui linhas de fabricação por Usinagem e linhas de montagem, onde podem ser encontrados maquinários como CNCs, Robôs, Prensas, Celas de Testes, entre outros.

3.2 FASE DIAGNÓSTICA – AHP

3.2.1 Modelagem do Método

Para a avaliação diagnóstica da empresa em relação à sua gestão energética, definiu-se a utilização dos critérios da ISO 50001 para esse fim. A escolha se deu pelo fato de os critérios já terem sido validados por órgãos competentes como aspectos pertinentes a uma organização bem estruturada sob a ótica da gestão energética. A ISO 50001, conforme mostrado no quadro 3, está estruturada dentro da metodologia PDCA, a qual abrange 21 critérios, sendo 10 deles pertencentes à etapa de Planejamento (*Plan*), 7 à etapa de Ação (*Do*), 3 à etapa de Verificação (*Check*) e 1 à etapa de Agir (*Act*).

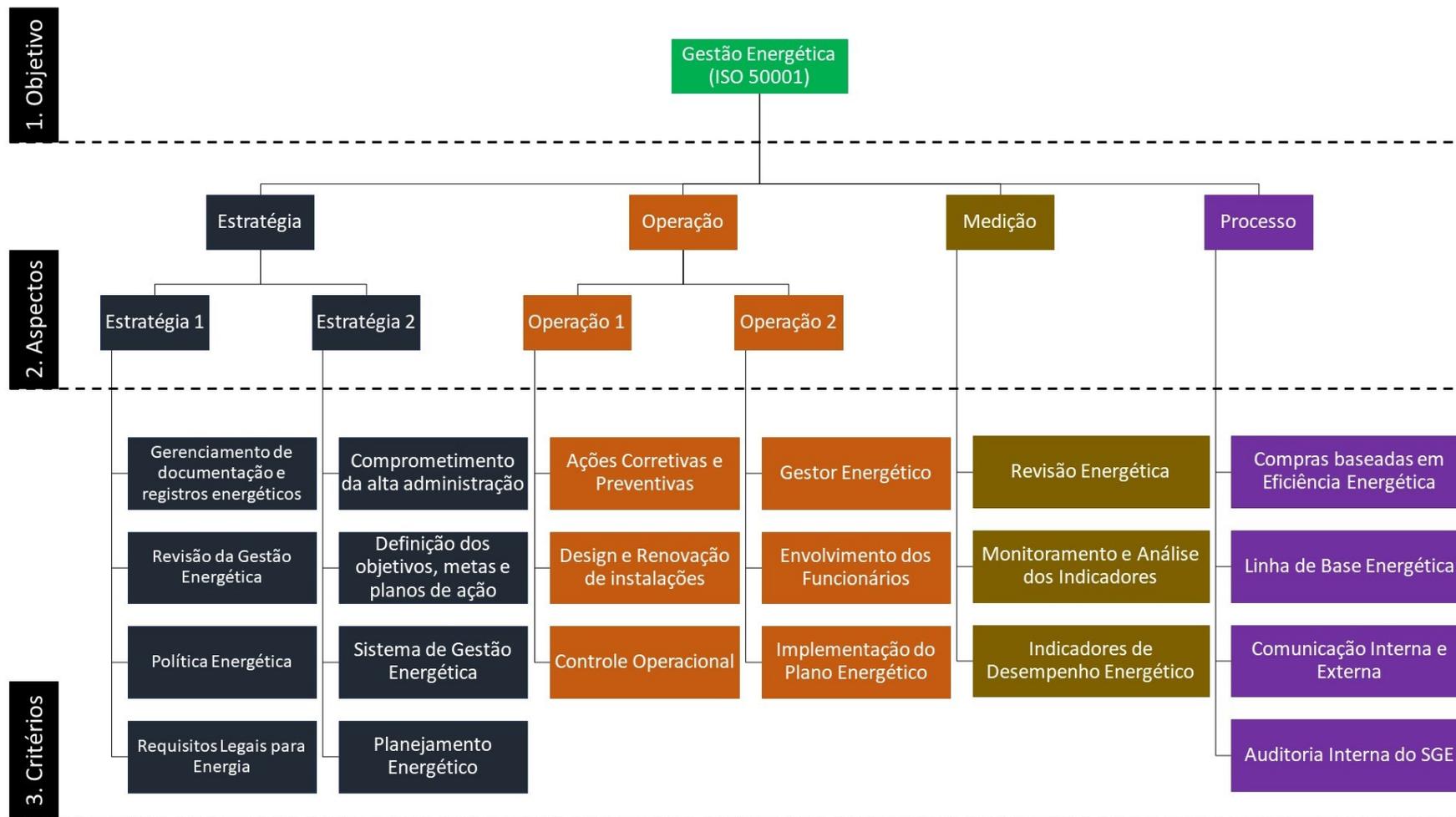
Para fins de avaliação dentro do método AHP, verificou-se a necessidade de categorizar os critérios da ISO 50001 em aspectos que refletissem áreas específicas da empresa, facilitando assim a avaliação, o direcionamento de ações e o entendimento dos pesos extraídos através da avaliação par a par dos critérios de cada grupo. Para isso, tomou-se como base o estudo realizado por PRADELLA (2018), que tinha como objetivo geral a formalização de um modelo de maturidade na área de gestão energética voltada para a indústria alimentícia, de forma a suportar o diagnóstico e as decisões da empresa no momento de estabelecer um plano de diretrizes relacionados à gestão energética sob diferentes cenários propositivos. Os aspectos levantados no estudo foram Processo, Operação, Estratégia e Medição.

A partir disso, o *framework* para a avaliação diagnóstica foi desenvolvido, sendo os critérios da ISO 50001 agrupados dentro de cada um dos aspectos conforme julgamento efetuado pelos integrantes deste trabalho a partir das definições presentes na ISO. Portanto, a estrutura AHP é composta pelos seguintes elementos (Figura 17):

1. Objetivo: Define o objetivo do método AHP em apresentar uma avaliação diagnóstica a respeito da gestão energética da empresa sob a ótica da ISO 50001;
2. Aspectos: Áreas da empresa que representam a sua estrutura em um modo geral, facilitando assim o direcionamento das análises realizadas a partir do diagnóstico fornecido pelo método;
3. Critérios: Atributos da ISO 50001.

Ressalta-se a separação dos aspectos Estratégia e Operação em dois grupos devido ao grande número de critérios alocados neles. A separação demonstrou-se útil para reduzir as chances de inconsistências avaliativas do especialista, uma vez que não impacta na coerência avaliativa do domínio de gestão envolvido. Outro ponto diz respeito à avaliação dos níveis de maturidade, que no decorrer do desenvolvimento do trabalho optou-se por não a realizar dentro do método AHP, mas sim na etapa seguinte com o método PROMETHEE, alterando ligeiramente a abordagem proposta na figura 3.

Figura 17 - Estrutura do AHP para avaliação diagnóstica da gestão energética da empresa



Fonte: Autoria própria, 2021

3.2.2 Avaliação dos critérios (*Pairwise Comparison*)

Uma vez modelado o método AHP, a avaliação par a par dos critérios dentro de cada aspecto mencionado na seção 3.2.1 foi realizada. Para isso, um especialista em Eficiência Energética da empresa foi convidado a participar deste trabalho, sendo o responsável por julgar o grau de maturidade de um critério em relação ao outro. O especialista é formado em Engenharia Elétrica e está há 9 anos na empresa, tendo passado pelas áreas de manutenção eletroeletrônica e Engenharia de Manutenção elétrica, sendo este o seu cargo atual, o qual concilia com sua participação no time de Meio Ambiente e Eficiência Energética.

A fim de facilitar o trabalho de avaliação par a par, foi desenvolvida uma planilha com as mesmas características do questionário disponível no *software Super Decision*, o qual segue a Escala Saaty conforme quadro 8. Para um melhor entendimento do formulário desenvolvido, a figura 18 ilustra a seção de avaliação dos critérios dentro do aspecto Medição.

Figura 18 - Seção do formulário de avaliação do especialista.

		Cluster - Medição																		
Categoria 1	>=9.5	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	>=9.5	Categoria 2
Indicadores de Desempenho																				Monitoramento e Análise de Indicadores
Indicadores de Desempenho																				Revisão Energética
Monitoramento e Análise de Indicadores																				Revisão Energética

Fonte: Autoria própria, 2021

Finalizada a avaliação, realizou-se o lançamento dos dados na plataforma do *Super Decision* para coleta dos pesos de cada critério. A análise diagnóstica a partir dos resultados adquiridos será abordada no capítulo 4 deste trabalho.

