



José Daniel Hernández Vásquez

Avaliação de impactos decorrentes da eficiência energética na indústria de papel e celulose utilizando modelo de decisão multicritério

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga
Co-orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Junho de 2018



José Daniel Hernández Vásquez

**Avaliação de impactos decorrentes da efficientização
energética na indústria de papel e celulose utilizando
modelo de decisão multicritério**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sergio Leal Braga

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Reinaldo Castro Souza

Coorientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Florian Alain Yannick Pradelle

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Prof. Mauricio Nogueira Frota

Departamento de Metrologia – PUC-Rio

Dr. Roberto de Miranda Musser

LIGHT Serviços de Eletricidade

Prof. Felipe Leite Coelho da Silva

Instituto de Ciências Exatas – UFRRJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de junho de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

José Daniel Hernández Vásquez

Mestre em Metrologia pela PUC-Rio (2014), cuja pesquisa de Mestrado desenvolveu-se no âmbito de um projeto de P&D do qual participou como pesquisador. Formado em Engenharia Mecânica pela Universidad del Atlántico (Barranquilla-Colômbia), em 2011. Possui experiência em metrologia científica e industrial, especificamente no controle metrológico e calibração de instrumentos (temperatura, massa, pressão e dimensional), validação de métodos analíticos e gestão metrológica de processos. Atua como Consultor Especialista em Metrologia e CEO da empresa colombiana MetroEnergía SAS. Desde 2014 é considerado especialista em Metrologia, reconhecido pela Rede Colombiana de Metrologia (RCM). No curso dos estudos de doutorado foi Bolsista da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Bolsista Nota 10 da Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ).

Ficha Catalográfica

Hernández Vásquez, José Daniel

Avaliação de impactos decorrentes da efficientização energética na indústria de papel e celulose utilizando modelo de decisão multicritério / José Daniel Hernández Vásquez; orientador: Sergio Leal Braga; co-orientador: Reinaldo Castro Souza. – 2018.

167 f.: il. (color) ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2018.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Efficientização energética. 3. Alternativas de efficientização energética. 4. Indústria de papel e celulose. 5. Métodos multicritério de apoio à decisão. 6. Fuzzy-AHP-TOPSIS. I. Braga, Sergio Leal. II. Souza, Reinaldo Castro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

À memória da minha avó: Yaya

Agradecimentos

Em primeiro lugar, a Deus, pelo dom da vida. E por assegurar saúde e força, que permitiram alcançar este objetivo profissional.

À minha Mãe, Anayibe, que me sensibilizou ao demonstrar tamanho carinho e orgulho ao ver seu filho caçula conquistar tão almejado título.

À minha avó, Judith (Yaya!, *in memoriam*), que se fez presente em espírito em todos os momentos de minha vida, em especial durante a superação dos desafios impostos pela conquista do doutorado.

À minha noiva, Laura (Mi Lau), que mesmo geograficamente distante, esteve tão próxima. Em particular, pelo seu amor e carinho e estímulos de seus pais, Benigno Montes e Luz Piñerez e seu irmão Diego Andrés.

Aos demais membros da família, pelo constante apoio e estímulo. Em especial, à minha irmã, Sandra e seu filho, Emilio André; meu irmão, Pedro Luis; meu avô Juanchito; minha Tia Patry; meu cunhado Luis David; tio Juan Carlos; primos Erick Vásquez, Jesús Alberto, David Franco e Armando Vásquez.

Ao meu amigo, mentor, “pai”, conselheiro, orientador do mestrado, Mauricio Nogueira Frota, pelas experiências vividas, sábios conselhos nesses sete anos de estudos avançados no Brasil. Sempre pronto para ouvir e orientar.

Ao casal Gilcinea Rangel Pesenti e Iván Mendes, pelo carinho, amizade e por acolher-me na intimidade de sua família abençoada no momento mais difícil de conclusão de minha pesquisa de doutorado.

À PUC-Rio, à CAPES e à FAPERJ, pelas bolsas complementares de estudo durante o curso de doutorado. Ao Departamento de Engenharia Mecânica, pelo acesso ao doutorado e pela indicação à disputada “Bolsa Nota 10 da FAPERJ”. Agradecimento que se estende ao corpo docente, discente e aos colegas de doutoramento. Ao Prof. Dr. Igor Braga de Paula, pela inteligente orientação durante a fase de qualificação.

Aos orientadores, Dr. Sergio Leal Braga e Dr. Reinaldo Castro Souza, pelo apoio e confiança depositados. Em particular ao Professor Reinaldo, registro um

agradecimento especial pela oportunidade, no curso dos últimos seis anos, da monitoria em seus três cursos: Estatística para metrologia; Tópicos Avançados de Incerteza de Medição para o Curso de Mestrado em Metrologia e Probabilidade e Estatística para o Curso de Engenharia Elétrica. Uma experiência que contribui de maneira decisiva para o meu crescimento profissional.

Aos membros da banca examinadora, Dr. Florian Alain Yannick Pradelle, Dr. Roberto de Miranda Musser, Dr. Felipe Leite Coelho da Silva e Dr. Mauricio Nogueira Frota, pela análise do trabalho e sugestões construtivas, que certamente enriqueceram o trabalho.

Aos especialistas do setor energético brasileiro, que aceitaram participar do instrumento de pesquisa que validou as alternativas de eficiência energética propostas.

Aos meus Professores da Universidad del Atlántico, Luis Sogamoso e Francisco Racedo, pelos sólidos ensinamentos durante minha formação em Engenharia Mecânica e pelo estímulo de dar continuidade de meus estudos de mestrado e doutorado no Brasil.

Às primeiras amigas que fiz no Brasil, ainda no aeroporto de entrada no Brasil, Alicia de Antolinez, Pilar Aragon Farkas e Beatriz Cantor Lopez, por acreditarem na minha estória e propiciarem o primeiro teto familiar.

Aos colegas do Mestrado em Metrologia, pelo apoio e companheirismo. Ao Alex Rubem, que me acolheu em sua casa. Ao Gabriel Apolinário e Thiago Cupertino, pelas emoções compartilhadas nas disputadas “peladas” de futebol. Ao Eduardo Machado, Carolina, Clarena, Juan David, Jherson, Cintia, Cristiana, Guilherme e Sergio Germano, pelo companheirismo. Aos colegas de doutorado Marcos Babilonia Paula Farias e Elias Conceição, pela dedicação, ensinamentos e conselhos durante o tempo de preparação para o exame de qualificação. A todos, o reconhecimento daquele que os consideram colegas de estudo, mas, em especial, amigos de verdade.

Aos meus amigos Colombianos, Kiara, Julio, Luis Malkun, Francisco, Loraine Malkun, Wilmer Mendoza e Horacio, pelos momentos de descontração, força e estímulo a distância.

E a todos que, de forma direta ou indireta, igualmente contribuíram.

Resumo

Hernández Vásquez, José Daniel; Leal Braga, Sergio (Orientador); Castro Souza, Reinaldo (Co-orientador). **Avaliação de impactos decorrentes da eficiência energética na indústria de papel e celulose utilizando modelo de decisão multicritério.** Rio de Janeiro, 2018. 167p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A tese de doutorado tem por objetivo avaliar os impactos decorrentes da implementação de estratégias de eficiência energética na indústria de papel e celulose. A motivação pela escolha do tema resultou da necessidade de obter ganhos de energia considerando aspectos que, usualmente, não são considerados em programas de eficiência energética (i.e.: aspectos sociais, técnicos, econômicos e ambientais). A metodologia utilizada – Método Multicritério de Apoio à Decisão *Fuzzy-AHP-TOPSIS*– (i) permitiu selecionar as tecnologias de eficiência energética aplicáveis ao subsetor de papel e celulose e (ii) possibilitou avaliar a influência de cada critério e subcritério na hierarquização de alternativas de eficiência energética. Os resultados consolidados permitiram: (i) confirmar que mudanças tanto nos processos, quanto nas tecnologias transversais do subsetor de papel e celulose devem ser implementadas; (ii) identificar os principais critérios decorrentes da eficiência energética no âmbito social, técnico, econômico e ambiental. Como conclusão, a pesquisa avaliou a relevância de cada critério, sugerindo, inclui-los em programas brasileiros de eficiência energética. Assim, a pesquisa legitima a sua contribuição para o setor energético brasileiro, promovendo o desenvolvimento de novos estudos na área de eficiência energética.

Palavras-chave

Eficiência energética; alternativas de eficiência energética; indústria de papel e celulose; métodos multicritério de apoio à decisão; *Fuzzy-AHP-TOPSIS*.

Abstract

Hernández Vásquez, José Daniel; Leal Braga, Sergio (Advisor); Castro Souza, Reinaldo (Co-advisor). **Evaluation of impacts resulting energy efficiency in the pulp and paper industry using multicriteria decision model.** Rio de Janeiro, 2018. 167p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The goal of this work is to evaluate the impacts of the implementation of energy efficiency strategies in the pulp and paper industry. The motivation for choosing the theme resulted from the need to obtain energy gains considering aspects that, usually not considered in energy efficiency programs (i.e.: social, technical, economical and environmental aspects). The methodology used – *Multicriteria Decision Making Method Fuzzy-AHP-TOPSIS* – (i) allowed to select the efficiency technologies applicable to the pulp and paper sub-sector and (ii) made it possible to evaluate the influence of each criterion and sub-criterion in the hierarchy of alternatives of energy efficiency. The consolidated results allowed: (i) to confirm that changes in the processes and in the transversal technologies of the pulp and paper subsector must be implemented; (ii) identify the main criteria resulting from energy efficiency in social, technical, economic and environmental aspects. As a conclusion, this work evaluated the relevance of each criterion, suggesting that it be included in Brazilian energy efficiency programs. Thus, the research legitimizes its contribution to the Brazilian energy sector, promoting the development of new studies in the area of energy efficiency.

Keywords

Energy efficiency; saving options; pulp and paper industry; MCDM; Fuzzy-AHP-TOPSIS

Sumário

1 Introdução	21
1.1. O caráter inovador da pesquisa	23
1.2. Objetivos: geral e específicos	24
1.3. Motivação	25
1.4. Estrutura da tese	25
2 Eficiência energética: fundamentos teóricos e políticas públicas	27
2.1. Eficiência energética	27
2.2. Políticas públicas de eficiência energética	29
2.2.1. Programa brasileiro de etiquetagem	30
2.2.2. Programa nacional de conservação de energia elétrica	30
2.2.3. Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e gás natural	31
2.2.4. Programa de eficiência energética das concessionárias de energia elétrica	31
2.2.5. Lei de Eficiência Energética	32
2.2.6. Plano Nacional de Eficiência Energética	33
3 Matriz energética brasileira: oferta e demanda	34
3.1. Matriz energética: caracterização da oferta	36
3.2. Matriz energética: caracterização da demanda	43
3.2.1. Setor industrial	45
3.2.2. Setor transportes	46
3.2.3. Setor comercial e público	47
3.2.4. Setor agropecuário	49
3.2.5. Setor residencial	50
3.2.6. Setor energético	50

3.3. Consumo energético nacional: estratificação setorial	51
3.3.1. Análises do setor industrial	52
3.3.1.1. Alimentos e bebidas	54
3.3.1.2. Ferro-gusa e Aço	56
3.3.1.3. Papel e celulose	58
3.3.1.4. Química	61
3.3.1.5. Não ferrosos e outros da metalurgia	63
3.3.2. Análises do setor transportes	65
3.3.3. Análises do setor energético	68
3.3.4. Análises do setor residencial	69
4 Mapeamento do setor industrial brasileiro	71
4.1. Identificação dos processos do setor industrial	71
4.2. Subsetor de papel e celulose: Estratégias de Eficientização Energética	73
4.3. Critérios e subcritérios para avaliação das estratégias de eficientização energética aplicadas ao subsetor de papel e celulose	76
4.3.1. Processos	77
4.3.2. Tecnologias transversais	80
4.3.2.1. Bombas	80
4.3.2.2. Ventilação	83
4.3.2.3. Refrigeração	85
4.3.2.4. Iluminação	87
5 Método Multicritério de Apoio à Decisão: Modelo <i>Fuzzy</i>-AHP-TOPSIS	90
5.1. Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD)	90
5.2. Visão geral e quadro comparativo	92
5.3. Modelo <i>Fuzzy</i> -AHP-TOPSIS	94
5.4. Descrição da fase I: <i>Fuzzy</i> -AHP	94
5.4.1. Etapa 1: Construção da hierarquia, definição de critérios e subcritérios	94
5.4.2. Etapa 2: Cálculo das matrizes de comparação pareadas <i>fuzzy</i>	95

5.4.3. Etapa 3: Análise de consistência das matrizes de comparação pareadas <i>fuzzy</i>	96
5.4.4. Etapa 4: Obtenção dos pesos dos critério e subcritérios <i>fuzzy</i> -AHP.	97
5.5. Descrição da fase I: <i>Fuzzy</i> -TOPSIS	98
5.5.1. Etapa 5: Criação de matrizes <i>fuzzy</i> de avaliação com uso do conjunto de termos linguísticos <i>fuzzy</i>	98
5.5.2. Etapa 6: Definição da solução ideal positiva e negativa (FPIS e FNIS) e definição da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-)	99
5.5.3. Etapa 7: Determinação da proximidade relativa do valor ideal	100
6 Resultados da aplicação do Modelo <i>Fuzzy</i>-AHP-TOPSIS para a avaliação de ações estratégicas de efficientização energética	101
6.1. Coleta de dados e entrevista com especialistas	101
6.2. Avaliação dos processos do subsetor papel e celulose	103
6.2.1. Processo I: Papel	105
6.2.2. Processo II: Química da celulose	108
6.2.3. Processo III: Mecânica da celulose	111
6.2.4. Processo IV: Papel reciclado	114
6.3. Avaliação das CCT: Bombas	117
6.4. Avaliação das CCT: Ventilação	123
6.5. Avaliação das CCT: Refrigeração	129
6.6. Avaliação das CCT: Iluminação	135
6.7. Discussão dos resultados	139
6.7.1. Processos	139
6.7.1.1. Processo I: Papel	141
6.7.1.2. Processo II: Química da celulose	142
6.7.1.3. Processo III: Mecânica da celulose	143
6.7.1.4. Processo IV: Papel reciclado	144
6.7.2. CCT: Bombas	144
6.7.3. CCT: Ventilação	147
6.7.4. CCT: Refrigeração	149

6.7.5. CCT: Iluminação	152
7 Conclusões e recomendações	155
Referências bibliográficas	156
ANEXO A – Descrição dos critérios e subcritérios	156

Lista de tabelas

Tabela 1 - Volumes de reserva no Brasil declarados pelos operadores	38
Tabela 2 - Previsão nacional da produção de petróleo	38
Tabela 3 - Demanda nacional de derivados do petróleo	40
Tabela 4 - Consumo energético por setor	44
Tabela 5 - Consumo energético do setor industrial por sub-setor	45
Tabela 6 - Fontes de consumo energético no setor comercial	48
Tabela 7- Consumo energético do setor público	49
Tabela 8 - Consumo energético acumulado dos sub-setores da indústria	52
Tabela 9 - Consumo energético por fontes: sub-setor de bebidas e alimentos	54
Tabela 10 - Consumo energético por fontes: sub-setor de bebidas e alimentos	55
Tabela 11 - Consumo energético por fontes: sub-setor de Ferro-gusa e Aço	56
Tabela 12 - Consumo energético por fontes: sub-setor Ferro-gusa e Aço	57
Tabela 13 - Consumo energético por fontes: sub-setor Papel e Celulose Aço	59
Tabela 14 - Consumo energético por fontes: sub-setor Papel e Celulose	60
Tabela 15 - Consumo energético por fontes: sub-setor Química	61
Tabela 16 - Consumo energético por fontes: sub-setor Química	62
Tabela 17 - Consumo energético por fontes: não ferrosos/outros da metalurgia	63
Tabela 18 - Consumo energético por fontes: não ferrosos/outros da metalurgia	64
Tabela 19 - Consumo energético do sub-setor transporte	65
Tabela 20 - Consumo energético por fontes: Setor Transporte	66
Tabela 21 - Subsetores e processos da indústria brasileira	72
Tabela 22 - Quantidade de publicações encontradas (Processos)	76
Tabela 23 - Quantidade de publicações encontradas (Ventilação)	76
Tabela 24 - Quantidade de publicações encontradas (Bombas)	77
Tabela 25 - Quantidade de publicações encontradas (Refrigeração)	77
Tabela 26 - Quantidade de publicações encontradas (Iluminação)	77
Tabela 27 - Termos linguísticos adotados e números <i>fuzzy</i> triangulares	95
Tabela 28 - Índice de consistência aleatória (IR)	97

Tabela 29 - Termos linguísticos para avaliação	98
Tabela 30 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critérios	103
Tabela 31 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Econômico	103
Tabela 32 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Técnico	103
Tabela 33 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Ambiental	103
Tabela 34 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios	104
Tabela 35 - Pesos dos critérios pelo método FAHP	104
Tabela 36 - Pesos dos subcritérios pelo método FAHP	105
Tabela 37 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas do Processo I	105
Tabela 38 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	106
Tabela 39 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP (<i>V</i>)	106
Tabela 40 - Matriz de distância total positiva e negativa	107
Tabela 41 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	107
Tabela 42 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas do Processo II	108
Tabela 43 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	109
Tabela 44 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP (<i>V</i>)	109
Tabela 45 - Matriz de distância total positiva e negativa	110
Tabela 46 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	110
Tabela 47 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas do Processo III	111
Tabela 48 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	112
Tabela 49 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP (<i>V</i>)	112
Tabela 50 - Matriz de distância total positiva e negativa	113
Tabela 51 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	113
Tabela 52 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas do Processo IV	114
Tabela 53 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	115
Tabela 54 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP (<i>V</i>)	115
Tabela 55 - Matriz de distância total positiva e negativa	116
Tabela 56 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	116
Tabela 57 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critérios	117
Tabela 58 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Econômico	117
Tabela 59 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Social	118

Tabela 60 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Técnico	118
Tabela 61 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios	118
Tabela 62 - Pesos dos critérios pelo método FAHP	118
Tabela 63 - Pesos dos subcritérios pelo método FAHP	119
Tabela 64 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas para a CCT (bombas)	120
Tabela 65 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	120
Tabela 66 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP (<i>V</i>)	121
Tabela 67 - Matriz de distância total positiva e negativa	121
Tabela 68 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	122
Tabela 69 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critérios	123
Tabela 70 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Econômico	123
Tabela 71 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Ambiental	123
Tabela 72 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Técnico	124
Tabela 73 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios	124
Tabela 74 - Pesos dos critérios pelo método FAHP	124
Tabela 75 - Pesos dos subcritérios pelo método FAHP	125
Tabela 76 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas para a CCT (ventilação)	126
Tabela 77 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	126
Tabela 78 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP <i>V</i>	127
Tabela 79 - Matriz de distância total positiva e negativa	127
Tabela 80 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	128
Tabela 81 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critérios	129
Tabela 82 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Econômico	129
Tabela 83 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Ambiental	129
Tabela 84 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Técnico	130
Tabela 85 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios	130
Tabela 86 - Pesos dos critérios pelo método FAHP	130
Tabela 87 - Pesos dos subcritérios pelo método FAHP	131
Tabela 88 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas para a CCT (refrigeração)	132
Tabela 89 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (<i>WTotal</i>)	132
Tabela 90 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP <i>V</i>	133

Tabela 91 - Matriz de distância total positiva e negativa	133
Tabela 92 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	134
Tabela 93 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critérios	135
Tabela 94 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Econômico	135
Tabela 95 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Ambiental	135
Tabela 96 - Matriz de comparação <i>Fuzzy</i> – critério Técnico	135
Tabela 97 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios	136
Tabela 98 - Pesos dos critérios pelo método FAHP	136
Tabela 99 - Pesos dos subcritérios pelo método FAHP	136
Tabela 100 - Matriz de decisão <i>D</i> : alternativas para a CCT (iluminação)	137
Tabela 101 - Peso total dos subcritérios pelo método <i>fuzzy</i> AHP (WT_{total})	137
Tabela 102 - Matriz de decisão normalizada e ponderada <i>fuzzy</i> AHP V	138
Tabela 103 - Matriz de distância total positiva e negativa	138
Tabela 104 - Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)	138

Lista de figuras

Figura 1 - Mapa de emissões durante o ano 2015	22
Figura 2 - Localização das usinas hidrelétricas brasileiras	23
Figura 3 - Políticas de eficiência energética por setores no cenário mundial	28
Figura 4 - Fluxo energético brasileiro	35
Figura 5 - Fluxo de energia elétrica no Brasil	36
Figura 6 - Perfil de produção dos derivados do petróleo	40
Figura 7 - Consumo energético nacional por setor da economia	44
Figura 8 - Consumo energético do setor industrial por sub-setor	46
Figura 9 - Sub-setores da indústria: Diagrama Pareto do consumo de energia	53
Figura 10 - Consumo energético por fonte: sub-setor de bebidas e alimentos	54
Figura 11 - Bebidas e alimentos: Diagrama Pareto do consumo de energia	55
Figura 12 - Consumo energético por fonte: sub-setor de ferro-gusa e aço	57
Figura 13 - Ferro-gusa e Aço: Diagrama Pareto do consumo de energia	58
Figura 14 - Consumo energético por fonte: sub-setor Papel e Celulose	59
Figura 15 - Papel e Celulose: Diagrama Pareto do consumo de energia	60
Figura 16 - Consumo energético por fonte: sub-setor Química	61
Figura 17 - Química: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte	62
Figura 18 - Consumo energético por fonte: Não ferrosos e outros da metalurgia	63
Figura 19 - Química: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte	64
Figura 20 - Consumo energético do setor transporte	65
Figura 21 - Setor transporte: Diagrama Pareto do consumo de energia	66
Figura 22 - Consumo energético por fonte: Setor Transporte	67
Figura 23 - Sub-setor rodoviário: Diagrama Pareto do consumo de energia	67
Figura 24 - Consumo energético do setor transporte	68
Figura 25 - Setor energético: Diagrama Pareto do consumo de energia	68
Figura 26 - Consumo energético do setor residencial	69
Figura 27 - Setor residencial: Diagrama Pareto do consumo de energia	70
Figura 28 - Estrutura do setor industrial e estratégias de efficientização	74

Figura 29 - Estrutura hierárquica de decisão do método <i>fuzzy</i> -AHP	95
Figura 30 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	108
Figura 31 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	111
Figura 32 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	114
Figura 33 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	117
Figura 34 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	122
Figura 35 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	128
Figura 36 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	134
Figura 37 - Gráfico radar com o mapeamento do <i>CCi</i> para cada alternativa	139
Figura 38 - Avaliação dos critérios para os processos de papel e celulose	140
Figura 39 - Avaliação dos subcritérios para os processos de papel e celulose	140
Figura 40 - Subcritérios para Alternativa 1 (Refinadores eficientes)	141
Figura 41 - subcritérios para Alternativa 3 (Análise de pressão)	142
Figura 42 - Subcritérios para Alternativa 1 (Eficiência elevada)	143
Figura 43 - Subcritérios para Alternativa 3 (Dispensor eficiente)	144
Figura 44 - Avaliação dos critérios (bombas) de papel e celulose	145
Figura 45 - Avaliação dos subcritérios (bombas) de papel e celulose	145
Figura 46 - Avaliação dos subcritérios (bombas) em função da alternativa 1	147
Figura 47 - Avaliação dos critérios (ventilação) de papel e celulose	147
Figura 48 - Avaliação dos subcritérios (ventilação) de papel e celulose	148
Figura 49 - Avaliação dos subcritérios (ventilação) em função da alternativa 1	149
Figura 50 - Avaliação dos critérios (refrigeração) do subsetor papel e celulose	150
Figura 51 - Avaliação dos subcritérios (refrigeração) de papel e celulose	150
Figura 52 - Avaliação dos subcritérios (refrigeração) em função alternativa 1	151
Figura 53 - Avaliação dos critérios (iluminação) do subsetor papel e celulose	152
Figura 54 - Avaliação dos subcritérios para as CCT (iluminação)	153
Figura 55 - Avaliação dos subcritérios (iluminação) em função da alternativa 2	154

Lista de quadros

Quadro 1 – Processos de papel e celulose: estratégias de efficientização	75
Quadro 2 - CCT do papel e celulose: estratégias de efficientização energética	75
Quadro 3 - Artigos com afinidades ao tema proposto	78
Quadro 4 - Artigos com afinidades ao tema proposto	81
Quadro 5 - Artigos com afinidades ao tema proposto	83
Quadro 6 - Artigos com afinidades ao tema proposto	85
Quadro 7 - Artigos com afinidades ao tema proposto	88
Quadro 8 - Métodos multicritério de apoio à decisão	93
Quadro 9 - Estrutura hierárquica do instrumento de pesquisa	102

“En el fútbol, como en la vida, no hay revanchas... Hay nuevas oportunidades”

Diego Pablo “El Cholo” Simeone

1 Introdução

Ao longo dos últimos anos, o Brasil tem realizado grandes esforços visando projetar uma matriz energética em função de uma mínima dependência de combustíveis fósseis. Segundo dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) sobre a emissão de CO₂ no mapa mundial (MME, 2016a), o indicador brasileiro é de 1,59 tonelada para cada mil quilos de energia consumida (tCO₂/tep). Com esse número, o país está bem abaixo das médias da América do Sul (1,84 tCO₂/tep) e do cenário mundial (2,34 tCO₂/tep). Segundo o MME, a grande participação de energias renováveis na matriz energética do continente contribui para esse resultado. O Brasil detém 39% de fontes renováveis em sua matriz de energia, agregando, assim, forte influência no indicador da região. Na América do Sul, a proporção das fontes renováveis é de 29%, mais que o dobro da média mundial, estimada em 13,6%.

Democraticamente, a proposta de uma matriz energética sustentável e ambientalmente amigável deve ser gerada por meio de um processo amplo de participação dos diferentes agentes da sociedade, assim permitindo aos cidadãos intervir numa fase inicial do processo, definindo o local, a tecnologia básica e as fontes críticas de energia que se deseja utilizar para atender às necessidades e capacidade de produção.

A Agencia Internacional de Energia (IEA, do inglês, *International Energy Agency*) publicou o panorama de emissões de CO₂ para o ano 2015 (IEA, 2016b), consolidado em nível mundial, conforme ilustrado na Figura 1.

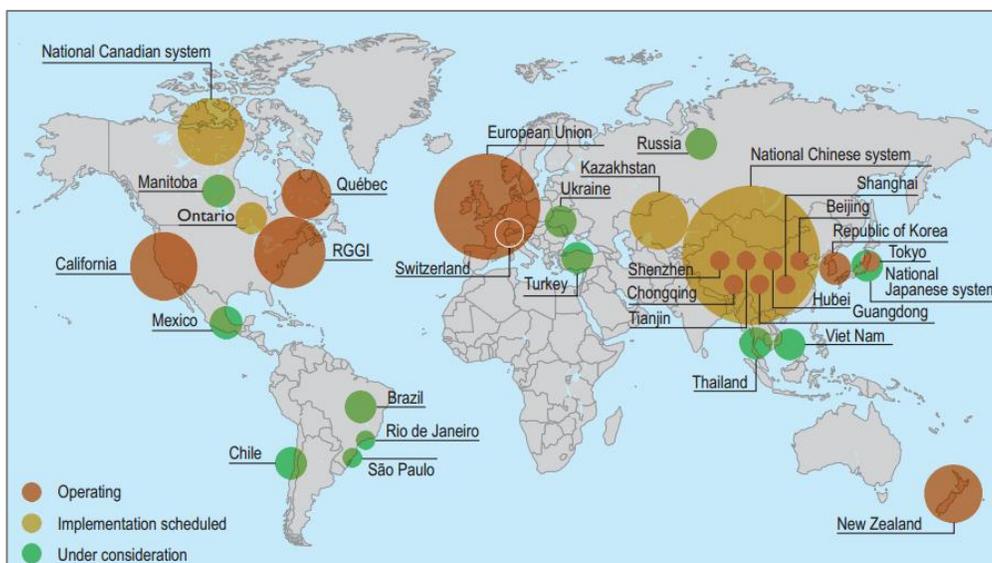


Figura 1 - Mapa de emissões durante o ano 2015

Fonte: (IEA, 2016b)

Pode ser observado nessa figura que o Brasil emitiu muito menos CO₂ durante a produção de energia do que as demais nações. Isto deve-se, basicamente, à composição da sua matriz energética amplamente favorável aos recursos renováveis. No caso do Brasil, a presença de fontes renováveis na matriz energética elétrica é significativa, principalmente da hidroeletricidade (68,1%) e da biomassa. Além disso, o governo brasileiro defende em negociações internacionais, a ampliação de outras fontes renováveis na matriz energética, tais como a solar e a eólica.

Por outro lado, o desenvolvimento da transmissão por linhas de distribuição possibilitou o aproveitamento de recursos disponíveis nos locais mais distantes dos centros consumidores, enquanto a interligação das redes, permitiu o aproveitamento das diversidades hidrológicas existentes entre as bacias, notadamente entre as do Sul e do Sudeste. A Figura 2 ilustra a distribuição de usinas hidroelétricas por todo o território nacional (Aneel, 2017a), totalizando: 219 em operação (potência outorgada: 101.138.278 kW); 6 em construção (potência outorgada: 1.922.100 kW); 8 empreendimentos com construção não iniciada (potência outorgada: 731.540 kW).

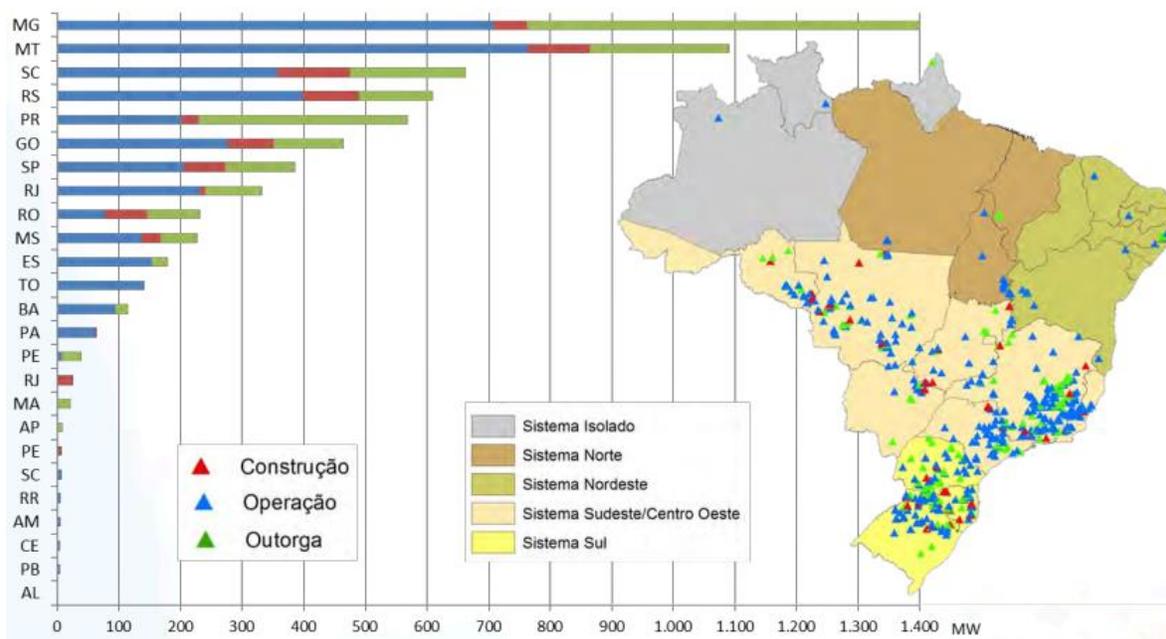


Figura 2 - Localização das usinas hidrelétricas brasileiras

Fonte: (Lenzi, 2013)

No curso da última década, o Brasil vem aderindo, paulatinamente, às diversas fontes renováveis de energia –biomassa, eólica e solar– o que corroborou para um maior equilíbrio do Balanço Energético Nacional de 2017 (EPE, 2017). Essas fontes têm-se constituído em alternativas aos combustíveis fósseis. Na atualidade, a matriz energética brasileira mostra uma predominância pela geração hidrelétrica, sinalizando um aumento na participação da biomassa, assim como na geração de energia eólica, quando comparado com os dados publicados pelo BEN 2016 (biomassa: 8,0%; energia eólica: 3,5%).

1.1. O caráter inovador da pesquisa

No cenário energético nacional, embora a geração de energia elétrica corresponda a uma matriz essencialmente hidráulica, a dependência de combustíveis de origem fóssil (petróleo e derivados) para a geração de energia tem sido muito expressiva ao longo dos anos, sendo o setor industrial o maior consumidor de energia no Brasil com 28,5% (EPE, 2017).

Para preservar as futuras gerações, julgam-se necessárias mudanças, principalmente no uso de uma tecnologia mais eficiente. Assim, uma análise crítica em quanto os impactos decorrentes da efficientização em função de diversos critérios e subcritérios (*e.g.*: social,

técnico, econômico e ambiental) deve ser realizada. Esta análise, usualmente não é considerada na implementação de programas de eficiência energética e, o protocolo internacional de medição e verificação (Evo, 2010) não avalia todos os possíveis impactos desta efficientização, uma vez que o foco está centralizado na redução do consumo de energia. Nesse sentido, julga-se que a aplicação inédita de um método multicritério robusto de apoio à decisão para avaliar os impactos decorrentes da efficientização energética no setor industrial, contribui a obter resultados não reportados na literatura especializada.

Esta é, exatamente, a principal motivação para o desenvolvimento desta pesquisa em nível de doutorado e constitui o seu caráter inovador; mais precisamente avaliar os impactos decorrentes da implementação de estratégias de efficientização energética na indústria, especificamente, no subsetor de papel e celulose utilizando o método híbrido *Fuzzy-AHP-TOPSIS*, com dois propósitos fundamentais: (i) possibilitar uma redução do consumo de energia e contribuindo à diminuição de emissões pela aplicação dos princípios da efficientização energética; (ii) conhecer o impacto social, econômico, técnico e ambiental desta efficientização.

Em sintonia com a filosofia do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio, na área de concentração de Petróleo e Energia, deseja-se que a pesquisa de Doutorado contribua para o estado da arte do setor energético brasileiro e o avanço do conhecimento em estudos relacionados à eficiência energética.

1.2. **Objetivos: geral e específicos**

Com base no exposto, o objetivo geral desta pesquisa é *avaliar os impactos decorrentes da implementação de estratégias de efficientização energética na indústria de papel e celulose utilizando modelo de decisão multicritério Fuzzy-AHP-TOPSIS*. Como desdobramentos do objetivo central, a pesquisa possui os seguintes objetivos específicos:

- estabelecer a priorização dos setores da economia brasileira à luz do consumo energético e demanda das fontes geradoras de energia;
- identificar estratégias de efficientização energética para os processos e as tecnologias transversais (CCT, do inglês *Cross-Cutting Technology*) do subsetor industrial de papel e celulose;

- definir critérios e subcritérios para avaliar as estratégias de eficiência energética aplicadas no subsetor industrial de papel e celulose, a partir da aplicação do método multicritério híbrido *Fuzzy-AHP-TOPSIS*;
- identificar a influência dos critérios e subcritérios sobre as estratégias de eficiência energética aplicadas no subsetor industrial de papel e celulose

1.3. Motivação

A principal motivação pela escolha do tema fundamenta-se na preocupação da comunidade internacional por seu permanente esforço de reduzir os indesejáveis efeitos ambientais que resultam do avanço tecnológico e, conseqüentemente, do consumo energético em setores críticos da economia (*e.g.*: indústria, transporte, energético, residencial, etc.).

Nesse sentido, a eficiência energética torna-se cada vez mais importante já que persegue objetivos legítimos da sustentabilidade, ou seja: (i) contribui para uma análise crítica da matriz energética brasileira; (ii) pesquisa alternativas tecnológicas de geração distribuída com potencial para produzir economias de energia em setores críticos da economia brasileira; (iii) mitiga os efeitos ambientais, contribuindo para a redução de emissões dos gases efeito estufa (GEE) e (iv) visa garantir o futuro das novas gerações.

1.4. Estrutura da tese

A seguir é apresentada de forma sucinta a estrutura da tese de doutorado.

O capítulo 1 contextualiza o trabalho e caracteriza a motivação da escolha do tema da pesquisa, definindo os objetivos perseguidos, justificando a motivação pela escolha do tema e o seu desenvolvimento.

O capítulo 2 apresenta os conceitos aplicáveis relacionados à eficiência energética e requeridos para o desenvolvimento do tema de pesquisa. Além disso, são descritas as principais políticas de eficiência energética adotadas pelo governo brasileiro e são abordadas outras políticas adotadas no cenário internacional.

O capítulo 3 apresenta uma revisão bibliográfica da atual matriz energética brasileira, caracterizando, principalmente, a oferta e a demanda. O capítulo finaliza com uma análise estatística, a partir do princípio de Pareto, que busca estratificar os setores críticos da economia brasileira.

O capítulo 4 apresenta um mapeamento do setor industrial e propõe estratégias de eficiência energética para o subsetor e papel e celulose. Além disso, os critérios e subcritérios identificados a partir da extensa revisão da literatura especializada, são amplamente detalhados.

O capítulo 5 apresenta em detalhe o modelo matemático adotado para avaliar as estratégias de efficientização energética, *i.e.*: método multicritério híbrido *Fuzzy-AHP-TOPSIS*.

O capítulo 6 apresenta e discute os resultados da aplicação do método *Fuzzy-AHP-TOPSIS*.

Finalmente, o capítulo 7 formula as conclusões da pesquisa de doutoramento associando-as aos objetivos específicos originalmente formulados. Adicionalmente, uma série de recomendações são efetuadas para desdobramentos de futuros trabalhos.

2

Eficiência energética: fundamentos teóricos e políticas públicas

Este capítulo apresenta a revisão da literatura relacionada ao tema de pesquisa desenvolvido na tese de doutorado. A revisão bibliográfica foi dividida em duas partes. Uma das partes trata da base teórica relacionada à eficiência energética, incluindo os conceitos clássicos, e outra traz uma síntese das distintas políticas de eficiência energética estabelecida no cenário nacional e internacional.

2.1. Eficiência energética

A IEA (*International Energy Agency*) define a eficiência energética como uma forma de gerir e restringir o crescimento no consumo de energia¹. Por exemplo: um equipamento é considerado eficiente (do ponto de vista energético), caso tenha a capacidade de realizar a mesma função, porém com um gasto menor de energia (*i.e.*: requerendo uma menor potência elétrica). Já o Departamento de Energia dos Estados Unidos define a eficiência energética como uma das formas mais adequadas e menos onerosas de combater as alterações climáticas, melhorar a competitividade das empresas e de reduzir os custos associados da energia para os consumidores².

A partir do ano de 1970, devido às dificuldades técnico-econômicas surgidas na indústria do petróleo, o conceito de eficiência energética ganhou visibilidade. Com o grande aumento do preço do barril de petróleo, no cenário industrial, tornou-se fundamental racionalizar as atividades visando diminuir os impactos da economia, ou seja, produzir a mesma quantidade de produtos e serviços com o menor recurso possível, para atender às distintas necessidades da sociedade. Dessa forma, hábitos de consumo foram modificados,

¹ Fonte: <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/> Data de acesso: 17 de maio de 2018

² Fonte: <http://www.energy.gov/science-innovation/energy-efficiency> Data de acesso: 17 de maio de 2018

fazendo com que um mesmo objetivo fosse alcançado utilizando-se um menor consumo de energia. Na atualidade, a eficiência energética está direcionada à proteção e conservação do meio ambiente, sem deixar de lado os custos elevados da energia de origem fóssil.

No contexto internacional, as políticas adotadas, normas e regulamentações compulsórias visam, principalmente, a redução do consumo de energia em setores críticos, dentre os quais destacam-se: transporte, industrial e residencial. A cobertura do setor difere em função das políticas internas e necessidade de cada país, conforme ilustrado na Figura 3.

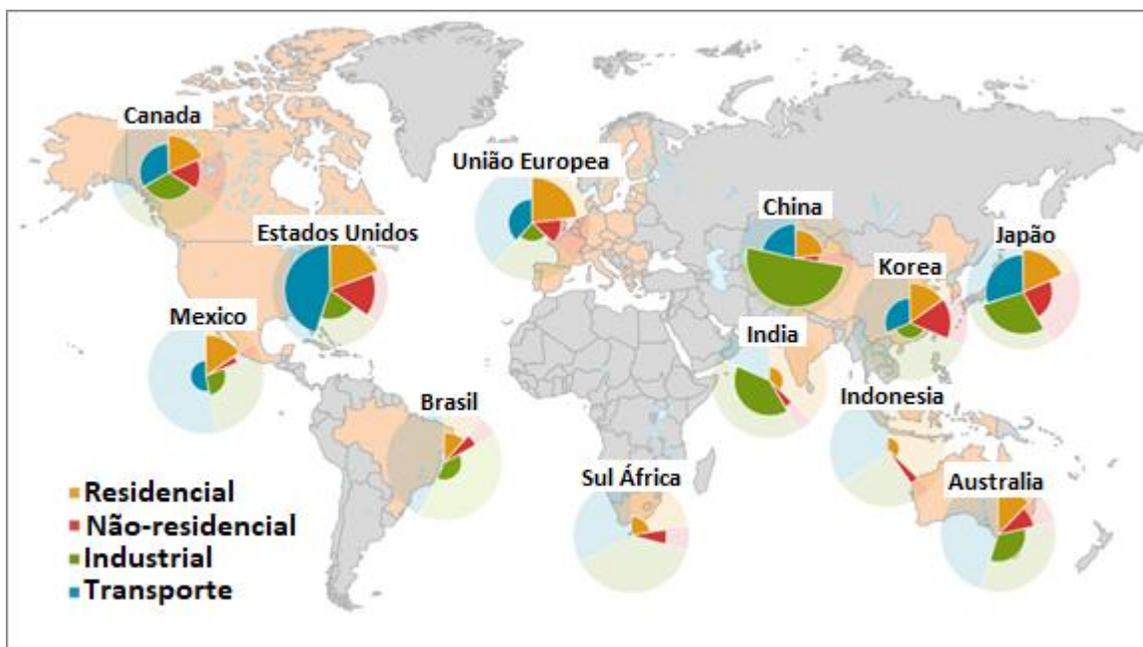


Figura 3 - Políticas de eficiência energética por setores no cenário mundial
Fonte: (IEA, 2016a)

Conforme ilustrado na figura acima, a indústria da China e Índia adotam um percentual maior de políticas públicas de eficiência energética. Nos Estados Unidos e na União Europeia, a indústria representa uma percentagem mais reduzida quando comparado a outros setores. Já no Brasil, constata-se a adoção de distintas políticas públicas que visam a redução de consumo e o aumento da eficiência energética. Os principais motivadores para o uso das políticas energéticas são (Calili *et al.*, 2014): (i) elevados custos de construção de novas usinas e a necessidade de considerar seus possíveis impactos ambientais; (ii) redução da poluição local e regional do ar e (iii) a redução das emissões dos gases de efeito estufa. O Brasil tem praticado algumas políticas para atingir uma melhor eficiência energética, políticas essas descritas a seguir.

No cenário brasileiro, o principal programa de conservação de energia é o Procel (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica). Procel é um programa de governo, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e executado pela Eletrobrás. Foi instituído em 30 de dezembro de 1985 para promover o uso eficiente da energia elétrica e combater o seu desperdício (Eletrobras-Procel, 2016). As ações do Procel nas suas distintas áreas de atuação (*e.g.*: equipamentos, edificações, iluminação pública, poder público, indústria e comércio) contribuem para o aumento da eficiência dos bens e serviços, para o desenvolvimento de hábitos e conhecimentos sobre o consumo eficiente da energia e, além disso, postergam os investimentos no setor elétrico, mitigando, assim, os impactos ambientais e colaborando para um Brasil mais sustentável.

Com base em estimativas de mercado e aplicação de metodologias específicas de avaliação de resultados, estima-se que, somente em 2015, o Procel alcançou uma economia de energia de aproximadamente 11,680 bilhões de kWh. Essa energia economizada pode ser convertida em emissões evitadas de 1,453 milhão tCO₂ equivalentes, o que corresponde às emissões proporcionadas por 499 mil veículos durante um ano (Eletrobras-Procel, 2016).

Além do Procel, no Brasil existem distintos programas que visam a eficiência energética. Destacam-se: (i) Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), coordenado pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO); (ii) Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e do Gás Natural (CONPET), cuja coordenação executiva é de responsabilidade da Petrobras; (iii) Programa de apoio a Projetos de Eficiência Energética (PROESCO), financiado pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e cuja coordenação executiva compete à Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012).

A seção seguinte detalha as principais políticas de eficiência energética adotadas pelo governo brasileiro, comentando aspectos de outras políticas públicas de energia adotadas no mundo.

2.2. Políticas públicas de eficiência energética

Conforme a demanda mundial da energia aumenta –é esperado um aumento de 30% até 2040– o desenvolvimento sustentável e o uso de fontes mais limpas de energia,

constituem um dos principais desafios para a comunidade internacional (Raineri, 2016). No Brasil, a projeção feita pelo Plano Nacional de Energia (EPE, 2007b) indica que o crescimento da renda e sua redistribuição deverão influenciar o crescimento do consumo por habitante. O cenário para 2030 no Brasil prevê uma população de aproximadamente 240 milhões de habitantes antecipando uma demanda total de energia primária cerca de 550 milhões de tep (tonelada equivalente de petróleo)³.

2.2.1. Programa brasileiro de etiquetagem

O Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) é um protocolo de cooperação, que foi firmado em 1984 entre o Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior (MDIC) e a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), com interveniência do MME, sendo coordenado pelo INMETRO e tendo como participantes os fabricantes nos Grupos Técnicos (Procel, 2011). O Programa Brasileiro de Etiquetagem visa prover os consumidores de informações que lhes permitam avaliar e otimizar o consumo de energia dos equipamentos eletrodomésticos, selecionar produtos de maior eficiência em relação ao consumo, e melhor utilizar eletrodomésticos, possibilitando economia nos custos de energia. Os produtos etiquetados que apresentam o melhor desempenho energético em sua categoria poderão também receber um selo de eficiência energética. Para os equipamentos elétricos domésticos etiquetados é concedido anualmente o Selo PROCEL.

2.2.2. Programa nacional de conservação de energia elétrica

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel) é um programa do Governo Federal vinculado ao Ministério de Minas e Energia e que foi criado em 30 de dezembro de 1985, por meio da Portaria Interministerial nº 1.877, sendo executado pela Eletrobrás. Tendo como missão promover a eficiência energética, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida da população e eficiência dos bens e serviços, reduzindo os

³ Tonelada de equivalente de petróleo (tep) ou, em inglês *ton of oil equivalent* (toe), é uma unidade de energia definida como a quantidade de energia liberada pela queima de uma tonelada de petróleo bruto (Nakićenović, 1996). Segundo a Agência Internacional de Energia, 1 tep corresponde a 41 868 MJ (Iea, 2016b).

impactos ambientais. O Procel possui, entre outros, os seguintes objetivos: estimular o uso eficiente e racional de energia elétrica; aumentar a competitividade do país; reduzir os impactos ambientais; proporcionar benefícios à própria sociedade; fomentar o desenvolvimento de tecnologias eficientes.

2.2.3.

Programa nacional da racionalização do uso dos derivados do petróleo e gás natural

O Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e Gás Natural (CONPET) é um programa do Governo Federal criado em 1991 por decreto presidencial, que tem por objetivo promover o desenvolvimento de uma cultura de não desperdício relacionado ao uso dos recursos naturais não renováveis, estimular a eficiência no uso da energia em diversos setores, com ênfase nos transportes, nas indústrias e nas residências. Além disso, o programa visa desenvolver ações de educação ambiental, reduzindo a emissão de gases de efeito estufa, contribuindo para o desenvolvimento econômico e o bem-estar social. O Selo Conpet de Eficiência Energética visa destacar, para o consumidor, aqueles modelos que atingem os graus máximos de eficiência energética na Etiqueta Nacional de Conservação de Energia do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMETRO. Este Selo é concedido anualmente pela Petrobras e representa um estímulo à fabricação de modelos cada vez mais eficientes (Conpet, 2012).

2.2.4.

Programa de eficiência energética das concessionárias de energia elétrica

O Programa de Eficiência Energética das Concessionárias de Energia Elétrica (PEE) é regulado e fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e possui os Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE) contendo as regras e as diretrizes de aplicação dos recursos do programa. A Lei nº 9.991 de 24 de julho de 2000⁴, em seu art. 1º, estabelece que: "as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica ficam obrigadas a aplicar, anualmente, o montante de, no mínimo, setenta e cinco centésimos por cento (0,75%) de sua receita operacional líquida

⁴ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9991.htm - Acesso: 17 de maio de 2018

(ROL) em pesquisa e desenvolvimento do setor elétrico e, no mínimo, vinte e cinco centésimos por cento (0,25%) em programas de eficiência energética no uso final”. Os percentuais estabelecidos pela Lei nº 9.991 de 24 de julho de 2000, em seu art. 1º, foram modificados pelo art. 11 da Lei nº 12.212 de 20 de janeiro de 2010⁵, que estabelece na seu parágrafo III: “a partir de 1º de janeiro de 2016, para as concessionárias e permissionárias cuja energia vendida seja inferior a 1.000 (mil) GWh por ano, o percentual mínimo a ser aplicado em programas de eficiência energética no uso final poderá ser ampliado de 0,25% (vinte e cinco centésimos por cento) para até 0,50% (cinquenta centésimos por cento)”. Em 2015, esses valores percentuais foram prorrogados pela MP/2015 até 2022. Esta MP define no seu art. 8º, parágrafo I: “até 31 de dezembro de 2022, os percentuais mínimos definidos no caput deste artigo serão de 0,50% (cinquenta centésimos por cento), tanto para pesquisa e desenvolvimento como para programas de eficiência energética na oferta e no uso final da energia”. Assim mesmo, o art. 8º, parágrafo V afirma que: “as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica deverão aplicar, no mínimo, 60% (sessenta por cento), podendo aplicar até 80% (oitenta por cento), dos recursos voltados aos seus programas de eficiência energética nas unidades consumidoras rurais, ou nas unidades pertencentes à comunidade de baixa renda ou cadastradas na Tarifa Social de Energia Elétrica”. Finalmente, o art. 5º, no seu parágrafo único, define: “Os investimentos em eficiência energética previstos no art. 1º desta Lei deverão priorizar iniciativas e produtos da indústria nacional, conforme regulamentação a ser definida pela Aneel”.

2.2.5. Lei de Eficiência Energética

Desde o 17 de outubro de 2001, o Brasil possui um importante instrumento para a indução da eficiência energética: a Lei nº 10.295, também conhecida como Lei de Eficiência Energética. Esta Lei foi concebida sob o entendimento de que a conservação de energia deve ser finalidade da Política Energética Nacional. Estimula o desenvolvimento tecnológico, a preservação ambiental e a introdução de produtos mais eficientes no mercado nacional (Eletrobras-Procen, 2016). Nesse contexto, a Lei de Eficiência Energética é o instrumento

⁵ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112212.htm - Acesso: 17 de maio de 2018

que determina a existência de níveis mínimos de eficiência energética (ou máximos de consumo específico de energia) de máquinas e aparelhos consumidores de energia (elétrica, derivados de petróleo ou outros insumos energéticos) fabricados ou comercializados no país, bem como de edificações construídas, com base em indicadores técnicos pertinentes e de forma compulsória. Uns dos principais motivos para o desenvolvimento da Lei de Eficiência Energética tem sido a estruturação no Brasil de uma rede de laboratórios, acreditados pelo INMETRO, para realizar ensaios técnicos em equipamentos. Foram 22 laboratórios capacitados em 11 instituições, entre Universidades e Centros de Pesquisa.

2.2.6. Plano Nacional de Eficiência Energética

A portaria 594, de 19 de outubro de 2011, publicada pelo Ministério de Minas e Energia (MME) aprovou o "Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEf) - Premissas e Diretrizes Básicas", que busca consolidar e ampliar o conjunto de iniciativas, ações e estratégias existentes para incentivar todos os setores da economia a aproveitar o potencial de eficiência energética existente. Este documento serve como orientador para que se atinjam as metas de economia de energia no contexto do planejamento energético nacional. Desta forma, o Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007b) e os Planos Decenais de Energia (PDEs) vão incorporar as políticas de eficiência energética definidas pelo governo.

O plano propõe um conjunto de ações e medidas principalmente para os setores da indústria e de micro, pequenas e médias empresas; transportes; educação; o Programa Brasileiro de Etiquetagem; iluminação pública; saneamento; pesquisa e desenvolvimento (P&D); Medição e Verificação (M&V) e parcerias internacionais.

3

Matriz energética brasileira: oferta e demanda

A matriz energética é o conjunto de recursos utilizados por um país para fornecimento da energia necessária para realização de seus processos produtivos (Gomez, 2015). Consiste, numa definição simplificada, de uma descrição de toda a produção e consumo de energia de um país, discriminada por fonte de produção e setores de consumo (EPE, 2017). A matriz pode ser tão detalhada quanto se deseje. Existem dois tipos de recursos disponíveis: (i) os primários (*e.g.*: petróleo, gás natural e carvão mineral) que são as fontes energéticas oriundas da natureza, ou seja, aquelas que não passam por processos de transformação e (ii) os secundários (*e.g.*: gasolina, diesel, eletricidade) formados a partir de uma matéria prima que sofre transformações (Marcoccia, 2007).

No Brasil, a descrição disponível mais detalhada que se tem é o Balanço Energético Nacional (BEN), que é elaborado anualmente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), sendo publicado pelo Ministério de Minas e Energia (MME). É um documento bastante completo, publicado regularmente desde 1970, sendo amplamente utilizado tanto pelo governo quanto pelo setor privado para suas atividades de planejamento e investimento (Vichi e Mansor, 2009).

A matriz energética brasileira é composta por diversos recursos renováveis, *e.g.*: biocombustível, hidrelétricas e carvão mineral, além do gás natural, urânio, petróleo e derivados. Devido aos recursos hídricos e fontes alternativas de energia (eólica e solar), o Brasil possui uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo industrializado (Lima, 2017). A Figura 4 ilustra o fluxo energético brasileiro mais para o ano base de 2016. Esses dados foram publicados recentemente pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017) e sintetizam a oferta de energia, assim como a demanda energética por parte dos diversos setores da economia nacional.

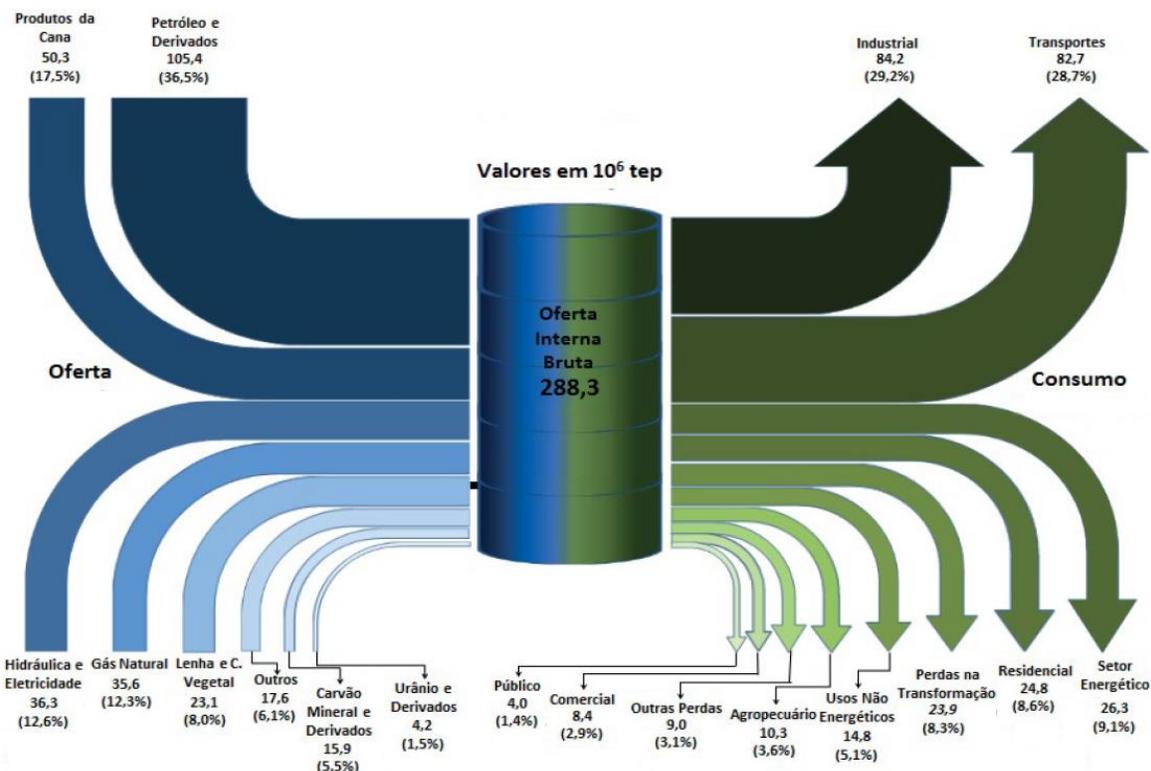


Figura 4 - Fluxo energético brasileiro

Fonte: (EPE, 2017)

Pelo lado da oferta, pode ser observado na figura acima, ainda uma forte dependência do Petróleo e seus derivados (37,3%) para a geração de energia. Mas, em contrapartida, também pode ser visto que outras fontes de energia menos poluentes como os produtos da cana (16,9%) aumentaram a produção de energia quando comparada com aquela do ano 2015 (produtos da cana: 15,7%). Isto confirma que os esforços por tornar a matriz energética cada vez mais sustentável, estão se tornando cada vez mais importantes.

Assim, o contexto atual da matriz energética brasileira demonstra extrema dependência das fontes hídricas, sobretudo, com a construção de usinas hidrelétricas de grande porte e das assim chamadas Pequenas Centrais Hidrelétricas (Silva e Vieira, 2016). A Figura 5 confirma esta situação, onde, segundo dados publicados recentemente no Balanço Energético Nacional (BEN), a geração de eletricidade conta com 68,1% de energia hidráulica (EPE, 2017).

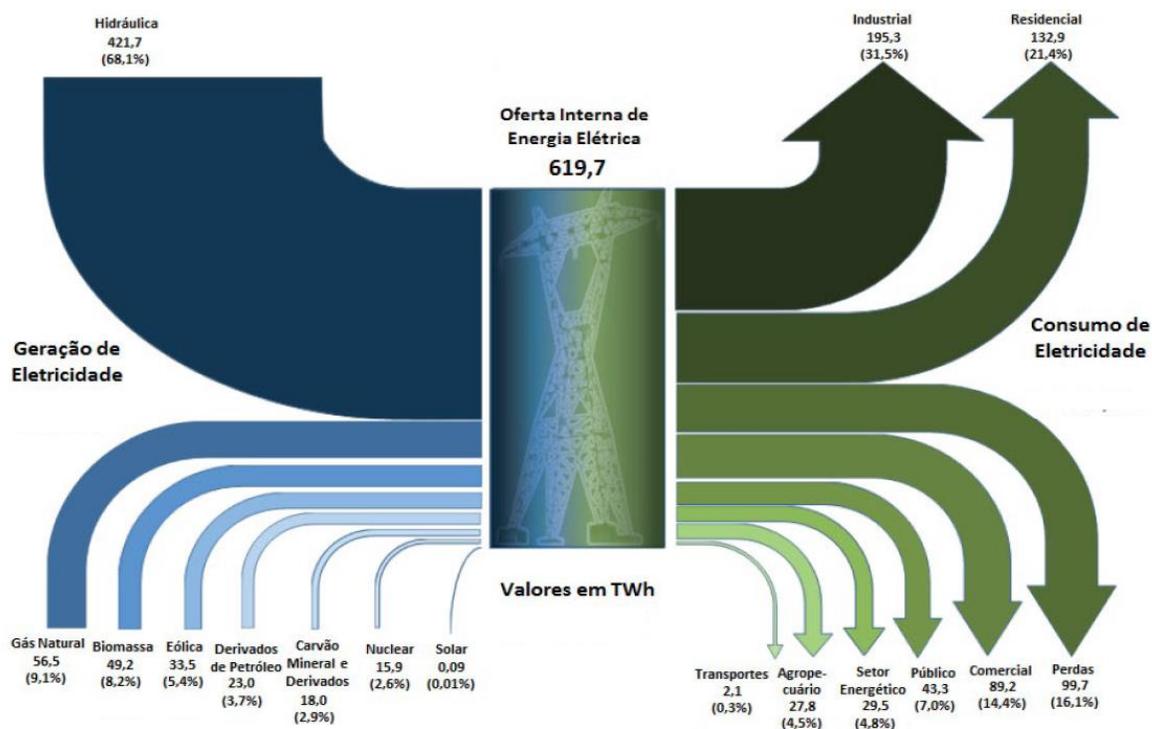


Figura 5 - Fluxo de energia elétrica no Brasil

Fonte: (EPE, 2017)

Ainda na Figura 5 pode ser observado que outras fontes de energia limpas (*e.g.*: energia eólica: 5,4%; biomassa: 8,2%) têm aumentado o índice de produção nos últimos anos, o que confirma as políticas do estado visando obter a produção de energia de diversas fontes.

Nesta ordem de ideias, e em sintonia com os objetivos perseguidos no desenvolvimento deste projeto de pesquisa a nível de doutorado, este capítulo propõe-se, essencialmente, a descrição de três tópicos fundamentais: (i) caracterizar a oferta de energia no Brasil; (ii) caracterizar a demanda de energia no Brasil e (iii) identificar os setores da economia onde concentra-se 80% do consumo energético nacional.

3.1.

Matriz energética: caracterização da oferta

A geração de energia a partir de fontes renováveis continua em expansão no Brasil. A oferta de energia elétrica de 2016 foi de 82,8% de renováveis, indicador superior ao verificado em 2015, de 75,5% (MME, 2016b). Os desempenhos da geração hidráulica, eólica e por biomassa foram determinantes no aumento das renováveis. Atualmente, o país se depara em uma fase de desenvolvimento econômico e na produção de energia, ademais, tem um

grande potencial na geração de combustíveis fósseis (Aneel, 2017a). Outro fator é que o Brasil faz parte do grupo de países em que a produção de eletricidade, em grande parte, é proveniente de usinas hidrelétricas. O Brasil possui um enorme potencial nas fontes de energia renováveis, que podem ser aproveitados pela matriz energética brasileira, no entanto, são necessários investimentos em tecnologia para redução dos custos de implantação e geração (Mantovani *et al.*, 2017), assim como a avaliação dos seus impactos associados.

No concernente à geração de energia elétrica, segundo Ministério de Minas e Energia (MME, 2017), a Oferta Interna de Energia Elétrica (OIEE) de 2017 foi estimada em 630,2 TWh, mostrando aumento de 2,6% sobre 2016. A estimativa é que a energia hidráulica continue sendo a mais importante na matriz elétrica de 2018, respondendo por 67,9%, percentual ligeiramente inferior ao verificado em 2016 (68,6%). Essa redução da fonte hídrica será compensada por bons desempenhos de outras fontes renováveis, como a eólica e a biomassa.

Em relação à capacidade de geração de energia elétrica, atualmente o Brasil possui no total 4.661 empreendimentos em operação (*i.e.*: centrais hidrelétrica, solares, fotovoltaicas, termelétrica, eólica, termonuclear), totalizando 152.136.881 kW de potência instalada. Está prevista para os próximos anos uma adição de 24.608.102 kW na capacidade de geração do País, proveniente dos 267 empreendimentos atualmente em construção e mais 552 em empreendimentos com construção ainda em fase inicial (Aneel, 2017a).

Em relação à oferta de petróleo e derivados, a produção em 2015 apresentou um aumento de 7,5% com relação ao ano de 2014, *i.e.*: passou de 121.129.000 m³ a 141.716.000 m³. Ainda em 2015, o País importou 12,2% e exportou 30,2% do total da produção. Com relação ao consumo total, este foi de 114.428.000 m³ o que representa 80,7% da produção nacional.

No referente às reservas de petróleo no cenário nacional atual, segundo os dados publicados pela Superintendência de Desenvolvimento e Produção (Sdp, 2016), o Brasil conta com 12.666,10 MMbbl de reservas 1P (Provadas); 22.741,55 MMbbl de reservas 3P (Provadas, Prováveis e Possíveis) e 4579,24 MMbbl de recursos contingentes⁶. A Tabela 1

⁶ Quantidade de Petróleo ou Gás Natural potencialmente recuperável, de Reservatórios descobertos, por meio de projetos de Desenvolvimento, mas cuja Produção, na data de referência do Boletins Anuais de Recursos e Reservas (BAR), não é comercialmente viável devido a uma ou mais contingências. Fonte: (Sdp, 2016).

mostra os volumes declarados pelos Operadores, discriminados por ambiente e bacia sedimentar⁷.

Tabela 1 - Volumes de reserva no Brasil declarados pelos operadores

	Petróleo (MMm ³)			Gás (MMm ³)		
	Reservas 1P	Reservas 3P	Recursos Contingentes	Reservas 1P	Reservas 3P	Recursos Contingentes
Mar						
<i>Alagoas</i>	0,07	0,07	0,00	456,20	456,20	0,00
<i>Camamu</i>	3,78	14,32	0,07	9.690,14	12.193,64	4.549,08
<i>Campos</i>	912,75	1.388,41	394,11	92.480,39	171.395,72	36.810,68
<i>Ceará</i>	2,49	7,09	0,04	257,61	509,99	1,99
<i>Espírito Santo</i>	5,03	6,90	1,42	5.941,52	6.769,96	1.211,09
<i>Potiguar</i>	14,00	18,99	0,44	2.164,44	2.730,00	921,74
<i>Recôncavo</i>	0,12	0,13	0,08	0,00	0,00	0,00
<i>Santos</i>	972,36	2.006,58	309,26	203.782,22	364.541,51	49.647,62
<i>Sergipe</i>	0,37	7,41	3,15	1.062,02	2.751,73	1.771,77
Mar Total	1.910,97	3.449,92	708,57	315.834,55	561.348,74	94.913,97
Terra						
<i>Alagoas</i>	0,58	1,26	0,00	1.295,39	2.626,87	296,98
<i>Amazonas</i>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Barreirinhas</i>	0,00	0,00	0,00	143,78	143,78	0,00
<i>Camamu</i>	0,00	4,45	0,00	34,88	34,88	0,00
<i>Espírito Santo</i>	3,79	8,85	1,36	675,01	829,74	25,99
<i>Parnaíba</i>	0,01	0,02	0,00	15.628,70	20.268,42	0,00
<i>Potiguar</i>	30,79	39,37	2,93	1.656,74	2.241,23	94,31
<i>Recôncavo</i>	28,93	50,69	3,19	5.535,77	10.301,34	466,65
<i>Sergipe</i>	31,20	53,15	11,46	1.151,72	1.628,99	40,05
<i>Salimões</i>	7,47	7,90	0,52	36.198,06	38.686,31	7.423,35
<i>Tucano Sul</i>	0,00	0,00	0,00	108,16	108,16	5,06
Terra Total	102,78	165,70	19,47	62.428,22	76.869,74	8.352,39
Total (MMm³)	2.013,75	3.615,62	728,04	378.262,77	638.218,48	103.266,35
Total (MMbbl)	12.666,10	22.741,55	4.579,24			

Fonte: (Sdp, 2016)

A previsão para os próximos anos mostra um panorama alentador em torno à produção. Espera-se um aumento de 63,2% até 2023, relacionados à produção de barris diários de petróleo. A Tabela 2 mostra a previsão de produção de petróleo por nível de incerteza dos recursos associados, informação que foi publicada pela Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético do Ministério de Minas e Energia (EPE, 2014).

Tabela 2 - Previsão nacional da produção de petróleo

Recurso:	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Petróleo	Milhões de barris diários						
União	-	-	0,023	0,054	0,072	0,093	0,134
RND-E	0,013	0,020	0,035	0,044	0,047	0,059	0,072
RC	0,264	0,559	0,971	1,427	1,881	2,243	2,474
RT	2,814	3,090	3,078	3,021	2,766	2,462	2,214
TOTAL	3,091	3,668	4,107	4,546	4,766	4,859	4,893

Fonte: Adaptado de (EPE, 2014)

Nota: As legendas referem-se a: (1) União = recursos não descobertos em áreas não contratadas; (2) RND-E = recursos não descobertos em áreas contratadas com empresas; (3) RC = recursos contingentes e (4) RT = reservas totais.

⁷ A Resolução ANP nº 47/2014 estabelece que o Operador de um Campo de Petróleo ou Gás Natural deve informar anualmente à ANP, até o dia 31 de janeiro, os volumes de Petróleo e de Gás Natural do Campo, relativos ao ano anterior. Fonte: (Sdp, 2016).

A produção sustentada somente nas Reservas Totais (RT), deverá atingir os maiores volumes entre 2018 e 2019. Após do ano 2019, prevê-se uma diminuição das RT. Já a produção relacionada aos Recursos Contingentes (RC), sustentados principalmente pelas acumulações do Pré-Sal Geológico (PSG), mantêm sua tendência crescente, chegando a contribuir com cerca de 50,6% da produção em 2023. A possível contribuição dos recursos na área da União, dependente da realização de novas contratações projetadas que, por concessão ou partilha da produção, é prevista iniciar-se em 2019 e alcançar cerca de 2,7% da produção potencial total em 2023. Em relação ao total, considerando-se todas as quatro fontes de recursos referidas, estima-se que a produção em 2023 tenha potencial de ser 137% maior que a registrada em 2017.

Com relação aos derivados do petróleo (*e.g.*: óleo diesel, diesel, gasolina, nafta, querosene), segundo dados oficiais publicados pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2017e), a produção aumentou em torno de 32% no período de 2006 a 2016. Já em 2015, teve um aumento de 3,2%. Isto tem favorecido o crescimento econômico do País, uma vez que a importância dos derivados obtidos através do refino do petróleo e pelo processamento do gás natural pode ser evidenciada nas suas aplicações. Como exemplo, pode-se destacar a utilização do GLP (gás de cozinha) e do gás natural nas residências e a produção dos combustíveis gasolina, diesel, querosene de aviação e GNV (gás natural veicular). Outras aplicações podem ser verificadas nas indústrias de infraestrutura (produtos asfálticos) e químicas, com o fornecimento de matérias-primas para fabricação de tintas, plásticos, embalagens para alimentos e medicamentos, móveis e eletrodomésticos, borrachas sintéticas, cosméticos, fertilizantes, brinquedos, entre outras. O cenário mundial é altamente dependente desses derivados, o que influencia o funcionamento das sociedades, impactando em suas economias, meio ambiente e bem estar (Anp, 2017d).

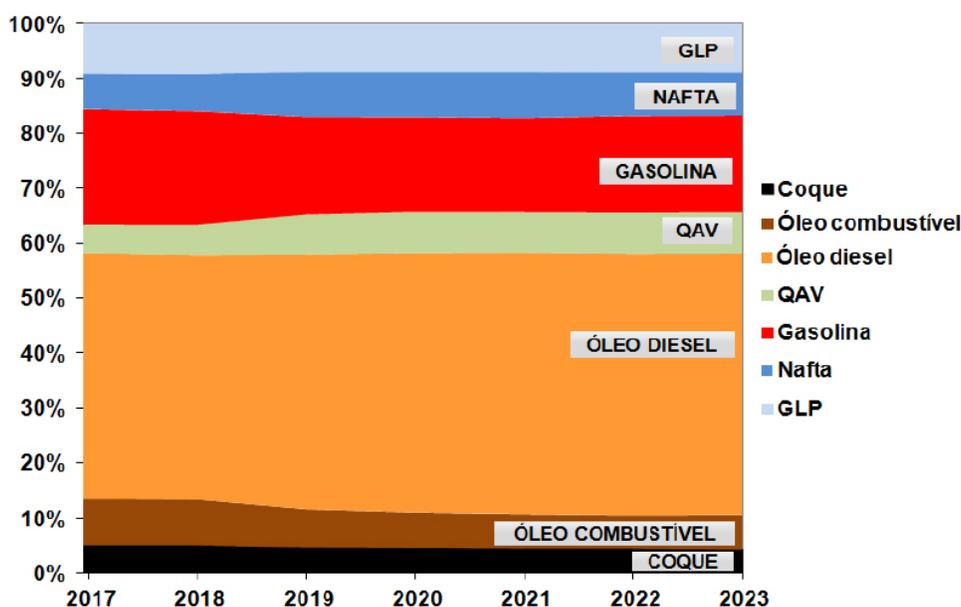
Já no referente à demanda estimada dos derivados do petróleo até 2023, espera-se um aumento de 15,6% com relação à demanda de 2017. A Tabela 3 apresenta a projeção da demanda nacional de derivados, incluindo-se a demanda de bunker para aviões e navios estrangeiros abastecidos no país, a ser atendida pela produção do parque nacional de refino ou, complementarmente, por importação.

Tabela 3 - Demanda nacional de derivados do petróleo

Produto	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
	mil m ³ /d						
GLP	39,4	40,1	40,9	41,6	42,3	43,1	43,8
Nafta	34,2	34,2	34,3	34,3	34,3	34,3	34,3
Gasolina A	102,7	104,6	106,6	107,8	110,0	112,9	114,1
QAV	24,1	25,1	26,2	27,0	28,1	29,3	30,5
Óleo Diesel A	182,8	190,6	197,3	203,8	210,3	217,8	225,2
Óleo Combustível	24,8	25,8	266,9	27,9	28,8	29,6	30,1
Coque	22,0	22,8	223,6	24,4	25,2	26,0	26,9
Outros	26,2	27,3	28,5	29,7	31,0	32,4	33,8
Total	456,2	470,7	484,2	496,4	510,0	525,5	540,6

Fonte: Adaptado de (EPE, 2014)

Em função da demanda estimada para os derivados do petróleo, define-se um perfil de produção que é ilustrado na Figura 6 junto com o balanço entre oferta e demanda de derivados e perfil de produção.

**Figura 6** - Perfil de produção dos derivados do petróleo

Fonte: Adaptado de (EPE, 2014)

De acordo com o gráfico acima, espera-se que em 2023 a produção de óleo diesel esteja associada ao 47,6% da produção total de derivados (488,2 mil m³/d). Assim mesmo, foi estimado que a gasolina terá uma produção equivalente a 17,6% do total da produção de derivados. Dessa forma, a gasolina continua sendo o segundo combustível mais consumido no Brasil, vindo atrás do óleo diesel. Já a produção de GLP cresce com o aumento do

processamento de gás natural nas Unidades Processamento de Gás Natural (UPGNs) e em decorrência, principalmente, das novas unidades de conversão no parque atual e das novas refinarias. Assim, com o aumento expressivo da capacidade nacional de refino em 2019, é esperado um equilíbrio no mercado do País. Porém, os volumes de GLP produzidos pelas UPGNs poderão sofrer variações significativas em função da intensidade do despacho das usinas termelétricas a gás natural, do crescimento do mercado não térmico deste combustível, da necessidade de injeção de gás nas unidades produtoras de petróleo e até do rendimento de GLP no gás proveniente dos novos campos de produção (EPE, 2014).

No referente ao gás natural, este transformou-se em uma importante fonte de energia na matriz energética mundial. No século XIX, nos Estados Unidos, era considerado o problema ao ser encontrado junto com o petróleo, pois exigia uma série de procedimentos de segurança que encareciam e complicavam as atividades de prospecção. No século XX, a partir dos anos 80, o consumo entrou em franca expansão e o gás natural transformou-se na fonte de energia de origem fóssil a registrar maior crescimento no mundo. Uma posição que detém até hoje e que deverá manter no médio prazo (Aneel, 2008c). No Brasil, a evolução entre 2005 e 2015 foi bem expressiva: 50,3%, ao passar de 17.699 Mm³ para 35.128 Mm³, como registra o Balanço Energético Nacional (EPE, 2017). Ainda assim, a participação atual, de 13,7%, coloca o gás natural na terceira posição na matriz energética nacional (atrás dos Derivados do Petróleo: 37,3% e Produtos da Cana: 16,9%).

Em termos da biomassa, é associada a matéria proveniente de seres vivos, que, através de diversas tecnologias, pode ser transformada em energia elétrica, mecânica ou térmica (Malico, 2008). Pode ter origem agrícola (como a cana de açúcar e o milho), florestal (madeira), animal (sebo bovino) ou de rejeitos industriais e urbanos (lixo biodegradável). A origem é capaz de determinar o potencial energético da biomassa (Lima e Gonçalves, 2017).

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior crescimento nos últimos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis. A partir da biomassa é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina (Aneel, 2008b).

Atualmente, o Brasil possui investimentos nos seguintes tipos de combustível de classe Biomassa (Aneel, 2017b): carvão vegetal, resíduos de madeira, bagaço de cana de açúcar, casca de arroz, licor negro, biogás, capim elefante e óleo de palmiste. Existem 13.823.866 kW de potência em operação de biomassa, sendo que o bagaço de cana de açúcar, corresponde a 78,79% do total desta potência em operação. Isto torna o bagaço de cana como uma fonte de energia importante para a matriz energética brasileira (Aneel, 2017b). Já em termos de empreendimentos em construção, 52,59% correspondem a fontes de bagaço de cana, o que sugere que esta fonte renovável continua se fortalecendo no mercado interno, o que torna a matriz energética mais sustentável para os próximos anos, ao tempo que favorece a não dependência do petróleo e seus derivados.

No contexto internacional, o Brasil se destaca na produção de biocombustíveis (*e.g.*: etanol, biodiesel e óleos vegetais hidrogenados), sendo o 2º maior produtor mundial, apenas atrás dos Estados Unidos (Lima e Gonçalves, 2017). A posição brasileira deve-se à alta produtividade da cana-de açúcar como matéria prima para a produção do etanol, sendo o volume deste biocombustível produzido por área plantada superior às demais origens, como o milho e a beterraba.

O etanol é o biocombustível mais produzido no mundo, sendo responsável por 74% de toda a produção. O etanol é utilizado mundialmente como forma de aumentar a octanagem da gasolina, ou seja, ampliar a resistência do motor à detonação quando exposto a altas pressões e altas temperaturas (Chaves, 2013). Para o caso do Brasil, os dois principais biocombustíveis líquidos usados são o etanol obtido a partir de cana de açúcar e, em escala crescente, o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais e adicionado ao diesel de petróleo em proporções variáveis (Anp, 2017a). Atualmente existem 349 plantas produtoras de etanol ratificadas pela ANP para operação no País, correspondendo a uma capacidade total autorizada de 186.176 m³/dia de produção de etanol hidratado e 99.848 m³/dia de produção de etanol anidro. Adicionalmente, 35 plantas de etanol já receberam a autorização para operação definitiva, totalizando uma capacidade de 30.707 m³/dia de produção de etanol hidratado e 17.188 m³/dia de produção de etanol anidro. A capacidade total das 384 plantas produtoras de etanol autorizadas é de 216.883 m³/dia de produção de etanol hidratado e 117.036 m³/dia de produção de etanol anidro (Anp, 2017b). A cana de açúcar é a matéria prima utilizada em 97,1% das plantas de etanol autorizadas.

O uso de etanol combustível reduz a emissão de gases de efeito estufa e reduz a dependência energética de combustíveis fósseis. Para avaliar o consumo e as emissões veiculares o Proconve (Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores) estabelece o uso obrigatório de combustíveis de referência (Anp, 2017c).

3.2. Matriz energética: caracterização da demanda

A energia que atende às necessidades da sociedade em geral, movimentada a indústria, o transporte e o comércio e demais setores econômicos do país recebe a denominação de Consumo Final no Balanço Energético Nacional (EPE, 2017). Esta energia, para chegar ao local de consumo, é transportada por gasodutos, linhas de transmissão, rodovias, ferrovias etc., e é distribuída por meio de diversos outros sistemas que acarretam perdas de energia.

Por outro lado, a energia extraída da natureza não se encontra na forma mais adequada para os usos finais, necessitando, na maioria dos casos, passar por processos em centros de transformação, tais como refinarias, usinas hidrelétricas, carvoarias, etc.. Estes processos também acarretam consumo e perdas de energia. No BEN, a menos de eventuais ajustes estatísticos, a soma do consumo final de energia, das perdas no transporte, na distribuição e na armazenagem e das perdas nos processos de transformação, recebe denominação de Demanda Total de Energia (EPE, 2007b).

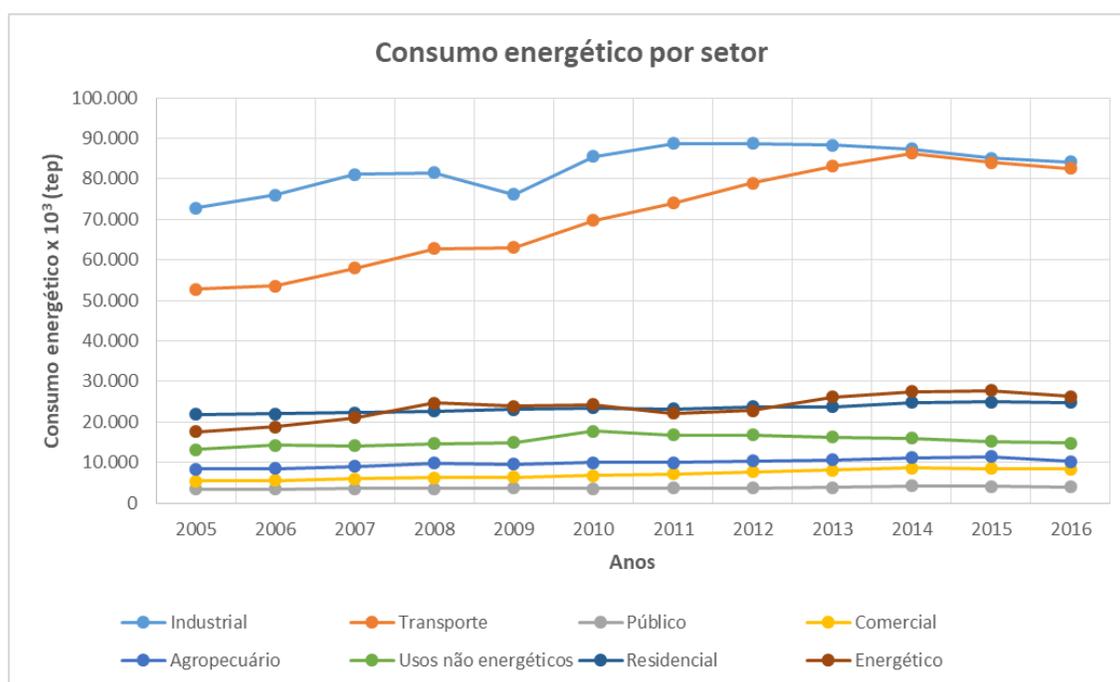
O BEN (EPE, 2017) apresenta, entre outras informações, os dados do consumo energético dos distintos setores da economia a partir do ano 2005 (Tabela 4). Neste ponto vale ressaltar, que este trabalho fez uso desses dados publicados pelo Ministério de Minas e Energia com o objetivo de selecionar os setores críticos da economia nacional no referente ao consumo energético.

Tabela 4 - Consumo energético por setor (x 10³ tep)

Setor / Anos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Industrial	72.806	76.030	81.133	81.570	76.189	85.567	88.716	88.697	88.294	87.502	84.645	84.183
Transporte	52.720	53.630	58.019	62.829	63.041	69.720	73.989	79.027	83.152	86.312	84.037	82.651
Público	3.451	3.453	3.557	3.622	3.648	3.636	3.758	3.741	3.871	3.978	3.980	4.026
Comercial	5.452	5.631	5.925	6.190	6.335	6.731	7.124	7.709	8.062	8.629	8.582	8.399
Agropecuário	8.361	8.554	9.067	9.911	9.553	10.029	9.999	10.362	10.632	11.209	11.487	10.291
Usos não energéticos	13.222	14.324	14.166	14.676	14.921	17.686	16.837	16.873	16.338	15.995	15.237	14.752
Residencial	21.827	22.090	22.271	22.738	23.129	23.562	23.267	23.761	23.726	24.786	24.951	24.851
Energético	17.653	18.823	21.049	24.679	23.916	24.263	22.171	22.868	26.143	27.453	27.763	26.279

Fonte: (EPE, 2017)

Da mesma forma, a Figura 7 mostra claramente que os setores industrial e transporte correspondem àqueles com maior consumo de energia na economia brasileira. Para o caso específico do setor industrial, é possível evidenciar esforços para diminuir de forma constante a carga energética. Este consumo tem diminuído em torno de 1% anual desde o 2011.

**Figura 7 - Consumo energético nacional por setor da economia**

Fonte: Autoria própria

A expansão acentuada do consumo de energia, embora possa refletir o aquecimento econômico e a melhoria da qualidade de vida, tem aspectos negativos, dentre dos quais destacam-se (Aneel, 2008a): (i) esgotamento dos recursos utilizados para a produção de energia; (ii) impacto ao meio ambiente produzido por essa atividade e (iii) elevados investimentos exigidos na pesquisa de novas fontes e construção de novas usinas.

A seguir descreve-se amplamente o cenário atual por cada setor da economia, em base a informações públicas e disponibilizada no BEN (EPE, 2017).

3.2.1. Setor industrial

O setor industrial é um dos mais importantes da economia brasileira sendo responsável por cerca de 25,0% do Produto Interno Bruto nacional (Economista, 2015). Por outro lado, dentro da desagregação da intensidade energética final, o setor industrial corresponde ao maior consumidor de energia no Brasil.

Dado a relevância deste setor para a matriz energética brasileira, existe um grande compromisso do governo para a redução de emissões e preservação do meio ambiente, sem impactar negativamente na produção e desenvolvimento tecnológico no País. É importante destacar que a dinâmica dos segmentos que compõem o setor industrial contribui para as modificações na estrutura de consumo de energia no período. Os sub-setores mais intensivos em energia (como os segmentos de ferro gusa e aço, papel e celulose, não ferrosos e outros da metalurgia, e ferro ligas) apresentam uma expansão ao longo dos anos.

A Tabela 5 e a Figura 8 mostram o consumo energético dos distintos sub-setores da indústria ao longo dos últimos anos.

Tabela 5 - Consumo energético do setor industrial por sub-setor (x 10³ tep)

Sub-Setor / Anos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Cimento	2.902	3.129	3.444	3.820	3.778	4.255	5.033	5.135	5.287	5.338	4.744	4.271
Ferro-gusa e Aço	16.914	16.446	17.664	17.627	13.008	16.445	17.401	16.914	16.274	16.387	16.725	14.969
Ferroligas	1.613	1.613	1.803	1.811	1.447	1.695	1.555	1.565	1.505	1.431	1.206	1.218
Mineração e Pelotização	2.764	2.875	3.195	3.198	2.255	3.182	3.335	3.240	3.247	3.358	3.346	2.714
Química	7.132	7.364	7.715	7.209	7.350	7.214	7.440	7.237	6.985	6.708	6.874	6.743
Não ferrosos e outros da metalurgia	5.403	5.668	5.954	5.966	5.353	6.492	7.074	7.057	6.935	6.616	5.646	5.648

Textil	1.202	1.213	1.275	1.208	1.172	1.212	1.201	1.116	1.101	1.017	895	842
Alimentos e bebidas	17.926	20.122	21.262	20.694	21.547	23.244	22.992	24.123	23.338	22.238	21.475	23.531
Papel e celulose	7.713	8.016	8.555	8.957	9.346	10.131	10.195	10.003	10.574	11.173	11.729	12.382
Cerâmica	3.412	3.533	3.841	4.193	4.128	4.485	4.724	4.803	5.069	5.079	4.614	4.272
Outras industrias	5.823	6.052	6.425	6.888	6.804	7.211	7.767	7.504	7.979	8.014	7.874	7.592

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

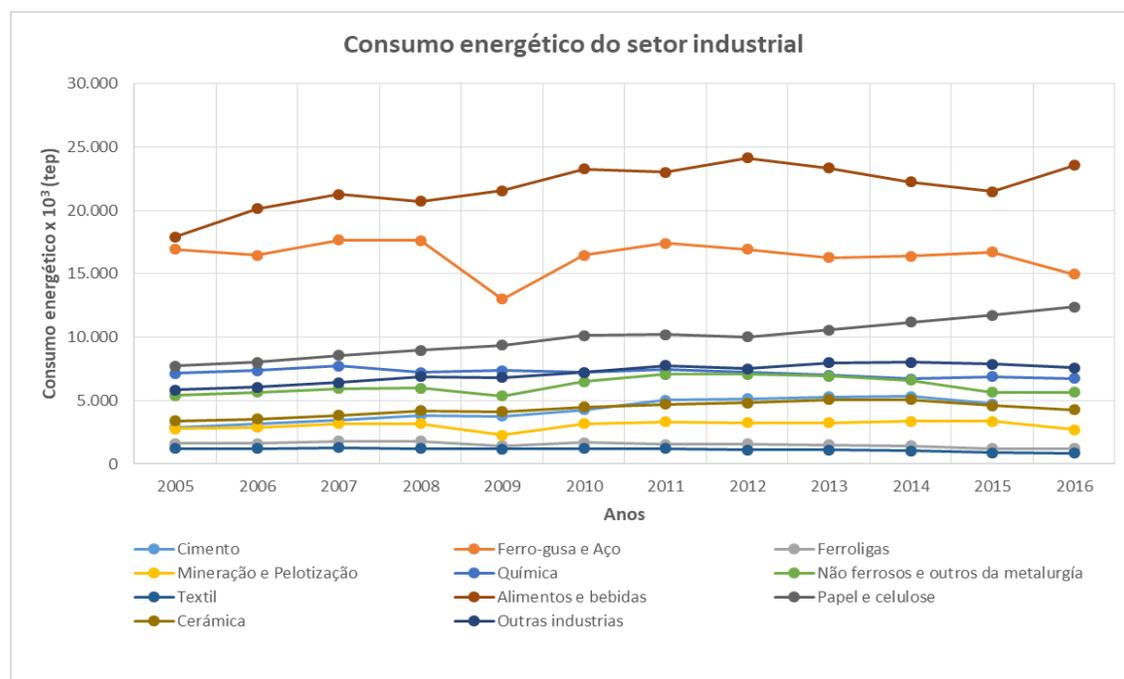


Figura 8 - Consumo energético do setor industrial por sub-setor
Fonte: Autoria própria

Observa-se, na figura anterior, uma tendência nos sub-setores de Alimentos e Bebidas e Ferro-gusa e Aço, terem um maior consumo de energia ao longo dos anos. Já, o sub-setor de Papel e Celulose tem mostrado um constante crescimento ao longo dos anos. No período 2005-2016 teve um crescimento de 37,7% o que sugere que estratégias de eficiência podem ser aplicadas neste sub-setor. Além disso, pode ser observado que os demais sub-setores possuem um comportamento de consumo quase constante ao longo dos anos.

3.2.2. Setor transportes

No Brasil, o segmento de transportes é o segundo maior consumidor de energia, com 28,1% do total (EPE, 2017), ou seja, possui uma relevância expressiva no consumo da matriz

energética brasileira. Visando atender às necessidades deste setor, como no restante do mundo, os principais recursos energéticos no Brasil são os combustíveis fósseis. Em termos do combustível, cerca de 45% do total consumido no país pelo setor de transporte corresponde a óleo diesel e 25% à gasolina (EPE, 2017). Porém, as fontes renováveis possuem uma participação inferior a 20%.