3.3 MATURIDADE E FASE DECISIONAL – PROMETHEE

Para a avaliação da maturidade e estruturação de um modelo de suporte para tomada de decisão sobre quais habilitadores tecnológicos utilizar a fim de melhorar o nível da gestão energética da empresa, utilizou-se o método PROMETHEE. A matriz avaliativa construída para o trabalho pode ser visualizada na figura 19.

Figura 19 - Exemplo da matriz avaliativa da maturidade no método PROMETHEE.

Visual PROMETHEE Academic - Maturidade.vpg (not saved)

File Edit Model Control PROMETHEE-GAIA GDSS GIS Custom Assistants Snapshots Options Help

	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑	☑
Maturidade	Comprometi...	Definição do...	Gerenciamen...	Planejament...	Política Ener...	Requisitos le...	Revisão da ...	Sistema de G...	Indicadores ...	Monitoramen...	Revisão ene...	Ações corret...	Controle Op...	Design e ren...	Envolviment...	
Unit	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y/n	y
Cluster/Group	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Preferences																
Min/Max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max
Weight	2,68	4,43	3,66	4,43	5,21	4,30	2,15	3,77	7,00	4,01	1,53	6,46	7,39	2,82	7,	
Preference Fn.	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usual	Usu
Thresholds	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolute	absolu
- Q: Indifference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n
- P: Preference	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n
- S: Gaussian	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n
Statistics																
Minimum	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,
Maximum	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,
Average	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,
Standard Dev.	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,
Evaluations																
<input checked="" type="checkbox"/> Nivel 1	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
<input checked="" type="checkbox"/> Nivel 2	yes	no	no	yes	no	no	yes	yes	yes	no	yes	yes	no	yes	yes	no
<input checked="" type="checkbox"/> Nivel 3	no	yes	yes	no	yes	yes	no	no	yes	no	no	yes	no	no	no	y

Fonte: Autoria própria, 2021

Para os fins deste trabalho de conclusão de curso, as seções e subseções utilizadas foram:

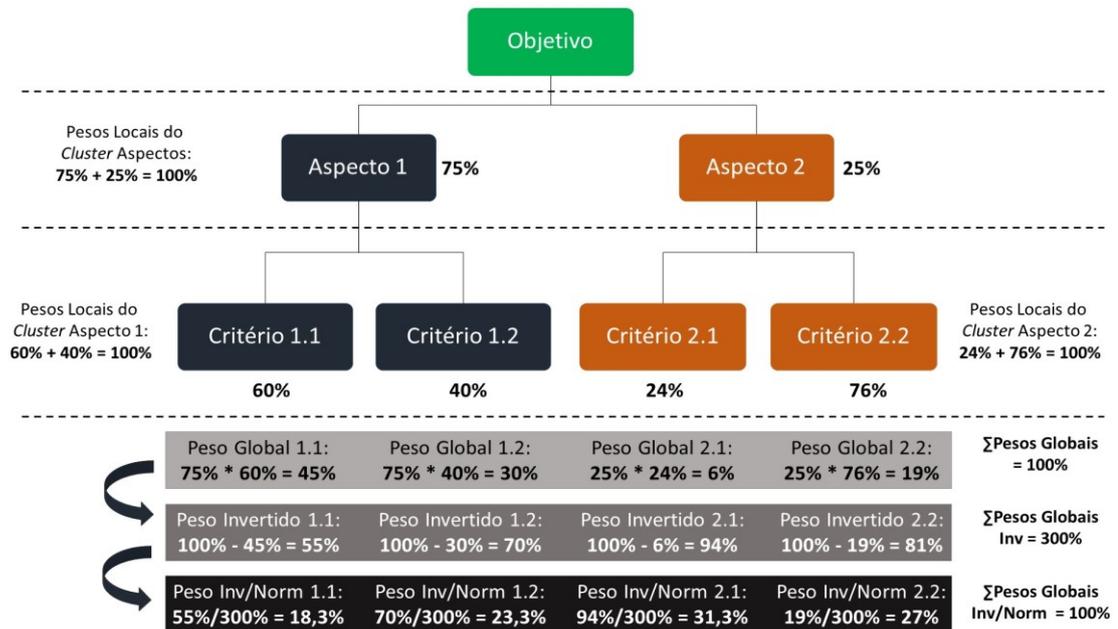
1. Critério (*Criterion*): serão inseridos os critérios da ISO 50001;
2. Preferências (*Preferences*): a função preferência define como as diferenças de avaliação de pares são traduzidas em graus de preferência;
 - a. Mín/Máx: função para definir “maximização” ou “minimização” do critério avaliado frente às tecnologias habilitadoras;
 - b. Peso (*Weight*): valor relativo do peso de cada critério resultante da análise AHP realizada na etapa anterior;
 - c. Função Preferência (*Preference Function*): conforme demonstrado no quadro 9, trata-se de um conjunto de seis funções que refletem a percepção da escala do critério pelo especialista;
3. Avaliações (*Evaluations*): listagem dos níveis de maturidade e dos habilitadores tecnológicos disponíveis. Onde será efetuada a pontuação de cada alternativa com os critérios

3.3.1 Pesos de cada critério para avaliação da maturidade e etapa decisional

Como dito anteriormente, os pesos a serem inseridos no modelo do PROMETHEE são saídas da análise AHP feita na fase diagnóstica. Porém, uma vez que num primeiro momento deseja-se realizar uma avaliação da maturidade da empresa, baseada nos pesos atribuídos pelo especialista, para somente depois adentrar na etapa decisional, ressalta-se que os pesos utilizados para esse primeiro passo serão os chamados “Pesos Globais”, que refletem qual o grau de desenvolvimento de um critério em relação a todos os outros.

Por outro lado, na fase decisional, o foco é compreender quais os critérios menos relevantes para então avaliar os habilitadores tecnológicos com maior aderência a cada um deles e que podem potencializá-los. Logo, neste segundo caso utilizaremos os “Pesos Globais Invertidos e Normalizados”. A figura 20 demonstra como os mesmos são calculados, e através desse exemplo, fica evidente no processo de inversão e normalização dos pesos globais que aqueles critérios com maior peso passam a ter menor relevância para o estudo, enquanto os critérios que antes não estavam bem avaliados, passam a ser a prioridade.

Figura 20 - Exemplo de cálculo dos pesos globais e invertido/normalizado.



Fonte: Autoria própria, 2021

3.3.2 Avaliações (*Evaluations*)

Conforme já descrito na seção 3.3.1, para o modelo PROMETHEE que terá como foco a avaliação da maturidade da empresa sob a ótica da gestão energética, as alternativas listadas na seção “Avaliações (*Evaluations*)” estarão divididas em Níveis 1, 2 e 3. A descrição de cada nível é específico a cada critério e podem ser visualizadas no quadro 3.

Para o modelo PROMETHEE com foco em sugerir habilitadores tecnológicos para potencializar critérios com baixo nível de desenvolvimento na empresa, as alternativas citadas na seção 2.2, e evidenciadas na figura 10, serão ligeiramente alteradas. Essa alteração se fez necessária uma vez que no decorrer das avaliações e análises percebeu-se que muitas das tecnologias listadas não possuem aderência com nenhum dos critérios. Logo, para suportar na decisão de quais habilitadores serão utilizados na fase decisional, criou-se o quadro 9, onde foram pontuados em 1, 5 ou 10 (pouco/nenhum impacto, médio impacto, alto impacto, respectivamente), as tecnologias em relação aos quatro aspectos nos quais os critérios da ISO 50001 foram agrupados. É importante ressaltar que os valores definidos acima não tiveram embasamento teórico, e foram selecionados pelos alunos deste trabalho a fim de

conseguir uma diferenciação razoável entre as pontuações para cada nível de aderência entre os habilitadores tecnológicos e os aspectos. A avaliação também foi realizada pelos alunos, e levou-se em consideração o contexto da gestão energética.

Quadro 9 – Filtro para definição dos habilitadores tecnológicos

Habilitadores Tecnológicos	Aspectos	Medição	Estratégia	Operação	Processo	Total
Computação em Nuvem		10	5	10	10	35
<i>Big Data & Analytics</i>		10	10	5	10	35
Aprendizado de Máquina		5	5	10	10	30
IoT (Internet das Coisas)		10	5	5	10	30
Integração de Sistemas		5	10	5	10	30
Cibersegurança		5	10	5	5	25
Realidade Virtual		1	5	5	10	21
Realidade Aumentada		1	1	1	10	13
<i>Sensor Fusion</i>		5	1	1	5	12
Sistemas Embarcados Inteligentes		5	1	1	5	12
Sistemas de Manufatura Flexíveis (FMS)		1	1	5	5	12
Mini Sensores		5	1	1	1	8
Robôs Colaborativos		1	1	1	1	4
Robôs Avançados		1	1	1	1	4
Veículos Autônomos e Conectados		1	1	1	1	4
Materiais Avançados		1	1	1	1	4
<i>Blockchain</i>		1	1	1	1	4
Controle por voz e por gestos		1	1	1	1	4
<i>Location Detection Technologies</i>		1	1	1	1	4
<i>Multi Agent Systems</i>		1	1	1	1	4
<i>Virtually Guided Self Services</i>		1	1	1	1	4

Fonte: Autoria própria, 2021

A partir da pontuação obtida, foram selecionados os sete primeiros habilitadores com maior pontuação. O novo conjunto de alternativas para os habilitadores tecnológicos será:

- Aprendizado de Máquina;
- IoT (Internet das Coisas);
- Computação em Nuvem;
- Realidade Virtual;
- Cibersegurança;
- Integração de Sistemas;
- *Big Data e Analytics*.