No Brasil, o setor do transporte está dividido em quatro sub-setores: (i) Rodoviário, (ii) Ferroviário, (iii) Aéreo, (iv) Hidroviário. Em relação ao mercado brasileiro de transportes rodoviários, há dois tipos de motorização: o Ciclo Otto e o Ciclo Diesel, que possuem diferentes finalidades de uso. O primeiro é utilizado, principalmente, para o transporte particular de passageiros e cargas leves e o segundo para o transporte público de passageiros e de cargas pesadas, que possui uma relevância expressiva no consumo de combustíveis no Brasil. O mercado de combustíveis brasileiro para automóveis de passageiros, comerciais leves e motocicletas, que utilizam motores do tipo Ciclo Otto (Gasolina C – uma composição de Gasolina Pura com Etanol Anidro-, Etanol Hidratado e GNV – Gás Natural Veicular), está passando por uma grande transformação tecnológica com o advento dos veículos Flex-Fuel (Gomez, 2015). Uma fonte alternativa de combustível importante para a mitigação dos impactos ambientais é o etanol hidratado (Bigaton *et al.*, 2016; Da Costa *et al.*, 2016). Em razão do menor poder calorífico do etanol hidratado em relação à Gasolina C, para se tornar uma alternativa atraente, é necessário que o preço do etanol hidratado esteja abaixo de 70% do preço da Gasolina C (De Moraes *et al.*, 2017). Dessa forma, julga-se necessário uma análise crítica sobre a viabilidade técnico-econômica de novas fontes de combustível, além de considerar a tecnologia existente e em desenvolvimento constante de carros elétricos e híbridos (Akhavan-Rezai *et al.*, 2016; Bertness e Mcshane, 2016; Grosso *et al.*, 2016) para o setor de transporte. O anterior está fundamentado na preservação do meio ambiente e a flexibilidade com a matriz energética Nacional.

3.2.3. Setor comercial e público

O setor comercial é bastante heterogêneo, composto por empresas do comércio propriamente dito, de comunicações, instituições financeiras, Serviços Industriais de Utilidade Pública (SIUP), setor financeiro, hotéis, supermercados, padarias, hospitais, entre outros (EPE, 2007b).

A energia elétrica representava 59% do consumo de energia final do setor em 1970 e evoluiu para 81% em 2004 (EPE, 2007b). Análises mais recentes indicam que o crescimento energético entre 2005 e 2015 foi de 37% (EPE, 2017). Em relação às fontes de consumo, a eletricidade constitui o 91,6% da energia consumida do setor, com uma taxa de crescimento média de 3% anual desde 2005 (EPE, 2017).

Considerando outros combustíveis, pouca coisa mudou. O GLP ganhou bastante mercado pelos mesmos motivos apresentados no setor residencial. O gás natural também vem ganhando mercado com a ampliação da rede de distribuição nos grandes centros urbanos e com a implementação de cogeração nos hotéis, hospitais e shopping centers. A Tabela 6 mostra as evoluções dos consumos das principais fontes energéticas no setor.

Tabela 6 - Fontes de consumo energético no setor comercial (x 10³ tep)

Fontes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	233	266	275	171	190	202	188	193	181	179	114	134
Lenha	73	74	77	78	80	89	95	96	96	97	94	90
Óleo diésel	53	54	56	59	57	36	9	9	6	7	4	8
Óleo combustível	115	110	116	122	122	25	19	19	14	22	27	17
GLP	309	308	302	309	135	298	352	438	420	442	396	396
Eletricidade	4.600	4.749	5.034	5.375	5.674	5.996	5.369	6.853	7.255	7.792	7.861	7.670
Carvão vegetal	67	73	78	78	86	92	90	90	90	91	88	84

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

Já no relacionado ao setor público, a eletricidade corresponde à fonte de maior consumo no setor. Este valor gira em torno de 92% para o setor (EPE, 2017) e de 8% do total de energia elétrica consumida no País (Procel, 2017). Dessa forma, para o administrador público, a diminuição dos gastos com eletricidade pode fazer a diferença no orçamento, já que existem outras prioridades de investimentos demandadas pela comunidade. A Tabela 7 mostra as fontes do consumo energético do setor público.

Tabela 7- Consumo energético do setor público (x 10³ tep)

Fontes	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	49	55	56	58	59	60	44	45	45	40	43	43
Óleo diésel	85	91	94	96	97	12	4	7	5	4	3	3
Óleo combustível	61	55	85	97	87	3	6	8	11	11	9	1
GLP	441	410	422	409	373	381	421	256	257	257	257	258
Eletricidade	2.815	2.842	2.900	2.972	3.031	3.190	3.283	3.424	3.553	3.684	3.668	3.720

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

Visando a redução de consumo elétrico no setor público, o governo nacional promove a substituição de lâmpadas incandescentes. Isto está ocorrendo de forma gradativa. O programa brasileiro de erradicação das incandescentes começou em junho de 2013 com a proibição da venda das lâmpadas de 150W. Em 2014 foi a vez do fim das de 100W, em junho de 2015 as de 60W e as últimas em 2016, de 40W. Em junho de 2016, todas as lâmpadas incandescentes estão fora de circulação, conforme Portaria Interministerial N° 1.007 de 31/12/10, dos Ministérios de Minas e Energia, Ciência e Tecnologia e Indústria e Comércio Exterior.

A perda de participação relativa do setor industrial na demanda total de eletricidade no país é, em parte, compensada pelos setores comercial e público brasileiro, capitaneando o processo de crescimento do setor de serviços na economia brasileira. Em síntese segundo dados publicados no plano nacional 2030, a participação relativa do setor comercial e público na demanda total de eletricidade oscila, em 2030, variando entre 24% e 26% (EPE, 2007b).

3.2.4. Setor agropecuário

A produção agropecuária é uma atividade desenvolvida no espaço rural, em áreas que se encontram ocupadas pelo setor primário da economia, no qual se destacam a agricultura, a pecuária e as atividades extrativistas. A atividade agropecuária no Brasil representa 8% do PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro e gera emprego para pelo menos 10% da população economicamente ativa do país. Outro ponto a ser destacado acerca da relevância que a agropecuária possui no Brasil é quanto à ocupação do território que teve início com a produção de cana-de-açúcar, posteriormente ao café e, por fim, a pecuária, que conduziu o

povoamento do interior do país (Freitas, 2017). A expectativa é que o Produto Interno Bruto (PIB) agrícola e pecuário cresça 3,61% (Brasil, 2017).

Em termos do consumo energético, o setor agropecuário demanda 3,8% da matriz energética nacional, sendo o óleo diesel a fonte de maior consumo com 6.327×10^3 tep. Isto equivale a 55,1% da energia consumida no setor. O setor agropecuário registra uma importante participação no consumo total de óleo diesel, atrás apenas do setor de transportes. Além disso, em relação à demanda projetada, segundo dados publicados no Plano Nacional de Energia 2030, a participação do setor agropecuário no consumo total de eletricidade em 2030 situa-se entre 3,0 e 4,6% (EPE, 2007b).

3.2.5. Setor residencial

O setor residencial, embora do ponto de vista energético é considerado um setor de importância média por não ter produto próprio, do ponto de vista social o consumo de energia é da maior relevância, já que energia é condição indispensável para se usufruir das comodidades mais essenciais da vida moderna.

A participação do setor residencial no consumo final energético é significativa, apesar de observar-se uma redução gradual, em termos percentuais, quando comparado com outros setores. No Brasil, o setor residencial consome 9,3% da energia nacional (EPE, 2017) localizando-se, desta forma, no quarto lugar dos setores com mais gasto energético. Dentro das fontes de energia consumidas pelo setor residencial, tem-se: gás natural, lenha, gás liquefeito de petróleo, querosene, gás canalizado, eletricidade e carvão vegetal.

Investigações realizadas (EPE, 2007b) projetam que, para o ano 2030, o consumo de energia no setor residencial será de 39,48 milhões de tep no cenário otimista e de 43,17 milhões de tep, na situação do cenário pessimista.

3.2.6. Setor energético

O Brasil possui a matriz energética mais renovável do mundo industrializado com 45,3% de sua produção proveniente de fontes como recursos hídricos, biomassa e etanol, além das energias eólica e solar. As usinas hidrelétricas são responsáveis pela geração de mais de 75% da eletricidade do País. Vale lembrar que a matriz energética mundial é

composta por 13% de fontes renováveis no caso de Países industrializados, caindo para 6% entre as nações em desenvolvimento.

De acordo com a classificação do Balanço Energético Nacional (EPE, 2017), o consumo final do setor Energético é composto pelo consumo de energia final nos campos de extração de petróleo e gás natural; nas minas de carvão mineral; nas refinarias de petróleo; nas unidades de processamento de gás natural (UPGN); nas centrais elétricas de serviço público e autoprodutoras; nas coquearias; nas carvoarias e nas outras transformações (EPE, 2007b).

Em geral, a participação do setor energético brasileiro corresponde, na atualidade, a 9,3% da matriz energética nacional, localizando-se no terceiro lugar dos setores de maior consumo. A demanda para o ano 2015 foi de 27.763×10^3 tep (EPE, 2017).

Uma fonte em destaque, e de vital importância para o Brasil, é o consumo de eletricidade no setor energético. O Brasil possui uma matriz de energia elétrica que conta com a participação essencialmente da hidroeletricidade, energia proveniente de 140 usinas em operação, com perspectiva de aumento do uso dessa fonte.

A previsão do Plano Decenal de Energia é que o País terá novas usinas com potencial de geração de 29.000 MW, sendo 15 na bacia do Amazonas, 13 na bacia do Tocantins-Araguaia, 18 no rio Paraná e 8 no rio Uruguai (EPE, 2007a). As 28 usinas hidrelétricas planejadas na região amazônica têm no seu conjunto, a capacidade instalada de 22.900 MW.

3.3.

Consumo energético nacional: estratificação setorial

Uma vez caracterizada a oferta e a demanda energética brasileira, esta seção tem como propósito realizar a estratificação dos principais setores da economia brasileira, *i.e.*: Industrial, Transporte, Público, Comercial, Agropecuário, Usos não energéticos, Residencial e Energético. Julga-se que todos os setores mencionados são importantes para a caracterização energética, mas nem todos são críticos visando análises estratégicas para a redução do consumo energético nacional. Assim, baseado no princípio de Pareto (Randles e Wolfe, 1979), o objetivo consiste em identificar quais são os setores críticos, *i.e.*, aqueles setores onde concentram-se, pelo menos, 80,0% do consumo energético nacional, tomando como base a média do consumo dos anos 2014 a 2016. A importância deste mapeamento e

estratificação setorial fundamenta-se na possibilidade de reduzir uma porcentagem menor de energia num setor de maior consumo energético (setor crítico), do que reduzir uma porcentagem maior de um setor que demanda pouca energia. Por exemplo, uma redução de 1% do consumo energético no setor industrial ($84,6 \times 10^6$ tep) equivale a 846.000 tep. Por outro lado, reduzir 10% do consumo energético do setor público ($4,0 \times 10^6$ tep), equivale a 400.000 tep. Assim, deste exemplo conclui-se que reduzindo uma pequena porcentagem de energia (1%) do setor industrial, obtém-se um 53% de ganho energético, ao invés de reduzir uma porcentagem maior (10%) do setor público.

Baseado em dados atualizados e disponíveis no Balanço Energético Nacional (EPE, 2017), a seguir detalha-se o desenvolvimento da análise estatística realizada para a seleção dos setores, sub-setores e fontes de consumo críticos da economia brasileira.

3.3.1. Análises do setor industrial

Este trabalho considerou para a análise estatística os seguintes subsectores da indústria em função dos dados publicados pelo BEN (EPE, 2017), *i.e.*: Cimento; Ferro-gusa e Aço; Ferroligas; Mineração e Pelotização; Química; Não ferrosos e outros da metalurgia; Textil; Alimentos e bebidas; Papel e celulose; Cerâmica; e Outras indústrias. A Tabela 5 (Página 45) apresentou o consumo energético do setor industrial por sub-setor. Fazendo uso desses dados foi realizado o Diagrama de Pareto. Assim, foi possível identificar os setores críticos da economia brasileira, ou seja, aqueles cujo consumo energético equivale a, pelo menos, 80,0% do consumo do setor. A Tabela 8 mostra os resultados. De igual forma, a Figura 9 ilustra o Diagrama Pareto do consumo energético dos subsectores da indústria.

Tabela 8 - Consumo energético acumulado dos sub-setores da indústria

Sub-SETOR	Consumo Medio	Consumo Relativo	Consumo Medio Acumulado	
	tep x 10 ³	%	tep x 10 ³	%
Alimentos e bebidas	21.842	26,4%	21.842	25,4%
Ferro-gusa e Aço	16.440	19,9%	38.282	44,5%
Papel e celulose	11.576	14,0%	49.858	57,9%
Outras indústrias	7.823	9,5%	57.681	67,0%
Química	6.707	8,1%	64.388	74,8%
Não ferrosos e outros da metalurgia	6.131	7,4%	70.519	81,9%
Cimento	5.044	6,1%	75.563	87,8%

Cerâmica	4.847	5,9%	80.409	93,4%
Mineração e Pelotização	3.391	4,1%	83.800	97,4%
Ferroligas	1.319	1,6%	85.118	98,9%
Textil	956	1,2%	86.074	100,0%

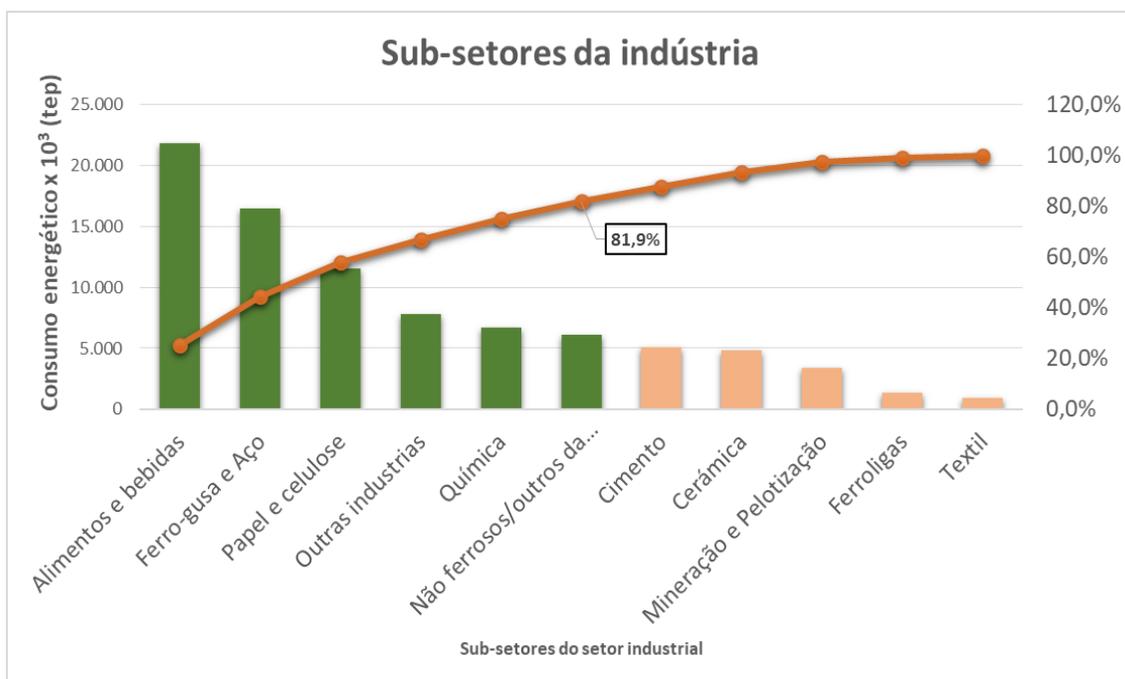


Figura 9 - Sub-setores da indústria: Diagrama Pareto do consumo de energia
Fonte: Autoria própria

Na figura acima pode ser observado que 81,9% da energia consumida no setor industrial está concentrada em 6 dos 11 subsetores definidos no BEN. Isto permite identificar que os sub-setores críticos da indústria são: (i) Alimentos e bebidas, (ii) Ferro-gusa e Aço, (iii) Papel e celulose, (iv) Outras industrias, (v) Química, (vi) Não ferrosos e outros da metalurgia. A partir deste resultado, identificou-se as fontes que representam, pelo menos, 80,0% das fontes de consumo em cada subsetor da indústria. Desta forma, é possível aplicar critérios de eficiência energética.

Os tópicos seguintes detalham a metodologia do Pareto para a identificação das fontes de consumo considerados críticos nos distintos subsetores da indústria brasileira.

3.3.1.1. Alimentos e bebidas

A Tabela 9 mostra o consumo energético, por fontes, no subsetor de alimentos e bebidas ao longo dos anos 2005 a 2016. Pode ser observado um claro domínio por parte do bagaço de cana ao longo do tempo. As outras fontes de energia apresentam um consumo praticamente constante. Esta situação é ilustrada na Figura 10.

Tabela 9 – Consumo energético por fonte: sub-setor de bebidas e alimentos (x 10³ tep)

Fonte / Anos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	511	559	587	581	52	662	652	720	688	736	834	833
Carvão vapor	62	39	46	37	48	71	90	68	69	66	65	51
Lenha	1.813	1.831	1.885	1.999	2.039	2.267	2.312	2.319	2.273	2.250	2.171	2.150
Bagaço de cana	13.050	15.224	16.116	15.353	16.148	17.248	16.861	17.844	17.213	16.120	15.485	17.524
Óleo diesel	61	65	77	82	82	148	191	212	260	249	239	242
Óleo combustível	529	412	451	467	467	325	318	271	198	148	119	87
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	125	144	174	190	187	202	225	266	282	315	320	331
Eletricidade	1.777	1.848	1.926	1.985	2.025	2.319	2.342	2.423	2.355	2.324	2.242	2.314

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

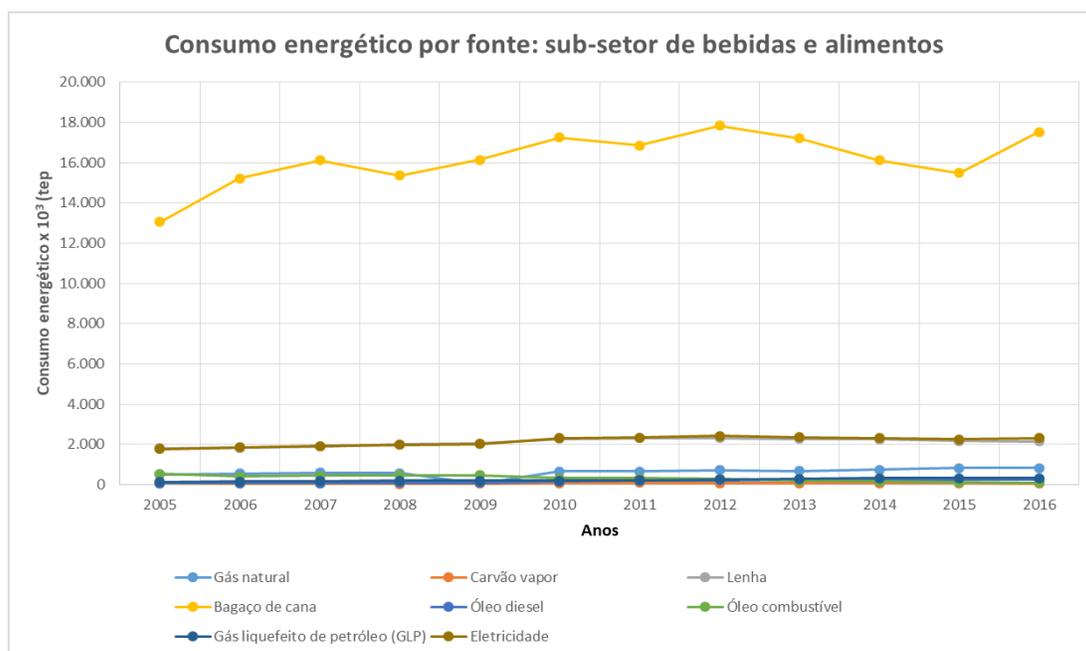


Figura 10 - Consumo energético por fonte: sub-setor de bebidas e alimentos

Fonte: Autoria própria

Aplicando o critério de Pareto, foi possível estabelecer que o 83,3% do consumo energético está concentrado em unicamente o 25,0% das fontes, *i.e.*: bagaço de cana e eletricidade. A estratificação completa das fontes é mostrada pela Tabela 10 e a Figura 11 ilustra a representação do Diagrama Pareto.

Tabela 10 - Consumo energético por fontes: sub-setor de bebidas e alimentos

Fonte	Consumo Medio	Consumo Relativo	Consumo Medio Acumulado	
	tep x 10 ³	%	tep x 10 ³	%
Bagaço de cana	16.376	73,1%	16.376	73,1%
Eletricidade	2.293	10,2%	18.670	83,3%
Lenha	2.190	9,8%	20.860	93,1%
Gás natural	801	3,6%	21.661	96,7%
GLP	322	1,4%	21.983	98,1%
Óleo diesel	243	1,1%	22.226	99,2%
Óleo combustível	118	0,5%	22.344	99,7%
Carvão vapor	61	0,3%	22.405	100,0%

Fonte: Autoria própria

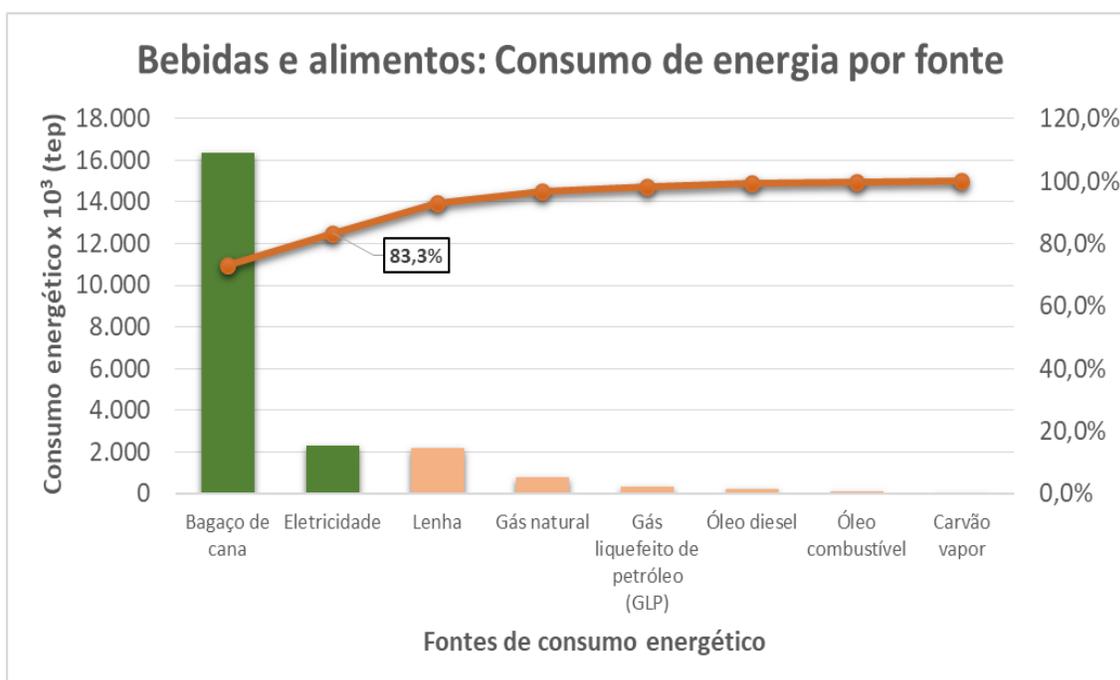


Figura 11 - Bebidas e alimentos: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, é possível concluir que, visando a redução do consumo energético no setor industrial, é preciso aplicar políticas de efficientização energética nas fontes de bagaço de cana e eletricidade, uma vez que foi estabelecido que consomem 83,3% da energia total do sub-setor de bebidas alimentos.

3.3.1.2. Ferro-gusa e Aço

Para o sub-setor Ferro-gusa e Aço foi aplicado um procedimento estatístico similar ao descrito anteriormente. Assim, daqui em diante o desenvolvimento da análise será mostrado de forma sucinta destacando os principais resultados para cada setor e o sub-setor crítico da economia brasileira.

A Tabela 11 mostra o consumo energético por fonte para o sub-setor Ferro-gusa e Aço, onde destaca-se que o coque de carvão mineral representa a fonte de maior consumo durante os últimos anos, o que pode ser observado de forma gráfica na Figura 12.

Tabela 11 - Consumo energético por fonte: sub-setor de Ferro-gusa e Aço (x 10³ tep)

FORNTE / ANOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	1.113	1.105	1.214	1.158	695	897	997	1.067	1.020	1.036	1.223	1.012
Carvão mineral	1.829	1.813	1.939	2.052	1.578	1.772	1.924	1.854	1.808	1.871	2.124	1.935
Óleo diesel	44	40	14	14	14	15	35	38	37	35	29	25
óleo combustível	82	107	145	142	114	168	29	29	40	35	0	2
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	100	85	88	97	90	71	26	20	19	26	25	59
Gás de cocoqueria	1.016	980	1.039	1.065	1.011	1.250	1.288	1.237	1.200	1.242	1.148	1.114
Coque de carvão mineral	6.067	5.763	6.320	6.289	4.969	7.153	7.750	7.495	7.309	7.522	7.441	6.728
Electricidade	1.397	1.452	1.579	1.602	1.281	1.613	1.714	1.696	1.691	1.671	1.609	1.484
Carvão vegetal	4.804	4.636	4.775	4.679	2.724	3.372	3.492	3.338	3.021	2.783	2.788	2.490
Alcatrão/Outras Sec. Petróleo	462	464	551	528	531	134	145	139	129	133	135	119

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

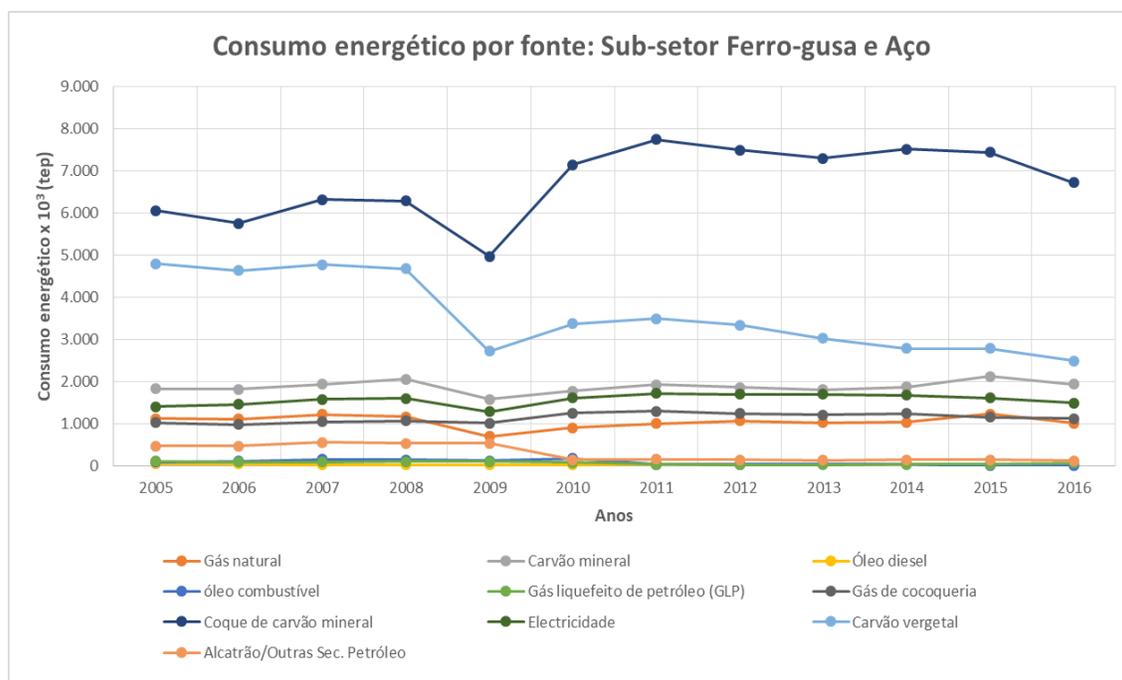


Figura 12 - Consumo energético por fonte: sub-setor de ferro-gusa e aço

Fonte: Autoria própria

Os resultados do diagrama Pareto confirmaram que 84,5% do consumo energético está associado a 36,4% das fontes. A Tabela 12 e a Figura 13 ilustram esta situação.

Tabela 12 - Consumo energético por fontes: sub-setor Ferro-gusa e Aço

Fonte	Consumo Médio	Consumo Relativo	Consumo Médio Acumulado	
	tep x 10 ³	%	tep x 10 ³	%
Coque de carvão mineral	7.230	45,3%	7.230	45,3%
Carvão vegetal	2.687	16,8%	9.917	62,2%
Carvão mineral	1.977	12,4%	11.894	74,6%
Electricidade	1.588	10,0%	13.482	84,5%
Gás de cocoqueria	1.168	7,3%	14.650	91,9%
Gás natural	1.090	6,8%	15.740	98,7%
Alcatrão/Outras Sec. Petróleo	129	0,8%	15.869	99,5%
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	37	0,2%	15.906	99,7%
Óleo diesel	30	0,2%	15.936	99,9%
óleo combustível	12	0,1%	15.948	100,0%

Fonte: Autoria própria

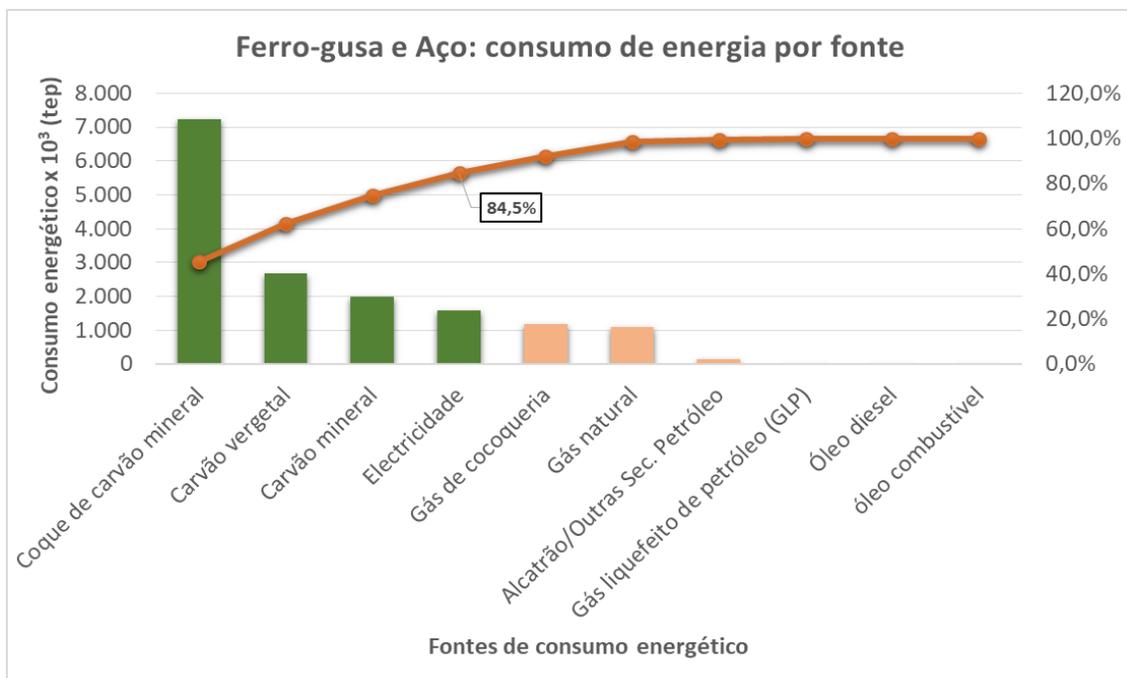


Figura 13 - Ferro-gusa e Aço: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, é possível concluir que estratégia eficaz para a redução do consumo energético no sub-setor de Ferro-gusa e Aço deve ser aplicada as seguintes fontes: Coque de carvão mineral, Carvão vegetal, Carvão mineral, Eletricidade, uma vez que foi possível mostrar, estatisticamente, que o seu consumo total equivale a 84,5% da energia total consumida no sub-setor analisado.

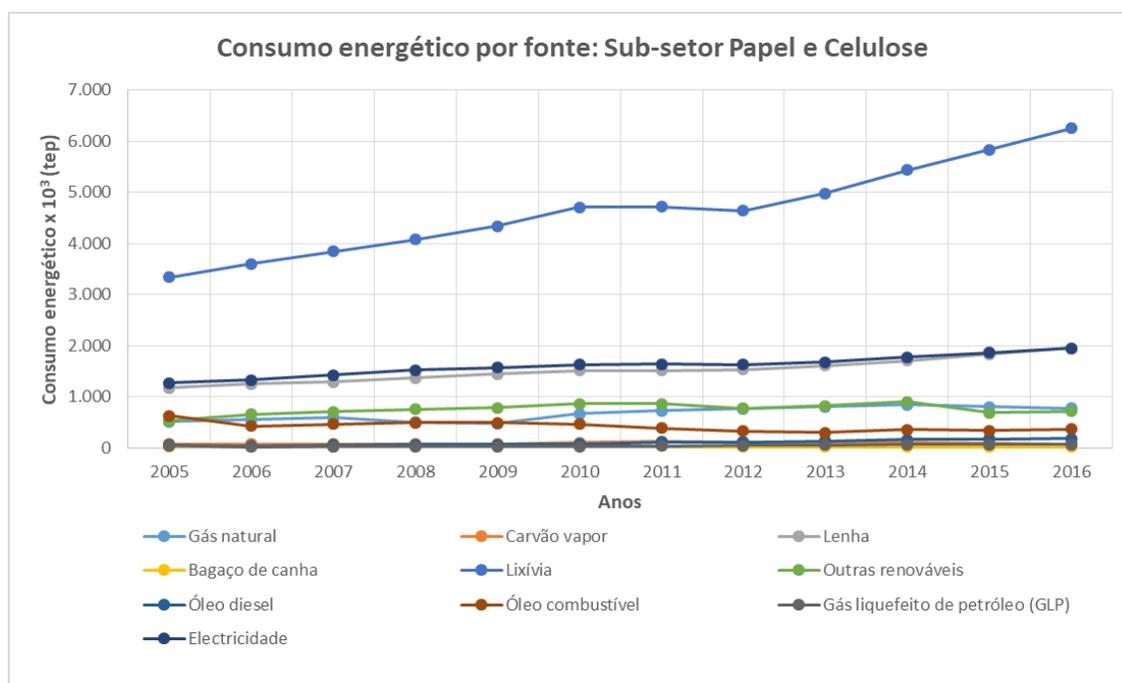
3.3.1.3. Papel e celulose

O sub-setor papel e celulose, principal objeto de estudo da pesquisa, representa 13,4% do consumo energético industrial brasileiro, sendo identificado como um dos mais importantes e críticos para a economia do País. A Tabela 13 resume o consumo energético por fonte. A Figura 14 ilustra o perfil do consumo ao longo dos últimos anos.

Tabela 13 - Consumo energético por fonte: sub-setor Papel e Celulose Aço (x 10³ tep)

FONTE / ANOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	519	560	597	509	483	676	730	769	809	848	805	778
Carvão vapor	85	82	80	81	84	112	126	124	124	117	86	84
Lenha	1.172	1.252	1.296	1.374	1.449	1.513	1.516	1.532	1.616	1.713	1.833	1.949
Bagaço de canha	33	34	36	37	39	41	41	24	25	25	27	30
Lixívia	3.342	3.598	3.842	4.078	4.335	4.711	4.721	4.640	4.983	5.432	5.837	6.246
Outras renováveis	540	660	713	756	786	870	871	777	831	906	691	725
Óleo diesel	60	44	65	68	68	76	115	124	137	164	173	183
Óleo combustível	633	432	471	499	499	466	390	328	304	365	341	368
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	56	25	29	29	30	31	45	50	60	73	72	68
Electricidade	1.270	1.330	1.426	1.528	1.574	1.636	1.641	1.636	1.684	1.780	1.864	1.952

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

**Figura 14 - Consumo energético por fonte: sub-setor Papel e Celulose**

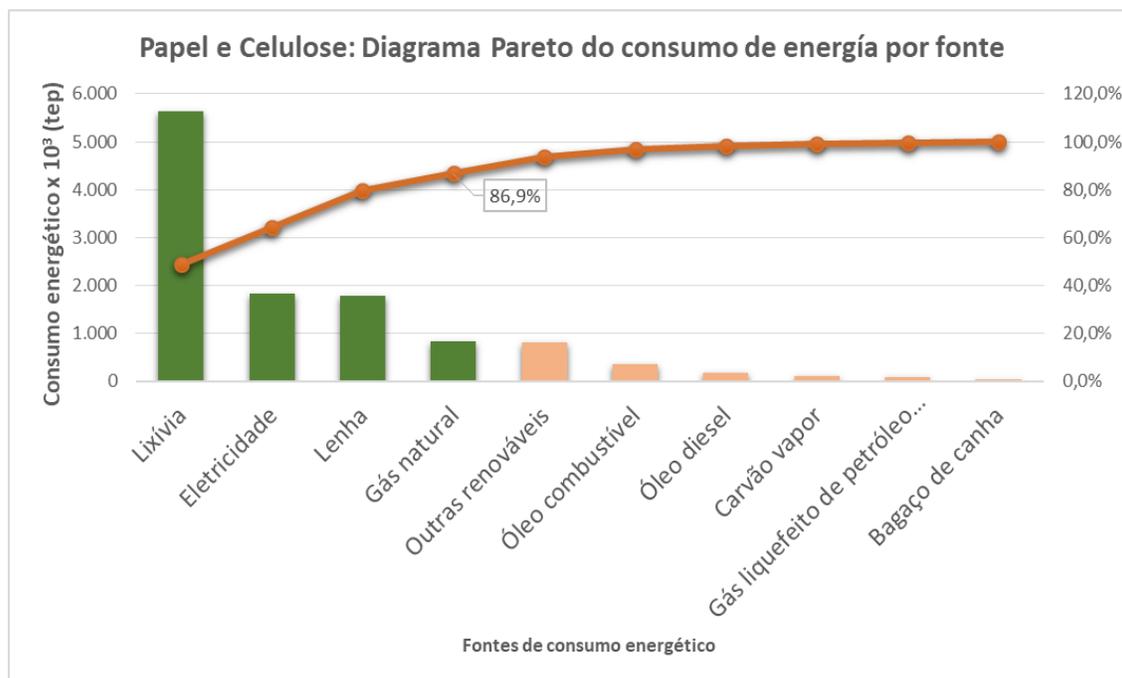
Fonte: Autoria própria

A aplicação do diagrama de Pareto permitiu estratificar as fontes de maior consumo. A seguir, a Tabela 14 e a Figura 15 sintetizam os resultados.

Tabela 14 - Consumo energético por fontes: sub-setor Papel e Celulose

Fonte	Consumo Médio	Consumo Relativo	Consumo Medio Acumulado	
	tep x 10 ³	%	tep x 10 ³	%
Lixívia	5.635	48,7%	5.635	48,7%
Eletricidade	1.822	15,7%	7.457	64,4%
Lenha	1.773	15,3%	9.230	79,7%
Gás natural	827	7,1%	10.056	86,9%
Outras renováveis	799	6,9%	10.855	93,8%
Óleo combustível	353	3,0%	11.208	96,8%
Óleo diesel	169	1,5%	11.376	98,3%
Carvão vapor	102	0,9%	11.478	99,1%
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	73	0,6%	11.550	99,8%
Bagaço de canha	26	0,2%	11.576	100,0%

Fonte: Autoria própria

**Figura 15** - Papel e Celulose: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

A figura acima confirma que as fontes críticas de consumo energético no sub-setor de Papel e Celulose são: Lixívia, Eletricidade, Lenha e Gás natural. Julga-se que estratégias de efficientização energéticas devem ser orientadas a diminuir o consumo energético decorrente do uso destas fontes de energia.

3.3.1.4. Química

O sub-setor Químico da indústria brasileira tem diminuído o consumo energético em torno de 6,0% nos últimos anos. A Tabela 15 mostra o consumo entre 2005 e 2016.

Tabela 15 - Consumo energético por fonte: sub-setor Química (x 10³ tep)

FONTE / ANOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	2.159	2.236	2.259	2.323	2.276	2.289	2.437	2.218	2.037	2.022	2.222	2.198
Carvão vapor	80	63	85	92	71	125	105	164	152	169	172	126
Lenha	50	52	51	51	45	49	48	47	50	49	48	43
Bagaço de canha e outras recup.	96	98	105	95	95	93	92	90	91	89	85	81
Óleo diesel	133	137	152	154	136	27	12	13	23	20	18	16
Óleo combustível	622	643	481	476	476	233	377	328	424	323	174	326
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	21	61	62	66	67	64	176	190	192	217	80	185
Eletricidade	1.814	1.880	1.985	1.901	1.996	2.055	2.014	2.023	1.962	1.922	1.940	1.900
Carvão vegetal	17	17	17	17	18	20	20	19	19	19	18	17
Outras secundárias de petróleo	2.139	2.178	2.517	2.033	2.169	2.259	2.158	2.145	2.035	1.880	1.949	1.851

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

A figura abaixo mostra o perfil do consumo energético das fontes. Observa-se que o consumo de gás natural, eletricidade e outras secundárias do petróleo é superlativo quando comparado com as outras fontes de consumo.

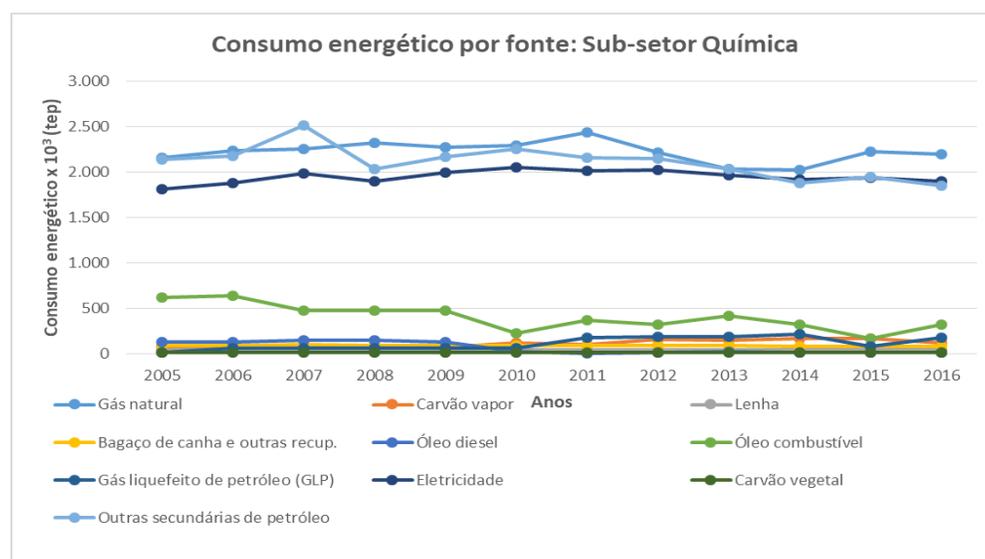


Figura 16 - Consumo energético por fonte: sub-setor Química

Fonte: Autoria própria

Já o diagrama de Pareto permitiu estratificar as fontes de maior consumo para o sub-setor da Química. A seguir a Tabela 16 e a Figura 17 sintetizam os resultados.

Tabela 16 - Consumo energético por fontes: sub-setor Química

Fonte	Consumo Médio	Consumo Relativo	Consumo Medio Acumulado	
	tep x 10 ³	%	tep x 10 ³	%
Gás natural	2.147	32,0%	2.147	32,0%
Eletricidade	1.921	28,6%	4.068	60,5%
Outras secundárias de petróleo	1.893	28,2%	5.961	88,7%
Óleo combustível	274	4,1%	6.236	92,8%
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	161	2,4%	6.396	95,2%
Carvão vapor	156	2,3%	6.552	97,5%
Bagaço de canha e outras recup.	85	1,3%	6.637	98,8%
Lenha	47	0,7%	6.684	99,5%
Óleo diesel	18	0,3%	6.702	99,7%
Carvão vegetal	18	0,3%	6.720	100,0%

Fonte: Autoria própria

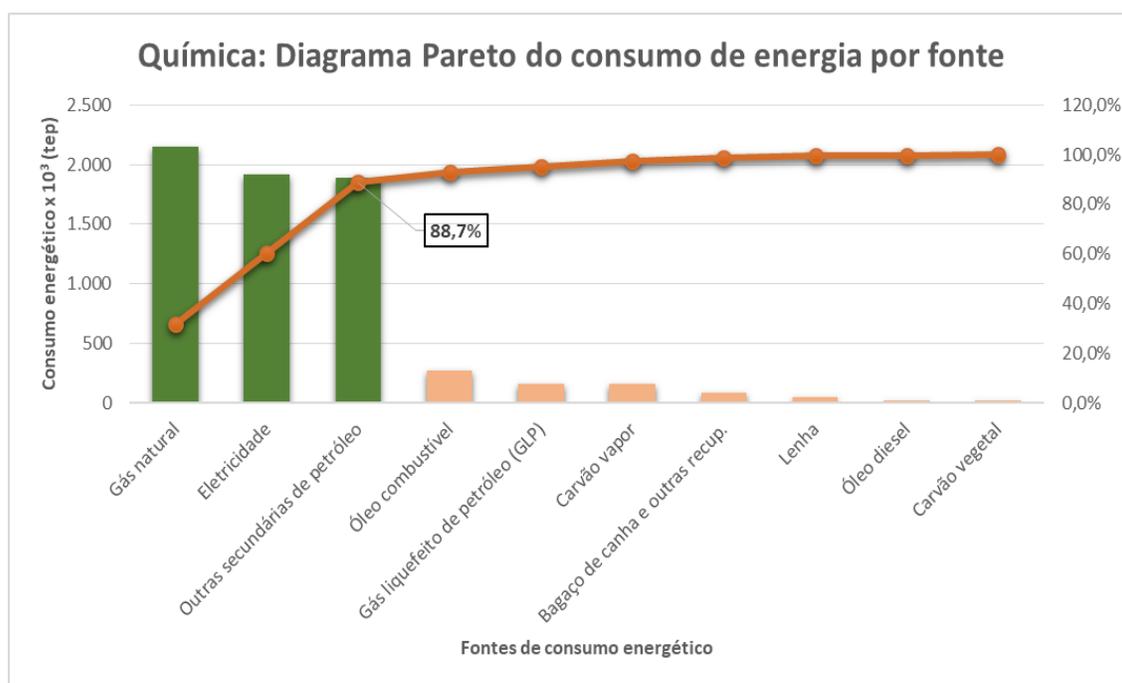


Figura 17 - Química: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, confirma-se que para o setor Químico 30,0% dos setores, consomem 88,7% da demanda energética. Assim, possíveis estratégias de efficientização energética,

devem ser aplicadas visando diminuir o consumo das fontes: Gás natural, Eletricidade e Outras secundárias de petróleo.