A aderência entre as tecnologias citadas e os critérios da ISO 50001 será classificada conforme os níveis *Very Low* (Muito Baixa), *Low* (Baixa), *Moderate* (Moderada), *High* (Alta) e *Very High* (Muito Alta), onde *Very Low* demonstra que a tecnologia não possui aderência com o critério e *Very High* demonstra um altíssimo grau de aplicabilidade. O julgamento dentro da plataforma *Visual Promethee* foi de responsabilidade dos alunos deste Trabalho de Conclusão de Curso.

4 RESULTADOS

Esta seção tem por objetivo apresentar os resultados obtidos nas fases de avaliação diagnóstica (AHP) e avaliação da maturidade e decisional (PROMETHEE), nessa ordem, no que diz respeito à gestão energética da empresa avaliada.

4.1 AVALIAÇÃO DIAGNÓSTICA (AHP)

Para iniciar a avaliação dos resultados da etapa diagnóstica, ressalta-se que o nível de inconsistência encontrado no julgamento do especialista dentro de cada aspecto ficou inferior ao limite recomendado de 0,1 (10%), o que pode ser verificado no quadro 9. Logo, pode-se tomar os valores obtidos como confiáveis para fins de análise.

Quadro 10 - Nível de inconsistência avaliativa do especialista.

Aspecto	Sub-Aspecto	Nível de Inconsistência
Eficiência Energética	-	0,03044 (3,044%)
Medição	-	0,01759 (1,759%)
Processo	-	0,02253 (2,253%)
Estratégia	Estratégia 1 e 2	0,02271 (2,271%)
Operação	Operação 1 e 2	0,01759 (1,759%)

Fonte: Autoria própria, 2021

Para auxiliar a análise, o quadro 10 foi criado para que os resultados pudessem ser visuais e de fácil compreensão.

Quadro 11 - Resumo dos resultados da avaliação diagnóstica no AHP.

Avaliação Diagnóstica da Empresa sob a ótica da ISO50001				
Categoria	Peso Categoria	Critério	Peso Global (x100)	Peso Global - Invertido e Normalizado (x100)
Medição	0,1254	Revisão energética	1,529	4,924
		Indicadores de Desempenho Energético (IDE)	7,003	4,650
		Monitoramento e Análise de Indicadores	4,008	4,800
Processo	0,2349	Auditoria interna do SGE	2,918	4,854
		Compras baseadas em Eficiência Energética	7,722	4,614
		Comunicação interna e externa	2,473	4,876
		Linha de base energética (LBE)	10,377	4,481
Estratégia	0,3065	Gerenciamento de documentação e registros energéticos	3,663	4,817
		Política Energética	5,206	4,740
		Requisitos legais para energia	4,304	4,785
		Revisão da Gestão Energética	2,152	4,892
		Comprometimento da alta administração	2,682	4,866
		Definição dos objetivos, metas e plano de ação	4,434	4,778
		Planejamento Energético	4,434	4,778
		Sistema de Gestão Energética	3,774	4,811
Operação	0,3333	Ações corretivas e preventivas	6,456	4,677
		Controle Operacional	7,390	4,631
		Design e renovação de instalações	2,820	4,859
		Envolvimento dos Funcionários	7,390	4,631
		Gestor Energético	2,820	4,859
		Implementação do Plano Energético	6,456	4,677

Fonte: Autoria própria, 2021

Na primeira camada de avaliação, evidencia-se que o aspecto que possui um maior nível de desenvolvimento é o da Operação (33,3%), seguido pelo de Estratégia (30,7%), Processo (23,5%) e por último o da Medição (12,5%).

Isso demonstra que a organização possui estratégias bem definidas do ponto de vista de planejamento e de ações ao nível operacional para atendimento dos requisitos da ISO 50001, porém, recomenda-se atenção para o aspecto Medição. A discrepância no nível desta última pode ser um indicativo de tomadas de decisões e criação de planos e estratégias que não estão fundamentadas em dados e fatos, o que pode gerar direcionamentos incorretos e, conseqüentemente, impactos negativos para o negócio.

Adentrando na camada dos critérios, nota-se que sete se destacam positivamente em relação aos outros quanto aos pesos globais que atingiram, sendo eles: Linha de Base Energética (10,377), Compras Baseadas em Eficiência Energética (7,722), Controle Operacional (7,390), Envolvimento dos Funcionários (7,390), Indicadores de Desempenho Energético (7,003), Ações Corretivas e Preventivas (0,6456) e Implementação do Plano Energético (0,6456). Do outro lado, como destaque negativo, temos a Revisão Energética, a qual atingiu o menor índice dos critérios avaliados (1,529).

O resultado obtido a nível de critério apenas reforça o que foi sugerido como ponto de atenção na análise dos aspectos. Os valores extraídos do método AHP evidenciam um grande foco da empresa nos quesitos relacionados ao Processo, Estratégia e Operação, e ainda que o critério “Indicadores de Desempenho Energético” esteja dentre aqueles que possuem maior peso global, o baixo nível da “Revisão Energética” deve ser avaliado com maior atenção. Como dito anteriormente, monitorar aquilo que se está fazendo, seja no nível estratégico ou operacional, é de extrema importância para garantir correções de rotas sempre que necessárias.

Os valores mostrados no quadro 10 demonstraram-se muito fiéis ao que se enxerga como situação atual da empresa avaliada. Com isso, a etapa diagnóstica evidencia uma empresa com uma estrutura operacional e estratégica sólida e bem suportada, principalmente por parte daqueles que estão na linha de frente e em contato diário com os maquinários e processos (nível de “Envolvimento dos Funcionários” é alto), os quais são imprescindíveis para que a Gestão Energética tenha sucesso. Porém, a empresa ainda possui falhas em relação à forma como monitora e toma ações para possíveis desvios no que diz respeito ao desenvolvimento da planta em cada um dos critérios.

4.2 AVALIAÇÃO DA MATURIDADE (PROMETHEE)

Com os pesos globais extraídos do método AHP, estruturou-se o PROMETHEE para que o especialista pudesse realizar a avaliação do nível de maturidade de cada critério, conforme o quadro 3.

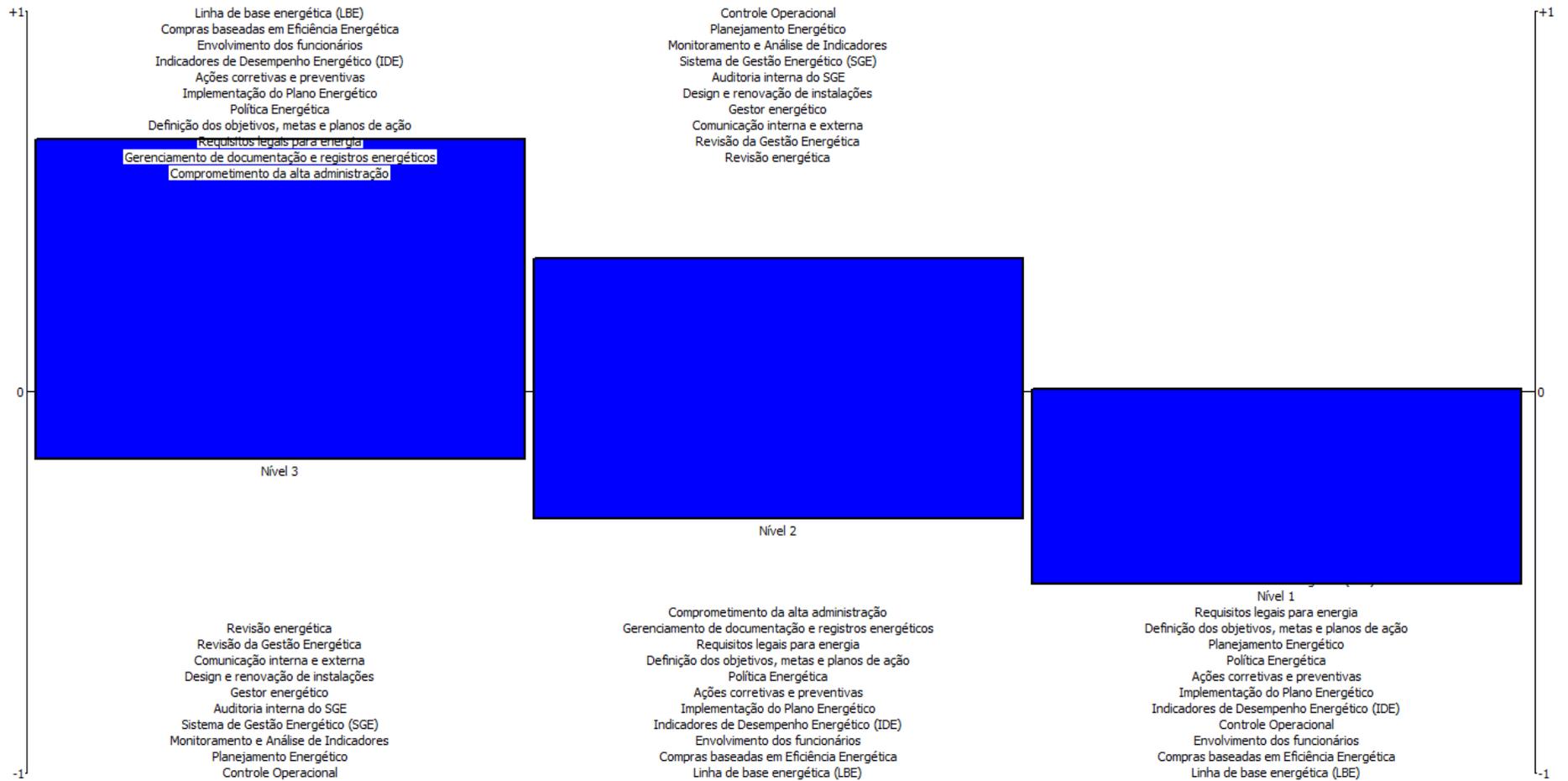
Figura 21 - Nível de maturidade da empresa.