3.3.1.5. Não ferrosos e outros da metalurgia

O sub-setor denominado Não ferrosos e outros da metalurgia representa 7,1% da demanda energética do setor industrial. Neste sub-setor o consumo de eletricidade está associado a 41,7% da demanda energética, sendo a fonte de maior consumo. A Tabela 17 e a Figura 18 mostram o consumo energético por fonte ao longo dos últimos anos.

Tabela 17 - Consumo energético por fonte: Não ferrosos e outros da metalurgia (x 10³ tep)

FONTE / ANOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	490	528	632	675	405	727	776	857	942	896	593	564
Óleo combustível	1.147	1.091	1.124	1.062	987	1.098	1.177	1.163	1.148	1.200	1.238	1.244
GLP e Diesel	18	85	91	85	86	79	47	44	53	51	45	42
Carvão mineral / Coque de C.M.	228	233	243	178	165	768	1.022	1.030	1.023	1.062	935	935
Electricidade	2.999	3.174	3.273	3.366	3.114	3.198	3.308	3.255	3.104	2.798	2.315	2.331
Carvão vegetal	8	8	9	9	8	9	9	10	11	14	11	10
Outras secundárias de petróleo	513	548	583	590	588	612	734	699	654	595	510	523

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

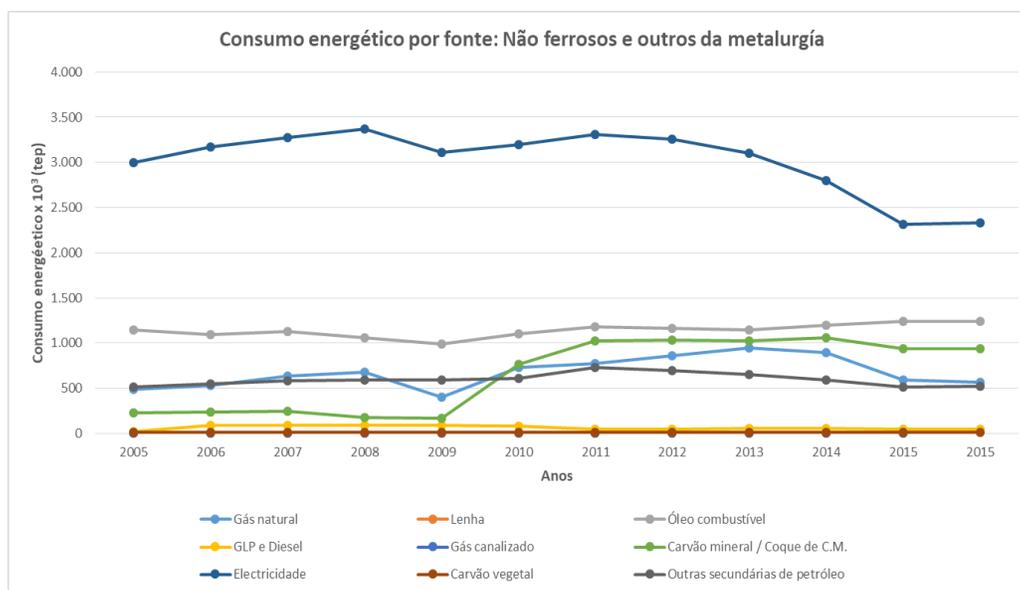


Figura 18 - Consumo energético por fonte: Não ferrosos e outros da metalurgia
Fonte: Autoria própria

Já o diagrama de Pareto permitiu estratificar as fontes de maior consumo para o sub-setor não ferrosos e outros da metalurgia. A seguir a Tabela 18 e a Figura 19 sintetizam os resultados.

Tabela 18 - Consumo energético por fontes: sub-setor não ferrosos e outros da metalurgia

Fonte	Consumo Médio	Consumo Relativo	Consumo Médio Acumulado	
	tep x 10 ³	%	tep x 10 ³	%
Eletricidade	2.481	41,6%	2.481	41,6%
Óleo combustível	1.227	20,6%	3.709	62,1%
Carvão mineral / Coque de C.M.	977	16,4%	4.686	78,5%
Gás natural	684	11,5%	5.370	89,9%
Outras secundárias de petróleo	543	9,1%	5.913	99,0%
GLP e Diesel	46	0,8%	5.959	99,8%
Carvão vegetal	12	0,2%	5.971	100,0%

Fonte: Autoria própria

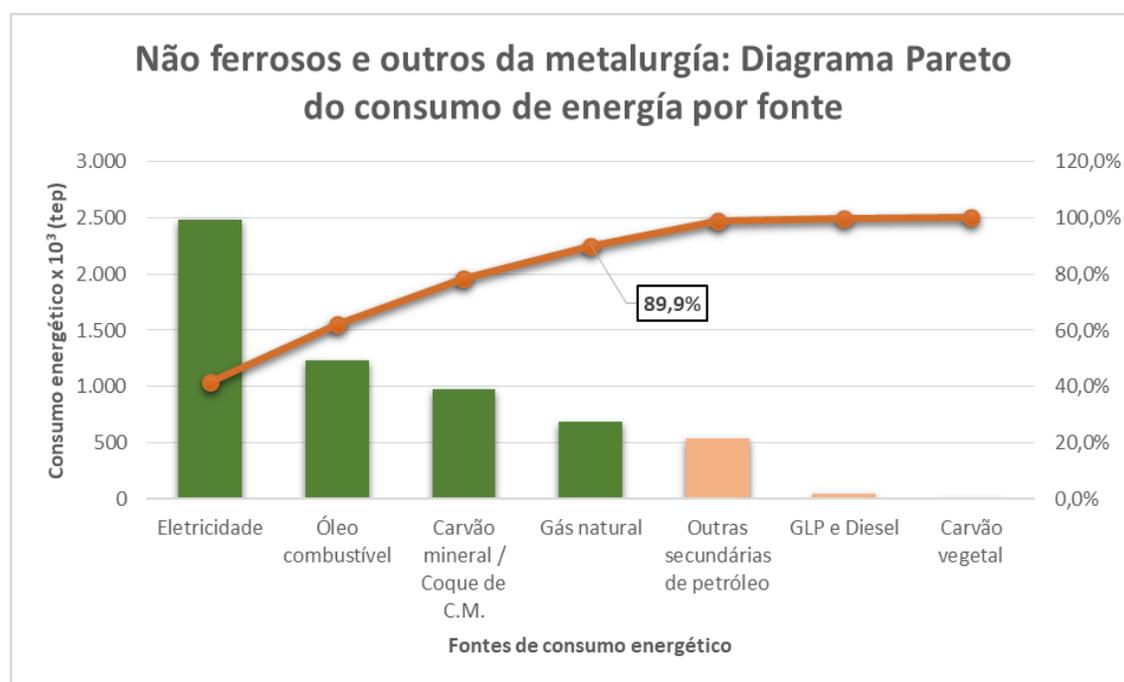


Figura 19 - Química: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, confirma-se que, para o sub-setor não ferrosos e outros da metalurgia 57,0% das fontes, consomem 89,9% da demanda energética. Assim, possíveis estratégias de

eficientização energética, devem ser aplicadas nas seguintes fontes de consumo: Eletricidade, Óleo combustível, Carvão mineral / Coque de C.M. e Gás natural

3.3.2. Análises do setor transportes

O setor de transporte é o segundo setor de maior consumo energético do Brasil, com um 28,1%, após do setor industrial. Este setor é subdividido em quatro grande sub-setores, *i.e.*: Rodoviário, Ferroviário, Aéreo e Hidroviário. A Tabela 19 mostra o consumo energético desses subsetores. De igual forma a Figura 20 ilustra o perfil de consumo no mesmo período.

Tabela 19 – Consumo energético do sub-setor transporte (x 10³ tep)

Fonte / Anos	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Rodoviário	48.073	49.067	52.892	57.370	57.683	63.963	67.896	72.721	77.007	79.945	78.267	77.436
Ferroviário	926	1.040	1.115	1.149	1.125	1.135	1.148	1.190	1.181	1.173	1.148	1.129
Aéreo	2.596	2.435	2.674	2.857	2.874	3.241	3.623	3.820	3.667	3.709	3.658	3.347
Hidroviário	1.124	1.088	1.338	1.452	1.359	1.380	1.323	1.297	1.298	1.485	965	740

Fonte: Adaptado de (EPE, 2017)

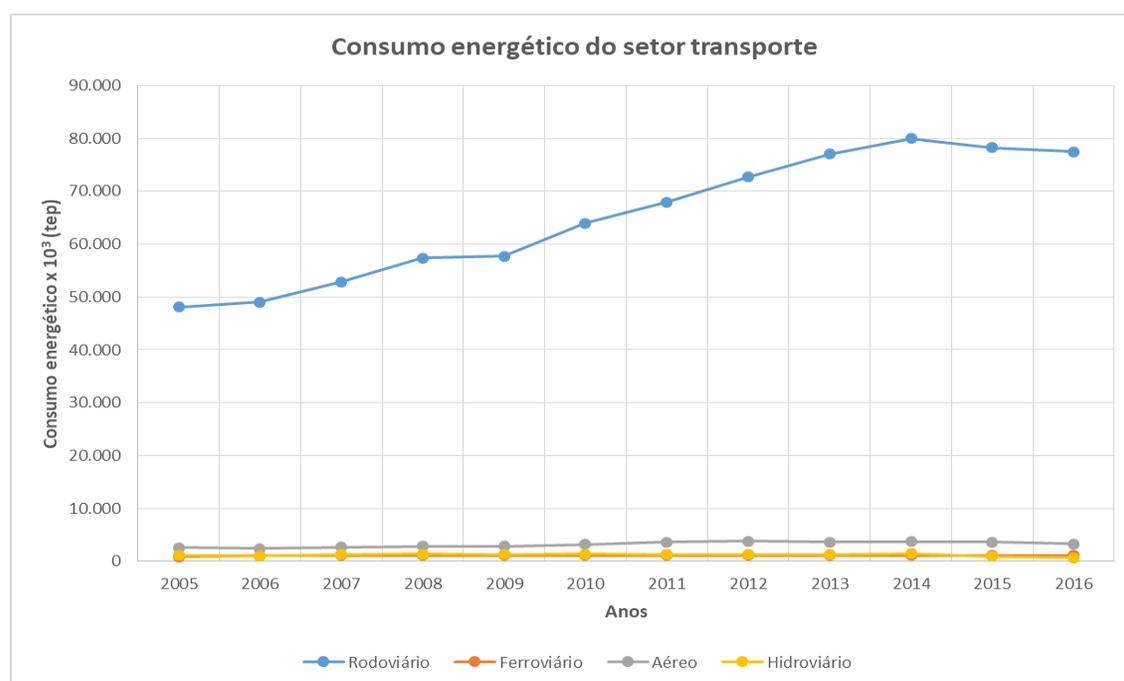


Figura 20 - Consumo energético do setor transporte

Fonte: Autoria própria

O gráfico anterior mostra uma clara tendência a que o sub-setor rodoviário consume a maior parte da energia do setor transporte. Isto é confirmado com a aplicação do Diagrama de Pareto que mostra-se a seguir (Figura 21).

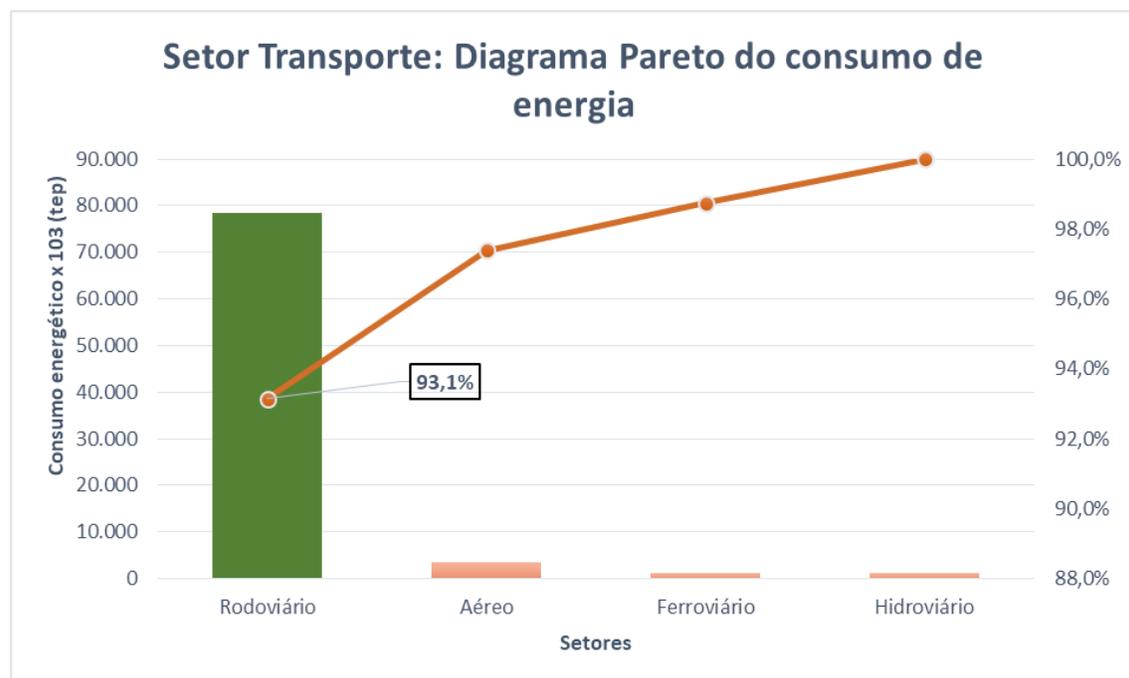


Figura 21 – Setor transporte: Diagrama Pareto do consumo de energia

Fonte: Autoria própria

A figura acima confirma que no setor transporte, o sub-setor Rodoviário é o mais crítico, uma vez que demanda o 93,1% da energia do setor, comparadas com o 4,2% do sub-setor Aéreo, 1,4% do sub-setor ferroviário e 1,3% do hidroviário.

Em base ao exposto, a seguir foram analisadas as fontes de consumo no sub-setor Rodoviário com o objetivo de estratificar aquelas consideradas críticas. A Tabela 20 resume o consumo energético por fonte ao longo dos últimos anos. Já a Figura 22 ilustra o perfil do consumo energético por fonte no mesmo período.

Tabela 20 - Consumo energético por fonte: Setor Transporte (x 10³ tep)

FONTE / ANOS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Gás natural	1.711	2.030	2.252	2.158	1.853	1.767	1.735	1.709	1.647	1.594	1.553	1.593
Óleo diesel	25.803	26.145	27.406	28.933	28.345	31.092	32.859	34.820	37.123	37.678	35.371	35.136
Biodisel	1	57	336	728	1.019	1.547	1.729	1.833	1.954	1.983	2.662	2.645
Gasolina automotiva	13.595	14.440	14.287	14.538	14.674	17.525	20.838	24.454	24.393	25.682	23.257	24.181

Álcool etílico anidro	4.079	2.777	3.325	3.533	3.392	3.790	4.504	4.144	5.172	5.882	5.842	5.928
Álcool etílico hidratado	2.885	3.618	5.287	7.480	8.400	8.243	6.230	5.763	6.717	7.126	9.582	7.953

Fonte: (EPE, 2017)

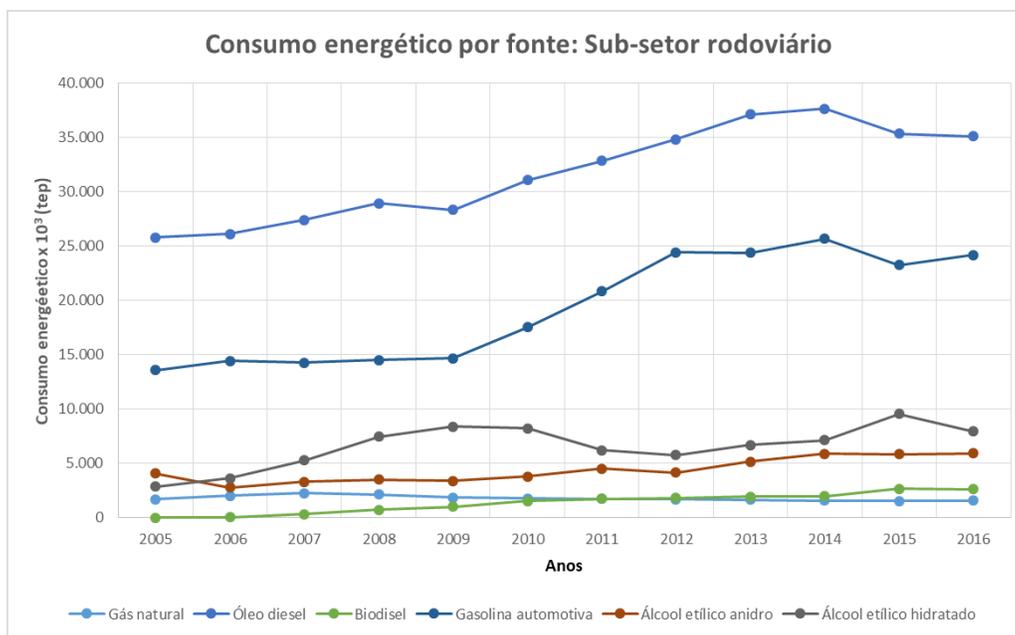


Figura 22 - Consumo energético por fonte: Setor Transporte

Fonte: Autoria própria

Em relação à aplicação do Diagrama Pareto, foi possível mostrar estatisticamente que 50,0% das fontes consomem 87,4% da energia do sub-setor rodoviário. A Figura 23 descreve esta situação.

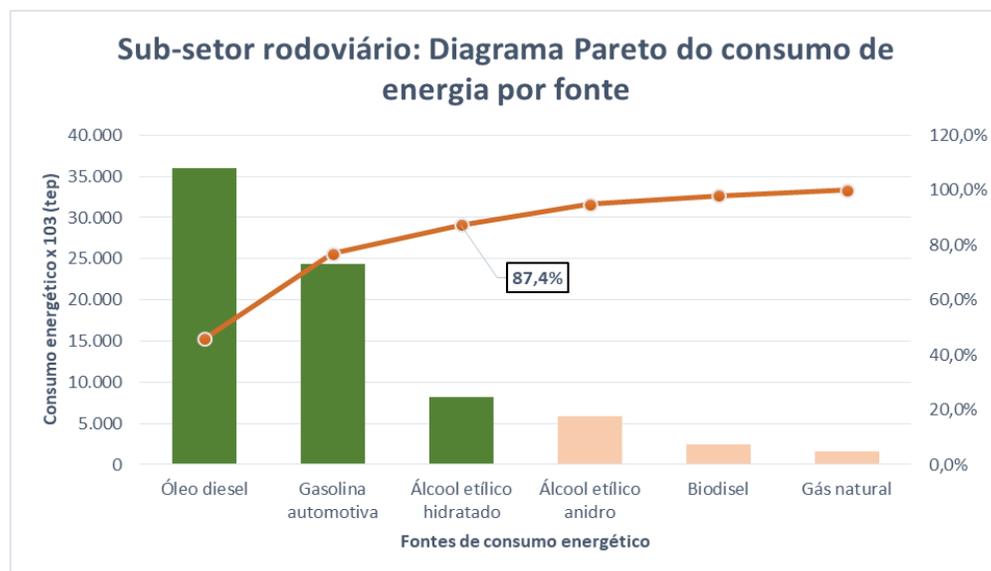


Figura 23 – Sub-setor rodoviário: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

3.3.3. Análises do setor energético

O setor energético brasileiro conta com diversas fontes de consumo cuja demanda está fortemente concentrado no bagaço de cana conforme se mostra na figura a seguir:

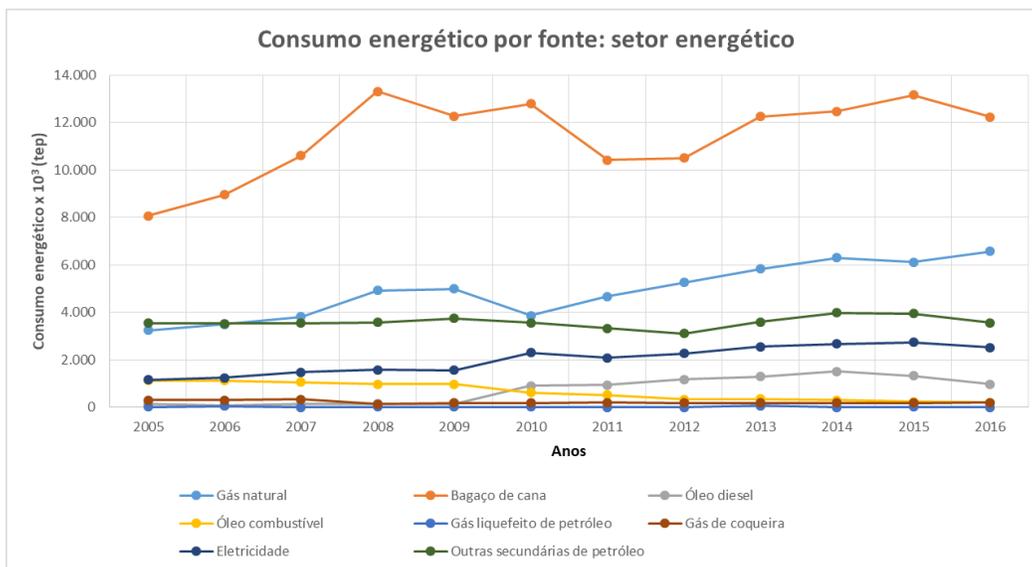


Figura 24 - Consumo energético do setor transporte

Fonte: Autoria própria

A pesar do BEN (EPE, 2017) listar diversas fontes de consumo para o setor energético, neste trabalho foi mostrado que 83,9% da demanda energética está concentrada em 37,5% das fontes. A Figura 25 ilustra o Diagrama de Pareto que detalha esta situação.

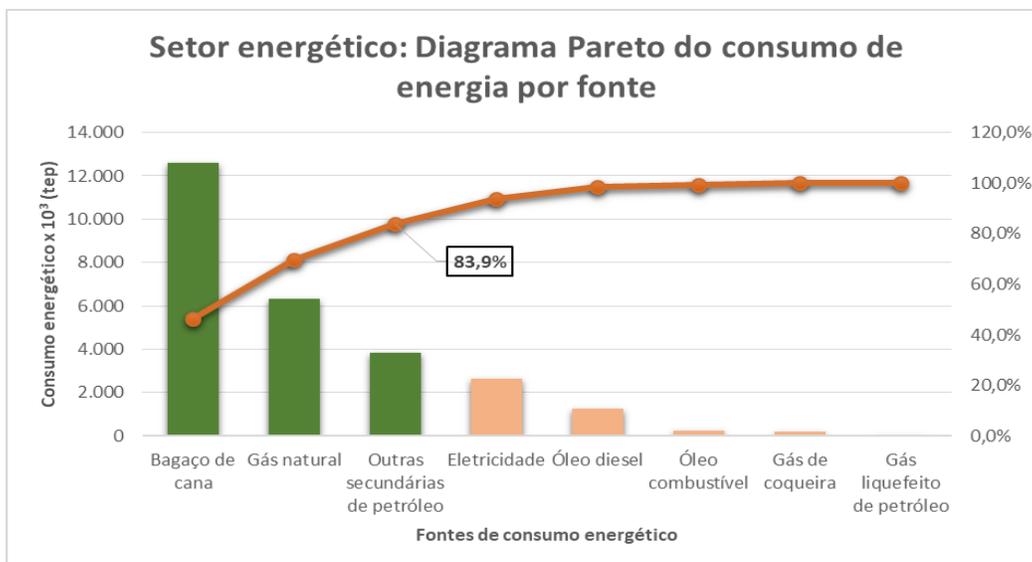


Figura 25 – Setor energético: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte

Fonte: Autoria própria

Dessa forma, mostrou-se necessário estabelecer estratégias de eficiência energética visando reduzir o consumo de: bagaço de cana, gás natural e outras secundárias de petróleo.

3.3.4. Análises do setor residencial

O setor residencial brasileiro caracteriza-se por apresentar três principais fontes de consumo energético, *i.e.*: eletricidade, GLP e lenha. A Figura 26 ilustra todas as fontes de consumo energético para o setor (EPE, 2017). Pode ser observado um crescimento linear do consumo de eletricidade, sendo que entre 2014 e 2016 existiu um consumo quase-constante.

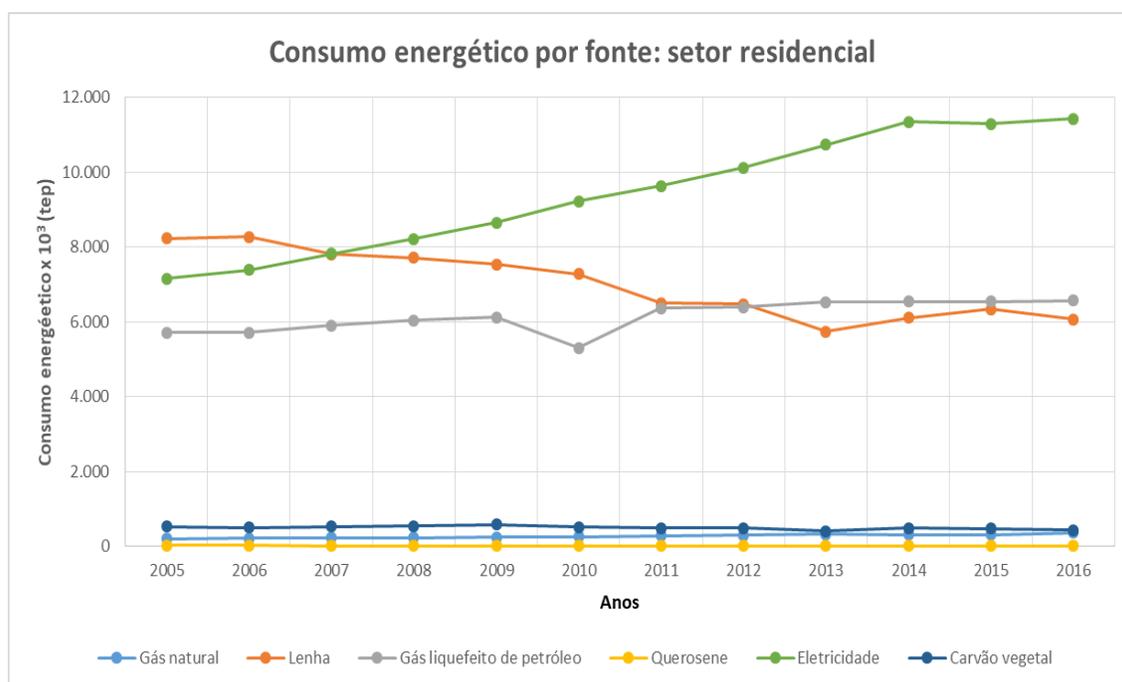


Figura 26 - Consumo energético do setor residencial

Fonte: Autoria própria

Este trabalho mostrou que 50,0% das fontes consomem 96,8% da energia do setor elétrico. A Figura 27 ilustra o Diagrama de Pareto que representa esta situação.

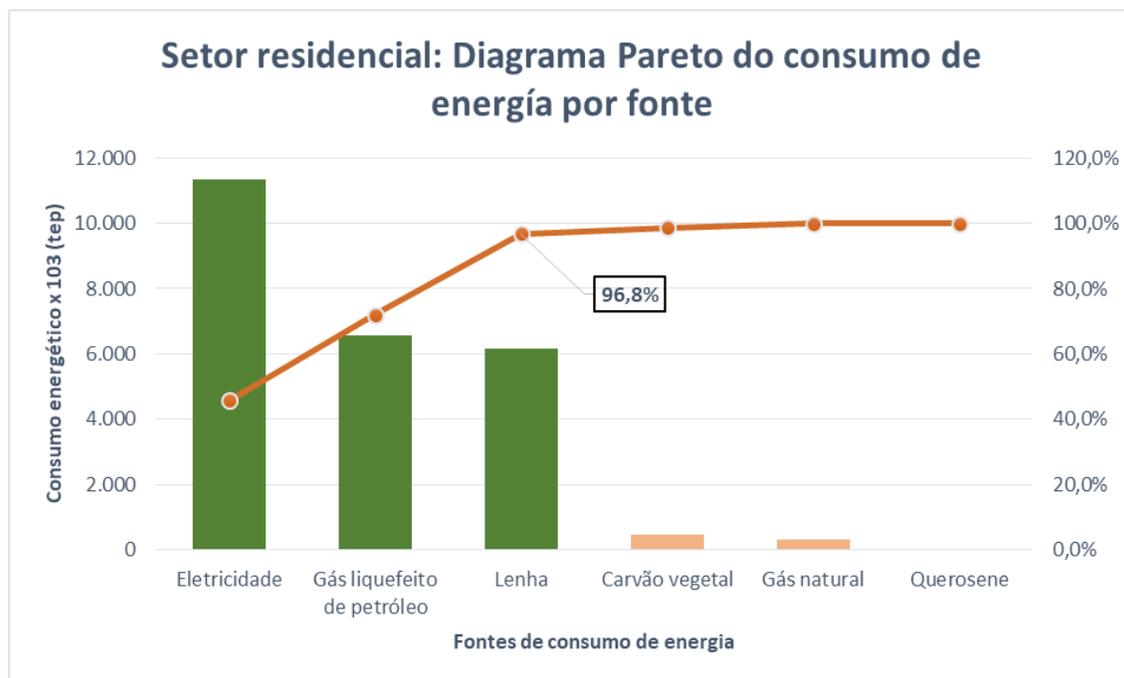


Figura 27 – Setor residencial: Diagrama Pareto do consumo de energia por fonte
 Fonte: Autoria própria

Assim, é preciso estabelecer estratégias de efficientização energética para reduzir o consumo de energia nas fontes: eletricidade, GLP e lenha.

4 Mapeamento do setor industrial brasileiro

O Balanço Energético Nacional (EPE, 2017) subdivide o setor industrial brasileiro em onze subsetores de acordo com a atividade desenvolvida: ferro-gusa e aço, metais não-ferrosos e outros de metalurgia, papel e celulose, química, alimentos e bebidas, cimento, ferro ligas, mineração e pelletização, têxtil, cerâmicas e outras indústrias. O consumo de energia ao longo dos últimos anos de cada subsetor, a estratificação dos setores críticos, assim como as principais fontes de consumo foram descritas amplamente no capítulo anterior. Nesse sentido, este capítulo apresenta um mapeamento dos processos associados a cada subsetor da indústria brasileira. Na pesquisa bibliográfica realizada constatou-se que o subsetor de Papel e Celulose apresenta uma ampla quantidade de informação atualizada, confiável e disponível, além de representar 14,0% do consumo de energia do setor industrial. Assim, em sintonia com o objetivo desta pesquisa, escolheu-se o subsetor de Papel e Celulose para avaliar as melhores estratégias de efficientização energética, as quais são detalhadas na seção 4.2, junto com as tecnologias transversais (CCT, do inglês *Cross-Cutting Technology*). Em seguida, a partir de uma extensa revisão da literatura especializada, foram definidos os critérios e subcritérios para avaliar as estratégias de efficientização energética aplicadas a cada processo e CCT do subsetor de Papel e Celulose. Levando em consideração o mapeamento realizado, elaborou-se um instrumento de pesquisa (questionário) que foi respondido por especialistas da área e, a partir da aplicação do Método Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD) *Fuzzy-AHP-TOPSIS* para a análises da demanda energética do setor industrial, conseguiu-se propor um ranking que conformam as alternativas de efficientização energética aplicadas ao subsetor de Papel e Celulose. Os próximos capítulos detalham a formulação matemática do MMAD e a sua aplicação no desenvolvimento do trabalho.

4.1. Identificação dos processos do setor industrial

Para cada um dos subsetores foram identificados os processos de produção existente e, além disso, para alguns subsetores foram definidas as tecnologias transversais empregadas e

as possíveis medidas de eficiência energética. Destaca-se o subsetor de Papel e Celulose junto com os seus processos identificados, uma vez que a metodologia de avaliação será aplicada neste subsetor da indústria.

Tabela 21 - Subsetores e processos da indústria brasileira

Subsetor	Processos
1 Ferro gusa e aço	1 Sinterização 2 Aço oxigenado 3 Aço elétrico 4 Aço laminado 5 Gusa coke 6 Redução
2 Metais não ferrosos e outros primário de metalurgia	1 Alumínio primário 2 Alumínio secundário (sucata) 3 Cobre primário 4 Cobre secundário 5 Cobre refinado 6 Zinco primário 7 Chumbo 8 Estanho 9 Níquel 10 Silício metálico
3 Papel e celulose	1 Papel 2 Mecânica de celulose 3 Química de celulose 4 Papel reciclado
4 Química	1 Amônia 2 Carboneto calcio (acetileno) 3 Cloro, diafragma 4 Cloro, membrana 5 Cloro, mercúrio 6 Eteno (etileno) 7 Oxigênio 8 Polietileno 9 Polipropileno 10 Plásticos 11 Resinas termofixas 12 Ácido adípico 13 Carbono preto 14 Metanol (álcool metílico) 15 Ácido nítrico 16 Policarbonato 17 Polissulfona 18 Hidróxido de sódio (soda) 19 Tolueno (TDI) 20 Dióxido de titânio 21 Outros para fertilizantes 22 Outros químicos inorgânicos 23 Outros petroquímicos básicos 24 Outras fibras sintéticas 25 Solventes industriais

5 Alimentos e bebidas	<ol style="list-style-type: none"> 1 Açúcares 2 Leite e derivados 3 Bebidas 4 Produtos derivados de carne 5 Panificação 6 Café, chá, cereais 7 Óleos e gorduras 8 Frutas e legumes 9 Óleos e gorduras 10 Chocolate, cacau e balas 11 Conservas de pescados
6 Cimento	<ol style="list-style-type: none"> 1 Preparação de matérias-primas 2 Clinquerização do cimento 3 Moagem do cimento CPI 4 Moagem do cimento CPII 5 Moagem do cimento CPIII 6 Moagem do cimento CPIV 7 Moagem do cimento CPV
7 Ferro ligas	<ol style="list-style-type: none"> 1 Preparação de matéria prima 2 Fusão e redução da carga 3 Preparação do produto final
8 Mineração e pelotização	<ol style="list-style-type: none"> 1 Mineração 2 Pelotização
9 Têxtil	<ol style="list-style-type: none"> 1 Fiação 2 Tecelagem 3 Malharia 4 Confecção 5 Beneficiamento
10 Cerâmica	<ol style="list-style-type: none"> 1 Revestimentos cerâmicos 2 Cerâmicas vermelha
11 Outras indústrias	<ol style="list-style-type: none"> 1 Outros

Fonte: (Silva, 2017)

4.2.

Subsetor de papel e celulose: Estratégias de Eficientização Energética

As estratégias de eficientização energética são utilizadas para reduzir o consumo de energia ao longo do tempo. Essas estratégias podem ser aplicadas aos processos da indústria e às tecnologias transversais, que são equipamentos comuns a todos os setores da indústria (Fleiter *et al.*, 2012; Silva, 2017), conforme ilustra-se na Figura 28. Com base em Silva (2017) e no FORECAST, as tecnologias transversais definidas neste trabalho foram as seguintes: ventilação, refrigeração, iluminação e bombas. As estratégias de eficientização

energética foram obtidas, principalmente, a partir de estudos desenvolvidos pelo Instituto Fraunhofer⁸ da Alemanha.

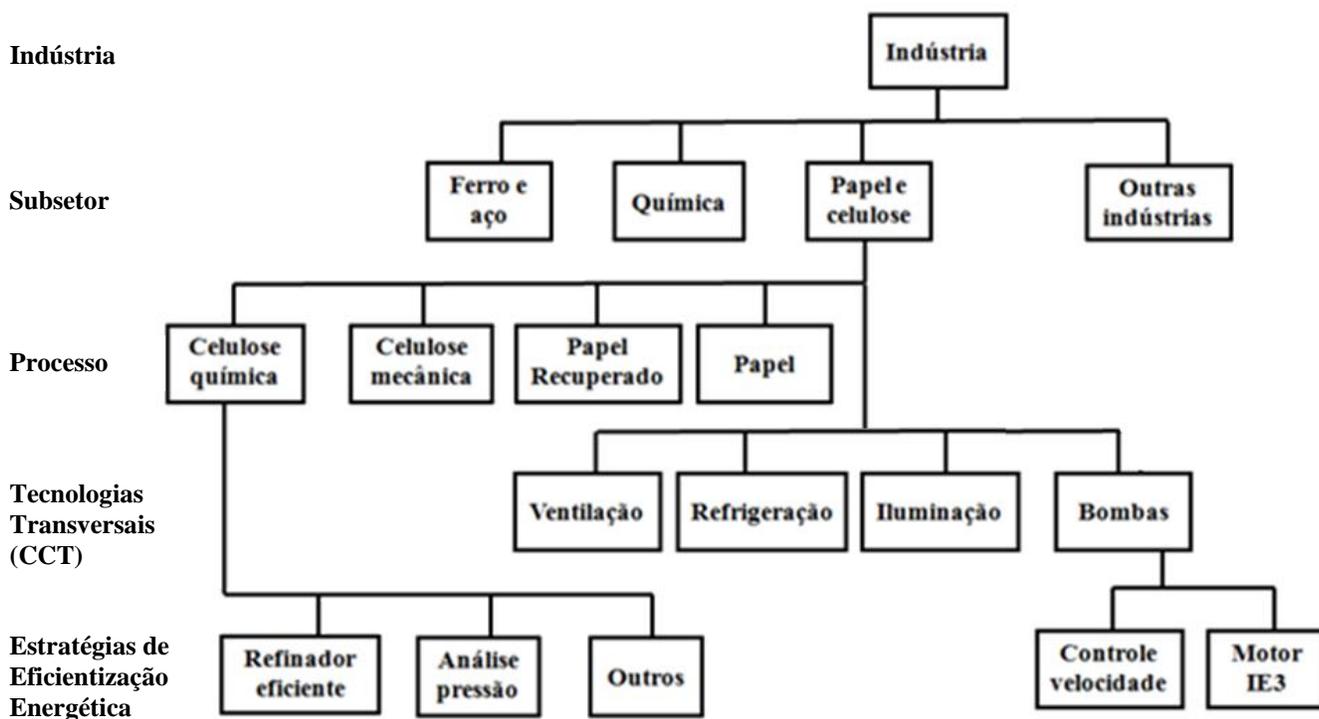


Figura 28 – Estrutura do setor industrial com algumas estratégias de eficientização energética

Fonte: Adaptado de (Silva, 2017)

No subsetor de papel e celulose foram consideradas doze medidas de eficiência energética para reduzir o consumo de energia dos processos. Essas medidas de eficiência foram consideradas com base nos trabalhos de (Fleiter *et al.*, 2012; Silva, 2017), no estudo desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer e presente no FORECAST, informações da indústria brasileira contidas no Balanço Energético Útil (BEU) (MME, 2005). O Quadro 1 mostra as estratégias de eficientização energética definidas neste estudo para os processos do subsetor de papel e celulose.

⁸ A plataforma de modelagem FORECAST visa desenvolver cenários de longo prazo para demanda futura de energia de países individuais e regiões do mundo até 2050. Ela é baseada em uma abordagem de modelagem *bottom-up*, considerando a dinâmica de tecnologias e impulsionadores socioeconômicos. Fonte: <http://www.forecast-model.eu/forecast-en/index.php>

Quadro 1 – Processos-Subsetor de papel e celulose: estratégias de eficiência energética

Processos	Estratégias de Eficiência Energética
Papel	Refinadores eficientes Otimização dos refinadores Melhoramento na química de fibras
Química de celulose	Gaseificação de licor negro Refinadores eficientes Análise de pressão
Mecânica de celulose	Eficiência elevada (GW) Pré-tratamento enzimático Refinadores eficientes (TMP)
Papel reciclado	Polpação de alta consistência Rastreamento eficiente Dispensor eficiente

Além das alternativas de eficiência energética para os processos, este estudo considerou onze estratégias de eficiência energética para as tecnologias transversais. Estas foram definidas com base nas informações encontradas na literatura especializada (Marques *et al.*, 2006; Kramer *et al.*, 2009; Rocha *et al.*, 2010; EPE, 2017; Bhandar, 2017; Silva, 2017) e por institutos internacionais de pesquisa na área energética: *Industrial Efficiency Technology Database* (Ietd, 2006), *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory* (Kramer *et al.*, 2009; Hahlbohm, 2013; Suhr *et al.*, 2015) e pelo estudo desenvolvido pelo Instituto Fraunhofer e presente no FORECAST. As informações são mostradas no Quadro 2.

Quadro 2 - CCT do Subsetor de papel e celulose: estratégias de eficiência energética

Tecnologias Transversais (CCT)	Estratégias de Eficiência Energética
Ventilação	Ventiladores de alta eficiência Manutenção regular Controlador de velocidade Motores IE2 Motores IE3 Movimentação direta em vez de V-Belt <i>Avoid oversizing</i>
Bombas	Bombas de alta eficiência Manutenção regular Motores IE2 Motores IE3 Movimentação direta em vez de V-Belt <i>Avoid oversizing</i>
Refrigeração	Compressores eficientes Manutenção regular Controlador de velocidade Motores IE2 Motores IE3 Movimentação direta em vez de V-Belt <i>Avoid oversizing</i>
Iluminação	Manutenção regular LEDs Luminárias eficientes

4.3.

Crêterios e subcr terios para avalia o das estratégias de efici ntiza o energética aplicadas ao subsetor de papel e celulose

O estudo bibliográfico foi o principal meio de investiga o desta pesquisa. Procurou-se extensivamente nas bases de dados por artigos relevantes sobre métodos multicr terio de apoio   decisão no sub-setor de Papel e Celulose, visando a constru o de um modelo que seja capaz de avaliar as estratégias de efici ntiza o energética nesse importante sub-setor da indústria brasileira.

Conforme procedimentos aplicados por outros autores (Trindade, 2016; Martins, 2017), nesse procedimento de pesquisa, as duas principais bases de dados utilizadas foram *Scopus* e *Science Direct*. Para estabelecer os cr terios dos processos, utilizaram-se as palavras-chaves: *Multicriteria* e *Pulp and Paper*. Já, para estabelecer os cr terios das tecnologias transversais (CCT), utilizaram-se as seguintes palavras-chaves: *Multicriteria* e *Ventilation*; *Multicriteria* e *Pump*; *Multicriteria* e *Refrigeration*; *Multicriteria* e *Lighting*. O passo seguinte, foi filtrar os resultados por idioma: inglês e português. Logo, foi filtrado para que as bases de dados científicas mostrassem os resultados para a op o *article*. Este filtro foi necessário para aumentar a acessibilidade dos documentos encontrados. No passo seguinte, foram selecionados os estudos mais recentes, partindo da hipótese que estariam contidas metodologias mais desenvolvidas e estudadas. Foram analisados os resumos dos artigos publicados a partir de 2015, visto que houve um aumento expressivo de artigos publicados nesse período. As seguintes tabelas mostram os resultados da pesquisa, tanto para os processos, quanto para as CCT.

Tabela 22 - Quantidade de publica es encontradas na pesquisa (Processos)

Bases de Dados	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Scopus	7	8	10	7	16	15	16	12	18	26	22	4
Science Direct	15	22	14	24	24	27	30	32	47	29	47	11

Tabela 23 - Quantidade de publica es encontradas na pesquisa (CCT: Ventila o)

Bases de Dados	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Scopus	13	14	16	23	22	29	29	41	48	54	62	13
Science Direct	17	27	18	29	36	43	51	65	101	133	135	51

Tabela 24 - Quantidade de publicações encontradas na pesquisa (CCT: Bombas)

Bases de Dados	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Scopus	9	18	30	47	45	48	53	67	74	93	91	17
Science Direct	63	62	67	94	113	125	134	186	223	265	302	110

Tabela 25 - Quantidade de publicações encontradas na pesquisa (CCT: Refrigeração)

Bases de Dados	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Scopus	2	3	5	3	12	24	15	25	22	25	19	9
Science Direct	14	14	9	17	13	27	24	27	31	46	59	21

Tabela 26 - Quantidade de publicações encontradas na pesquisa (CCT: Iluminação)

Bases de Dados	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Scopus	7	11	14	23	26	26	46	53	43	63	62	13
Science Direct	170	182	208	261	297	353	435	464	620	748	870	99

Os artigos que foram encontrados nas bases de dados abordam assuntos de diversas áreas do conhecimento, tais como engenharia química, ciências ambientais, energia, ciência da computação, matemática, biologia, agricultura, ciências sociais, economia, entre outros. Portanto, a análise dos resumos dos artigos buscou identificar os estudos compatíveis ao tema proposto para a pesquisa, cujos critérios determinantes foram a adoção de métodos multicritérios para avaliar as estratégias de efficientização energética no sub-setor de papel e celulose na indústria brasileira.