Rank	action	Phi	Phi+	Phi-
1	Nível 3	0,4451	0,6300	0,1850
2	Nível 2	0,0549	0,3700	0,3150
3	Nível 1	-0,5000	0,0000	0,5000

Fonte: Autoria própria, 2021

Evidencia-se a partir da Figura 21 que a empresa possui um nível de maturidade 3 quanto aos critérios avaliados. Logo, está madura no que diz respeito à gestão energética. Para melhor entendimento dos critérios com maior nível de maturidade, verificar a Figura 22, que mostra o gráfico *Promethee Rainbow*, onde na parte superior de cada nível encontram-se os critérios que estão incluídos neles e os que estão abaixo são os não pertencentes àqueles níveis de maturidade.

Figura 22 - PROMETHEE Rainbow com nível de maturidade dos critérios.



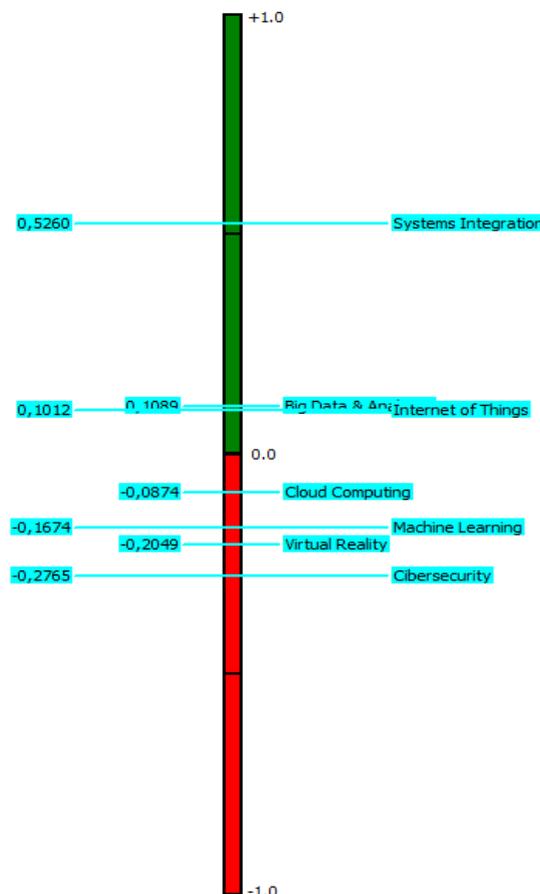
Fonte: Autoria própria, 2021

4.3 AVALIAÇÃO DECISIONAL (PROMETHEE)

Nessa seção serão apresentados os resultados extraídos do método PROMETHEE e que devem ser tomados como sugestões para promover a melhoria da Gestão Energética frente aos critérios da ISO 50001 que receberam os menores pesos globais e, por conseguinte, os maiores pesos globais invertidos e normalizados.

Analisando de forma geral, as três tecnologias que apresentam o maior nível de aplicabilidade e com maior potencial de agregação de valor para a empresa sob a ótica da Gestão Energética (maior dominância sobre as demais) são as tecnologias de Integração de Sistemas (*Systems Integration*), *Big Data & Analytics* e Internet das Coisas (*Internet of Things*), conforme pode ser constatado na figura 23, que demonstra a classificação dos habilitadores baseados no fluxo “Phi líquido”, facilitando a identificação do ranqueamento das tecnologias.

Figura 23 - PROMETHEE Rankings - PROMETHEE II.

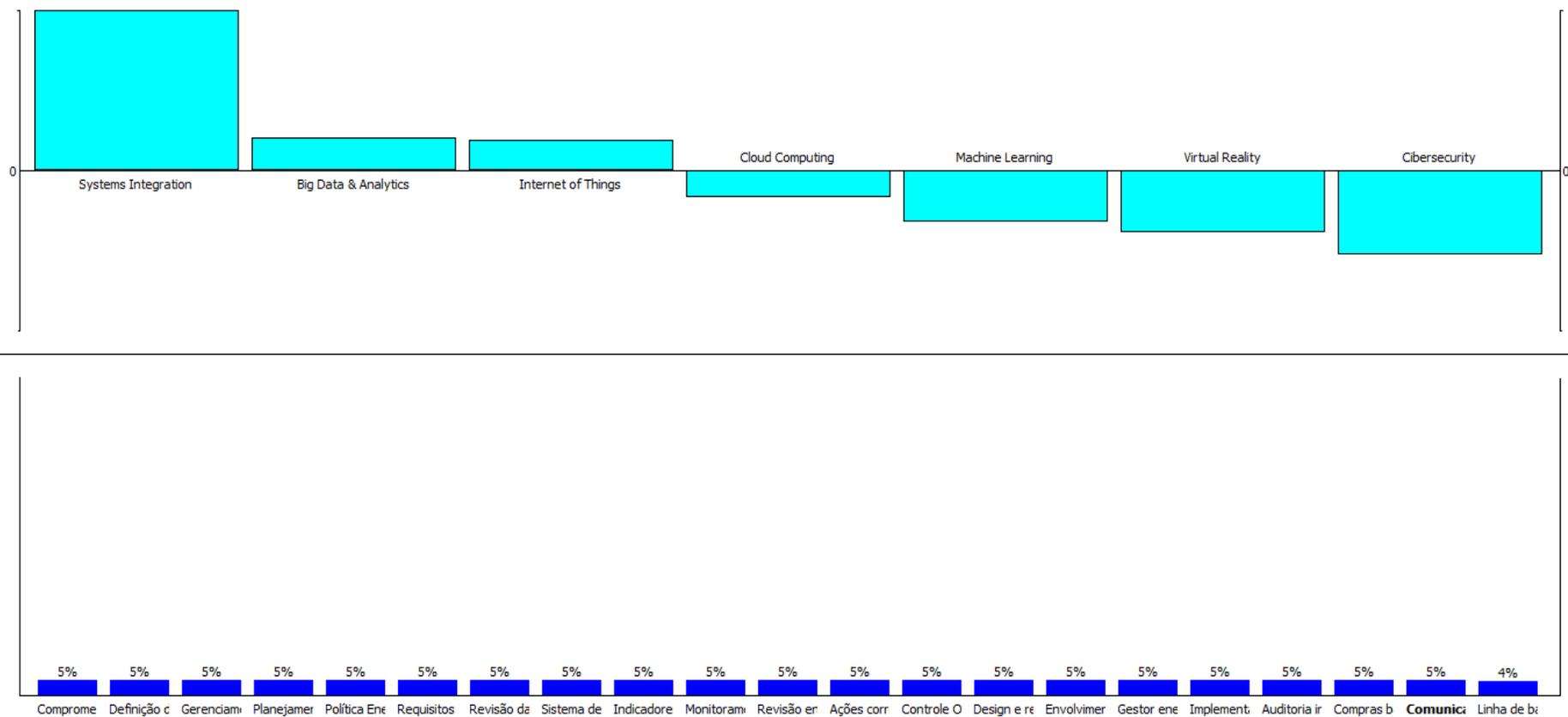


Fonte: Autoria própria, 2021

A figura 24 mostra o gráfico denominado “*Walking Weights*”, onde é possível verificar as ponderações realizadas pelo método AHP e como os mesmos impactam na seleção das tecnologias com maior potencial de retorno para a empresa melhorar a sua gestão energética. Ressalta-se que no processo de inversão e normalização dos pesos globais do método AHP todos ficaram próximos um do outro, motivo pelo qual o percentual de “importância” na parte inferior do gráfico está com um valor de peso igual. Para fins de comparação, a equipe do trabalho optou por, manualmente, destacar os sete critérios com os menores pesos globais mostrados no quadro 11, e então verificar se as sugestões de tecnologias se mantêm. A figura 25 evidencia essa alteração.

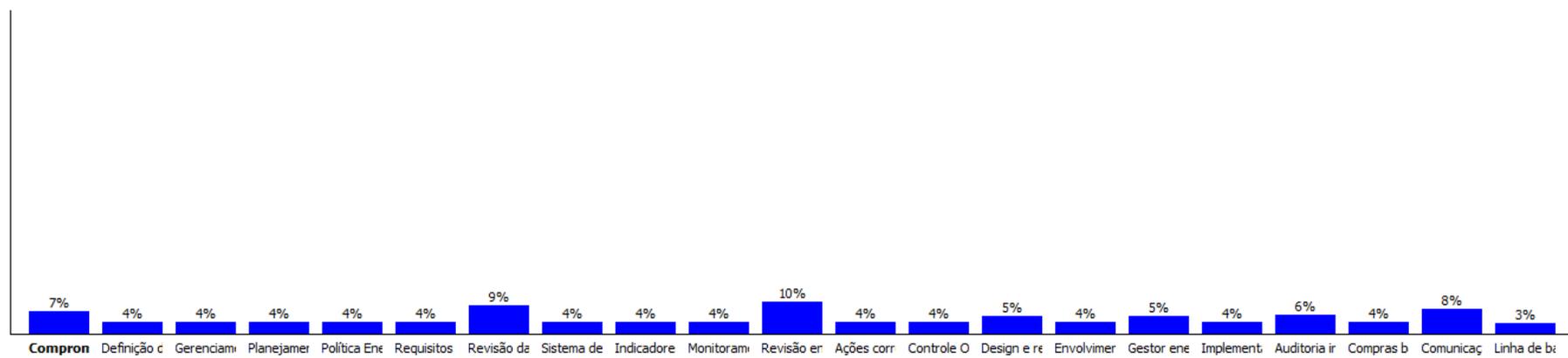
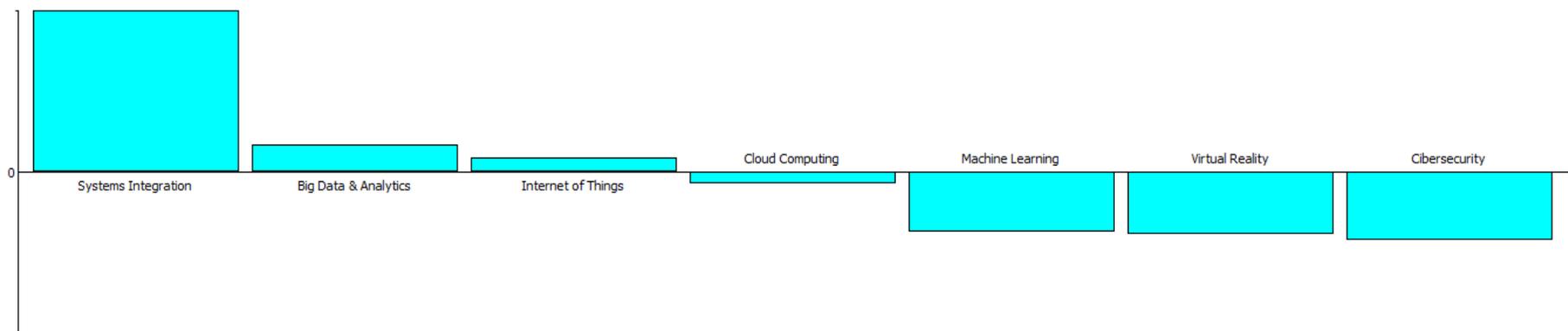
Com a alteração realizada nos pesos dos sete critérios com menores pesos globais, a conclusão para as tecnologias com maior nível de preferência não se alterou, sendo que Integração de Sistemas, *Big Data & Analytics* e *Internet of Things* permanecem como os principais.

Figura 24 - Pesos dos critérios da ISO 50001 e grau de preferência das tecnologias.



Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 25 - Sete menores pesos dos critérios da ISO 5001 ajustados e grau de preferência das tecnologias.



Fonte: Autoria própria, 2021

À medida que os resultados foram sendo obtidos, a equipe observou que a inversão e normalização dos pesos globais, por ficarem muito próximos em seus valores, dificultaram as análises a respeito de quais habilitadores tecnológicos pudessem gerar maior impacto à empresa sob a ótica da Gestão Energética. Por esse motivo, decidiu-se complementar o estudo com uma avaliação decisional através do método PROMETHEE para cada conjunto (aspectos) de critérios, o que trará uma melhor visualização do ranqueamento das tecnologias habilitadoras recomendadas.

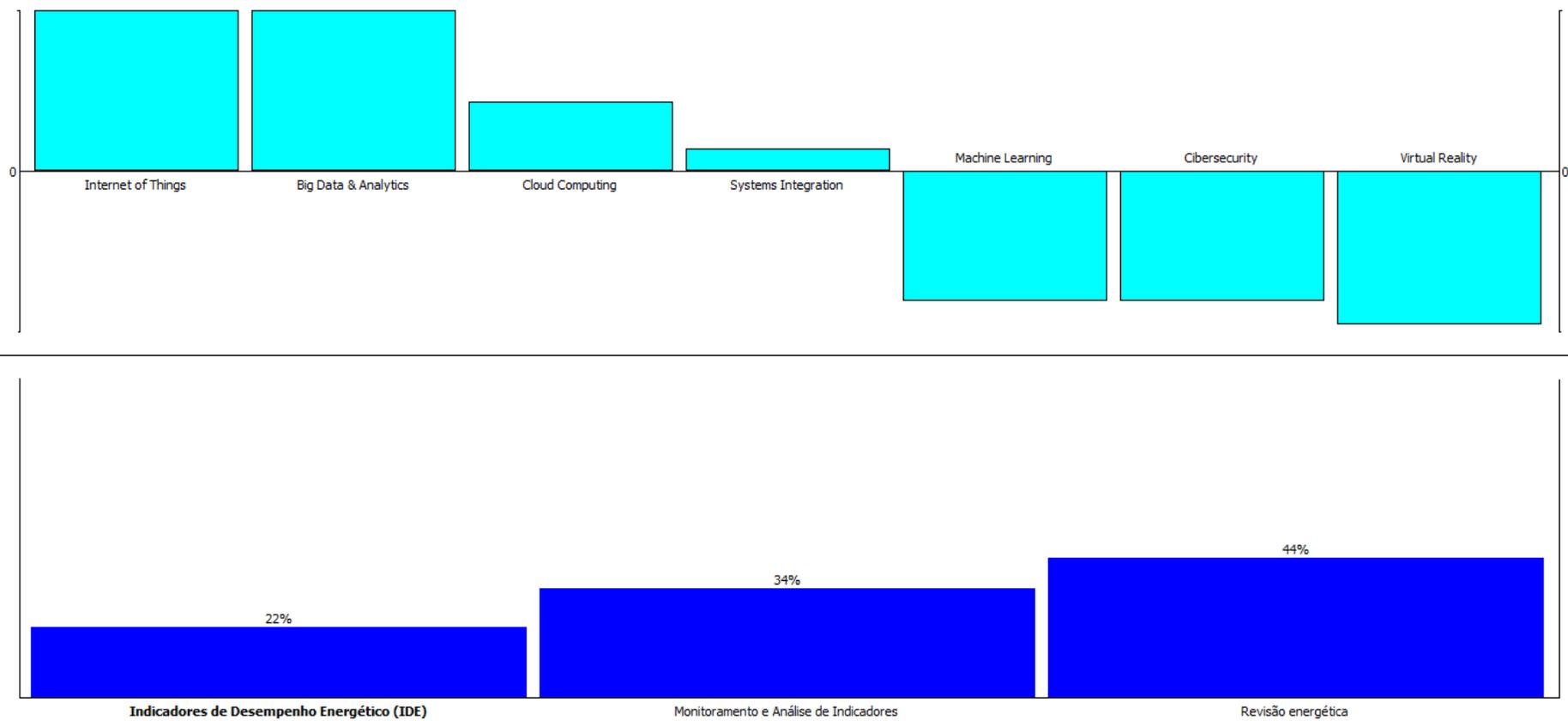
Com o intuito de facilitar o entendimento por parte dos gestores, criou-se o quadro 12, o qual demonstra os aspectos, critérios e o ranqueamento das tecnologias baseadas nas análises individuais de cada conjunto de critérios. Os resultados extraídos do método PROMETHEE para cada conjunto podem ser verificados nas figuras 26 a 29, sendo as análises gráficas realizadas na sequência.