A seções subsequentes detalham os artigos selecionados, assim como os critérios e subcritérios propostos para os processos do sub-setor da indústria papel e celulose, assim como, as tecnologias transversais associadas.

4.3.1. Processos

A partir da análise minuciosa da literatura especializada, ao todo, oito artigos com afinidade ao tema proposto foram selecionados. Os autores (Jauhar *et al.*, 2014; Azizi e Ray, 2015; Campos *et al.*, 2015; Machani *et al.*, 2015; Akhundzadeh e Shirazi, 2017; Boukherroub *et al.*, 2017; Kinto *et al.*, 2017; M'hamdi *et al.*, 2017), ano de publicação, objetivos e método aplicado, estão apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 - Artigos com afinidades ao tema proposto

Ano	Autores	Objetivo	Método	CRITÉRIOS					
				1	2	3	4	5	6
2015	Majid Azizi; Charles Ray	Selecionar as melhores soluções para o fornecimento de matéria prima na indústria de papel e celulose	ANP (<i>Analytic Network Process</i>), AHP (<i>Analytic Hierarchy Process</i>)	x	x	x	x		
2015	Mahdi Machani; Mustapha Nourelfath; Sophie D'Amours	Identificar estratégias de transformação, dentro da indústria do papel e celulose, que afetam a competitividade do setor industrial	Modelo matemático (Função Objetivo)	x	x	x			x
2014	Sunil Kumar Jauhar; Millie Pant; Ajith Abraham	Propor uma solução à abordagem SSS (seleção sustentável de fornecedores) aplicando Evolução Diferencial no setor do papel e celulose	DEA (Evolução Diferencial)	x	x				x
2015	Lucila M.S. Campos; Daiane Aparecida; Miguel Angel Verdinelli; Paulo Augusto Cauchick	Selecionar os melhores indicadores que ajudam à indústria brasileira (empresas do setor do papel e celulose) a melhorar o seu desempenho na conservação do meio ambiente à luz das diretrizes estabelecidas pela ISO 14001	Agrupamento Hierárquico por dendograma	x	x				x
2017	Maryam Akhundzadeh; Babak Shirazi	Selecionar as tecnologias mais apropriadas no setor da celulose, considerando o grande impacto da qualidade da celulose na produção do papel	FAHP (<i>Fuzzy Analytic Hierarchy Process</i>)	x					x x
2017	Asmae Ismaili M'hamdi; Noureddine Idrissi Kandri; Abdelaziz Zerouale; Dagnija Blumberga; Julija Gusca	Comparar o impacto no meio ambiente da produção do papel, usando os métodos convencionais e o método de tratamento químico de resíduos de madeira	Classificação (rank)		x				
2017	Tasseda Boukherrou; Luc LeBel; Angel Ruiz	Estabelecer opções de fabricação de produtos sustentáveis a partir da matéria prima no setor de papel e celulose	AHP	x	x		x		
2017	Tadashi Kinto; De Oliveira Bernal; Veiga Gimenes; Morales Udaeta	Identificar os impactos das fontes de geração de energia no setor industrial, especificamente, no setor do papel e celulose	Planejamento Integrado de Recursos (IRP)	x	x	x	x	x	

Definição de Critérios: 1. Econômico (7 artigos); 2. Ambiental (7 artigos); 3. Político (3 artigos); 4. Social (3 artigos); 5. Técnico (5 artigos); 6. Risco (1 artigo)

Conforme mostrado no Quadro 3, os distintos autores aplicaram diversos métodos multicritério de apoio a decisão aplicados no setor papel e celulose. Dos métodos multicritérios utilizados, o AHP (*Analytic Hierarchy Process*) figura entre os mais frequentes, porém, não é possível concluir que há um método mais indicado para os tipos de análises em questão. Além disso, observa-se que a literatura vem estudando diversos métodos, enlaçando a teoria dos conjuntos *fuzzy* para considerar as incertezas.

Pode-se notar que os critérios Econômico, Ambiental e Técnico são adotados pela maioria dos autores. Além disso, os critérios Político e Social são adotados unicamente em três artigos. Já o critério de Risco é aplicado em um único trabalho (Akhundzadeh e Shirazi, 2017). Dessa forma, as dimensões que foram escolhidas para avaliar os processos do sub-setor papel e celulose foram: Econômico, Ambiental e Técnico.

Para definir os critérios e subcritérios, alguns cuidados devem ser observados para garantir que todas as dimensões e fatores envolvidos estejam representados de modo adequado. Para a situação de estudos relacionados com energia, escolher uma grande quantidade de critérios não torna a tomada de decisão necessariamente mais útil, pelo contrário, menos critérios são benéficos para a avaliação do problema objetivo (Akhavan-Rezai *et al.*, 2016; Martins, 2017). Nessa ordem de ideias, os critérios devem apresentar relevância, mas sem repetitividade. Segundo Wang *et al.* (2009), os princípios que devem ser obedecidos para escolha dos critérios são:

- **Princípio sistêmico:** os critérios devem refletir as características essenciais e todo o desempenho dos sistemas de energia;
- **Princípio de consistência:** os critérios devem ser consistentes com os objetivos da tomada de decisão;
- **Princípio da independência:** os critérios devem refletir o desempenho das alternativas por diferentes aspectos;
- **Princípio de mensurabilidade:** os critérios devem ser mensuráveis em valores quantitativos tanto quanto possível ou serem qualitativamente expressos;
- **Princípio da comparabilidade:** o resultado da tomada de decisão é mais racional quando a comparabilidade dos critérios é mais evidente.

Visando escolher as melhores alternativas que permitam reduzir a demanda energética nos processos do sub-setor de papel e celulose, considerando os princípios para estabelecer os critérios, foram sugeridos 10 subcritérios da literatura, conforme descrevem-se a seguir: 3 (Econômicos), 4 (Ambientais) e 3 (Técnicos). Os critérios e subcritérios foram discutidos

pelo autor da tese de doutorado e os orientadores, com o intuito de ter-se um consenso unificado. Os critérios, juntos com os subcritérios definidos são:

- **Econômico**
 - Custo do investimento inicial
 - Custo da energia consumida
 - Custo da operação e manutenção

- **Ambiental**
 - Poluição ambiental (emissões de gases do efeito estufa, GEE)
 - Uso dos recursos naturais
 - Proteção da biodiversidade e ecossistemas
 - Consumo de água

- **Técnico**
 - Qualidade da tecnologia
 - Flexibilidade e simplicidade de implementação
 - Confiabilidade da tecnologia

O Anexo A apresenta a descrição de todos os critérios e subcritérios que fazem parte do estudo (processos e CCT), além de compor a planilha que foi avaliada pelos especialistas.

4.3.2. Tecnologias transversais

Esta seção descreve os critérios e subcritérios definidos para análise das tecnologias transversais, *i.e.*: ventilação, bombas, refrigeração e iluminação.

4.3.2.1. Bombas

As bombas centrífugas são máquinas em que a movimentação do líquido é produzida por forças que se desenvolvem na massa líquida, em consequência da rotação do rotor com

um certo número de pás especiais. A distinção entre os diversos tipos de bombas de fluxo é feita, fundamentalmente, em função da forma como o rotor cede energia o líquido, bem como pela orientação do líquido ao passar pelo rotor (Marques *et al.*, 2006). Para analisar os distintos critérios aplicados nesta investigação com o propósito de avaliar as bombas do setor industrial brasileiro, especificamente do sub-setor do papel e celulose, foram selecionados oito os artigos com afinidade ao tema proposto. Os autores (Cavalcante e Lopes, 2015; Goldrath *et al.*, 2015; Besikci *et al.*, 2016; Fergani *et al.*, 2016; Yagmur, 2016; Jagtap e Bewoor, 2017; Ozcan *et al.*, 2017; Muhsen *et al.*, 2018), ano de publicação, objetivos e método aplicado, estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Artigos com afinidades ao tema proposto

Ano	Autores	Objetivo	Método	CRITERIOS					
				1	2	3	4	5	
2015	Cristiano A.V. Cavalcante, Rodrigo S. Lopes	Selecionar as melhores estratégias para a gestão de manutenção em um sistema de cogeração de uma usina brasileira	MAVT (Teoria dos valores de múltiplos atributos)	x					x
2015	T. Goldrath, O. Ayalon, M. Shechter	Avaliar as melhores estratégias de eficiência energética, com o propósito de definir um índice combinado de sustentabilidade na indústria	Rank	x	x	x	x	x	
2016	E. Bal Beşikçi, T. Kececi, O. Arslan, O. Turan	Selecionar as melhores técnicas de operação na indústria marítima, dentro do âmbito do Plano de Gestão da Eficiência Energética adotado pela Organização Marítima Internacional (OMI).	FAHP						x
2016	Zineb Fergani, Djamel Touil, Tatiana Morosuk	Analisar os efeitos de três fluidos na operação de um Ciclo Rankine Orgânico a partir de múltiplos critérios	Função objetivo	x	x				
2016	Levent Yagmur	Analisar as prioridades de equipamentos para uma usina termelétrica em função da tecnologia e o seu local de utilização	AHP					x	x
2017	Evren Çan Özcan, Sultan Ünlüsoy, Tamer Eren	Selecionar as melhores estratégias de manutenção para usinas hidroelétricas na Turquia	AHP	x					x
2017	H.P. Jagtap, A.K. Bewoor	Identificar os equipamentos críticos de uma usina termoelétrica	AHP	x				x	x

2018	Dhiaa Halboot Muhsen, Tamer Khatib, Tawfeeq Enad Abdulabbas	Selecionar os principais fatores no dimensionamento de um sistema de bombeamento de água fotovoltaica em uma zona rural	AHP-TOPSIS	x					x
------	--	---	------------	---	--	--	--	--	---

Definição de Critérios: 1. Econômico (6 artigos); 2. Ambiental (2 artigos); 3. Político (1 artigos); 4. Social (3 artigos); 5. Técnico (7 artigos)

Conforme mostra-se no Quadro 4, diversos são os critérios que os autores têm avaliado para a análise de bombas no setor industrial. Apesar do método AHP ser bastante utilizado, no Quadro 4 ainda é possível constatar que não existe uma uniformidade com aplicação dos métodos multicritérios de apoio à decisão. Pode ser observado que, nesta situação, os critérios Econômico, Social e Técnico, foram considerados em maior quantidade pela literatura. Já os critérios Ambiental e Político são aplicados em dois e um trabalho, respectivamente. Nessa ordem de ideias, as dimensões que foram escolhidas para avaliar esta tecnologia transversal foram: Econômico, Social e Técnico.

Considerando os princípios para estabelecer os critérios, foram sugeridos 9 subcritérios, conforme descrevem-se a seguir: 3 (Econômicos), 3 (Sociais) e 3 (Técnicos). Os critérios e subcritérios foram discutidos pelo autor da tese de doutorado e os orientadores, com o intuito de ter-se um consenso unificado. Os critérios, juntos com os subcritérios definidos são:

- **Econômico**

- Custo do investimento inicial
- Custo da energia consumida e exergia gerada
- Custo da operação e manutenção

- **Social**

- Aceitação social da tecnologia
- Segurança ocupacional
- Geração de emprego

- **Técnico**

- Tempo de vida útil
- Simplicidade de seleção e implementação
- Disponibilidade da tecnologia

4.3.2.2. Ventilação

As instalações de ventilação industriais, geralmente, operam suas máquinas na rotação constante, para obter a variação de vazão, principalmente na sua diminuição, utilizam válvulas que estrangulam a tubulação, aumentando a pressão do ventilador com o aumento das perdas do sistema. Essa prática, normalmente, penaliza energeticamente a instalação, quando comparada com a variação de vazão através da rotação variável (Marques *et al.*, 2006). Para analisar os distintos critérios aplicados nesta investigação e com o propósito de avaliar as melhores estratégias de efficientização energética para ventiladores do setor industrial brasileiro, especificamente do sub-setor do papel e celulose, foram selecionados seis artigos com afinidade ao tema proposto. Os autores (Besikci *et al.*, 2016; Si *et al.*, 2016; Bernardo *et al.*, 2017; Loikkanen *et al.*, 2017; Martin-Gamboa *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2017), ano de publicação, objetivos e método aplicado, estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Artigos com afinidades ao tema proposto

Ano	Autores	Objetivo	Método	CRITERIOS			
				1	2	3	4
2016	E. Bal Beşikçi, T. Kececi, O. Arslan, O. Turan	Selecionar as melhores técnicas de operação na indústria marítima, dentro do âmbito do Plano de Gestão da Eficiência Energética adotado pela Organização Marítima Internacional (OMI).	FAHP				x
2016	Jin Si, Ljiljana Marjanovic-Halburd, Fuzhan Nasiri, Sarah Bell	Selecionar as melhores tecnologias verdes para aumentar a eficiência energética em edificações industriais existentes.	AHP	x	x	x	x
2017	Haichao Wang, Lin Duanmu, Risto Lahdelma, Xiangli Li	Desenvolver uma estrutura de apoio à decisão considerando critérios econômicos, energéticos, tecnológicos e ambientais, com o propósito de facilitar o planejamento / adaptação dos sistemas aquecimento.	AHP	x	x		x
2017	Mario Martín-Gamboa, Diego Iribarren, Diego García-Gusano, Javier Dufour	Avaliar a potencialidade da combinação de abordagens de ciclo de vida (LC) e análise de envolvimento de dados (DEA) para a	MAVT (Teoria dos valores de múltiplos atributos)	x	x	x	x

		sua aplicabilidade em sistemas de energia.					
2017	Oskari Loikkanen, Risto Lahdelma, Pekka Salminen	Avaliar em distintas alternativas para melhorar as soluções de eficiência energética em edificações industriais	Análise Estocástica de Aceitabilidade Multicritério (SMAA)	x	x		x
2017	Hermano Bernardo, Adélio Gaspar, Carlos Henggeler Antunes	Avaliar as melhores estratégias de eficiência energética considerando equipamentos de ventilação	ELECTRE TRI	x	x		x

Definição de Critérios: 1. Econômico (5 artigos); 2. Ambiental (5 artigos); 4. Social (2 artigos); 5. Técnico (6 artigos)

A pesar do método AHP ser bastante utilizado, no Quadro 5 contata-se que não existe uma uniformidade com aplicação dos métodos multicritérios de apoio à decisão. Observa-se que os critérios Econômico, Ambiental e Técnico, foram os mais citados na literatura. As dimensões que foram escolhidas para avaliar esta tecnologia transversal são: Econômico, Social e Técnico.

Considerando os princípios para estabelecer os critérios, foram sugeridos 10 subcritérios, conforme descrevem-se a seguir: 3 (Econômicos), 3 (Ambientais) e 4 (Técnicos). Os critérios e subcritérios foram discutidos pelo autor da tese de doutorado e os orientadores, com o intuito de ter-se um consenso unificado. Os critérios e os subcritérios definidos são:

- **Econômico**

- Custo do investimento inicial
- Custo da energia consumida e exergia gerada
- Custo da operação e manutenção

- **Ambiental**

- Poluição ambiental em relação às emissões de gases do efeito estufa (GEE)
- Geração de resíduos
- Impacto positivo na qualidade ambiental interna

- **Técnico**

- Tempo de vida útil
- Conforto Térmico
- Qualidade do ar interno
- Disponibilidade da tecnologia

4.3.2.3. Refrigeração

A refrigeração industrial é o processo utilizado na indústria química, papel e celulose, de alimentos e de processos e pode ser caracterizada pela faixa de temperatura de operação. No limite inferior, a temperatura pode atingir a ordem de -70°C a -60°C , enquanto no limite superior podem ser observadas temperaturas de 15°C (Marques *et al.*, 2006). Para esta situação, foram selecionados diversos critérios com afinidade ao tema proposto. Os autores (Eini *et al.*, 2016; Zheng *et al.*, 2016; Botticella *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2018; Shahrestani *et al.*, 2018), ano de publicação, objetivos e método aplicado, estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Artigos com afinidades ao tema proposto

Ano	Autores	Objetivo	Método	CRITERIOS			
				1	2	3	4
2016	Saeed Eini, Hamidreza Shahhosseini, Navid Delgarm, Moonyong Lee, Alireza Bahadori	Avaliar a potencialidade da abordagem " <i>Inherently Safer Design</i> " para maximizar a segurança geral de uma planta de processo industrial em função de múltiplos critérios	TOPSIS, LINMAP, Método da Entropia de Shannon	x	x	x	x
2016	C.Y. Zheng, J.Y. Wu, X.Q. Zhai, R.Z. Wang	Avaliar diversas estratégias de políticas tarifárias para contribuir na melhora do desempenho energético e econômico em sistemas combinados de energia, refrigeração e aquecimento (CCHP)	TOPSIS (<i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution</i>)	x			x

2017	F. Botticella, F. de Rossi, A. W. Mauro, G. P. Vanoli, L. Viscito	Avaliar diversas configurações de um sistema de refrigeração a partir da utilização de vários refrigerantes (R32, R290, R1234yf, R1234ze, XL41, XL55) como alternativa potencial para os refrigerantes mais comuns realmente utilizados (R410A, R407C, R134a).	Função Objetivo	x	x			x
2018	Xi Chen, Haowei Zhou, Wenbin Li, Zhengkun Yu, Guangcai Gong, Yongtao Yana, Liang Luo, Zhongmin Wan, Yuejiao Ding	Avaliar distintos critérios (termodinâmicos, econômicos e ambientais) na instalação num sistema <i>Proton Exchange Membrane</i> (PEMFC) baseados num sistema combinado de energia, refrigeração e aquecimento (CCHP)	TOPSIS	x	x			x
2018	Mehdi Shahrestani, Runming Yao, Geoffrey K. Cook	Selecionar as melhores alternativas dos sistemas de aquecimento, ventilação, ar condicionado e refrigeração (HVAC&R) para diminuir o consumo total de energia no Reino Unido.	Fuzzy	x	x			x

Definição de Critérios: 1. Econômico (5 artigos); 2. Ambiental (4 artigos); 4. Social (1 artigos); 5. Técnico (5 artigos)

Conforme mostrado no Quadro 6, diversos são os critérios que os autores têm avaliado para a análise de sistemas de refrigeração no setor industrial. Apesar do método TOPSIS ser bastante utilizado, no Quadro 6 ainda é possível constatar que não existe uma uniformidade com aplicação dos métodos multicritérios de apoio à decisão. Pode ser observado que, nesta situação, os critérios Econômico, Ambiental e Técnico, foram considerados em maior quantidade pela literatura. Já o critério social foi aplicado em um único trabalho. Nessa ordem de ideias, as dimensões que foram escolhidas para avaliar a tecnologia transversal, refrigeração, foram: Econômico, Ambiental e Técnico.

Considerando os princípios para estabelecer os critérios, foram sugeridos 9 subcritérios, conforme descrevem-se a seguir: 3 (Econômicos), 3 (Ambiental) e 3 (Técnicos). Os critérios e subcritérios foram discutidos pelo autor da tese de doutorado e os orientadores, com o intuito de ter-se um consenso unificado. Os critérios, juntos com os subcritérios definidos são:

- **Econômico**

- Custo do investimento inicial
- Custo da energia consumida e exergia gerada
- Custo da operação e manutenção

- **Ambiental**

- Poluição ambiental em relação às emissões de gases do efeito estufa (GEE)
- Geração de resíduos
- Consumo de água

- **Técnico**

- Qualidade da tecnologia
- Conforto térmico
- Qualidade do ar interno

4.3.2.4. Iluminação

Diversos autores mostram que a iluminação ineficiente é comum no Brasil. Uma combinação de lâmpadas, reatores e refletores eficientes, associados a hábitos saudáveis na sua utilização, podem ser aplicados para reduzir o consumo de energia elétrica (Marques *et al.*, 2006). Para escolher os critérios associados à iluminação, foram selecionados cinco artigos com afinidade ao tema proposto. Os autores (Aste *et al.*, 2017; Carli *et al.*, 2017; Kluczek, 2017; Marinakis *et al.*, 2017; Baloch *et al.*, 2018), ano de publicação, objetivos e método aplicado, estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Artigos com afinidades ao tema proposto

Ano	Autores	Objetivo	Método	CRITÉRIOS			
				1	2	3	4
2018	Ashfaque Ahmed Baloch, Pervez Hameed Shaikh, Faheemullah Shaikh, Zohaib Hussain Leghari, Nayyar Hussain Mirjat, Muhammad Aslam Uqailia	Selecionar a melhor ferramenta para a simulação de sistemas de iluminação em edificações	Rank	x			x
2017	Aldona Kluczek	Descrever uma abordagem multi-critérios global para avaliação de sustentabilidade dos processos de fabricação	AHP			x	x
2017	N. Aste, R. S. Adhikari, C. Del Pero, F. Leonforte, I. Timis	Selecionar as melhores estratégias e soluções para avaliar o consumo de energia no setor residencial em Quênia.	Multi-Objective Optimization (MOO)	x	x		x
2017	Vangelis Marinakis, Haris Doukas, Panos Xidonas, Constantin Zopounidis	Selecionar as melhores estratégias para a implementação de um plano de energia que busca reduzir as emissões de CO ₂	UTA (Utility Additive)	x	x	x	
2018	Raffaele Carli, Mariagrazia Dotoli, Roberta Pellegrino	Desenvolver uma ferramenta de decisão multi-critérios para apoiar o tomador de decisões públicas na otimização intervenções de adaptação de energia nos sistemas existentes de iluminação pública.	Multi-Objective Optimization (MOO)	x	x		x

Definição de Critérios: 1. Econômico (4 artigos); 2. Ambiental (3 artigos); 4. Social (2 artigos); 5. Técnico (4 artigos)

Conforme mostrado no Quadro 7, diversos são os critérios que os autores têm avaliado para a análise da iluminação no setor industrial brasileiro. Nesta situação, é possível constatar que não existe uma uniformidade com aplicação dos métodos multicritérios de apoio à

decisão. Pode ser observado que, nesta situação, os critérios Econômico, Ambiental e Técnico foram escolhidas para avaliar a tecnologia transversal: iluminação.

Considerando os princípios para estabelecer os critérios, foram sugeridos 9 subcritérios, conforme descrevem-se a seguir: 3 (Econômicos), 3 (Ambientais) e 3 (Técnicos). Os critérios e subcritérios foram discutidos pelo autor da tese de doutorado e os orientadores, com o intuito de ter-se um consenso unificado. Os critérios, juntos com os subcritérios definidos são:

- **Econômico**

- Custo do investimento inicial
- Custo da energia consumida
- Custo de operação e manutenção

- **Ambiental**

- Poluição ambiental em relação às emissões de gases do efeito estufa (GEE)
- Geração de resíduos
- Consumo de água

- **Técnico**

- Tempo de vida útil
- Simplicidade de seleção e implementação
- Qualidade da tecnologia

5

Método Multicritério de Apoio à Decisão: Modelo *Fuzzy*-AHP-TOPSIS

Este capítulo apresenta os conceitos fundamentais do modelo matemático adotado para a seleção das estratégias de efficientização energética do setor industrial brasileiro, *i.e.*: Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD). Nesta Tese de Doutorado, definem-se os MMAD como um conjunto de técnicas desenvolvidas para ajudar um decisor (seja ele caracterizado por uma pessoa, grupo político, grupo de técnicos, grupo de especialistas, entre outros) a tomar uma decisão relacionada a um problema complexo, de difícil resolução e com diversas alternativas de solução, de acordo com determinados critérios e subcritérios (Barrios *et al.*, 2016). Além disso, as técnicas devem ser capazes de tratar problemas eventualmente complexos de maneira simples, para que sejam úteis à tomada de decisão, priorizando a eficiência do processo.

Em termos específicos, a pesquisa propõe a aplicação de um modelo para mensurar e avaliar as ações estratégicas de efficientização no setor industrial brasileiro, baseado na integração de dois métodos multicritério *fuzzy* de apoio à decisão: FAHP e FTOPSIS. As etapas do método foram agrupadas em duas fases: (i) a fase *fuzzy*-AHP, na qual se estabelecem os pesos para os critérios e subcritérios para avaliar as estratégias de efficientização energética; e (ii) a fase *fuzzy*-TOPSIS, na qual se hierarquizam as melhores estratégias.

Nesse sentido, os MMAD tornam-se uma excelente estratégia para mensurar e avaliar as ações estratégicas de efficientização no setor industrial brasileiro, uma vez que o processo implica tomadas de decisão de especialistas da área a partir de diversos critérios complexos.

5.1.

Métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MMAD)

Os métodos multicritérios de apoio a decisão consistem em um conjunto de procedimentos lógicos visando a construção de modelos com o objetivo de orientar o tomador de decisão (Ren *et al.*, 2017), à escolha de alternativas. A tomada de decisão multicritério é considerada como uma metodologia altamente confiável para classificar múltiplas

alternativas com base em vários critérios (Umm *et al.*, 2009). Os MMAD foram aplicados com sucesso em diferentes áreas de economia, energia, gestão, transporte, gestão de recursos humanos, e outros domínios (Shih *et al.*, 2007; Velasquez e Hester, 2013).

O início dos métodos multicritérios estruturados data da Segunda Guerra Mundial, advindo da necessidade da estruturação matemática dos problemas logísticos enfrentados nesta guerra (Pitteri, 2016). Ao longo dos anos 60 e 70 foram desenvolvidas as primeiras metodologias estruturadas, destacando-se Bernard Roy na França, com o método ELECTRE, que se tornaria uma família de métodos, Thomas L. Saaty nos Estados Unidos, com o método AHP e Keeney e Raiffa, com o MAUT, também nos EUA (Fernandes *et al.*, 2009).

Uma corrente de pensamento recente para tratar problemas de decisão é o Auxílio Multicritério à Decisão (AMD). Essa abordagem tem como característica a análise dos problemas à luz de vários critérios conflitantes e o reconhecimento da subjetividade inerente aos atores de decisão (Costa, 2006).

O AMD é um método que busca modelar a solução de problemas de tomada de decisão, mais especificamente, escolha de alternativas. Este método consiste em um instrumental poderoso e de uso crescente no âmbito da tomada de decisão no ambiente organizacional e institucional. A utilização do AMD implica no entendimento de que não existe a melhor alternativa para todos os critérios, assim, o objetivo é auxiliar o processo decisório. A partir da estruturação do modelo escolhido, é realizada uma análise de sensibilidade que visa avaliar a volatilidade das alternativas. Sendo assim, essa metodologia não busca a solução ótima, mas uma solução de compromisso, em que deve prevalecer o consenso entre as partes envolvidas (Gomes e Gomes, 2012).

De acordo com Moraes (1999) para análise de problemas de tomada de decisão, é importante conhecer algumas terminologias usadas com frequência durante o processo:

- **Decisor:** é empregado para referenciar o indivíduo ou grupo de indivíduos que intervém no processo, influenciando direta ou indiretamente a decisão, através da manifestação das preferências e julgamentos de valor fornecidos em distintas fases do processo.
- **Analista:** refere-se ao cientista ou técnico, que tem como papel fundamental ajudar o decisor no processo. Ele auxilia o decisor a expressar suas preferências, para tirar conclusões definitivas sobre o conjunto de ações (alternativas viáveis).
- **Facilitador:** é um líder experiente, que deve focalizar a sua atenção na resolução do problema, coordenando os pontos de vista do decisor, mantendo

este motivado e destacando o aprendizado no processo de decisão. O seu papel fundamental é esclarecer e modelar o processo de avaliação ou negociação condizente à tomada de decisão. Deve-se manter neutro durante o processo de decisão, para não influenciar nos julgamentos dos decisores.

- **Objetivo:** representa a definição da problemática, podendo ela ser de escolha, classificação, ordenação ou descrição.
- **Atributo:** é uma medida que fornece uma base para avaliar os níveis de vários objetivos e definir se as metas têm sido atingidas ou não dada uma decisão particular, ou seja, os atributos funcionam como um aspecto mensurável de julgamento, pelo qual uma variável de decisão pode ser caracterizada. Também são chamados de critérios e subcritérios.
- **Alternativas:** são as opções para a tomada de decisão, também chamadas de ações potenciais.

De acordo com (Gomes e Gomes, 2012) as diversas etapas no processo de decisão devem estar sistematizadas. Nesse sentido, em geral, o processo de toma de decisão pode ser dividido em sete fases:

- **Fase 1** – Identificação dos atores envolvidos no processo decisório.
- **Fase 2** – Definição e escolha de alternativas viáveis. É necessário que as alternativas escolhidas sejam plausíveis, principalmente se existem muitas opções, deve-se lembrar que quanto mais alternativas, mais julgamentos serão necessários.
- **Fase 3** – Definição de critérios. Todos os fatores relevantes devem ser incluídos para análise, sem que se perca a praticidade. É necessário que se analisem os critérios propostos para que se excluam as redundâncias.
- **Fase 4** – Julgamento das alternativas sob os variados critérios. As alternativas são quantificadas em relação aos critérios para que elas sejam comparáveis entre si;
- **Fase 5** – Determinação da importância relativa dos critérios. Nesta fase são alocados os pesos, ou índices de importância relativa, nos critérios.
- **Fase 6** – Determinação das soluções. É a aplicação do método multicritério em si pela síntese dos resultados.
- **Fase 7** – Análise de robustez ou sensibilidade. É a fase em que a sensibilidade do modelo é testada em relação a variações reais no cenário em que se insere o problema de decisão. Em outras palavras, consiste em estudar mudanças nas alternativas devido a variações nos atributos. Pode ser classificado como tendo estabilidade fraca ou forte, dependendo de como a solução se degrada a um nível predeterminado. Basicamente, a ideia é testar o grau de variação necessário para que haja uma modificação na prescrição da(s) alternativa(s).

5.2. Visão geral e quadro comparativo

Em termos gerais, os MMAD podem ser definidos como um conjunto de técnicas desenvolvidas para ajudar um decisor (seja ele caracterizado por uma pessoa, grupo político,

grupo de técnicos, entre outros) a tomar uma decisão relacionada a um problema complexo, de difícil resolução e com diversas alternativas de solução, de acordo com determinados critérios. Além disso, os instrumentos devem ter habilidade para tratar problemas eventualmente complexos de maneira simples, para que sejam acessíveis aos decisores, sem que eles tenham que investir muito tempo e dinheiro para utilizá-los (Costa, 2006).

O Quadro 8 apresenta os principais MMAD, incluindo as referências bibliográficas, assim como as vantagens e desvantagens da aplicação.

Quadro 8 - Métodos multicritério de apoio à decisão

MMAD	Vantagens	Desvantagens
Processo Analítico Hierárquico (<i>Analytical Hierarchy Process – AHP</i>) (Saaty, 1977; 1990; 1991; 2000)	<ul style="list-style-type: none"> - Modelo simples para construir; - Processo lógico; - Eficiente em lidar com atributos qualitativos e quantitativos; - Resultados de fácil entendimento. 	<ul style="list-style-type: none"> - Dúvidas têm sido levantadas sobre a fundamentação dessa teoria. Existe uma forte visão de que os axiomas em que o AHP se baseia não são suficientemente claros para serem empiricamente testados.
Técnica para avaliar o desempenho de alternativas através de similaridade com a solução ideal (<i>Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution – TOPSIS</i>) (Hwang e Yoon, 1981)	<ul style="list-style-type: none"> - A consistência interna e solidez lógica; - Fácil de seguir; - Intuitivamente atraente; - Não há cálculos complicados; - Facilmente configurado em MS Excel; - Os resultados são de fácil entendimento; - Valor do índice simples dado; - Os resultados podem ser facilmente demonstrados graficamente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Grande número de procedimentos; - Grande número de cálculos; - Fornece um resultado geral.
<i>Preference Ranking Method for Enrichment Evaluation – PROMETHEE</i> (Brans e Vincke, 1984)	<ul style="list-style-type: none"> - Incentiva mais interação entre o decisor e o modelo na procura de boas opções; - Os defensores argumentam que o seu conceito <i>outranking</i> é mais relevante para situações práticas do que o conceito de dominação restritiva. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muito conhecimento necessário.
Abordagem de Decisão Fuzzy (<i>Fuzzy Decision Approach – FDA</i>) (Liang e Wang, 1994)	<ul style="list-style-type: none"> - É baseada em palavras e não em números, expresso linguisticamente; - Melhor tratamento das imprecisões; - Facilidade na especificação das regras; - O uso de variáveis linguísticas deixa mais perto do pensamento humano; - Requer poucas regras, poucos valores e poucas decisões. 	<ul style="list-style-type: none"> - Construção complexa; - A lógica <i>fuzzy</i> é bastante imprecisa; - Dificuldade em prever qual será a interação entre as diferentes condicionantes do problema.
<i>Métodos ELimination Et Choix TRaduisant la rEalité – ELECTRE</i> (Roy e Bouyssou, 1993)	<ul style="list-style-type: none"> - Os defensores argumentam que o seu conceito <i>outranking</i> é mais relevante a situações práticas do que o conceito de dominação restritiva; - Pode ser usado para escolher, classificar, e ordenar alternativas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Muito conhecimento necessário. - Não é transparente; - Muito provavelmente será necessário um especialista em AMD para ajudar e realizar a análise.
<i>Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique – MACBETH</i> (Bana Costa e Vasnick, 1994)	<ul style="list-style-type: none"> - Julgamento comparativo dos decisores entre os diversos critérios e ações; - É utilizado um software especializado que fornece os pesos dos critérios de acordo com os julgamentos feitos; 	<ul style="list-style-type: none"> - O <i>software</i> pode não conseguir gerar resultados compatíveis com as comparações realizadas e sugere variações de julgamentos que permitam a aproximação de um resultado;

	- A principal vantagem desta técnica é maneira como os decisores expressam suas preferências, de forma qualitativa.	- A possibilidade de se tornar um método cansativo caso haja necessidade de um grande número de comparações.
--	---	--

Fonte: (Mello, 2015)

5.3. Modelo *Fuzzy-AHP-TOPSIS*

A representação gráfica do modelo de mensuração e avaliação das ações estratégicas de efficientização no setor industrial brasileiro compreende duas fases. A primeira, *fuzzy-AHP*, possui as seguintes quatro etapas:

- **Etapa 1:** Construção da hierarquia onde são definidos os critérios e subcritérios;
- **Etapa 2:** Cálculo das matrizes de comparação pareadas *fuzzy*, usando os valores linguísticos – números *fuzzy* triangular (TFN, do inglês, *Triangular Fuzzy Number*);
- **Etapa 3:** Análise de consistência das matrizes de comparação pareadas *fuzzy*;
- **Etapa 4:** Obtenção dos pesos dos critério e subcritérios *fuzzy-AHP*.

Após a avaliação dos pesos de cada critério e subcritério gerados na etapa anterior, inicia-se a segunda fase: *fuzzy-TOPSIS*. Esta fase consiste em três etapas, totalizando o método sete etapas:

- **Etapa 5:** Constituição da matriz de avaliação das alternativas, agregando os valores linguísticos fornecidos pelos tomadores de decisão;
- **Etapa 6:** Definição da solução ideal positiva e negativa (FPIS e FNIS) e definição da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-);
- **Etapa 7:** Determinação da proximidade relativa do valor ideal e definição do ranking a partir da ordenação decrescente dos valores obtidos por cada alternativa.

5.4. Descrição da fase I: *Fuzzy-AHP*

Descrevem-se a seguir as etapas da primeira fase (*fuzzy-AHP*) para estimar os pesos dos critérios e subcritérios.

5.4.1. Etapa 1: Construção da hierarquia, definição de critérios e subcritérios

Considerando a estrutura hierárquica de decisão do método multicritério de apoio a decisão, devem ser definidos os critérios e subcritérios, situados no nível da estrutura abaixo

do objetivo, que são fatores considerados por exercer influência sobre o objetivo. A Figura 29 mostra a estrutura hierárquica adotada para esta pesquisa em particular.

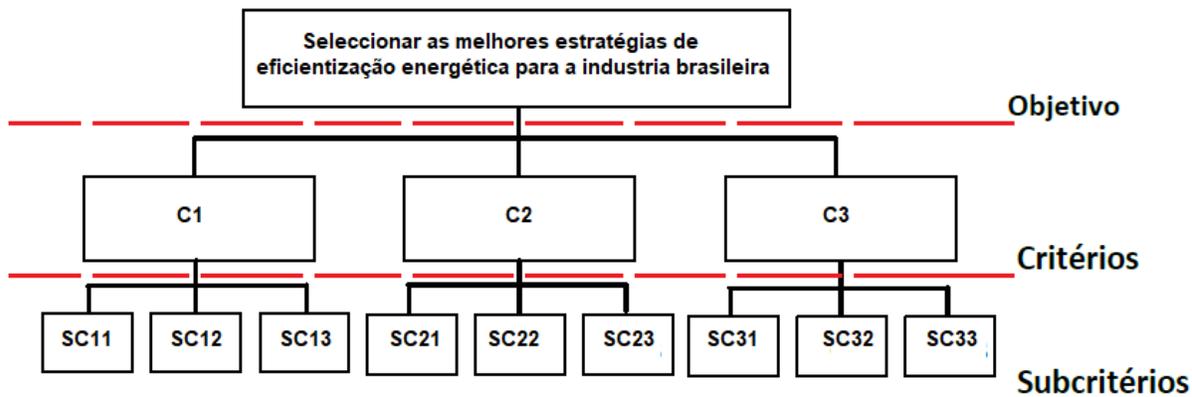


Figura 29 - Estrutura hierárquica de decisão do método *fuzzy*-AHP

Fonte: Elaboração própria

5.4.2.

Etapa 2: Cálculo das matrizes de comparação pareadas *fuzzy*

Nesta etapa, com os critérios e subcritérios para avaliar as opções definidos, precisam-se os julgamentos dos especialistas, que definem a relevância de cada critério e subcritério a partir de uma comparação par a par. Assim, neste processo são calculadas as matrizes de comparação, que para esse estudo foram trinta e duas: as primeiras oito matrizes foram compostas pelas três dimensões, e as outras vinte e quatro compostas dos subcritérios de cada dimensão.

Assim, a escala usada para capturar a imprecisão desta comparação, pareada de critérios e subcritérios é a escala *Fuzzified Saaty's 9-point scale* (Saaty, 1991), adotando os conjuntos da função de pertinência de “*Triangular Fuzzy Number*” (TFN).

Pelo julgamento dos especialistas e com os termos linguísticos escolhidos, serão obtidas as matrizes de importância em ambiente *fuzzy*, considerando-se um intervalo (suporte), a função de pertinência estabelecida e seu grau de pertinência e não mais valores reais fixos (*crisp*), como comumente praticado no método AHP não *fuzzy*.

A Tabela 27 apresenta os termos linguísticos, da variável linguística, adotados e seus respectivos números *fuzzy* triangulares.

Tabela 27 - Termos linguísticos adotados e seus respectivos números *fuzzy* triangulares

comparação da matriz *crisp* (valores reais fixos) A é consistente, significa que a matriz de comparação *fuzzy* \tilde{A} também é consistente.

A Razão de Consistência (RC) é usada para estimar a consistência das comparações pareadas e pode ser expressa pela Equação (2):

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

Onde o índice de consistência é obtido a partir da seguinte expressão:

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

O parâmetro IC representa o maior autovalor e o índice de consistência aleatório (IR) é mostrado na Tabela 28, sendo n o tamanho da matriz.

Tabela 28 - Índice de consistência aleatória (IR)

Tamanho de n	1	2	3	4	5	6	7	8
IR	0	0	0,52	0,89	1,11	1,25	1,35	1,40

Fonte: (Saaty, 1991)

Como regra comum, quando $RC \leq 0,10$, a consistência é aceita. Se IC não for aceito, é necessário revisar a matriz de comparação, ou seja, retornar à Etapa 2. No caso de aceito, os pesos poderão ser obtidos.

5.4.4.

Etapa 4: Obtenção dos pesos dos critério e subcritérios *fuzzy*-AHP.

Para obter os pesos dos critérios e subcritérios *fuzzy*-AHP é utilizado o método da média geométrica. Dada a matriz de comparação *fuzzy* \tilde{A} , o cálculo dos pesos se dá conforme mostra-se nas seguintes expressões:

$$\tilde{a}_i = \left(\prod_{j=1}^3 \tilde{a}_{ij} \right)^{\frac{1}{3}} = (\tilde{a}_{i1} \cdot \tilde{a}_{i2} \cdot \tilde{a}_{i3})^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

$$\tilde{w}_i = \frac{\tilde{a}_i}{\sum_{i=1}^3 \tilde{a}_i} \quad (5)$$

$$\tilde{W}_i = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \dots, \tilde{w}_n] \quad (6)$$

5.5. Descrição da fase I: *Fuzzy*-TOPSIS

A seguir, descrevem-se a seguir as três etapas da Fase II do modelo.

5.5.1. Etapa 5: Criação de matrizes *fuzzy* de avaliação com uso do conjunto de termos linguísticos *fuzzy*

Com os pesos calculados na última etapa da Fase I, pode-se iniciar a fase *fuzzy*-TOPSIS. Nesta fase, os valores de cada critério e subcritério são fornecidos pelos tomadores de decisão, no processo de avaliação de cada tecnologia. Para esta classificação é comumente usada a Escala Likert de cinco pontos. Nesta escala, cada ponto representa um nível de maturidade, e conseqüentemente, cada nível recebe um valor numérico triangular *fuzzy*.

A Tabela 29 apresenta a descrição dos termos linguísticos e seus respectivos valores numéricos para os critérios. O valor numérico *fuzzy* foi considerado com o intuito de ampliar a incerteza dentro dos triângulos dos termos centrais, termos esses onde podem aparecer as maiores incertezas no momento de resposta dos especialistas (Trindade, 2016).

Tabela 29 - Termos linguísticos para avaliação

Descrição	Nível de maturidade	Valor numérico <i>fuzzy</i>
Muito baixo (MB)	1	(1; 1; 2)
Baixo (MB)	2	(1; 2; 3,5)
Médio (M)	3	(1,5; 3; 4,5)
Alto (A)	4	(2,5; 4; 5)
Muito Alto (MA)	5	(4; 5; 5)

Fonte: Adaptado de (Trindade, 2016)

Uma vez computada cada nota atribuída pelos especialistas na avaliação das tecnologias, os valores são convertidos para números triangulares *fuzzy*. A partir dos termos linguísticos e respectivos valores *fuzzy*, a matriz de decisão \tilde{D} é construída, de acordo com o exemplo a seguir.

$$\tilde{D} = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad \therefore \quad i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

Onde A_m são as alternativas e \tilde{x}_{mn} são os valores apontados pelos tomadores de decisão. A partir da matriz original, gera-se a matriz de decisão *fuzzy* normalizada \tilde{R}_{ij} , por meio de padronização linear.

$$\tilde{R}_{ij} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n} \quad \therefore \quad i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

Onde,

$$\tilde{r}_{ij} = (\tilde{r}_{ij}^l, \tilde{r}_{ij}^m, \tilde{r}_{ij}^u) = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^+}, \frac{b_{ij}}{c_j^+}, \frac{c_{ij}}{c_j^+} \right) \quad \therefore \quad i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$c_j^+ = \max_i c_{ij} \quad (10)$$

Uma vez construída a matriz padronizada, os pesos encontrados no método *fuzzy* são aplicados e formam uma nova matriz \tilde{V} . Ao considerar os pesos dos critérios e subcritérios, chega-se ao *Peso Fuzzy Total*, que é determinado a partir da aplicação das seguintes equações:

$$W_{Total} = W_{Critério} \times W_{Subcritério} \quad (11)$$

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad \therefore \quad i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

Onde,

$$\tilde{v}_{ij} = (\tilde{v}_{ij}^l, \tilde{v}_{ij}^m, \tilde{v}_{ij}^u) = w_j \otimes \tilde{r}_{ij} = (w_j \tilde{r}_{ij}^l, w_j \tilde{r}_{ij}^m, w_j \tilde{r}_{ij}^u) \quad (13)$$

5.5.2.

Etapa 6: Definição da solução ideal positiva e negativa (FPIS e FNIS) e definição da distância para FPIS (D+) e para FNIS (D-)

Nesta etapa, a distância euclidiana é calculada, considerando os valores normalizados *fuzzy* encontrados na etapa 5. A seguir, define-se a solução ideal *fuzzy* positiva (FPIS, A^+) e negativa (FNIS, A^-), conforme as seguintes expressões:

$$A^+ = (\tilde{v}_1^+, \tilde{v}_2^+, \dots, \tilde{v}_m^+) \quad \therefore \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_m^-) \quad \therefore \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

Logo, as distâncias euclidianas são somadas e dois vetores D^+ e D^- são estabelecidos.

$$D^+ = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^+) , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (16)$$

$$D^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-) , \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

$$d(\tilde{X}, \tilde{Z}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(l_X - l_Z)^2 + (m_X - m_Z)^2 + (u_X - u_Z)^2]} \quad (18)$$

5.5.3.

Etapa 7: Determinação da proximidade relativa do valor ideal

Os coeficientes de proximidade são mensurados com base nas distâncias positiva e negativa, como descrito na etapa anterior. Os coeficientes de proximidade (CC_i) são a proximidade relativa da solução ideal *fuzzy* positiva e negativa e podem ser calculados pela seguinte equação:

$$CC_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (19)$$

Uma vez calculados, os coeficientes encontram-se em uma mesma base para todas as alternativas. Assim, pode ser realizada a ordenação decrescente das estratégias de eficiência energética proposta neste trabalho.

6

Resultados da aplicação do Modelo *Fuzzy-AHP-TOPSIS* para a avaliação de ações estratégicas de eficiência energética

Este capítulo consolida os resultados da pesquisa e inicia contextualizando a descrição da coleta de dados, análise da informação e entrevistas com especialistas do setor energético. Na sequência, levando em consideração o julgamento crítico dos especialistas, apresentam-se os principais resultados obtidos por meio da aplicação do modelo *Fuzzy-AHP-TOPSIS* para a avaliação de ações estratégicas de eficiência energética, que julgam-se relevantes na indústria de papel e celulose no Brasil.