Quadro 12 - Resumo dos habilitadores tecnológicos recomendados para cada conjunto de critérios.

Aspecto	Critérios	Habilitadores Tecnológicos Recomendados ($\Phi > 0$)
Medição	Revisão energética Indicadores de Desempenho Energético (IDE) Monitoramento e Análise de Indicadores	1) <i>Internet of Things</i> 2) <i>Big Data & Analytics</i> 3) <i>Cloud Computing</i> 4) <i>Systems Integration</i>
Processo	Auditoria interna do SGE Compras baseadas em Eficiência Energética Comunicação interna e externa Linha de base energética (LBE)	1) <i>Systems Integration</i> 2) <i>Cloud Computing</i> 3) <i>Big Data & Analytics</i>
Estratégia	Gerenciamento de documentação e registros energéticos Política Energética Requisitos legais para energia Revisão da Gestão Energética Comprometimento da alta administração Definição dos objetivos, metas e plano de ação Planejamento Energético Sistema de Gestão Energética	1) <i>Systems Integration</i> 2) <i>Big Data & Analytics</i> 3) <i>Cloud Computing</i> 4) <i>Internet of Things</i>
Operação	Ações corretivas e preventivas Controle Operacional Design e renovação de instalações Envolvimento dos Funcionários Gestor Energético Implementação do Plano Energético	1) <i>Internet of Things</i> 2) <i>Systems Integration</i> 3) <i>Big Data & Analytics</i>

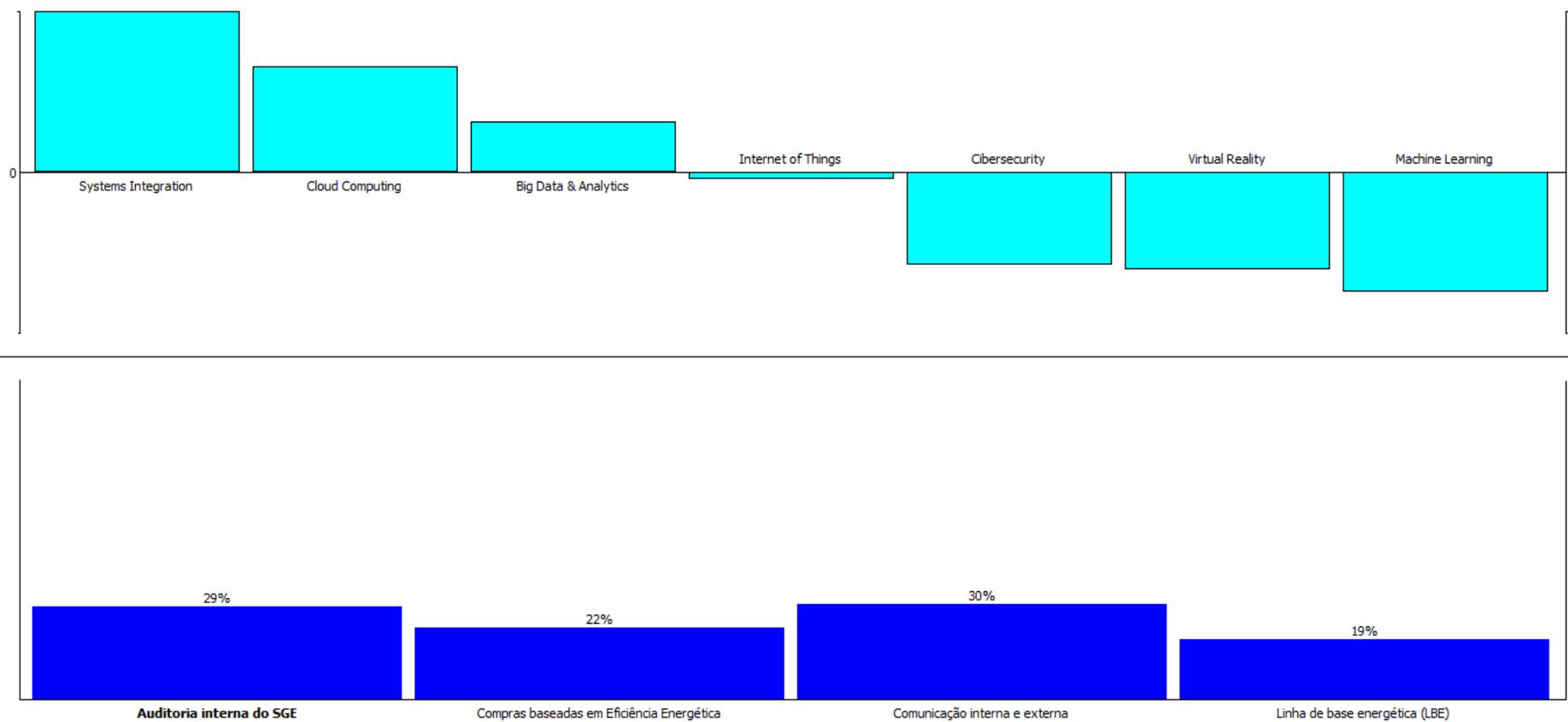
Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 26 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Medição.



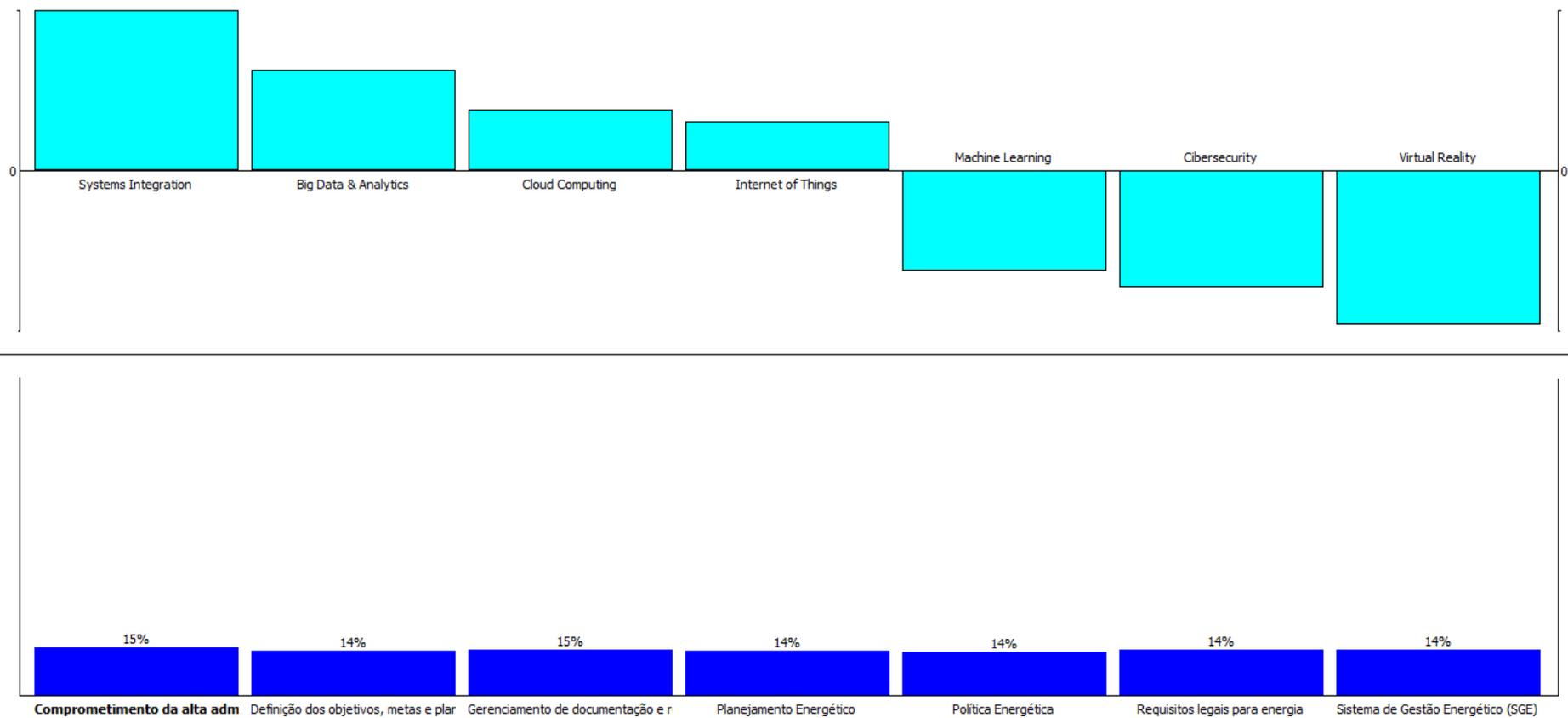
Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 27 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Processo.