Ao final do capítulo discutem-se os resultados obtidos para os quatro processos (papel, química da celulose, mecânica da celulose, papel reciclado) e as quatro tecnologias transversais avaliadas (bombas, ventilação, refrigeração e iluminação).

6.1.

Coleta de dados e entrevista com especialistas

Nesta fase da pesquisa (coleta de dados) foi realizado, com acompanhamento dos orientadores da Tese de Doutorado, assim como a participação de especialistas do setor energético, um instrumento de pesquisa que foi submetido à avaliação, discussão e julgamento de 10 especialistas com amplo conhecimento e experiência na área de eficiência energética. O painel de especialista foi estruturado de forma híbrida por 5 notáveis da indústria nacional e 5 acadêmicos.

O processo de coleta e avaliação dos dados foi concebido a partir da aplicação de quatro etapas: (i) extensa pesquisa documental e bibliográfica na literatura para o estudo e seleção das dimensões (critérios) e temas (subcritérios) mais relevantes relacionados com o estudo proposto; (ii) análise, discussão e definição dos temas e dimensões junto com os orientadores e especialistas do setor energético brasileiro, assim como da análises multicritério; (iii) elaboração do instrumento de pesquisa e (iv) entrevistas com os especialistas para avaliar os critérios e subcritérios e julgamento das alternativas de eficiência energética.

O instrumento de pesquisa considerou 19 temas sobre efficientização energética, levando em conta as características inerentes dos distintos Processos e CCT, assim como as dimensões de análises abordados no estudo de doutoramento.

Em geral, os temas foram agrupados em quatro dimensões: Econômico, Ambiental, Técnico e Social. O Quadro 9 sintetiza os temas e dimensões considerados na pesquisa. O Anexo A, apresenta uma descrição detalhada das características relacionadas aos temas de cada dimensão.

Quadro 9 - Estrutura hierárquica do instrumento de pesquisa

DIMENSÃO (CRITÉRIO)	TEMAS (SUBCRITÉRIOS)
Econômico	Custo do investimento inicial Custo da energia consumida Custo da operação e manutenção Custo da energia consumida e exergia gerada
Ambiental	Emissões de GEE Uso dos recursos naturais Proteção dos ecossistemas Consumo de água Geração de resíduos Impacto positivo na qualidade ambiental interna
Técnico	Qualidade da tecnologia Simplicidade de seleção e implementação Confiabilidade da tecnologia Tempo de vida útil Disponibilidade da tecnologia Conforto térmico
Social	Aceitação social da tecnologia Segurança ocupacional Geração de emprego

Para a avaliação das alternativas, adotou-se uma escala Likert de 5 pontos para cada questão, com o propósito que os especialistas avaliem o nível de maturidade em relação a cada um dos 19 temas. Os níveis de maturidade considerados foram: 1 – Muito baixa; 2 - Baixa; 3 - Moderada; 4 - Alta; 5 – Muito alta. Os resultados obtidos foram convertidos para a escala Likert com a finalidade de padronizar a estrutura de avaliação. Com isto, as informações foram formatadas para compor e aplicar o modelo de avaliação multicritério de apoio à decisão, cujos resultados são apresentados a seguir.

6.2.

Avaliação dos processos do subsetor papel e celulose

A partir da pesquisa bibliográfica, foram identificados os atributos (critérios e subcritérios) para os processos mapeados no subsetor de papel e celulose. Assim, esta seção mostra o resultado dos pesos dos critérios e subcritérios quando aplicada a primeira fase da metodologia, *i.e.*: *Fuzzy-AHP*. Nessa etapa, procedeu-se ao preenchimento das matrizes pareadas a partir da opinião dos especialistas. A seguir, as Tabelas 31 a 34 apresentam os resultados das matrizes *fuzzy* obtidas:

Tabela 30 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Critérios

Critérios	E			A			T		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E	(1 ; 1 ; 1)	(4 ; 5 ; 6)	(4 ; 5 ; 6)						
A	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(1 ; 1 ; 1)	(1 ; 2 ; 3)						
T	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(1 ; 1 ; 1)						

E: Econômico; A: Ambiental; T: Técnico

Tabela 31 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Econômico

Subcritérios	E1			E2			E3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1 ; 1 ; 1)	(3 ; 4 ; 5)	(4 ; 5 ; 6)						
E2	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)						
E3	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 32 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Técnico

Subcritérios	T1			T2			T3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
T1	(1 ; 1 ; 1)	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1/7 ; 1/6 ; 1/5)						
T2	(3 ; 4 ; 5)	(1 ; 1 ; 1)	(1/3 ; 1/2 ; 1)						
T3	(5 ; 6 ; 7)	(1 ; 2 ; 3)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 33 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Ambiental

Subcritérios	A1			A2			A3			A4		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	(1 ; 1 ; 1)	(3 ; 4 ; 5)	(2 ; 3 ; 4)	(6 ; 7 ; 8)								
A2	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1 ; 1 ; 1)	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(3 ; 4 ; 5)								
A3	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 2 ; 3)	(1 ; 1 ; 1)	(3 ; 4 ; 5)								
A4	(1/8 ; 1/7 ; 1/6)	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1 ; 1 ; 1)								

Quando a matriz *crisp* A é consistente, significa que a matriz de comparação *fuzzy* também é consistente (Patil e Kant, 2014). Assim, um algoritmo foi desenvolvido em Microsoft Excel e, a partir da avaliação das matrizes *crisp*, foi possível realizar uma análise de consistência das matrizes de comparação pareadas *fuzzy*. A Tabela 34 sintetiza os resultados do Índice de Consistência (IC), o Índice de consistência aleatório (IR) e da Razão de Consistência (RC), para as matrizes de critérios e subcritérios.

Tabela 34 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios

Dimensão	IC	IR	RC	Decisão: $RC \leq 0,10$
Critérios	0,044	0,660	0,0666	OK
Subcritério: Econômico	0,066	0,660	0,0419	OK
Subcritério: Técnico	0,006	0,660	0,0095	OK
Subcritério: Ambiental	0,046	0,990	0,0468	OK

Pode ser observado na tabela acima que todas as matrizes atingem a condição de consistência, pois o valor RC calculado é menor que 0,10 para todas as situações avaliadas.

Uma vez confirmada a consistência de todas as matrizes, foram obtidos os pesos dos critérios e subcritérios pelo método FAHP. Os pesos foram determinados pelo método da média geométrica, conforme descrito no capítulo anterior. As tabelas 36 e 37 apresentam os pesos para os critérios e subcritérios, respectivamente.

Tabela 35 – Pesos dos critérios pelo método FAHP

Critérios	PESO		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	(0,8399 ; 0,9747 ; 1,1006)		
Ambiental	(0,1834 ; 0,2456 ; 0,3029)		
Técnico	(0,1272 ; 0,1547 ; 0,2100)		

Tabela 36 – Pesos dos subcritérios pelo método FAHP

CRITÉRIO	SUBCRITÉRIOS		PESO		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	E1	Custo do investimento inicial	(0,6667 ; 0,8221 ; 0,9615)		
	E2	Custo da energia consumida	(0,2646 ; 0,3333 ; 0,4200)		
	E3	Custo da operação e manutenção	(0,1156 ; 0,1352 ; 0,1667)		
Técnico	T1	Qualidade da tecnologia	(0,1019 ; 0,1156 ; 0,1352)		
	T2	Flexibilidade e simplicidade de implementação	(0,3333 ; 0,4200 ; 0,5700)		
	T3	Confiabilidade da tecnologia	(0,5700 ; 0,7631 ; 0,9196)		
Ambiental	A1	Emissões de gases do efeito estufa (GEE)	(0,6057 ; 0,7631 ; 0,9048)		
	A2	Uso dos recursos naturais	(0,1352 ; 0,1667 ; 0,2311)		
	A3	Proteção da biodiversidade e ecossistemas	(0,2100 ; 0,2912 ; 0,3816)		
	A4	Consumo de água	(0,0886 ; 0,1025 ; 0,1230)		

Com os pesos dos critérios e subcritérios definidos, iniciou-se a Fase II: *Fuzzy-TOPSIS*. Nesta segunda fase foram elaboradas as matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos *fuzzy*. As seções subsequentes apresentam as matrizes de decisão *fuzzy*, assim como um ranking seletivo das principais alternativas de efficientização energética para cada processo à luz da opinião dos especialistas.

6.2.1.

Processo I: Papel

A partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão \tilde{D} , conforme mostra-se na Tabela 37.

Tabela 37 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas do Processo I (Papel) versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1,8 ; 3,0 ; 4,3)	(2,5 ; 3,5 ; 4,3)	(1,8 ; 3,0 ; 4,3)						
E2	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
E3	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)						
T1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
T2	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
T3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A1	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A2	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)						
A3	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
A4	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						

Alternativa 1: Refinadores eficientes; **Alternativa 2:** Optimização dos refinadores; **Alternativa 3:** Melhoramento na química de fibras

Logo, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme mostra-se na Tabela 38.

Tabela 38 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,5600 ; 0,8012 ; 1,0583)		
E2	(0,2222 ; 0,3249 ; 0,4622)		
E3	(0,0971 ; 0,1317 ; 0,1834)		
T1	(0,0130 ; 0,0179 ; 0,0284)		
T2	(0,0424 ; 0,0650 ; 0,1197)		
T3	(0,0725 ; 0,1181 ; 0,1931)		
A1	(0,1111 ; 0,1874 ; 0,2740)		
A2	(0,0248 ; 0,0409 ; 0,0700)		
A3	(0,0385 ; 0,0715 ; 0,1156)		
A4	(0,0163 ; 0,0252 ; 0,0372)		

A seguir, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada. Para isto, aplicou-se a Equação 8 em conjunto com a Equação 12 e a matriz normalizada ponderada \tilde{V} foi calculada. A Tabela 39 apresenta os resultados.

Tabela 39 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,2 ; 0,5 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)						
E2	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)						
E3	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)						
T1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)						
T2	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)						
T3	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)						
A1	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,5 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)						
A2	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)						
A3	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)						
A4	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)						

Alternativa 1: Refinadores eficientes; **Alternativa 2:** Otimização dos refinadores; **Alternativa 3:** Melhoramento na química de fibras

A partir dos resultados da matriz normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP foi possível determinar a solução ideal *fuzzy* positiva e negativa (FPIS e FNIS), considerando os valores máximos e mínimos de cada subcritério.

A continuação, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- , fazendo uso das equações 14 e 15, respectivamente. A Tabela 40 sintetiza os resultados.

Tabela 40 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritérios	Distância total positiva (A^+)			Distância total negativa (A^-)		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
E1	0,41	0,35	0,42	0,40	0,39	0,37
E2	0,20	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20
E3	0,08	0,09	0,09	0,09	0,07	0,07
T1	0,04	0,05	0,04	0,06	0,05	0,06
T2	0,26	0,23	0,30	0,26	0,29	0,25
T3	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
A1	0,39	0,44	0,39	0,44	0,39	0,44
A2	0,11	0,11	0,13	0,12	0,12	0,10
A3	0,16	0,20	0,16	0,20	0,18	0,20
A4	0,20	0,19	0,19	0,17	0,19	0,19

Na sequência, estimou-se a proximidade relativa à solução ideal *fuzzy*. Este valor foi calculado a partir das distâncias totais positivas e negativas, cuja representação é dada pelo coeficiente de proximidade (CCi). Este parâmetro representa o índice de desempenho de cada alternativa a partir da avaliação dos três critérios: econômico, técnico e ambiental.

Tabela 41 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CCi
	D^+	D^-	
Alternativa 1: Refinadores eficientes	2,2602	2,3512	0,5099
Alternativa 2: Otimização dos refinadores	2,2551	2,3096	0,5060
Alternativa 3: Melhoramento na química de fibras	2,3132	2,2994	0,4985

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Refinadores eficientes (Alternativa 1), Otimização dos refinadores (Alternativa 2) e Melhoramento na química de fibras (Alternativa 3). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

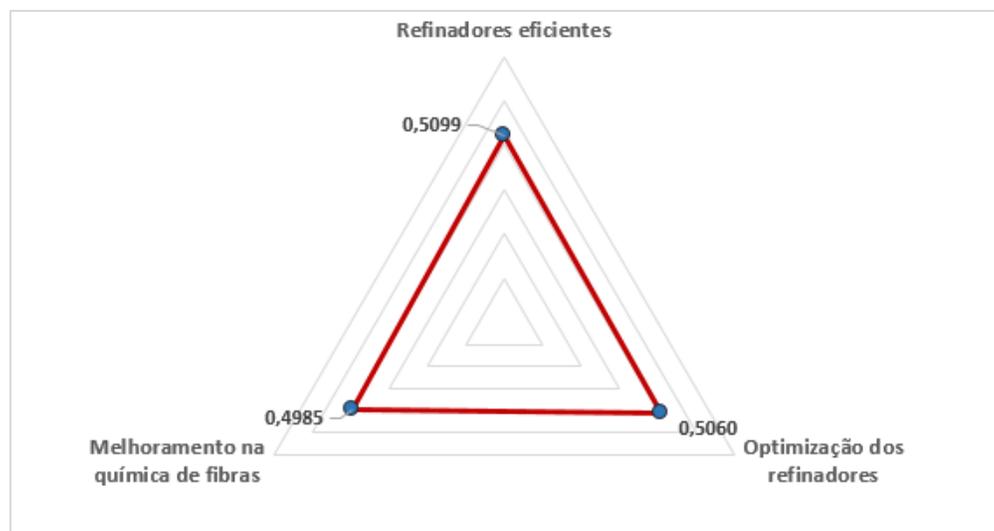


Figura 30 - Gráfico radar com o mapeamento do *CCI* para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que os índices das alternativas 1 e 2, Refinadores eficientes e Optimização dos refinadores, respectivamente, encontram-se acima da média aritmética (0,5048). Já a alternativa 3, encontra-se abaixo do primeiro quartil (0,5022).

6.2.2. Processo II: Química da celulose

Similar ao procedimento mostrado na seção anterior (6.2.1), este tópico apresenta os resultados da fase *Fuzzy-TOPSIS* para o processo II: Química da celulose. Assim, a partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão \tilde{D} , conforme mostra-se na Tabela 42.

Tabela 42 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas do Processo II versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,8 ; 3,0 ; 4,3)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)						
E2	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
E3	(1,8 ; 3,0 ; 4,3)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
T1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
T2	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)						
T3	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
A1	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
A2	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						

A3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)
A4	(1,8 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)

Alternativa 1: Gaseificação de licor negro; **Alternativa 2:** Refinadores eficientes; **Alternativa 3:** Análise de pressão

Logo, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme mostra-se na Tabela 43.

Tabela 43 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,6410 ; 0,8819 ; 1,1400)		
E2	(0,2063 ; 0,2952 ; 0,4038)		
E3	(0,0971 ; 0,1317 ; 0,1834)		
T1	(0,0130 ; 0,0179 ; 0,0284)		
T2	(0,0424 ; 0,0650 ; 0,1197)		
T3	(0,0725 ; 0,1181 ; 0,1931)		
A1	(0,1111 ; 0,1874 ; 0,2740)		
A2	(0,0248 ; 0,0409 ; 0,0700)		
A3	(0,0385 ; 0,0715 ; 0,1156)		
A4	(0,0163 ; 0,0252 ; 0,0372)		

A seguir, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada. Para isto, aplicou-se a Equação 8 em conjunto com a Equação 12 e a matriz normalizada ponderada \tilde{V} foi calculada. A Tabela 44 apresenta os resultados.

Tabela 44 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

Subcritérios	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,2 ; 0,6 ; 1,0)	(0,3 ; 0,5 ; 0,9)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)						
E2	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)						
E3	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)						
T1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)						
T2	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,3 ; 0,4 ; 0,6)						
T3	(0,2 ; 0,5 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,4 ; 0,7 ; 0,9)						
A1	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,4 ; 0,7 ; 0,9)						
A2	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)						
A3	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)						
A4	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)						

Alternativa 1: Gaseificação de licor negro; **Alternativa 2:** Refinadores eficientes; **Alternativa 3:** Análise de pressão

A partir dos resultados da matriz normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP foi possível determinar a solução ideal *fuzzy* positiva e negativa (FPIS e FNIS), considerando os valores máximos e mínimos de cada subcritério.

A continuação, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- , fazendo uso das equações 14 e 15, respectivamente. A Tabela 45 sintetiza os resultados.

Tabela 45 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritérios	Distância total positiva (A^+)			Distância total negativa (A^-)		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
E1	0,49	0,49	0,36	0,47	0,41	0,52
E2	0,17	0,16	0,13	0,17	0,17	0,18
E3	0,09	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
T1	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06
T2	0,30	0,26	0,20	0,25	0,26	0,31
T3	0,46	0,41	0,34	0,41	0,46	0,49
A1	0,39	0,39	0,32	0,39	0,39	0,42
A2	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,10
A3	0,18	0,16	0,22	0,21	0,22	0,17
A4	0,20	0,20	0,18	0,18	0,18	0,20

Na sequência foi estimado o coeficiente de proximidade (CCi):

Tabela 46 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CCi
	D^+	D^-	
Alternativa 1: Gaseificação de licor negro	2,4325	2,3273	0,4889
Alternativa 2: Refinadores eficientes	2,2950	2,3479	0,5057
Alternativa 3: Análise de pressão	2,0086	2,5303	0,5575

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Análise de pressão (Alternativa 3), Refinadores eficientes (Alternativa 2) e Gaseificação de licor negro (Alternativa 1). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

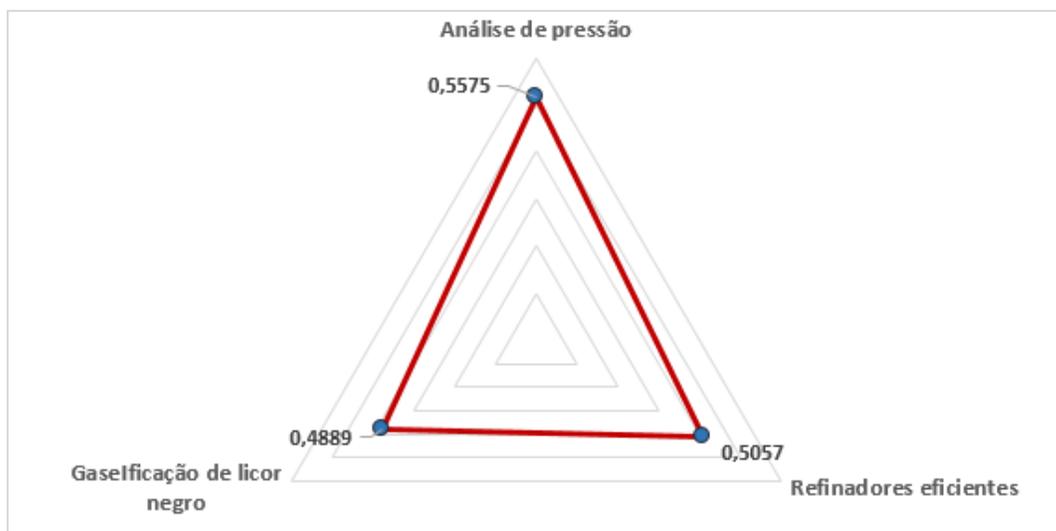


Figura 31 - Gráfico radar com o mapeamento do CCI para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que unicamente a alternativa 3, Análise de Pressão, encontra-se acima da média aritmética (0,5174). Já, a alternativa 1, Gaseificação de licor negro, corresponde, exatamente ao primeiro quartil (0,4889).

6.2.3. Processo III: Mecânica da celulose

Esta seção mostra os resultados consolidados para o Processo III (Mecânica da celulose). A partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão \tilde{D} , conforme mostra-se na Tabela 47.

Tabela 47 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas do Processo III versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
E2	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
E3	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,8 ; 3,0 ; 4,3)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
T1	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
T2	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
T3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A2	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A3	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A4	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(1,8 ; 3,0 ; 4,3)						

Alternativa 1: Eficiência elevada (GW); **Alternativa 2:** Pré-tratamento enzimático; **Alternativa 3:** Refinadores eficientes (TMP)

Logo, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme mostra-se na Tabela 48.

Tabela 48 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,6410	; 0,8819	; 1,1400)
E2	(0,2063	; 0,2952	; 0,4038)
E3	(0,0971	; 0,1317	; 0,1834)
T1	(0,0130	; 0,0179	; 0,0284)
T2	(0,0424	; 0,0650	; 0,1197)
T3	(0,0725	; 0,1181	; 0,1931)
A1	(0,1111	; 0,1874	; 0,2740)
A2	(0,0248	; 0,0409	; 0,0700)
A3	(0,0385	; 0,0715	; 0,1156)
A4	(0,0163	; 0,0252	; 0,0372)

A seguir, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada. Para isto, aplicou-se a Equação 8 em conjunto com a Equação 12 e a matriz normalizada ponderada \tilde{V} foi calculada. A Tabela 49 apresenta os resultados.

Tabela 49 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

Subcritérios	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,4	; 0,8	; 1,0)	(0,4	; 0,8	; 1,0)	(0,3	; 0,6	; 1,0)
E2	(0,1	; 0,2	; 0,4)	(0,1	; 0,2	; 0,4)	(0,1	; 0,2	; 0,3)
E3	(0,0	; 0,1	; 0,2)	(0,0	; 0,1	; 0,1)	(0,1	; 0,1	; 0,2)
T1	(0,1	; 0,1	; 0,1)	(0,1	; 0,1	; 0,1)	(0,0	; 0,1	; 0,1)
T2	(0,2	; 0,3	; 0,6)	(0,2	; 0,4	; 0,6)	(0,1	; 0,3	; 0,5)
T3	(0,3	; 0,6	; 0,9)	(0,3	; 0,6	; 0,9)	(0,3	; 0,6	; 0,9)
A1	(0,4	; 0,7	; 0,9)	(0,2	; 0,5	; 0,9)	(0,3	; 0,6	; 0,9)
A2	(0,1	; 0,1	; 0,2)	(0,1	; 0,1	; 0,2)	(0,1	; 0,1	; 0,2)
A3	(0,1	; 0,2	; 0,4)	(0,1	; 0,2	; 0,4)	(0,1	; 0,2	; 0,4)
A4	(0,1	; 0,2	; 0,4)	(0,1	; 0,2	; 0,4)	(0,1	; 0,2	; 0,3)

Alternativa 1: Eficiência elevada (GW); **Alternativa 2:** Pré-tratamento enzimático; **Alternativa 3:** Refinadores eficientes (TMP)

A continuação, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- , fazendo uso das equações 14 e 15, respectivamente. A Tabela 50 sintetiza os resultados.

Tabela 50 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritérios	Distância total positiva (A ⁺)			Distância total negativa (A ⁻)		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
E1	0,38	0,38	0,48	0,50	0,50	0,44
E2	0,17	0,17	0,18	0,17	0,17	0,16
E3	0,09	0,09	0,07	0,08	0,07	0,09
T1	0,05	0,04	0,06	0,06	0,07	0,06
T2	0,27	0,23	0,30	0,28	0,29	0,25
T3	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
A1	0,32	0,44	0,39	0,47	0,39	0,44
A2	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10
A3	0,20	0,20	0,18	0,18	0,18	0,19
A4	0,18	0,20	0,22	0,20	0,18	0,16

A seguir, calculou-se o coeficiente de proximidade (*CCi*).

Tabela 51 – Cálculo do coeficiente de proximidade (*CCi*)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		<i>CCi</i>
	D ⁺	D ⁻	
Alternativa 1: Eficiência elevada (GW)	2,1834	2,4498	0,5287
Alternativa 2: Pré-tratamento enzimático	2,2704	2,3718	0,5109
Alternativa 3: Refinadores eficientes (TMP)	2,3973	2,2908	0,4886

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (*CCi*), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Eficiência elevada (GW) (Alternativa 1), Pré-tratamento enzimático (Alternativa 2) e Refinadores eficientes (TMP) (Alternativa 3). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o *CCi* para cada alternativa proposta.

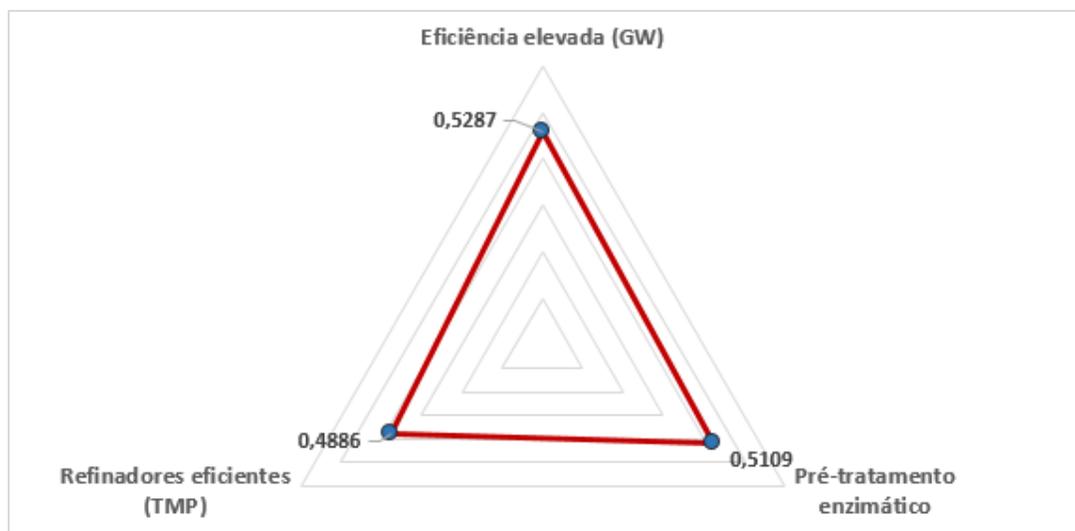


Figura 32 - Gráfico radar com o mapeamento do CCI para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que os índices das alternativas 1 e 2, Eficiência elevada (GW) e Pré-tratamento enzimático, respectivamente, encontram-se acima da média aritmética (0,5094). Já a alternativa 3, Refinadores eficientes (TMP), corresponde, exatamente, ao terceiro quartil (0,4886).

6.2.4. Processo IV: Papel reciclado

Finalmente, para o Processo IV, Papel reciclado, foi concebido um procedimento similar às seções anteriores. Assim, a partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão \tilde{D} , conforme mostra-se na Tabela 52.

Tabela 52 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas do Processo IV versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
E2	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
E3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
T1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)						
T2	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
T3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						
A1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)						
A2	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)						

A3	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)
A4	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)

Alternativa 1: Polpação de alta consistência; **Alternativa 2:** Rastreamento eficiente; **Alternativa 3:** Dispensor eficiente

Logo, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme mostra-se na Tabela 54.

Tabela 53 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,6410 ; 0,8819 ; 1,1400)		
E2	(0,2063 ; 0,2952 ; 0,4038)		
E3	(0,0971 ; 0,1317 ; 0,1834)		
T1	(0,0130 ; 0,0179 ; 0,0284)		
T2	(0,0424 ; 0,0650 ; 0,1197)		
T3	(0,0725 ; 0,1181 ; 0,1931)		
A1	(0,1111 ; 0,1874 ; 0,2740)		
A2	(0,0248 ; 0,0409 ; 0,0700)		
A3	(0,0385 ; 0,0715 ; 0,1156)		
A4	(0,0163 ; 0,0252 ; 0,0372)		

A seguir, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada. Para isto, aplicou-se a Equação 8 em conjunto com a Equação 12 e a matriz normalizada ponderada \tilde{V} foi calculada. A Tabela 54 apresenta os resultados.

Tabela 54 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

Subcritérios	Alternativa 1			Alternativa 2			Alternativa 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,5 ; 0,8 ; 1,0)						
E2	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)						
E3	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)						
T1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)						
T2	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,3 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)						
T3	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)						
A1	(0,4 ; 0,7 ; 0,9)	(0,4 ; 0,7 ; 0,9)	(0,4 ; 0,7 ; 0,9)						
A2	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)						
A3	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)						
A4	(0,1 ; 0,1 ; 0,3)	(0,1 ; 0,1 ; 0,3)	(0,1 ; 0,1 ; 0,3)						

Alternativa 1: Polpação de alta consistência; **Alternativa 2:** Rastreamento eficiente; **Alternativa 3:** Dispensor eficiente

Foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- , fazendo uso das equações 14 e 15, respectivamente. A Tabela 55 sintetiza os resultados.

Tabela 55 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritérios	Distância total positiva (A^+)			Distância total negativa (A^-)		
	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
E1	0,40	0,40	0,34	0,37	0,37	0,42
E2	0,18	0,16	0,18	0,16	0,18	0,16
E3	0,07	0,08	0,07	0,08	0,07	0,08
T1	0,04	0,05	0,06	0,07	0,06	0,06
T2	0,23	0,20	0,23	0,22	0,24	0,22
T3	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
A1	0,32	0,32	0,32	0,34	0,34	0,34
A2	0,12	0,11	0,11	0,10	0,11	0,11
A3	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18
A4	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16

O coeficiente de proximidade (CCi) foi calculado, conforme mostra-se na Tabela 57:

Tabela 56 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CCi
	D^+	D^-	
Alternativa 1: Polpação de alta consistência	2,1325	2,0834	0,4942
Alternativa 2: Rastreamento eficiente	2,0851	2,1114	0,5031
Alternativa 3: Dispensor eficiente	2,0787	2,1366	0,5069

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Dispensor eficiente (Alternativa 3), Rastreamento eficiente (Alternativa 2) e Polpação de alta consistência (Alternativa 1). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

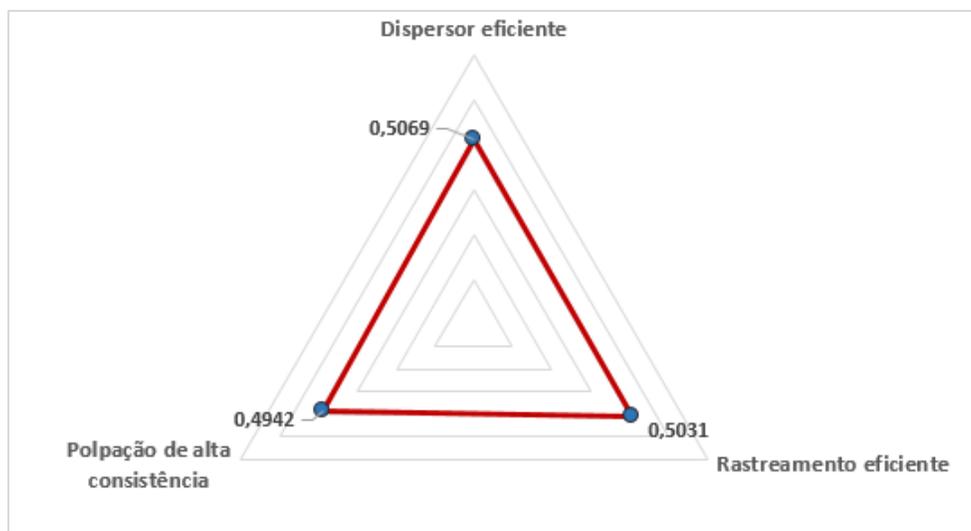


Figura 33 - Gráfico radar com o mapeamento do *CCI* para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que as alternativas 3 e 2, encontram-se acima da média aritmética (0,5014). Já, a alternativa 1, Polpação de alta consistência, corresponde, exatamente ao primeiro quartil (0,4942).

6.3. Avaliação das CCT: Bombas

Seguindo com a aplicação do método multicritério, esta seção mostra os resultados da avaliação das tecnologias transversais (CCT), especificamente, para o caso das bombas. Em uma primeira etapa, aplicou-se a fase *Fuzzy-AHP*. Assim, procedeu-se ao preenchimento das matrizes pareadas a partir da opinião dos especialistas. A seguir, as Tabela 57 a Tabela 60 apresentam os resultados das matrizes *fuzzy* obtidas:

Tabela 57 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Critérios

Critérios	E			S			T		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E	(1 ; 1 ; 1)	(4 ; 5 ; 6)	(2 ; 3 ; 4)						
S	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(1 ; 1 ; 1)	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)						
T	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(3 ; 4 ; 5)	(1 ; 1 ; 1)						

E: Econômico; S: Social; T: Técnico

Tabela 58 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Econômico

Subcritérios	E1			E2			E3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1 ; 1 ; 1)	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1/8 ; 1/7 ; 1/6)						
E2	(3 ; 4 ; 5)	(1 ; 1 ; 1)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)						
E3	(6 ; 7 ; 8)	(2 ; 3 ; 4)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 59 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Social

Subcritérios	S1			S2			S3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
S1	(1 ; 1 ; 1)	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)						
S2	(7 ; 8 ; 9)	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)						
S3	(4 ; 5 ; 6)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 60 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Técnico

Subcritérios	T1			T2			T3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
T1	(1 ; 1 ; 1)	(8 ; 9 ; 9)	(1 ; 2 ; 3)						
T2	(1/9 ; 1/9 ; 1/8)	(1 ; 1 ; 1)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)						
T3	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)	(1 ; 1 ; 1)						

A Tabela 61 sintetiza os resultados do Índice de Consistência (IC), o Índice de consistência aleatório (IR) e da Razão de Consistência (RC), para as matrizes de critérios e subcritérios.

Tabela 61 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios

Dimensão	IC	IR	RC	Decisão: RC ≤ 0,10
Critérios	0,061	0,660	0,0923	OK
Subcritério: Econômico	0,024	0,660	0,0370	OK
Subcritério: Social	0,034	0,660	0,0509	OK
Subcritério: Técnico	0,014	0,660	0,0208	OK

Pode ser observado na tabela acima que todas as matrizes atingem a condição de consistência, pois o valor RC calculado é menor que 0,10 para todas as situações avaliadas. Uma vez confirmada a consistência de todas as matrizes foram obtidos os pesos dos critérios e subcritérios pelo método FAHP. Os pesos foram determinados pelo método da média geométrica, conforme descrito no capítulo anterior. As Tabelas 63 e 64 apresentam os pesos para os critérios e subcritérios, respectivamente.

Tabela 62 – Pesos dos critérios pelo método FAHP

Critérios	PESO		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	(0,6667 ; 0,8221 ; 0,9615)		
Social	(0,1073 ; 0,1228 ; 0,1456)		
Técnico	(0,3029 ; 0,3669 ; 0,4524)		

Tabela 63 – Pesos dos subcritérios pelo método FAHP

CRITÉRIO	SUBCRITÉRIOS		PESO		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	E1	Custo do investimento inicial	(0,0975 ; 0,1098 ; 0,1272)		
	E2	Custo da energia consumida e exergia gerada	(0,3029 ; 0,3669 ; 0,4524)		
	E3	Custo da operação e manutenção	(0,7631 ; 0,9196 ; 1,0583)		
Social	S1	Aceitação social da tecnologia	(0,0882 ; 0,0975 ; 0,1098)		
	S2	Segurança ocupacional	(0,8034 ; 0,9615 ; 1,1006)		
	S3	Geração de emprego	(0,3333 ; 0,3952 ; 0,4807)		
Técnico	T1	Tempo de vida útil	(0,6667 ; 0,8736 ; 1,0000)		
	T2	Simplicidade de seleção e implementação	(0,1010 ; 0,1111 ; 0,1323)		
	T3	Disponibilidade da tecnologia	(0,2912 ; 0,3816 ; 0,5291)		

Com os pesos dos critérios e subcritérios definidos, iniciou-se a Fase II: *Fuzzy-TOPSIS*. Nesta segunda fase, foram elaboradas as matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos *fuzzy*.

A partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} à luz da opinião dos especialistas, conforme mostra-se na Tabela 64. Logo, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme mostra-se na Tabela 65. Em seguida, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada (Tabela 66). Finalmente, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- (Tabela 67).

Tabela 64 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas para a CCT (bombas) versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3			ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6			
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>																
E1	(2,9 ; 3,8 ; 4,3)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,9 ; 4,0 ; 4,6)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,9 ; 4,0 ; 4,6)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)
E2	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(1,9 ; 3,0 ; 4,1)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)
E3	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(1,9 ; 2,8 ; 3,8)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)
S1	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(3,4 ; 4,5 ; 4,9)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(3,4 ; 4,5 ; 4,9)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)
S2	(2,9 ; 4,0 ; 4,6)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)
S3	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)
T1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)
T2	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)
T3	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)

Alternativa 1: Bombas de alta eficiência; **Alternativa 2:** Manutenção regular; **Alternativa 3:** Motores IE2; **Alternativa 4:** Motores IE3; **Alternativa 5:** Movimentação direta em vez de V-Belt; **Alternativa 6:** *Avoid oversizing*

Tabela 65 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,0650 ; 0,0902 ; 0,1223)		
E2	(0,2019 ; 0,3016 ; 0,4350)		
E3	(0,5088 ; 0,7560 ; 1,0175)		
S1	(0,0095 ; 0,0120 ; 0,0160)		
S2	(0,0862 ; 0,1181 ; 0,1602)		
S3	(0,0358 ; 0,0485 ; 0,0700)		
T1	(0,2019 ; 0,3205 ; 0,4524)		
T2	(0,0306 ; 0,0408 ; 0,0598)		
T3	(0,0882 ; 0,1400 ; 0,2394)		

Tabela 66 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3			ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>															
E1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)
E2	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)
E3	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,3 ; 0,5 ; 0,8)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,5 ; 0,8)	(0,3 ; 0,5 ; 0,8)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)
S1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)
S2	(0,5 ; 0,8 ; 1,0)	(0,6 ; 0,9 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,6 ; 0,9 ; 1,1)	(0,6 ; 0,9 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,1)	(0,4 ; 0,8 ; 1,1)	(0,4 ; 0,8 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)
S3	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)
T1	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)
T2	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)
T3	(0,1 ; 0,2 ; 0,5)	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,2 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)

Alternativa 1: Bombas de alta eficiência; **Alternativa 2:** Manutenção regular; **Alternativa 3:** Motores IE2; **Alternativa 4:** Motores IE3; **Alternativa 5:** Movimentação direta em vez de V-Belt; **Alternativa 6:** *Avoid oversizing*

Tabela 67 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritérios	Distância total positiva (A ⁺)						Distância total negativa (A ⁻)					
	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa	Alternativa
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
E1	0,05	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05
E2	0,17	0,24	0,21	0,19	0,25	0,23	0,25	0,17	0,23	0,24	0,19	0,20
E3	0,46	0,57	0,48	0,48	0,50	0,42	0,51	0,32	0,47	0,47	0,46	0,51
S1	0,04	0,04	0,04	0,03	0,05	0,05	0,06	0,05	0,06	0,06	0,04	0,05
S2	0,41	0,32	0,49	0,49	0,43	0,48	0,46	0,54	0,42	0,42	0,49	0,47
S3	0,26	0,23	0,26	0,26	0,28	0,24	0,22	0,23	0,22	0,22	0,19	0,25
T1	0,35	0,39	0,40	0,39	0,40	0,41	0,45	0,43	0,42	0,43	0,42	0,42
T2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
T3	0,28	0,24	0,28	0,27	0,28	0,31	0,24	0,27	0,25	0,25	0,25	0,20

Na sequência foi estimada a proximidade relativa à solução ideal *fuzzy*. Este valor foi calculado a partir das distâncias totais positivas e negativas, cuja representação é dada pelo coeficiente de proximidade (CCi). Este parâmetro representa o índice de desempenho de cada alternativa a partir da avaliação dos três critérios: econômico, social e técnico.

Tabela 68 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CCi
	D^+	D^-	
Alternativa 1: Bombas de alta eficiência	2,0567	2,2622	0,5238
Alternativa 2: Manutenção regular	2,1139	2,1223	0,5010
Alternativa 3: Motores IE2	2,2391	2,1586	0,4908
Alternativa 4: Motores IE3	2,1987	2,1726	0,4970
Alternativa 5: Movimentação direta em vez de V-Belt	2,2800	2,1401	0,4842
Alternativa 6: <i>Avoid oversizing</i>	2,2264	2,1983	0,4968

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Bombas de alta eficiência (Alternativa 1), Manutenção regular (Alternativa 2), Motores IE3 (Alternativa 4), *Avoid oversizing* (Alternativa 6), Motores IE2 (Alternativa 3) e Movimentação direta em vez de V-Belt (Alternativa 5). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

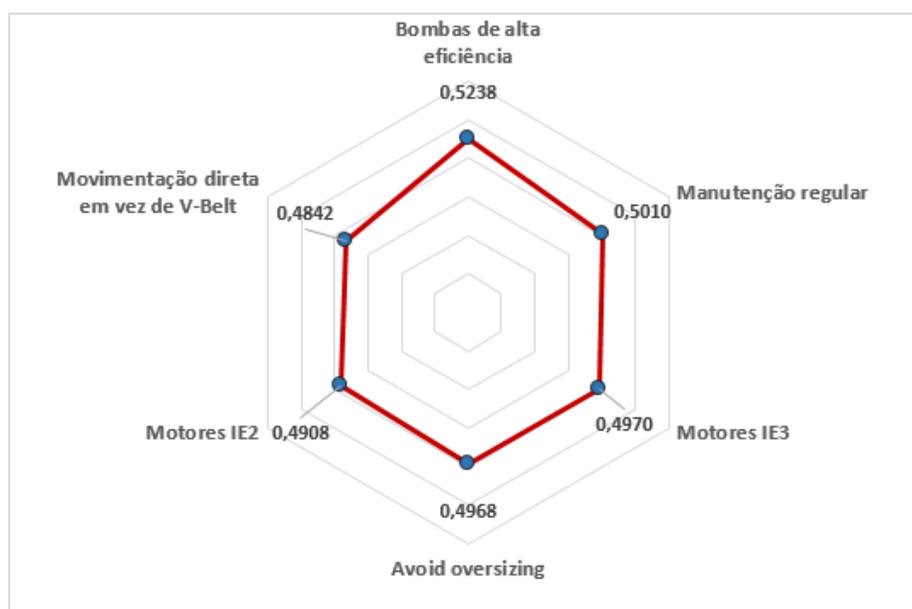


Figura 34 - Gráfico radar com o mapeamento do CCi para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que os índices das alternativas 1 e 2, Bombas de alta eficiência e Manutenção regular, respectivamente, encontram-se acima da média aritmética (0,5048). Já a alternativa 5, Movimentação direta em vez de V-Belt, encontra-se abaixo do primeiro quartil (0,4892).

6.4. Avaliação das CCT: Ventilação

De forma similar à seção 6.3, este novo tópico apresenta a aplicação do método multicritério par a tecnologia de ventilação. Em uma primeira etapa, aplicou-se a fase *Fuzzy*-AHP e foi realizado o preenchimento das matrizes pareadas a partir da opinião dos especialistas. As Tabelas 70 a 73 apresentam os resultados das matrizes *fuzzy* obtidas:

Tabela 69 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Critérios

Critérios	E			A			T		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E	(1 ; 1 ; 1)	(7 ; 8 ; 9)	(4 ; 5 ; 6)						
A	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)	(1 ; 1 ; 1)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)						
T	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(2 ; 3 ; 4)	(1 ; 1 ; 1)						

E: Econômico; A: Ambiental; T: Técnico

Tabela 70 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Econômico

Subcritérios	E1			E2			E3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1 ; 1 ; 1)	(1/9 ; 1/9 ; 1/8)	(0 ; 0 ; 1)						
E2	(8 ; 9 ; 9)	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)						
E3	(2 ; 3 ; 4)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 71 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Ambiental

Subcritérios	A1			A2			A3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	(1 ; 1 ; 1)	(8 ; 9 ; 9)	(1 ; 2 ; 3)						
A2	(1/9 ; 1/9 ; 1/8)	(1 ; 1 ; 1)	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)						
A3	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(7 ; 8 ; 9)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 72 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Técnico

Subcritérios	T1			T2			T3			T4		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
T1	(1 ; 1 ; 1)	(7 ; 8 ; 9)	(1 ; 2 ; 3)	(3 ; 4 ; 5)								
T2	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)	(1 ; 1 ; 1)	(1/8 ; 1/7 ; 1/6)	(1/3 ; 1/2 ; 1)								
T3	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(6 ; 7 ; 8)	(1 ; 1 ; 1)	(6 ; 7 ; 8)								
T4	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1 ; 2 ; 3)	(1/8 ; 1/7 ; 1/6)	(1 ; 1 ; 1)								

A Tabela 73 sintetiza os resultados do Índice de Consistência (IC), o Índice de consistência aleatório (IR) e da Razão de Consistência (RC), para as matrizes de critérios e subcritérios.

Tabela 73 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios

Dimensão	IC	IR	RC	Decisão: RC ≤ 0,10
Critérios	0,039	0,660	0,0587	OK
Subcritério: Econômico	0,000	0,660	0,0000	OK
Subcritério: Ambiental	0,026	0,660	0,0396	OK
Subcritério: Técnico	0,073	0,660	0,0733	OK

Pode ser observado na tabela acima que todas as matrizes atingem a condição de consistência, pois o valor RC calculado é menor que 0,10 para todas as situações avaliadas.

Uma vez confirmada a consistência de todas as matrizes foram obtidos os pesos dos critérios e subcritérios pelo método FAHP. Os pesos foram determinados pelo método da média geométrica, conforme descrito no capítulo anterior. As Tabelas 75 e 76 apresentam os pesos para os critérios e subcritérios, respectivamente.