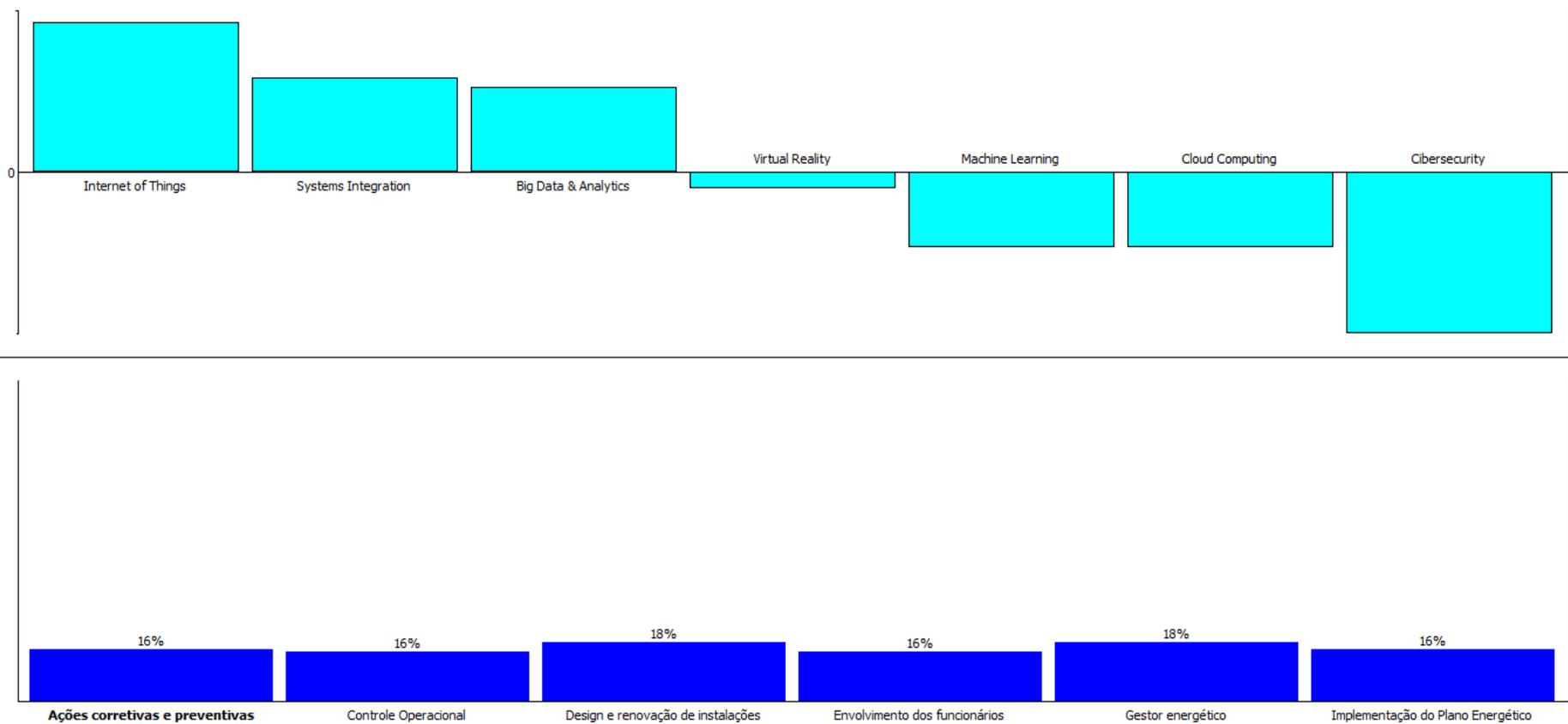
Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 28 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Estratégia.



Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 29 - Habilitadores Tecnológicos focados para melhora do aspecto de Operação.



Fonte: Autoria própria, 2021

Para Medição, que dentre os aspectos obteve o menor nível de peso local, o resultado mostrado na figura 26 é factível com a realidade encontrada na empresa. Como comentado anteriormente, por possuir um parque fabril antigo (máquinas com mais de 20 anos de uso) e por estarem iniciando a sua jornada de Transformação Digital, há pouco estrutura para suportar a coleta e análise de dados energéticos dos maquinários, o que torna válida a sugestão dos habilitadores *Internet of Things*, *Big Data & Analytics* e Computação em Nuvem como um meio para melhorar o nível dentro do aspecto.

O Processo, que também obteve um peso local baixo, teve como habilitadores tecnológicos recomendados a Integração de Sistemas, Computação em Nuvem e *Big Data & Analytics*, conforme mostrado na figura 27. Avaliando o resultado do método em relação aos critérios que compoem esse aspecto, valida-se a sugestão, uma vez que os mesmos podem atuar diretamente na melhora tanto das questões relacionadas à Auditoria do SGE quanto no que diz respeito à Comunicação Interna e Externa, evidenciando os indicadores de desempenho e os pontos fracos da organização do ponto de vista da gestão energética através dos dados coletados, armazenados, tratados e analisados.

Os aspectos Estratégia e Operação aparecem como sendo os mais maduros e obtiveram pesos locais semelhantes. Porém, para fins de completude da análise, extraíram-se também os resultados para ambos, e os mesmos podem ser verificados nas figuras 28 e 29, respectivamente. Os critérios dentro da Estratégia possuem pesos locais bem equilibrados, e tem como principais habilitadores tecnológicos sugeridos a Integração de Sistemas, *Big Data & Analytics* e a Computação em Nuvem. Para a Operação, as sugestões são basicamente as mesmas que para o anterior, porém o habilitador *Internet of Things* aparece como o maior potencial para a alavancagem desse aspecto, o que faz sentido, uma vez que atua diretamente em questões relacionadas à Ações Corretiva e Preventivas, Controle Operacional e Design e Renovação das Instalações, por exemplo.

5 CONCLUSÃO

A avaliação da empresa, dentro do contexto deste trabalho de conclusão de curso, mostrou-se pertinente para aquilo que a mesma tem como objetivo para os próximos anos. Globalmente, a empresa vem se organizando na condução das ações derivadas do plano de transformação digital, o qual tem como foco duas grandes frentes, sendo a primeira algo mais voltado para o seu modelo de negócio, com a migração gradativa de produtos para serviços, e a segunda o processo de digitalização de suas unidades fabris e cadeias de suprimento, sendo este o ponto de suporte dado por este trabalho.

Logo, o trabalho atuou de forma a trazer uma nova visão à respeito da maturidade da empresa no que tange a forma como faz a sua gestão da energia, bem como auxiliar no processo decisório de quais habilitadores possuem maior potencial de impacto positivo para impulsionar os elos fracos dessa gestão. E como já ressaltado acima, foi de encontro às necessidades oriundas do processo de transformação digital, porém com foco na área de energia das unidades fabris, que é de responsabilidade do departamento de Meio Ambiente.

Do estudo, pode-se verificar que a empresa possui um nível de maturidade alto nos critérios da ISO 50001 focados em Operação e Processo, porém um nível inferior de maturidade nos aspectos Medição e Estratégia. Este resultado não é sinônimo de implementação de ações desordenadas e não fundamentadas em dados e fatos, mas é um alerta para que a organização revise de forma crítica a situação atual de sua gestão energética afim de garantir que estão em um processo bem definido e estruturado, onde as partes envolvidas tenham de forma clara para onde estão indo e, principalmente, o que precisam fazer para atingir o objetivo traçado.

No processo de sugestão dos habilitadores tecnológicos com maior potencial de impacto positivo na empresa, reforçou-se ainda mais o que foi constatado na análise de maturidade, uma vez que as tecnologias de “Integração de Sistemas”, *Big Data & Analytics* e “Internet das Coisas”, que possuem grande enfoque no tratamento, unificação e análise de dados, foram as que obtiveram destaque dentre as demais quando avaliada num contexto geral da gestão energética da empresa.

Todo o processo de estudo, estruturação dos métodos AHP e PROMETHEE, avaliações realizadas pelo especialista e resultados obtidos, foi bem visto pela time

de gestão da área de Meio Ambiente e Energia, e por isso este trabalho será apresentado dentro do fórum local que trata do assunto de Gestão Energética para que demais membros da equipe possam opinar e refletir à respeito do que foi mostrado, podendo a partir disso serem tomadas decisões sobre ações a serem realizadas para corrigir as fraquezas apontadas, ou até mesmo um novo processo de análise, seguindo os moldes do estudo apresentado, para fins de entendimento e decisões em outras áreas.