Tabela 74 – Pesos dos critérios pelo método FAHP

Critérios	PESO		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	(1,0122 ; 1,1400 ; 1,2599)		
Ambiental	(0,1010 ; 0,1156 ; 0,1383)		
Técnico	(0,2311 ; 0,2811 ; 0,3333)		

Tabela 75 – Pesos dos subcritérios pelo método FAHP

CRITÉRIO	SUBCRITÉRIOS		PESO		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	E1	Custo do investimento inicial	(0,1010 ; 0,1111 ; 0,1323)		
	E2	Custo da energia consumida e exergia gerada	(0,8399 ; 1,0000 ; 1,1006)		
	E3	Custo da operação e manutenção	(0,2646 ; 0,3333 ; 0,4200)		
Ambiental	A1	Poluição ambiental (Emissões de gases, GEE)	(0,6667 ; 0,8736 ; 1,0000)		
	A2	Geração de resíduos	(0,0770 ; 0,0801 ; 0,0871)		
	A3	Impacto positivo na qualidade ambiental interna	(0,4421 ; 0,5291 ; 0,6934)		
Técnico	T1	Tempo de vida útil	(0,6376 ; 0,8399 ; 1,0000)		
	T2	Conforto térmico	(0,0801 ; 0,0871 ; 0,0959)		
	T3	Qualidade do ar interno	(0,4200 ; 0,5061 ; 0,6667)		
	T4	Disponibilidade da tecnologia	(0,1325 ; 0,1723 ; 0,2130)		

Com os pesos dos critérios e subcritérios definidos, iniciou-se a Fase II: *Fuzzy-TOPSIS*. Nesta segunda fase foram elaboradas as matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos *fuzzy*.

A partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} à luz da opinião dos especialistas, conforme mostra-se na Tabela 76.

Seguidamente, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme apresenta-se na Tabela 77. Em seguida, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada (Tabela 78). Finalmente, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- (Tabela 79).

Tabela 76 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas para a CCT (ventilação) versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3			ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6			ALTERNATIVA 7			
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>																			
E1	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)	(4,0 ; 5,0 ; 5,0)
E2	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,9 ; 3,8 ; 4,3)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,9 ; 3,8 ; 4,3)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,9 ; 3,8 ; 4,3)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,9 ; 3,8 ; 4,3)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,9 ; 3,8 ; 4,3)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)
E3	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)
A1	(3,6 ; 4,8 ; 5,0)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(3,3 ; 4,5 ; 5,0)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)
A2	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,5 ; 3,0 ; 4,5)
A3	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)
T1	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)
T2	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,4 ; 2,8 ; 4,3)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,4 ; 2,8 ; 4,3)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,4 ; 2,8 ; 4,3)	(1,3 ; 2,5 ; 4,0)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)
T3	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)
T4	(2,7 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(3,0 ; 4,3 ; 4,9)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,0 ; 3,3 ; 4,4)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)

Alternativa 1: Ventiladores de alta eficiência; **Alternativa 2:** Manutenção regular; **Alternativa 3:** Controlador de velocidade; **Alternativa 4:** Motores IE2; **Alternativa 5:** Motores IE3; **Alternativa 6:** Movimentação direta em vez de V-Belt; **Alternativa 7:** *Avoid oversizing*

Tabela 77 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,1022 ; 0,1267 ; 0,1667)		
E2	(0,8502 ; 1,1400 ; 1,3867)		
E3	(0,2678 ; 0,3800 ; 0,5291)		
A1	(0,0673 ; 0,1010 ; 0,1383)		
A2	(0,0078 ; 0,0093 ; 0,0120)		
A3	(0,0446 ; 0,0611 ; 0,0959)		
T1	(0,1474 ; 0,2361 ; 0,3333)		
T2	(0,0185 ; 0,0245 ; 0,0320)		
T3	(0,0971 ; 0,1423 ; 0,2222)		
T4	(0,0306 ; 0,0484 ; 0,0710)		

Tabela 78 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3			ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6			ALTERNATIVA 7			
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>																			
E1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)
E2	(0,5 ; 0,9 ; 1,1)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,1)	(0,4 ; 0,8 ; 1,1)	(0,5 ; 0,8 ; 0,9)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,5 ; 0,8 ; 0,9)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,5 ; 0,8 ; 0,9)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,5 ; 0,8 ; 0,9)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,4 ; 0,7 ; 1,1)	(0,5 ; 0,8 ; 0,9)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)
E3	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)
A1	(0,5 ; 0,8 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)
A2	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)
A3	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)
T1	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 1,0)	(0,3 ; 0,6 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)
T2	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)	(0,0 ; 0,0 ; 0,1)
T3	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,1 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)
T4	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,3 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)

Alternativa 1: Ventiladores de alta eficiência; **Alternativa 2:** Manutenção regular; **Alternativa 3:** Controlador de velocidade; **Alternativa 4:** Motores IE2; **Alternativa 5:** Motores IE3; **Alternativa 6:** Movimentação direta em vez de V-Belt; **Alternativa 7:** *Avoid oversizing*

Tabela 79 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritéri os	Distância total positiva (A ⁺)							Distância total negativa (A ⁻)						
	ALTERNATI VA 1	ALTERNATI VA 2	ALTERNATI VA 3	ALTERNATI VA 4	ALTERNATI VA 5	ALTERNATI VA 6	ALTERNATI VA 7	ALTERNATI VA 1	ALTERNATI VA 2	ALTERNATI VA 3	ALTERNATI VA 4	ALTERNATI VA 5	ALTERNATI VA 6	ALTERNATI VA 7
E1	0,043	0,043	0,037	0,032	0,032	0,037	0,034	0,043	0,043	0,045	0,047	0,047	0,045	0,042
E2	0,405	0,569	0,45	0,45	0,457	0,561	0,491	0,566	0,466	0,543	0,543	0,467	0,452	0,542
E3	0,185	0,211	0,185	0,188	0,208	0,182	0,191	0,199	0,185	0,199	0,204	0,179	0,194	0,175
A1	0,314	0,425	0,386	0,405	0,35	0,478	0,456	0,535	0,479	0,497	0,488	0,515	0,413	0,422
A2	0,041	0,04	0,038	0,04	0,041	0,037	0,041	0,033	0,037	0,037	0,035	0,033	0,04	0,036
A3	0,333	0,341	0,309	0,302	0,309	0,341	0,327	0,308	0,316	0,315	0,327	0,315	0,316	0,32
T1	0,401	0,448	0,484	0,439	0,383	0,43	0,437	0,504	0,468	0,456	0,486	0,511	0,474	0,489
T2	0,033	0,039	0,035	0,044	0,049	0,051	0,043	0,052	0,049	0,051	0,044	0,04	0,037	0,043
T3	0,34	0,369	0,354	0,33	0,311	0,305	0,322	0,311	0,283	0,306	0,333	0,33	0,341	0,318
T4	0,305	0,316	0,269	0,32	0,345	0,33	0,538	0,391	0,406	0,43	0,385	0,356	0,4	0,094

Na sequência foi estimada a proximidade relativa à solução ideal *fuzzy*. Este valor foi calculado a partir das distâncias totais positivas e negativas, cuja representação é dada pelo coeficiente de proximidade (CCi). Este parâmetro representa o índice de desempenho de cada alternativa a partir da avaliação dos três critérios: econômico, ambiental e técnico.

Tabela 80 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CCi
	D^+	D^-	
Alternativa 1: Ventiladores de alta eficiência	2,4005	2,9425	0,5507
Alternativa 2: Manutenção regular	2,8012	2,7312	0,4937
Alternativa 3: Controlador de velocidade	2,5482	2,8794	0,5305
Alternativa 4: Motores IE2	2,5502	2,8928	0,5315
Alternativa 5: Motores IE3	2,4850	2,7941	0,5293
Alternativa 6: Movimentação direta em vez de V-Belt	2,7523	2,7119	0,4963
Alternativa 7: <i>Avoid oversizing</i>	2,8795	2,4813	0,4629

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Ventiladores de alta eficiência (Alternativa 1), Motores IE2 (Alternativa 4), Controlador de velocidade (Alternativa 3), Motores IE3 (Alternativa 5), Movimentação direta em vez de V-Belt (Alternativa 6), Manutenção regular (Alternativa 2) e *Ovoid oversizing* (Alternativa 7). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

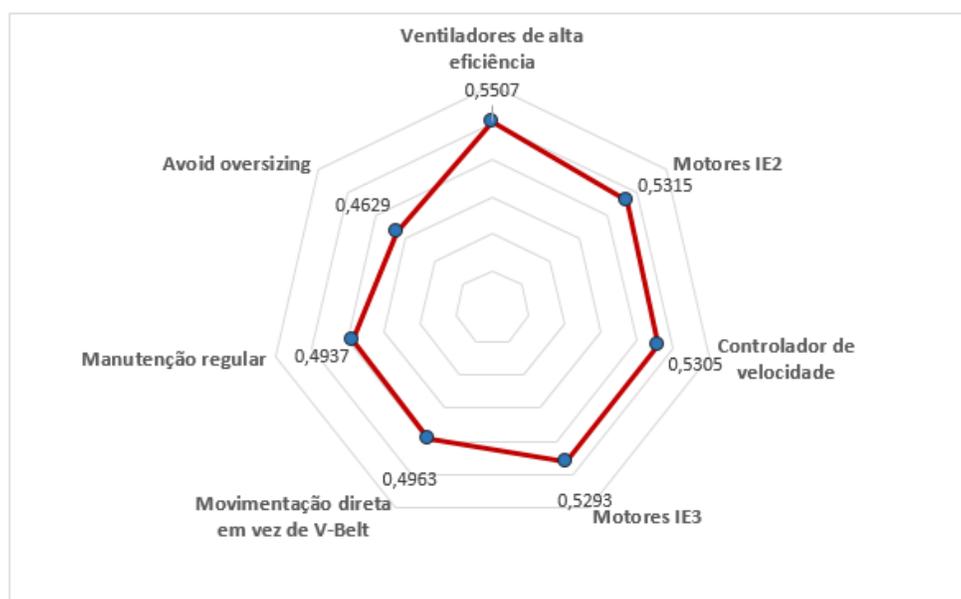


Figura 35 - Gráfico radar com o mapeamento do CCi para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que os índices das alternativas 1, 4, 3 e 5, encontram-se acima da média aritmética (0,5135). Já as alternativas 6, 2 e 7, encontra-se abaixo do primeiro quartil (0,4937).

6.5. Avaliação das CCT: Refrigeração

De forma similar ao procedimento descrito, esta seção apresenta a aplicação do método multicritério para a tecnologia de refrigeração. Em uma primeira etapa, aplicou-se a fase *Fuzzy*-AHP e foi realizado o preenchimento das matrizes pareadas a partir da opinião dos especialistas. As Tabelas 82 a 85 apresentam os resultados das matrizes *fuzzy* obtidas:

Tabela 81 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Critérios

Critérios	E			A			T		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E	(1 ; 1 ; 1)	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(1/9 ; 1/9 ; 1/8)						
A	(4 ; 5 ; 6)	(1 ; 1 ; 1)	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)						
T	(8 ; 9 ; 9)	(3 ; 4 ; 5)	(1 ; 1 ; 1)						

E: Econômico; A: Ambiental; T: Técnico

Tabela 82 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Econômico

Subcritérios	E1			E2			E3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1 ; 1 ; 1)	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)	(1/6 ; 1/5 ; 1/4)						
E2	(4 ; 5 ; 6)	(1 ; 1 ; 1)	(1 ; 2 ; 3)						
E3	(4 ; 5 ; 6)	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 83 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Ambiental

Subcritérios	A1			A2			A3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	(1 ; 1 ; 1)	(6 ; 7 ; 8)	(2 ; 3 ; 4)						
A2	(1/8 ; 1/7 ; 1/6)	(1 ; 1 ; 1)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)						
A3	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(2 ; 3 ; 4)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 84 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Técnico

Subcritérios	T1			T2			T3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
T1	(1 ; 1 ; 1)	(1 ; 2 ; 3)	(2 ; 3 ; 4)						
T2	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(1 ; 1 ; 1)	(1 ; 2 ; 3)						
T3	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(1 ; 1 ; 1)						

A Tabela 85 sintetiza os resultados do Índice de Consistência (IC), o Índice de consistência aleatório (IR) e da Razão de Consistência (RC), para as matrizes de critérios e subcritérios.

Tabela 85 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios

Dimensão	IC	IR	RC	Decisão: $RC \leq 0,10$
Critérios	0,059	0,660	0,0893	OK
Subcritério: Econômico	0,035	0,660	0,0537	OK
Subcritério: Ambiental	0,005	0,660	0,0082	OK
Subcritério: Técnico	0,006	0,660	0,0085	OK

Pode ser observado na tabela acima que todas as matrizes atingem a condição de consistência, pois o valor RC calculado é menor que 0,10 para todas as situações avaliadas.

Uma vez confirmada a consistência de todas as matrizes foram obtidos os pesos dos critérios e subcritérios pelo método FAHP. Os pesos foram determinados pelo método da média geométrica, conforme descrito no capítulo anterior. As tabelas 87 e 88 apresentam os pesos para os critérios e subcritérios, respectivamente.

Tabela 86 – Pesos dos critérios pelo método FAHP

Critérios	PESO		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	(0,0882 ; 0,0937 ; 0,1050)		
Ambiental	(0,3094 ; 0,3591 ; 0,4200)		
Técnico	(0,9615 ; 1,1006 ; 1,1856)		

Tabela 87 – Pesos dos subcritérios pelo método FAHP

CRITÉRIO	SUBCRITÉRIOS		PESO		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	E1	Custo do investimento inicial	(0,1010 ; 0,1140 ; 0,1323)		
	E2	Custo da energia consumida e exergia gerada	(0,5291 ; 0,7181 ; 0,8736)		
	E3	Custo da operação e manutenção	(0,3669 ; 0,4524 ; 0,6057)		
Ambiental	A1	Poluição ambiental (Emissões de gases, GEE)	(0,7631 ; 0,9196 ; 1,0583)		
	A2	Geração de resíduos	(0,1050 ; 0,1208 ; 0,1456)		
	A3	Consumo de água	(0,2646 ; 0,3333 ; 0,4200)		
Técnico	T1	Qualidade da tecnologia	(0,4200 ; 0,6057 ; 0,7631)		
	T2	Conforto térmico	(0,2311 ; 0,3333 ; 0,4807)		
	T3	Qualidade do ar interno	(0,1456 ; 0,1834 ; 0,2646)		

Com os pesos dos critérios e subcritérios definidos, iniciou-se a Fase II: *Fuzzy-TOPSIS*. Nesta segunda fase foram elaboradas as matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos *fuzzy*.

A partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} à luz da opinião dos especialistas, conforme mostra-se na Tabela 88.

Seguidamente, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme apresentado na Tabela 89. Na sequência, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada (Tabela 90). Finalmente, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- (Tabela 91).

Tabela 88 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas para a CCT (refrigeração) versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3			ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6			ALTERNATIVA 7			
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>																			
E1	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)
E2	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)
E3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)
A1	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,8 ; 4,0 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(2,4 ; 3,8 ; 4,8)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)	(1,8 ; 3,3 ; 4,6)
A2	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)
A3	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,0 ; 3,0 ; 4,0)	(2,0 ; 3,0 ; 4,0)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)
T1	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)
T2	(2,5 ; 3,5 ; 4,3)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,1 ; 3,3 ; 4,3)	(1,6 ; 3,0 ; 4,4)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)	(2,3 ; 3,3 ; 4,1)
T3	(1,9 ; 2,8 ; 3,8)	(1,9 ; 2,8 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,6 ; 2,8 ; 4,0)	(1,6 ; 2,8 ; 4,0)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)	(1,5 ; 2,5 ; 3,8)

Alternativa 1: Compressores eficientes; **Alternativa 2:** Manutenção regular; **Alternativa 3:** Controlador de velocidade; **Alternativa 4:** Motores IE2; **Alternativa 5:** Motores IE3; **Alternativa 6:** Movimentação direta em vez de V-Belt; **Alternativa 7:** *Avoid oversizing*

Tabela 89 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,0089 ; 0,0107 ; 0,0139)		
E2	(0,0467 ; 0,0673 ; 0,0917)		
E3	(0,0324 ; 0,0424 ; 0,0636)		
A1	(0,2361 ; 0,3302 ; 0,4444)		
A2	(0,0325 ; 0,0434 ; 0,0611)		
A3	(0,0819 ; 0,1197 ; 0,1764)		
T1	(0,4038 ; 0,6667 ; 0,9048)		
T2	(0,2222 ; 0,3669 ; 0,5700)		
T3	(0,1400 ; 0,2019 ; 0,3137)		

Tabela 90 – Matriz de decisão normalizada e ponderada pelo método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3			ALTERNATIVA 4			ALTERNATIVA 5			ALTERNATIVA 6			ALTERNATIVA 7			
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>																			
E1	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)
E2	(0,3 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,6 ; 0,9)
E3	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,3 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)	(0,2 ; 0,4 ; 0,6)
A1	(0,4 ; 0,8 ; 1,1)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,3 ; 0,7 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)	(0,4 ; 0,8 ; 1,0)
A2	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,0 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)	(0,1 ; 0,1 ; 0,1)
A3	(0,1 ; 0,3 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)
T1	(0,2 ; 0,4 ; 0,8)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,4 ; 0,7)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)	(0,2 ; 0,5 ; 0,8)
T2	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,3 ; 0,5)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)	(0,1 ; 0,2 ; 0,4)
T3	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)

Alternativa 1: Compressores eficientes; **Alternativa 2:** Manutenção regular; **Alternativa 3:** Controlador de velocidade; **Alternativa 4:** Motores IE2; **Alternativa 5:** Motores IE3; **Alternativa 6:** Movimentação direta em vez de V-Belt; **Alternativa 7:** *Avoid oversizing*

Tabela 91 – Matriz de distância total positiva e negativa

Subcritérios	Distância total positiva (A ⁺)							Distância total negativa (A ⁻)						
	ALTERNATI VA 1	ALTERNATI VA 2	ALTERNATI VA 3	ALTERNATI VA 4	ALTERNATI VA 5	ALTERNATI VA 6	ALTERNATI VA 7	ALTERNATI VA 1	ALTERNATI VA 2	ALTERNATI VA 3	ALTERNATI VA 4	ALTERNATI VA 5	ALTERNATI VA 6	ALTERNATI VA 7
E1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
E2	0,40	0,42	0,45	0,41	0,41	0,46	0,46	0,41	0,40	0,39	0,45	0,45	0,40	0,40
E3	0,28	0,31	0,32	0,27	0,27	0,31	0,32	0,30	0,28	0,26	0,29	0,29	0,28	0,26
A1	0,39	0,48	0,48	0,40	0,45	0,52	0,50	0,55	0,48	0,48	0,53	0,51	0,46	0,50
A2	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,08	0,08	0,07
A3	0,20	0,20	0,22	0,21	0,22	0,23	0,18	0,21	0,20	0,19	0,17	0,16	0,18	0,22
T1	0,38	0,39	0,38	0,37	0,37	0,38	0,38	0,38	0,36	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
T2	0,25	0,24	0,25	0,26	0,26	0,26	0,28	0,23	0,26	0,24	0,22	0,22	0,22	0,22
T3	0,12	0,12	0,13	0,12	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11

Na sequência foi estimada a proximidade relativa à solução ideal *fuzzy*. Este valor foi calculado a partir das distâncias totais positivas e negativas, cuja representação é dada pelo coeficiente de proximidade (CCi). Este parâmetro representa o índice de desempenho de cada alternativa a partir da avaliação dos três critérios: econômico, ambiental e técnico.

Tabela 92 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CCi)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CCi
	D^+	D^-	
Alternativa 1: Compressores eficientes	2,1339	2,2998	0,5187
Alternativa 2: Manutenção regular	2,2680	2,2131	0,4939
Alternativa 3: Controlador de velocidade	2,3412	2,1643	0,4804
Alternativa 4: Motores IE2	2,1611	2,2703	0,5123
Alternativa 5: Motores IE3	2,2107	2,2434	0,5037
Alternativa 6: Movimentação direta em vez de V-Belt	2,3995	2,1646	0,4743
Alternativa 7: <i>Avoid oversizing</i>	2,3805	2,2146	0,4819

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: Compressores eficientes (Alternativa 1), Motores IE2 (Alternativa 4), Motores IE3 (Alternativa 5), Manutenção regular (Alternativa 2), *Avoid oversizing* (Alternativa 7), Controlador de velocidade (Alternativa 3) e Movimentação direta em vez de V-Belt (Alternativa 6). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

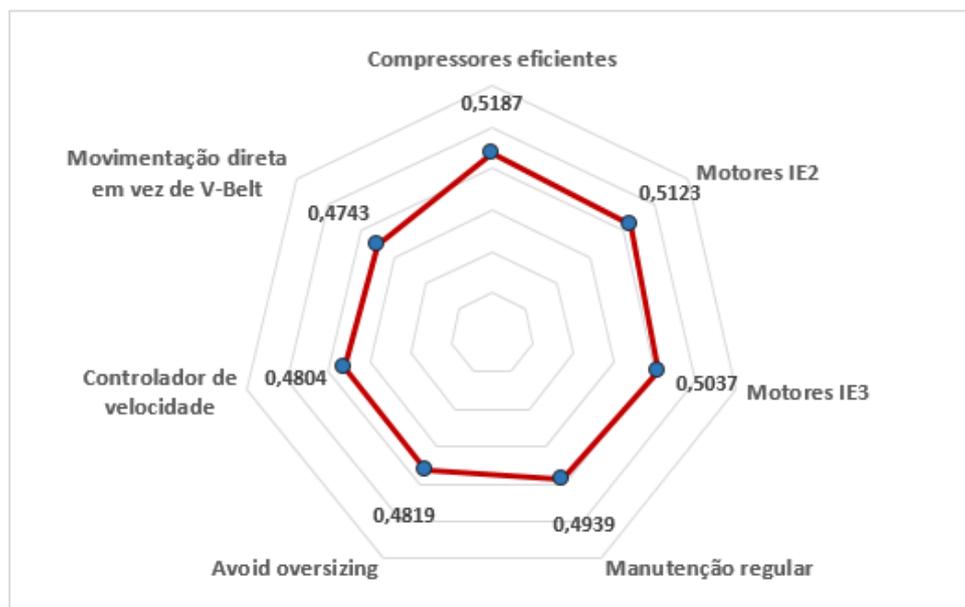


Figura 36 - Gráfico radar com o mapeamento do CCi para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que os índices das alternativas 1, 4 e 5, encontram-se acima da média aritmética (0,4950). Já a alternativas 3, corresponde, exatamente, ao valor do primeiro quartil (0,4804).

6.6. Avaliação das CCT: Iluminação

Finalmente, os resultados correspondentes à última tecnologia transversal avaliada (*i.e.*: iluminação) são apresentados. Em uma primeira etapa, aplicou-se a fase *Fuzzy*-AHP e foi realizado o preenchimento das matrizes pareadas a partir da opinião dos especialistas. As Tabelas 94 a 97 apresentam os resultados das matrizes *fuzzy* obtidas:

Tabela 93 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Critérios

Critérios	E			A			T		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)	(7 ; 8 ; 9)						
A	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)						
T	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)						

E: Econômico; A: Ambiental; T: Técnico

Tabela 94 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Econômico

Subcritérios	E1			E2			E3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(1 ; 1 ; 1)	(1/8 ; 1/7 ; 1/7)	(1 ; 2 ; 3)						
E2	(7 ; 7 ; 8)	(1 ; 1 ; 1)	(7 ; 8 ; 9)						
E3	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 95 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Ambiental

Subcritérios	A1			A2			A3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
A1	(1 ; 1 ; 1)	(7 ; 8 ; 9)	(8 ; 9 ; 9)						
A2	(1/9 ; 1/8 ; 1/7)	(1 ; 1 ; 1)	(1 ; 2 ; 3)						
A3	(1/9 ; 1/9 ; 1/8)	(1/3 ; 1/2 ; 1)	(1 ; 1 ; 1)						

Tabela 96 - Matriz de comparação *Fuzzy* – Subcritérios subordinados ao critério Técnico

Subcritérios	T1			T2			T3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>

T1	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)	(3 ; 4 ; 5)
T2	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)	(2 ; 3 ; 4)
T3	(1/5 ; 1/4 ; 1/3)	(1/4 ; 1/3 ; 1/2)	(1 ; 1 ; 1)

A Tabela 97 sintetiza os resultados do Índice de Consistência (IC), o Índice de consistência aleatório (IR) e da Razão de Consistência (RC), para as matrizes de critérios e subcritérios.

Tabela 97 - Cálculo do IC, IR e RC para as matrizes de critérios e subcritérios

Dimensão	IC	IR	RC	Decisão: RC ≤ 0,10
Critérios	0,0012	0,660	0,0018	OK
Subcritério: Econômico	0,0335	0,660	0,0507	OK
Subcritério: Ambiental	0,0370	0,660	0,0561	OK
Subcritério: Técnico	0,0506	0,660	0,0767	OK

Pode ser observado na tabela acima que todas as matrizes atingem a condição de consistência, pois o valor RC calculado é menor que 0,10 para todas as situações avaliadas.

Uma vez confirmada a consistência de todas as matrizes foram obtidos os pesos dos critérios e subcritérios pelo método FAHP. Os pesos foram determinados pelo método da média geométrica, conforme descrito no capítulo anterior. As Tabelas 99 e 100 apresentam os pesos para os critérios e subcritérios, respectivamente.

Tabela 98 – Pesos dos critérios pelo método FAHP

Critérios	PESO		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	(0,8034 ; 0,9615 ; 1,1006)		
Ambiental	(0,2646 ; 0,3333 ; 0,4200)		
Técnico	(0,1010 ; 0,1156 ; 0,1383)		

Tabela 99 – Pesos dos subcritérios pelo método FAHP

CRITÉRIO	SUBCRITÉRIOS		PESO		
			<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
Econômico	E1	Custo do investimento inicial	(0,1667 ; 0,2195 ; 0,2513)		
	E2	Custo da energia consumida e exergia gerada	(1,2198 ; 1,2753 ; 1,3867)		
	E3	Custo da operação e manutenção	(0,1111 ; 0,1323 ; 0,1743)		
Ambiental	A1	Poluição ambiental (Emissões de gases, GEE)	(1,2753 ; 1,3867 ; 1,4422)		
	A2	Geração de resíduos	(0,1602 ; 0,2100 ; 0,2513)		
	A3	Consumo de água	(0,1111 ; 0,1272 ; 0,1667)		
Técnico	T1	Qualidade da tecnologia	(0,4200 ; 0,6057 ; 0,7631)		
	T2	Conforto térmico	(0,2311 ; 0,3333 ; 0,4807)		
	T3	Qualidade do ar interno	(0,1456 ; 0,1834 ; 0,2646)		

Com os pesos dos critérios e subcritérios definidos, iniciou-se a Fase II: *Fuzzy-TOPSIS*. Nesta segunda fase foram elaboradas as matrizes de avaliação usando o conjunto de termos linguísticos *fuzzy*.

A partir dos resultados dos pesos dos critérios e subcritérios, construiu-se a matriz de decisão *fuzzy* \tilde{D} à luz da opinião dos especialistas, conforme mostra-se na Tabela 100. Seguidamente, a multiplicação dos pesos dos critérios pelo peso das dimensões (subcritérios) resulta no vetor peso total W_{Total} , conforme apresenta-se na Tabela 101. Logo, a matriz de avaliação de decisão \tilde{D} é normalizada (Tabela 102). Finalmente, foram determinadas as matrizes de distância A^+ e A^- (Tabela 103).

Tabela 100 – Matriz de decisão \tilde{D} : alternativas para a CCT (iluminação) versus subcritérios

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)
E2	(2,5 ; 3,8 ; 4,6)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)
E3	(2,5 ; 4,0 ; 5,0)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)
A1	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)
A2	(2,9 ; 4,3 ; 5,0)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)
A3	(2,3 ; 3,8 ; 4,9)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(2,1 ; 3,5 ; 4,6)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)	(1,9 ; 3,3 ; 4,5)
T1	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)	(2,0 ; 3,5 ; 4,8)
T2	(2,5 ; 3,5 ; 4,3)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)	(2,3 ; 3,5 ; 4,5)
T3	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)	(2,6 ; 4,0 ; 4,9)

Alternativa 1: Manutenção Regular; **Alternativa 2:** LEDs; **Alternativa 3:** Luminárias eficientes

Tabela 101 – Peso total dos subcritérios pelo método *fuzzy* AHP (W_{Total})

SUBCRITÉRIOS	PESO TOTAL		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,1339 ; 0,2111 ; 0,2766)	(0,1339 ; 0,2111 ; 0,2766)	(0,1339 ; 0,2111 ; 0,2766)
E2	(0,9799 ; 1,2262 ; 1,5263)	(0,9799 ; 1,2262 ; 1,5263)	(0,9799 ; 1,2262 ; 1,5263)
E3	(0,0893 ; 0,1272 ; 0,1918)	(0,0893 ; 0,1272 ; 0,1918)	(0,0893 ; 0,1272 ; 0,1918)
A1	(0,3374 ; 0,4622 ; 0,6057)	(0,3374 ; 0,4622 ; 0,6057)	(0,3374 ; 0,4622 ; 0,6057)
A2	(0,0424 ; 0,0700 ; 0,1055)	(0,0424 ; 0,0700 ; 0,1055)	(0,0424 ; 0,0700 ; 0,1055)
A3	(0,0294 ; 0,0424 ; 0,0700)	(0,0294 ; 0,0424 ; 0,0700)	(0,0294 ; 0,0424 ; 0,0700)
T1	(0,0611 ; 0,0882 ; 0,1251)	(0,0611 ; 0,0882 ; 0,1251)	(0,0611 ; 0,0882 ; 0,1251)
T2	(0,0267 ; 0,0385 ; 0,0581)	(0,0267 ; 0,0385 ; 0,0581)	(0,0267 ; 0,0385 ; 0,0581)
T3	(0,0124 ; 0,0168 ; 0,0254)	(0,0124 ; 0,0168 ; 0,0254)	(0,0124 ; 0,0168 ; 0,0254)

Tabela 102 – Matriz de decisão normalizada e ponderada método *fuzzy* AHP (\tilde{V})

SUBCRITÉRIOS	ALTERNATIVA 1			ALTERNATIVA 2			ALTERNATIVA 3		
	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>	<i>l</i>	<i>m</i>	<i>u</i>
E1	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)	(0,1 ; 0,2 ; 0,3)
E2	(0,8 ; 1,1 ; 1,4)	(0,9 ; 1,2 ; 1,4)	(0,8 ; 1,1 ; 1,4)	(0,9 ; 1,2 ; 1,4)	(0,8 ; 1,1 ; 1,4)	(0,9 ; 1,2 ; 1,4)	(0,8 ; 1,1 ; 1,4)	(0,9 ; 1,2 ; 1,4)	(0,8 ; 1,1 ; 1,4)
E3	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)
A1	(0,7 ; 1,1 ; 1,4)	(0,7 ; 1,2 ; 1,4)	(0,6 ; 1,1 ; 1,4)	(0,7 ; 1,2 ; 1,4)	(0,6 ; 1,1 ; 1,4)	(0,7 ; 1,2 ; 1,4)	(0,6 ; 1,1 ; 1,4)	(0,7 ; 1,2 ; 1,4)	(0,6 ; 1,1 ; 1,4)
A2	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)	(0,1 ; 0,2 ; 0,2)
A3	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)
T1	(0,2 ; 0,5 ; 0,9)	(0,4 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,5 ; 0,9)	(0,4 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)	(0,2 ; 0,5 ; 0,9)	(0,4 ; 0,6 ; 0,9)	(0,3 ; 0,6 ; 0,9)
T2	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)	(0,2 ; 0,3 ; 0,4)
T3	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,0 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)	(0,1 ; 0,1 ; 0,2)

Alternativa 1: Manutenção Regular; **Alternativa 2:** LEDs; **Alternativa 3:** Luminárias eficientes

Tabela 103 – Matriz de distância total positiva e negativa

SUBCRITÉRIO S	Distância total positiva (A ⁺)			Distância total negativa (A ⁻)		
	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3	ALTERNATIVA 1	ALTERNATIVA 2	ALTERNATIVA 3
	1	2	3	1	2	3
E1	0,10	0,08	0,08	0,11	0,12	0,12
E2	0,40	0,31	0,37	0,42	0,46	0,43
E3	0,07	0,07	0,08	0,07	0,07	0,06
A1	0,47	0,44	0,54	0,59	0,60	0,56
A2	0,11	0,11	0,12	0,11	0,11	0,11
A3	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07	0,06
T1	0,42	0,33	0,39	0,39	0,44	0,42
T2	0,13	0,13	0,14	0,16	0,16	0,15
T3	0,10	0,07	0,08	0,07	0,10	0,09

Na sequência foi estimada a proximidade relativa à solução ideal *fuzzy*. Este valor foi calculado a partir das distâncias totais positivas e negativas, cuja representação é dada pelo coeficiente de proximidade (CC_i). Este parâmetro representa o índice de desempenho de cada alternativa a partir da avaliação dos três critérios: econômico, ambiental e técnico.

Tabela 104 – Cálculo do coeficiente de proximidade (CC_i)

ALTERNATIVAS	DISTÂNCIAS		CC_i
	D ⁺	D ⁻	
Alternativa 1: Manutenção Regular	1,8693	1,9873	0,5153
Alternativa 2: LEDs	1,5867	2,1226	0,5722
Alternativa 3: Luminárias eficientes	1,8653	2,0131	0,5190

Conforme o resultado mostrado na tabela acima, em função do coeficiente de proximidade (CCi), a ordenação do desempenho das alternativas propostas, do maior para o menor corresponde a: LEDs (Alternativa 2), Luminárias eficientes (Alternativa 3) e Manutenção regular (Alternativa 1). Para uma melhor visualização dos resultados, a seguir ilustra-se o gráfico radar que ressalta o CCi para cada alternativa proposta.

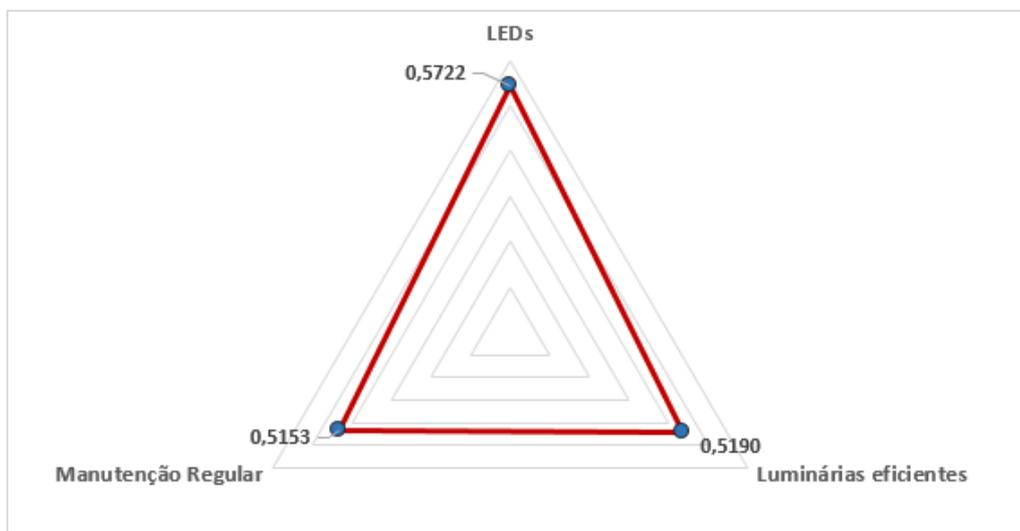


Figura 37 - Gráfico radar com o mapeamento do CCi para cada alternativa

Em geral, os resultados do gráfico acima mostram que unicamente o índice da alternativa 2 encontram-se acima da média aritmética (0,5355). Já a alternativas 1, corresponde, exatamente, ao valor do primeiro quartil (0,5153).

6.7. Discussão dos resultados

Esta seção discute os resultados consolidados para cada processo e CCT, evidenciando a relação de cada alternativa de eficientização proposta em função dos critérios e subcritérios.

6.7.1. Processos

Os especialistas conceberam que, em função da atual situação econômica tanto no cenário nacional, quanto no internacional, para tornar eficiente os *processos* do subsetor de papel e celulose, o principal critério que deve ser considerado é o *Econômico* conforme ilustra-se na Figura 38.

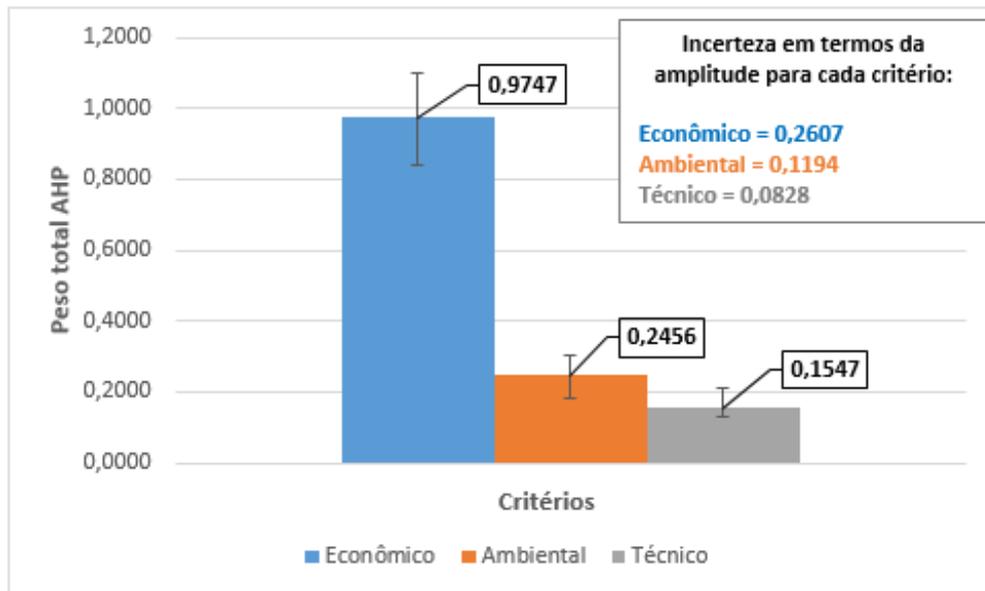


Figura 38 – Avaliação dos critérios para os processos do subsetor papel e celulose

A pesar do resultado acima, o grupo de especialista também considerou fundamental avaliar aspectos relevantes que devem ser considerados tanto na questão ambiental, quanto na visão técnica. Assim, os resultados da pesquisa confirmaram que quatro subcritérios (2 econômicos, 1 ambiental e 1 técnico) devem ser analisados com o propósito de efficientizar os processos. A Figura 39 ilustra os resultados.

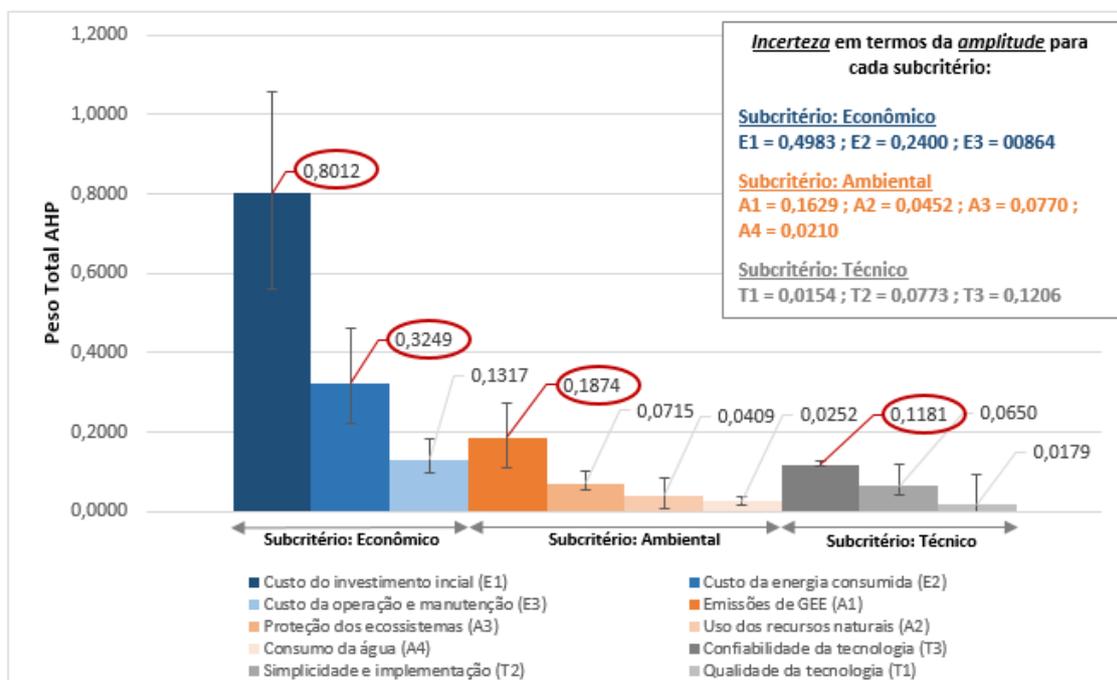


Figura 39 – Avaliação dos subcritérios para os processos do subsetor papel e celulose

A figura acima mostra a comparação dos pesos totais AHP para todos os subcritérios avaliados. Os resultados evidenciaram e confirmaram o julgamento do grupo de especialistas no sentido de avaliar o impacto de: (i) custo do investimento inicial; (ii) custo da energia consumida; (iii) emissões de gases de efeito estufa (GEE) e (iv) confiabilidade da tecnologia. Este resultado confirma os cuidados que devem ser considerados ao inserir uma nova tecnologia com o intuito de aumentar a eficiência energética dos processos industriais, onde diversos fatores afetam o seu desempenho e, por consequente, as expectativas dos resultados. Além disso, foi evidenciada a preocupação dos especialistas pelo cuidado com o meio ambiente. Inserir uma nova tecnologia no cenário nacional leva, além dos custos econômicos e técnicos, um possível impacto ambiental que, atualmente, está sendo prioridade pelos governos internacionais e confirmado nesta pesquisa, à luz dos resultados obtidos.

As seções 6.7.1.1 a 6.7.1.4 discutem os resultados em relação a cada processo, as alternativas propostas em função dos subcritérios avaliados.

6.7.1.1. Processo I: Papel

Em relação ao **Processo I (papel)** o resultado da aplicação do método multicritério confirmou que a alternativa 1 (Refinadores eficientes) corresponde à mais acertada à luz da opinião do grupo especialista, seguida da alternativa 2 (Otimização dos refinadores) e 3 (Melhoramento na química de fibras). A Figura 40 ilustra a influência de cada subcritério.

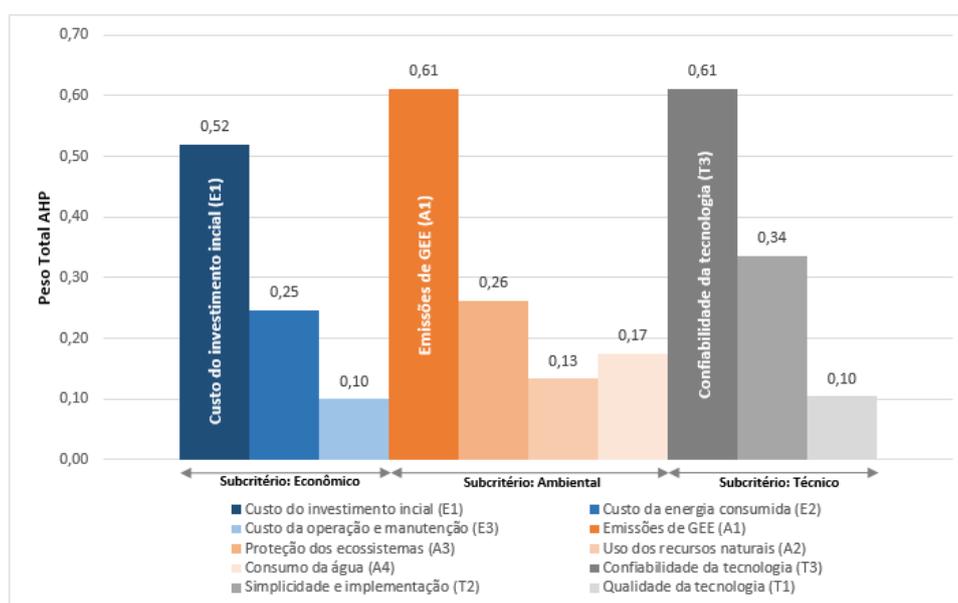


Figura 40 – Subcritérios para Alternativa 1 (Refinadores eficientes)

Pode ser confirmado nas figuras acima a influência e relevância de três subcritérios considerados críticos para a seleção de uma nova tecnologia: (i) custo do investimento inicial; (ii) emissões de GEE e (iii) confiabilidade da tecnologia. Assim, à luz da opinião de especialistas, foi confirmado o fato que diversos critérios e os seus distintos impactos devem ser avaliados para adotar uma nova tecnologia com intuito de tornar os processos industriais mais eficientes.

6.7.1.2. Processo II: Química da celulose

Em relação ao Processo II (química da celulose) o resultado da aplicação do método multicritério confirmou que a alternativa 3 (Análise de pressão) corresponde à mais acertada à luz da opinião do grupo especialista, seguida da alternativa 2 (Refinadores eficientes) e 1 (Gaseificação de licor negro). A Figura 41 ilustra a influência de cada subcritério.