Para próximos estudos, ressaltam-se dois pontos, sendo o primeiro a necessidade em estar atento na forma como a estrutura do método AHP é definida, uma vez que é o ponto de partida para todo o processo de análise e decisão, conforme demonstrado neste trabalho de conclusão de curso. Muitos critérios concentrados em um único aspecto podem gerar inconsistência avaliativa pelo especialista. Por esse motivo, sugere-se a utilização de um número de aspectos que possa garantir o agrupamento de até quatro critérios, facilitando a análise do especialista e conclusões da equipe. O segundo ponto diz respeito ao número de especialistas responsáveis por avaliar a gestão energética da empresa frente aos critérios definidos para a etapa diagnóstica. O presente trabalho contou com a participação de apenas um especialista, e isso pode gerar distorções nos resultados obtidos, uma vez que o mesmo pode cometer erros devido à má interpretação na avaliação de um ou mais critérios, além de poder ser influenciado pela sua própria natureza humana. Ainda que o método AHP forneça o “índice de inconsistência” para verificar a assertividade nas respostas do especialista, recomenda-se a participação de no mínimo dois especialistas no estudo para realizar as comparações par-a-par dos critérios (o ideal são três especialistas). Dessa forma, além do nível de inconsistência do AHP auxiliar na determinação da assertividade das respostas, a visão de dois ou três especialistas pode mitigar ainda mais as incoerências avaliativas a partir das justificativas citadas anteriormente, gerando então um cenário mais fiel e próximo da realidade.

REFERÊNCIAS

ALBDAVI, Amir; CHAHARSOOGHI, S. Kamal; ESFAHANIPOUR, Akbar. **Decision making in stock trading: An application of PROMETHEE**. European Journal of Operational Research 177, p. 673 – 683, 2007.

ANAGNOSTOPOULOS, Konstantinos P.; VAVATSIKOS, Athanasios P. **An AHP model for construction contractor prequalification**. Int. J. Oper. Res., 6, p. 333 – 346, 2006.

ARULDOSS, M.; LAKSHMI, T.M.; VENKATESAN, V.P. **A survey on multi-criteria decision making methods and its applications**. *Am. J. Inform. Syst.*, 1: p. 31 – 43.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2019**. Disponível em: encurtador.com.br/fnPT2 . Acesso em: 11 out 2019

BHATTACHARYA, S.; KARNAM, R. **Knowledge based expert system for optimizing the decision making process in tender evaluation**. *International Institute of Information Technology*, Hyderabad, Gachibowli, India.

BONISSONE, Piero P.; SUBBU, R.; LIZZI, J. **Multi Criteria Decision Making (MCDM): A Framework for Research and Applications**. IEEE Computational Intelligence Magazine, p. 48 - 61, vol. 4, ago. 2009. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5190938>. Acesso em: 10 out. 2019

DAGDEVIREN, M. **Decision making in equipment selection: an integrated approach with AHP and PROMETHEE**. Journal Intelligence Manufacturing, p.397-406, 2008.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Consumo Anual de Energia Elétrica por Classe (nacional)**. Disponível em: encurtador.com.br/ANVZ2. Acesso em: 04 mai. 2019

ENERDATA. **Global Energy Statistical Yearbook 2018**. Disponível em: encurtador.com.br/qEHY2. Acesso em: 04 mai. 2019

FADAEI, Saeed et al. **Locating industrial landfill using analytical hierarchy process (AHP)(Case study: Natanz-Isfahan industrial suburbs)**. Journal of Advances in Environmental Health Research, 4(4), p. 182-189, 2016. Disponível em: http://jaehr.muk.ac.ir/article_45370.html. Acesso em: 10 nov. 2019.

FORBES. **What is Industry 4.0? Here's a Super Easy Explanation For Anyone**. Disponível em: encurtador.com.br/fhmP1>. Acesso em: 04 mai. 2019

HESTER, Patrick T.; VELASQUEZ, Mark. **An Analysis of Multi-Criteria Decision Making Methods**. International journal operations, research, 2013. Disponível em: https://www.orstw.org.tw/ijor/vol10no2/ijor_vol10_no2_p56_p66.pdf. Acesso em: 10 nov. 2019.

HOUNSHELL, Leon. **The Industrial Internet of Things, Digitalization and The Future of Business**. Forbes Technology Council, 2018. Disponível em: encurtador.com.br/gkuSY. Acesso em: 08 dez. 2019

HWANG, H.; MOON, C.; CHUANG, C.; GOAN, M. **Supplier selection and planning model using AHP**. *Int. Symp. Analytic Hierarchy Process 2005*, Honolulu, Hawaii.

JAVIED, T., BAKAKEU, J., GESSINGER, D., FRANKE, J. **"Strategic energy management in industry 4.0 environment"**, *2018 Annual IEEE International Systems Conference (SysCon)*, Vancouver, BC, 2018, pp. 1-4.

KWOK, Y.F. **Using Analytic Hierarchy Process for the evaluation of government projects**. *Proc. Int. Symp. Analytic Hierarchy Process 2011*, Defence Science and Technology Agency, Singapore.

MAHMOODZADEH, S.; SHAHRABI, J.; PARIAZAR, M.; ZAERI, M.S. **Project selection by using Fuzzy AHP and TOPSIS technique.** *World Acad, Sci, Eng, Technol.*, 6: p. 333 – 338.

MARCONDES, Gabriela H. **Gestão contínua de eficiência energética: proposta de uma ferramenta para avaliação da maturidade e priorização de projetos de eficiência energética na manufatura.** 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

MILANOVIC, Dragan et al. **Application of MCDM methods for flotation machine selection.** *Minerals Engineering*, 2019. Disponível em: <encurtador.com.br/cjkoY>. Acesso em: 10 nov. 2019.

MOHAMED, Nor H.; LAMSALI, Hendrik; SATHYAMOORTHY, Dinesh. **Multi-criteria decision making (MCDM) for technical evaluation of tenderers: A review of methods employed.** *Defence S&T Technical Bulletin*, p. 90-102, vol. 8, mar. 2015. Disponível em: encurtador.com.br/atvX9. Acesso em: 10 nov. 2019

PADUMADASA, E.U.; REHAN, S. **Investigation in to decision support systems and multiple criteria decision making to develop a web based tender management system.** *Int. Symp. Analytic Hierarchy Process 2009*, School of Computing, Asia Pacific Institute of Information Technology Colombo, Sri Lanka.

PALCIC, I.; LALIC, B.S. **Analytical Hierarchy Process as a tool for selection and evaluating projects.** *Int. J. Sim. Model.*, 8, p. 16 – 26, 2009.

PIMENTEL, Bruno S. **4 importantes conceitos da Indústria 4.0 na Gestão de Energia e Utilidades.** *Viridis*, 2018. Disponível em: encurtador.com.br/zAPSU. Acesso em: 08 dez. 2019

PRADELLA, Angela M. **Contribuição para formalização de um modelo de avaliação de maturidade e diretrizes para gestão de energia na indústria de alimentos.** 2018. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) –

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas (PPGEPS), Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

PLATTS, K. W., **A Process Approach to Researching Manufacturing Strategy**, International Journal of Operations & Production Management, Vol. 13 No. 8, pp. 4-17, 1993.

PROCEL INDÚSTRIA. **Metodologia de Realização de Diagnóstico Energético**. Disponível em: encurtador.com.br/dmsCU. Acesso em: 04/05/2019

SAATY, Thomas L. **Decision making with the analytic hierarchy process**. Int. J. Services Sciences, Vol. 1, No. 1, p. 83–98, 2008.

SAATY, R. W. **The Analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used**. Mathl Modelling, Vol. 9, No. 3-5, p. 161-176, 1987.

SARKAR, A.; MOHAPATRA, P.K.J. **Evaluation of supplier capability and performance: A method for supply base reduction**. *J. Purchasing Supply Manage.*, 12: p. 148 – 163.

SHROUF, F.; ORDIERES, J.; MIRAGLIOTTA, G. **Smart Factories in Industry 4.0: A Review or the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm**. IEEE, p. 697-701, 2014.

SOARES, S. R. **Análise multicritério como instrumento de gestão ambiental**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção. Florianópolis: UFSC, 2003.

WEG. **Porque a Indústria 4.0 Representa Ganho em Eficiência para as Empresas**. Disponível em: encurtador.com.br/zDGJ2. Acesso em: 04/05/2019

WORLD ECONOMIC FORUM. **Readiness for the Future of Production Report 2018**. Disponível em: encurtador.com.br/bhCE2 . Acesso em: 05/05/2019