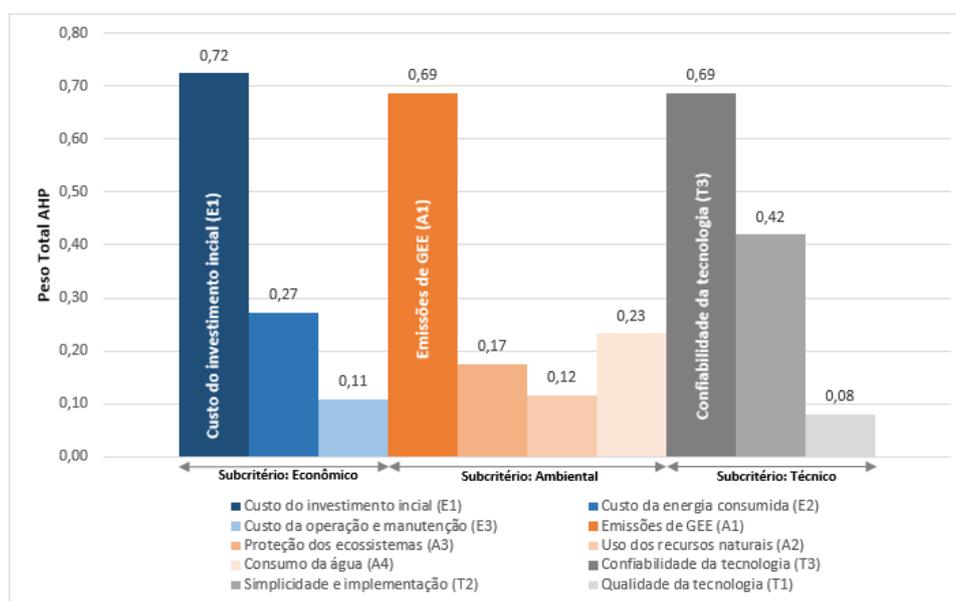


Figura 41 – subcritérios para Alternativa 3 (Análise de pressão)

Nesta situação, apesar do subcritério técnico simplicidade da implementação mostrar que uma importante contribuição no seu peso quando comparado este resultado com aquele obtido no processo 1, ainda neste processo da química da celulose os três subcritérios mais importantes considerados pelo grupo de especialistas correspondem a: (i) custo do investimento inicial; (ii) emissões de GEE e (iii) confiabilidade da tecnologia.

6.7.1.3. Processo III: Mecânica da celulose

Neste Processo III (mecânica da celulose) o resultado da aplicação do método multicritério confirmou que a alternativa 1 (Eficiência elevada) corresponde à mais acertada à luz da opinião do grupo especialista, seguida da alternativa 2 (Pré-tratamento enzimático) e 1 (Refinadores eficientes). A Figura 42 ilustra a influência de cada subcritério.

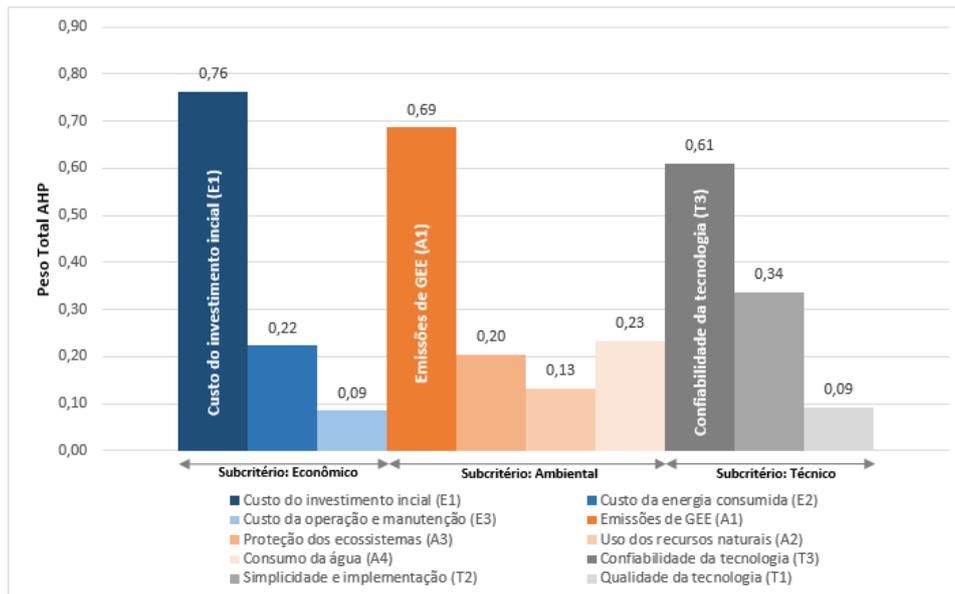


Figura 42 – Subcritérios para Alternativa 1 (Eficiência elevada)

Para este processo, a pesar dos três subcritérios *(i) custo do investimento inicial;* *(ii) emissões de GEE e (iii) confiabilidade da tecnologia)* mostrarem-se críticos para todas as alternativas avaliadas, para a situação da alternativa 1 e 2, o custo do investimento inicial mostrou-se claramente mais crítico. Isto pode ser explicado devido que para implementar equipamentos de eficiência elevada (alternativa 1) e implementar um pré-tratamento (alternativa 2), os recursos atuais são limitados e precisa-se de um alto investimento na aquisição de equipamentos, insumos e recursos humanos com conhecimento específico na área. Este fato se traduz num forte impacto econômico no início, o que pode aumentar o tempo de retorno do investimento. Já para o caso da alternativa 3, houve uma uniformidade nos resultados destes subcritérios, o que se traduz que, além dos custos iniciais, o impacto ambiental e o desempenho de uma nova tecnologia, são fatores críticos para a implementação de refinadores eficientes.

6.7.1.4. Processo IV: Papel reciclado

No Processo IV (papel reciclado) o resultado da aplicação do método multicritério confirmou que a alternativa 3 (Dispensor eficiente) corresponde à mais acertada à luz da opinião do grupo especialista, seguida da alternativa 2 (Rastreamento eficiente) e 1 (Polpação de alta consistência). A Figura 43 ilustra a influência de cada subcritério.

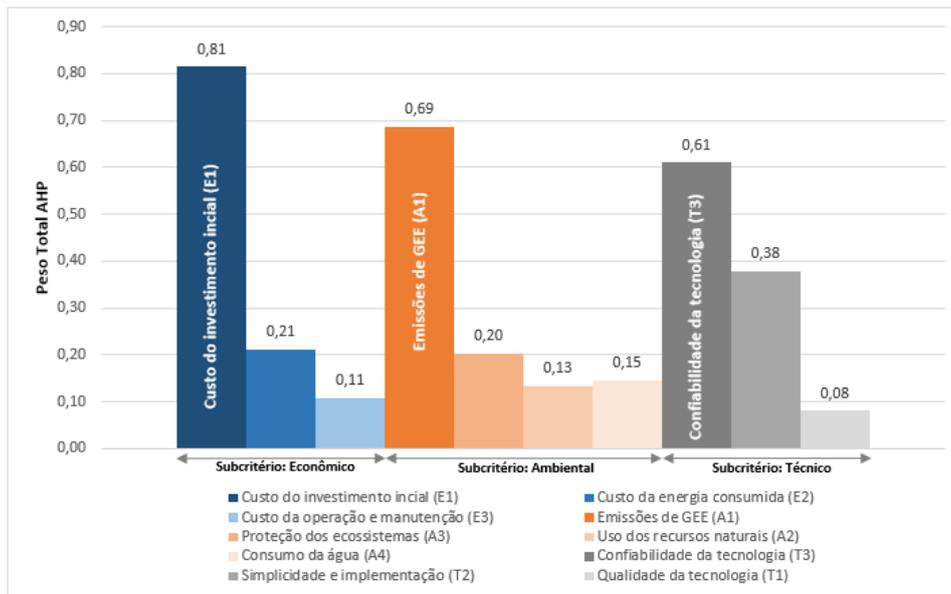


Figura 43 – Subcritérios para Alternativa 3 (Dispensor eficiente)

Neste último processo observa-se que os três subcritérios (*i*) custo do investimento inicial; (*ii*) emissões de GEE e (*iii*) confiabilidade da tecnologia) foram considerados críticos para a implementação desta alternativa. Além disso, evidenciou-se uma clara tendência ao custo do investimento inicial, o que confirma que para a implementação desta alternativa o fator econômico torna-se o mais relevante.

6.7.2. CCT: Bombas

O fator econômico é o critério mais importante a ser considerado para tornar mais eficiente uma **bomba** para a indústria de papel e celulose, conforme ilustrado na Figura 44.

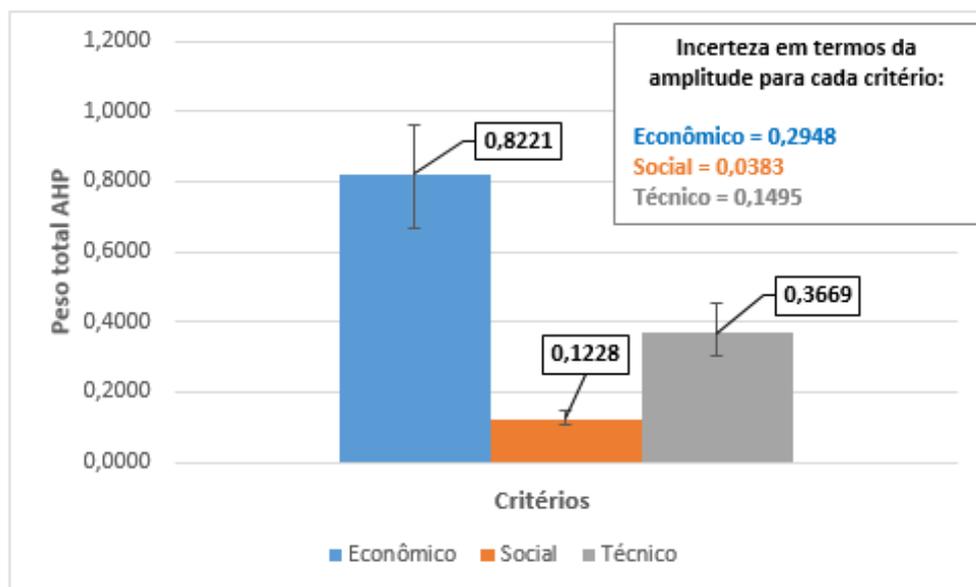


Figura 44 – Avaliação dos critérios para as CCT (bombas) do subsetor papel e celulose

Apesar da clara tendência do fator econômico no processo de efficientização de uma bomba industrial, os especialistas levantaram aspectos interessantes e relevante relacionados ao impacto social e técnico devem ser avaliados. Nesse sentido, quatro subcritérios específicos foram analisados e discutidos pelo grupo de especialistas. A Figura 45 ilustra o peso total AHP de todos os subcritérios avaliados, fazendo um destaque especial para: (i) custo de operação e manutenção; (ii) tempo de vida útil; (iii) segurança ocupacional e (iv) geração de emprego.

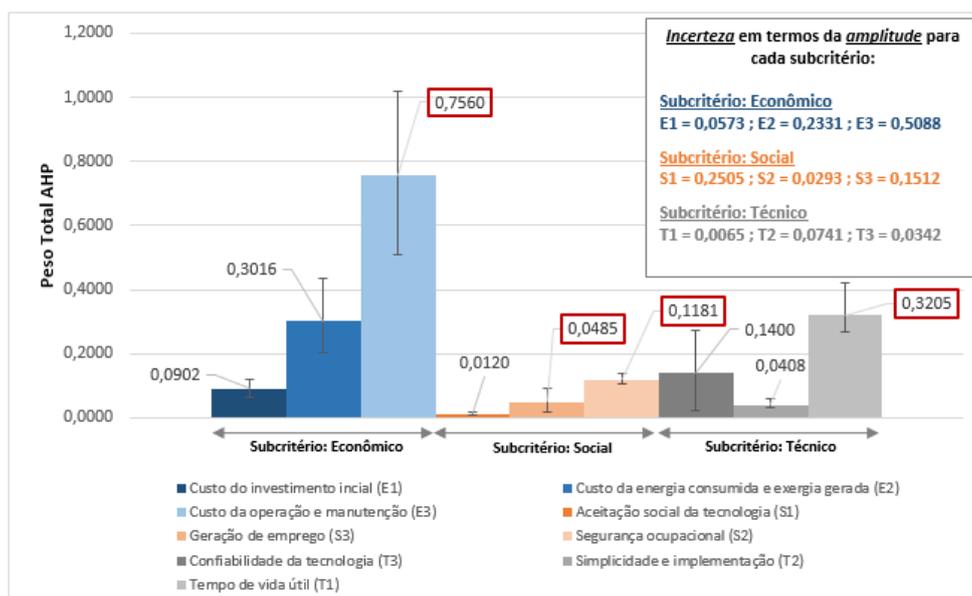


Figura 45 – Avaliação dos subcritérios para as CCT (bombas) do subsetor papel e celulose

O custo de operação e manutenção sem dúvida representa uma das maiores preocupações da utilização de bombas industriais, fato que foi confirmado pelo grupo de especialistas. A operação desta tecnologia em condições adversas, a manutenção preventiva mal planejada, são alguns dos principais fatores que aumentam os custos. Já, o tempo de vida útil avalia o tempo de duração ou vida útil que a tecnologia pode operar garantindo uma alta eficiência energética. À luz da opinião dos especialistas, um aspecto importante refere-se ao deslocamento da curva de operação da bomba em função da seleção, operação e manutenção. Isto pode gerar um maior requerimento de potência, o que decorre num incremento no consumo de energia desta tecnologia. Além disso, as perdas de energia na operação de uma bomba é um fator importante devido ao tempo de operação durante a execução de um processo. Considerando aspectos sociais, a segurança ocupacional, ou seja, a preservação da saúde física do operador durante a manutenção e manipulação da bomba industrial, torna-se um aspecto fundamental para a aquisição e implementação de uma nova tecnologia. A preservação da vida humana é um princípio básico de operação que os especialistas consideram de alta relevância. Num segundo plano, neste contexto social, encontra-se a geração de emprego. O Brasil passa por uma situação difícil do ponto visto socioeconômico. Os especialistas consideram que o fato de incluir uma nova tecnologia, pode tornar o processo mais eficiente, mas deve-se avaliar se precisa-se de mão de obra qualificada e com conhecimentos específicos para a operação do sistema. Também deve-se avaliar se, no cenário que a nova tecnologia automatize o processo, o possível índice de desemprego que isto pode ocasionar.

Em relação à melhor alternativa, ou seja, aquela ranqueada como de maior preferência pelo grupo de especialistas (Alternativa 1: bombas eficientes), a Figura 46 ilustra uma análise em função dos subcritérios, destacando-se três de especial relevância, já amplamente discutidos nesta seção.

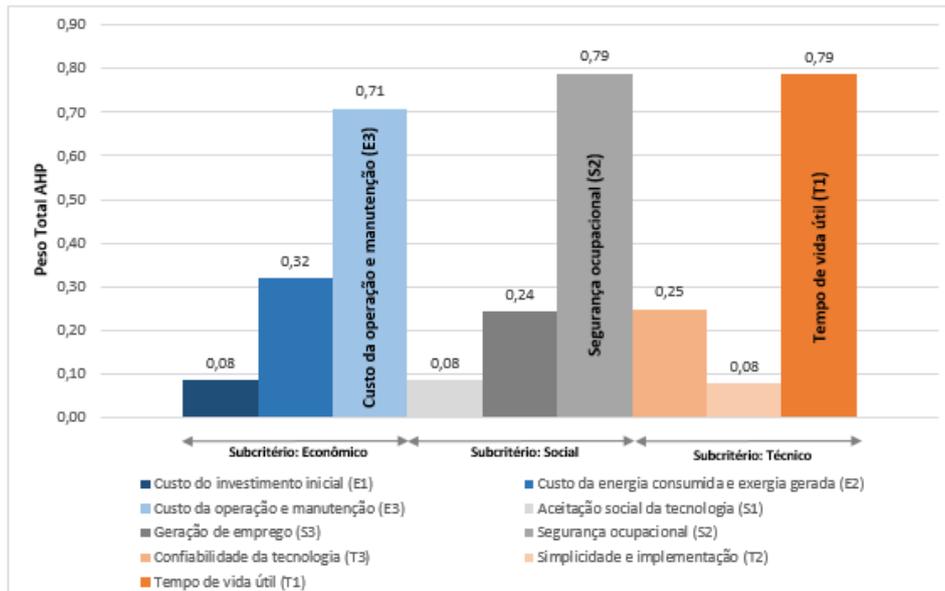


Figura 46 - Avaliação dos subcritérios da CCT (bombas) em função da alternativa 1: bombas eficientes

6.7.3. CCT: Ventilação

Nesta situação, uma vez mais o fator econômico tornou-se o critério de preferência pelo grupo de especialistas. Os critérios técnico e ambiental, ocuparam o segundo e terceiro lugar respectivamente. A Figura 47 ilustra esta situação.

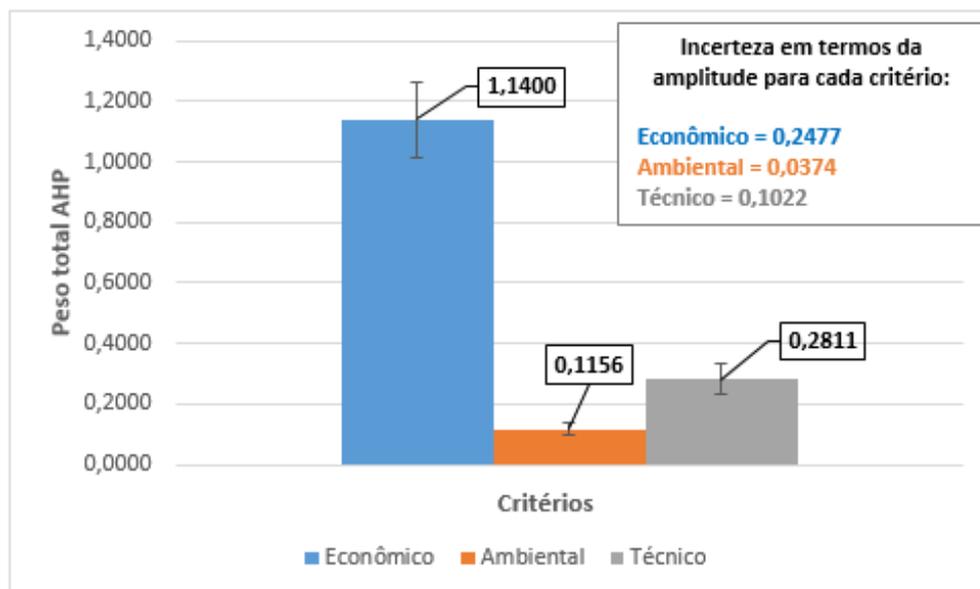


Figura 47 – Avaliação dos critérios para as CCT (Ventilação) do subsetor papel e celulose

Nesta situação, os especialistas consideraram de especial relevância dois subcritérios econômicos, um ambiental e um técnico. Eles são: (i) custo do investimento

inicial; (ii) *custo de operação e manutenção*; (iii) *emissões de GEE* e (iv) *tempo de vida útil*. Esses subcritérios foram analisados e discutidos, além de tudo, os resultados obtidos confirmaram quantitativamente a importância do impacto na avaliação de ventiladores eficientes. A Figura 48 ilustra os subcritérios avaliados e faz um destaque especial para os quatro já mencionados.

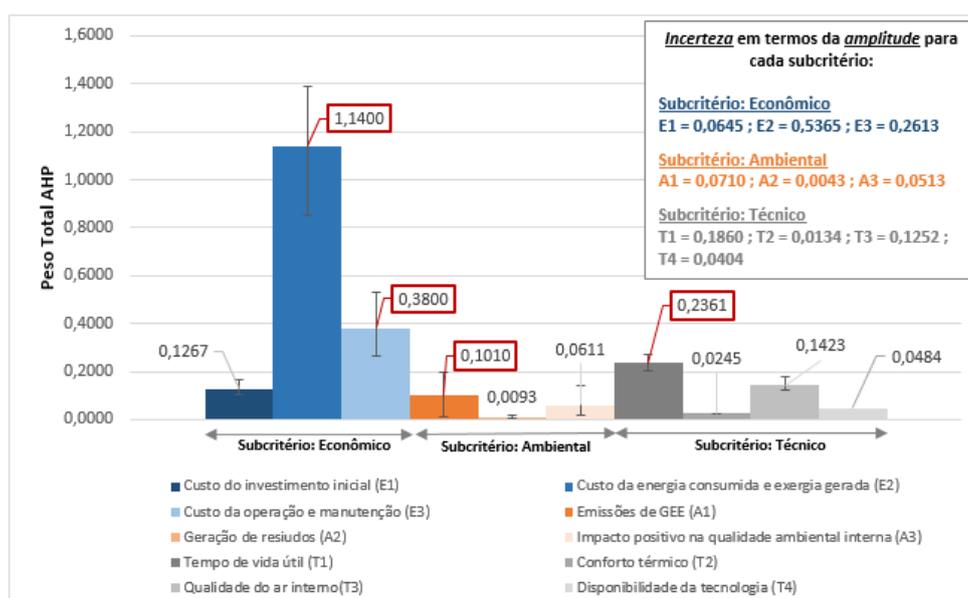


Figura 48 – Avaliação dos subcritérios para as CCT (ventilação) do subsetor papel e celulose

Em relação ao custo da energia consumida e exergia gerada foi percebida uma alta preocupação. Espera-se que a implementação de uma nova tecnologia seja tecnicamente eficiente e os custos da energia sejam menores, o que levaria a um retorno do investimento em um tempo menor. No referente ao custo de operação e manutenção similar aos comentários realizados para o caso das bombas. As condições adversas de operação, a manutenção preventiva mal planejada, são alguns dos principais fatores que aumentam os custos. Já, no concernente ao tema ambiental, a geração de emissões de GEE representa um dos principais aspectos a ser analisado. Os especialistas consideram que, ao inserir uma nova tecnologia no País devem prevalecer os critérios legítimos da sustentabilidade, principalmente, priorizando o futuro das novas gerações e qualidade de vida das pessoas. Finalmente, o critério técnico é bem importante e o subcritério de maior preferência corresponde ao tempo de vida útil. Esse subcritério considera o tempo de duração ou vida útil que a tecnologia pode operar garantindo uma alta eficiência energética. Os especialistas consideram que aspectos fundamentais devem ser analisados,

tais como: o deslocamento da curva de operação do ventilador em função da seleção, operação e manutenção.

Em relação à melhor alternativa, ou seja, aquela ranqueada como de maior preferência pelo grupo de especialistas (Alternativa 1: ventiladores eficientes), a Figura 49 ilustra uma análise em função dos subcritérios, destacando-se três de especial relevância, já amplamente discutidos nesta seção.

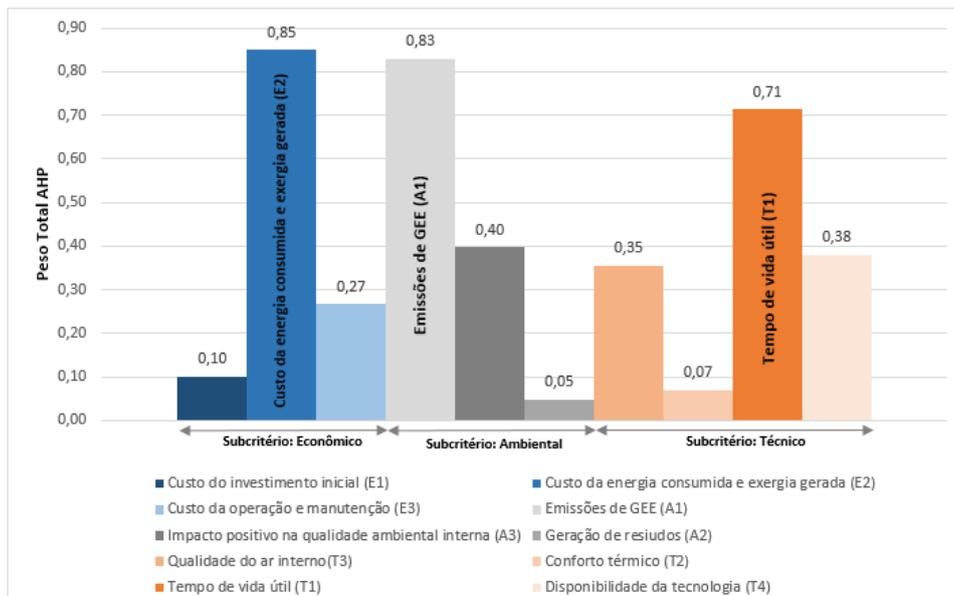


Figura 49 – Avaliação dos subcritérios da CCT (ventilação) em função da alternativa 1: ventiladores eficientes

6.7.4. CCT: Refrigeração

Contrário à tendência mostrada na avaliação das anteriores CCT (bomba e ventilação), o principal critério a ser considerado para tornar mais eficientes um sistema de *refrigeração* é o *Técnico*, seguido do *Ambiental* e por último o critério *Econômico*. A Figura 50 ilustra esta situação.

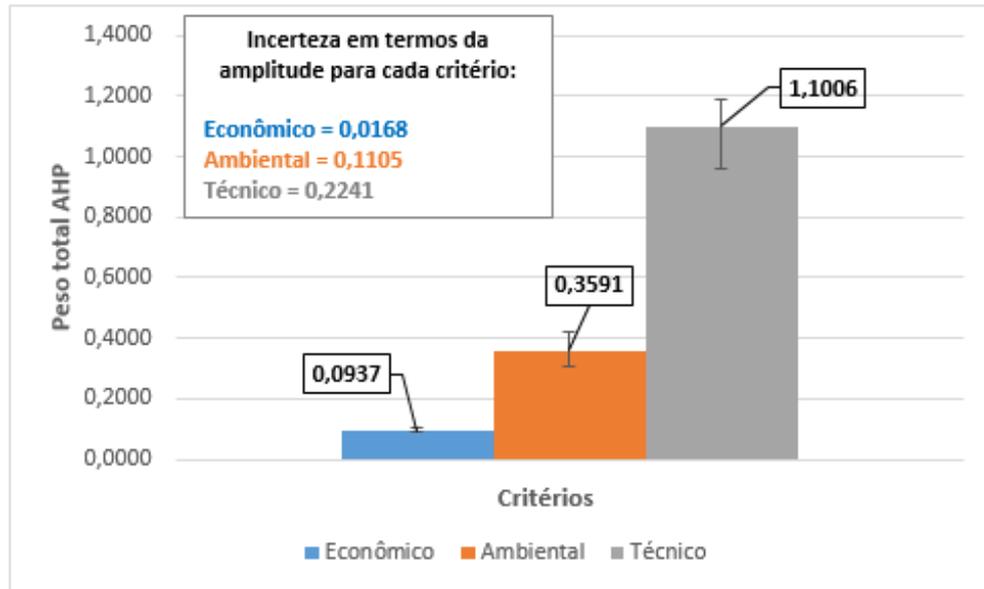


Figura 50 – Avaliação dos critérios para as CCT (refrigeração) do subsetor papel e celulose

Nesta situação houve um consenso pelo grupo de especialista relacionada à proteção de meio ambiente, bem acima dos critérios econômicos. Este resultado torna-se fundamental uma vez que levanta a preocupação diminuir as emissões e atender às políticas ambientais amplamente discutida na comunidade internacional. A Figura 51 ilustra o peso total AHP de todos os subcritérios avaliados, fazendo um destaque especial em: (i) tempo de vida útil e (ii) emissões de GEE.

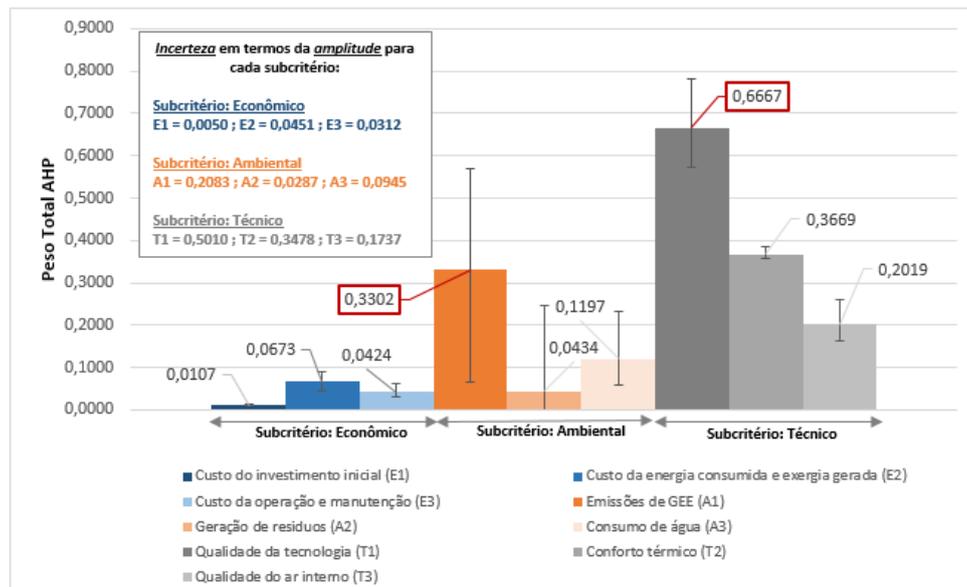


Figura 51 – Avaliação dos subcritérios para as CCT (refrigeração) do subsetor papel e celulose

Em relação à *qualidade da tecnologia*, os especialistas propõem que a tecnologia para sistemas de refrigeração deve manter uma alta eficiência energética com uma reduzida manutenção preventiva, uma vez que o custo da energia demandada pela refrigeração é elevada quando comparada com outras tecnologias. As condições de operação, assim como a seleção adequada do sistema refrigeração em função da carga térmica a ser retirada, são fatores fundamentais que devem ser considerados com o propósito de avaliar a qualidade da tecnologia. Já, a *geração de emissões de GEE* se constitui em um aspecto crítico a ser analisado para a implementação de novas tecnologias de refrigeração. Os especialistas conceberam que manter os níveis de emissões abaixo da média dos países da região e promover as políticas de eficiência energética priorizando critérios de sustentabilidade, são aspectos críticos que devem ser levados em consideração.

No concernente à melhor alternativa, ou seja, aquela ranqueada como de maior preferência pelo grupo de especialistas (Alternativa 1: compressores eficientes), a Figura 52 ilustra uma análise em função dos subcritérios, destacando-se três de especial relevância, já amplamente discutidos nesta seção.

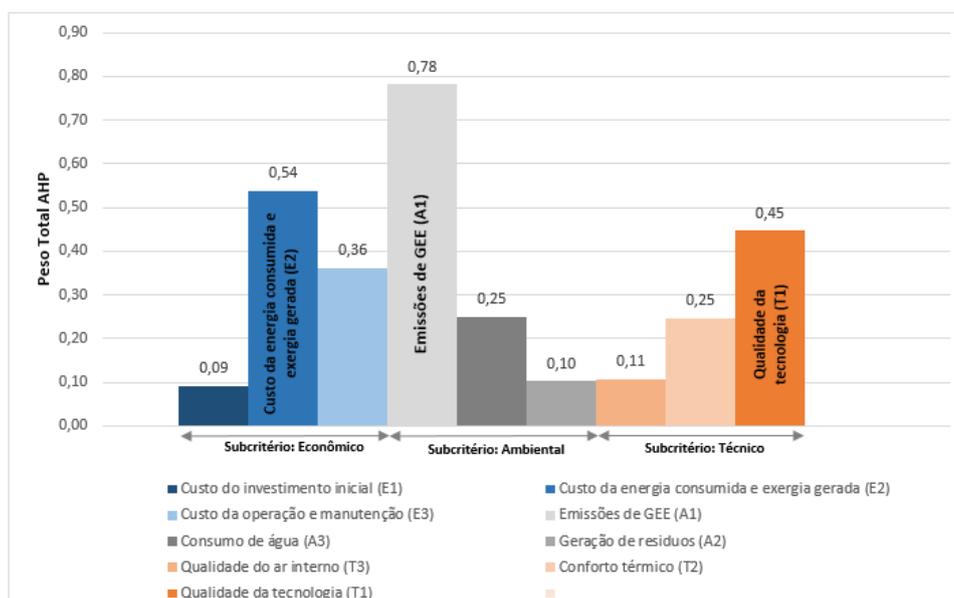


Figura 52 – Avaliação dos subcritérios da CCT (refrigeração) em função da alternativa 1: compressores eficientes

Na figura acima, destaca-se ainda que o subcritério Emissões de GEE é o principal fator a ser considerado para a implementação da alternativa, o que confirma o forte compromisso da proteção ambiental. Além disso, é percebido que o custo da energia não é crítico para eficientizar o sistema de refrigeração, assim como a qualidade da tecnologia.

6.7.5. CCT: Iluminação

O fator econômico constitui o critério de preferência pelo grupo de especialistas para tornar mais eficiente a *iluminação* no subsetor de papel e celulose. Porém, o impacto ambiental também foi considerado crítico, inclusive, acima das características técnicas da tecnologia. A Figura 53 ilustra esta situação.

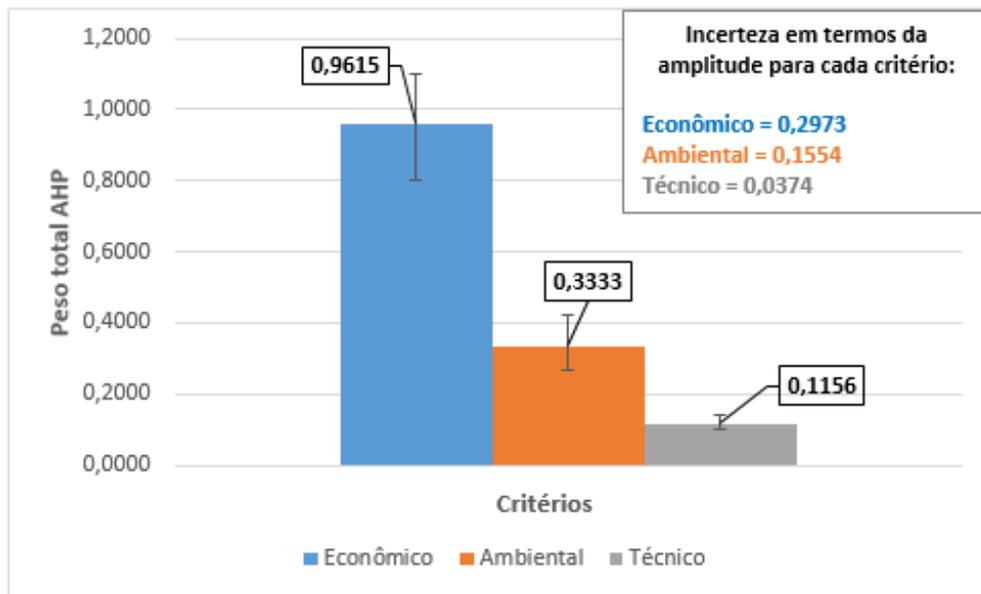


Figura 53 – Avaliação dos critérios para as CCT (iluminação) do subsetor papel e celulose

Nesta tecnologia, embora exista uma tendência a considerar o fator econômico, os especialistas levantaram aspectos interessantes e relevantes relacionados ao impacto social e técnico que devem ser avaliados. Nesse sentido, três subcritérios específicos foram analisados e discutidos pelo grupo de especialistas. A Figura 54 ilustra o peso total AHP de todos os subcritérios avaliados, fazendo um destaque especial para: (i) emissões de GEE e (ii) custo da energia consumida.

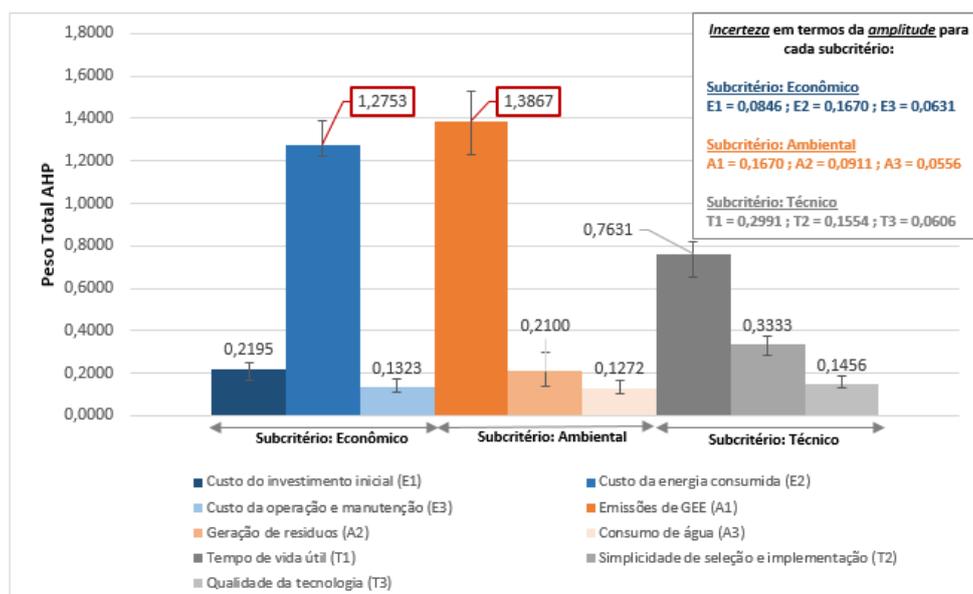


Figura 54 – Avaliação dos subcritérios para as CCT (iluminação)

O subcritério *emissões de GEE* é sem dúvida, de maior preocupação no setor de iluminação. Um maior consumo energético implica em uma maior produção para atender a demanda. Conseqüentemente, os efeitos de GEE (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFC e SF₆) constituem-se em umas das principais causas de poluição ambiental que impactam diretamente na vida humana. Avaliar a produção de CO₂ foi o principal aspecto considerado pelo grupo de especialistas, confirmando uma vez mais, o compromisso com a proteção do meio ambiente. No concernente ao *custo da energia consumida*, os especialistas propõem avaliar a eficiência energética de cada tecnologia desde o ponto de vista econômico, ou seja, quanto é o gasto econômico relacionado ao consumo energético. Este parâmetro é de vital importância, especialmente, para o análise do setor elétrico.

Em relação à melhor alternativa, ou seja, aquela ranqueada como de maior preferência pelo grupo de especialistas (Alternativa 2: LEDs), a Figura 55 ilustra uma análise em função dos subcritérios, destacando-se dois de especial relevância, já amplamente discutidos nesta seção.

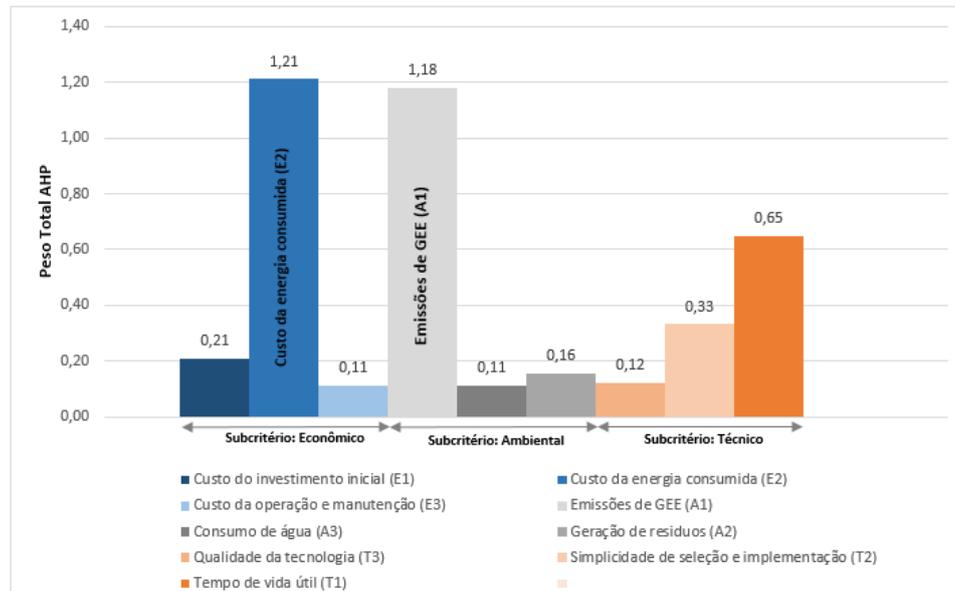


Figura 55 – Avaliação dos subcritérios da CCT (iluminação) em função da alternativa 2

A figura acima confirma a relevância dos subcritérios avaliados, em especial, aqueles relacionados ao fator econômico (custo da energia consumida) e ao aspecto ambiental (emissões de GEE).

Em sínteses, este estudo considera a importância de tornar o subsetor de papel e celulose mais eficiente, mas avaliando os impactos decorrentes desta eficiência no âmbito: econômico, técnico, ambiental e social.

7

Conclusões e recomendações

A partir de uma análise estatística baseada no princípio de Pareto, a pesquisa de doutorado permitiu identificar que o setor industrial contribui com 28,5% do consumo de energia brasileiro, sendo caracterizado como o mais crítico à luz do consumo energético. Além disso, o estudo da literatura especializada e fontes de informação disponível permitiram selecionar o subsetor de papel e celulose – que representa 14,0% da energia consumida do setor industrial – para a análise de alternativas de efficientização energética viáveis e aplicada neste subsetor. A abordagem do método multicritério híbrido de apoio à decisão *Fuzzy-AHP-TOPSIS*, confirmou que além dos critérios técnicos e econômicos, aspectos sociais e ambientais impactam na efficientização energéticas de processos industriais, assim como nas distintas tecnologias aplicáveis.

Desta forma, como resultado da contribuição da Tese de Doutorado, conclui-se que a implementação de ações de efficientização energética que, permitem obter ganhos de energia, decorrem em impactos técnicos, econômicos, ambientais e sociais que não são considerados em programas de eficiência energética. Assim, esta pesquisa analisou a grande relevância de cada aspecto, assim como os critérios e subcritérios de avaliação, sugerindo desta forma, inclui-los em programas brasileiros de eficiência energética.

Como possíveis desdobramentos futuros da pesquisa recomenda-se:

- Aplicação do modelo *Fuzzy-AHP-TOPSIS* para avaliar estratégias de efficientização energética em outros setores e subsetores críticos da economia brasileira, assim como para as fontes de energia.
- Comparação de resultados por meio da aplicação de outros métodos híbridos de lógica *fuzzy* disponíveis na literatura (*i.e.*: ELECTRE, PROMETHEE, ANP).
- Estudos comparativos do subsetor de papel e celulose brasileiro com o mesmo subsetor do exterior, aplicando modelos multicritério.
- Estudos e proposição de novos modelos de previsão (series temporais) para avaliar a efficientização de processos e tecnologias aplicáveis ao longo do tempo.

Referências bibliográficas

AKHAVAN-REZAI, E. et al. Online Intelligent Demand Management of Plug-In Electric Vehicles in Future Smart Parking Lots. **Ieee Systems Journal**, v. 10, n. 2, p. 483-494, Jun 2016. ISSN 1932-8184.

AKHUNDZADEH, M.; SHIRAZI, B. Technology selection and evaluation in Iran's pulp and paper industry using 2-filtered *fuzzy* decision making method. **Journal of cleaner production**, v. 142, p. 3028-3043, 2017. ISSN 0959-6526.

ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil - Energia no Brasil e no mundo. Parte I:** 12 p. 2008a.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil - Fontes Renováveis Parte II:** 12 p. 2008b.

ANEEL. **Fontes não-renováveis Parte III.** Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasil: Agência Nacional de Energia Elétrica: 92-104 p. 2008c.

ANEEL. **Programa de Eficiência Energética.** p.ANEEL. 2013

ANEEL. Banco de informações de Geração (BIG): Capacidade de Geração do Brasil. 2017a.

ANEEL. Combustível Biomassa - Banco de Informações de Geração (BIG). 2017b.

ANP. Biocombustíveis. 2017a. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis> >. Acesso em: 25 de maio de 2017.

ANP. **Boletim do Etanol N°09/2017 - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.** SUPERINTENDÊNCIA DE REFINO, P. D. G. N. E. P. D. B. S. 2017b.

ANP. Etanol. 2017c. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/wwwanp/biocombustiveis/etanol> >. Acesso em: 25 de maio de 2017.

ANP. Produção de derivados de petróleo e processamento de gás natural. Brasil, 2017d. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/wwwanp/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural> >. Acesso em: 23 de maio de 2017.

ANP. Produção nacional de derivados de petróleo (barris). Brasil, 2017e. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/wwwanp/dados-estatisticos> >. Acesso em: 23 de maio de 2017.

ASTE, N. et al. Sustainable Building Design in Kenya. **8th International Conference on Applied Energy (Icae2016)**, v. 105, p. 2803-2810, 2017. ISSN 1876-6102.

AZIZI, M.; RAY, C. Introducing a status of access to raw material resources for manufacturers of cellulosic industries. **Forest Policy and Economics**, v. 51, p. 17-28, Feb 2015. ISSN 1389-9341.

BALOCH, A. A. et al. Simulation tools application for artificial lighting in buildings. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3007-3026, Feb 2018. ISSN 1364-0321.

BARRIOS, M. A. O. et al. An AHP-Topsis Integrated Model for Selecting the Most Appropriate Tomography Equipment. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 15, n. 04, p. 861-885, 2016. ISSN 0219-6220.

BERNARDO, H.; GASPAR, A.; ANTUNES, C. H. An application of a multi-criteria decision support system to assess energy performance of school buildings. **Cisbat 2017 International Conference Future Buildings & Districts - Energy Efficiency from Nano to Urban Scale**, v. 122, p. 667-672, 2017. ISSN 1876-6102.

BERTNESS, K. I.; MCSHANE, S. J. **Battery tester for electric vehicle**: Google Patents 2016.

BESIKCI, E. B. et al. An application of *fuzzy*-AHP to ship operational energy efficiency measures. **Ocean Engineering**, v. 121, p. 392-402, Jul 2016. ISSN 0029-8018.

BHANDER, G. Analysis of emission reduction strategies for power boilers in the US pulp and paper industry. 2017.

BIGATON, A. et al. Previsão de custos do setor sucroenergético na região Centro-Sul do Brasil: safra 2016/17. **Revista iPecege**, v. 2, n. 3, p. 106-113, 2016. ISSN 2359-5078.

BOTTICELLA, F. et al. Multi-criteria (thermodynamic, economic and environmental) analysis of possible design options for residential heating split systems working with low GWP refrigerants. **International Journal of Refrigeration**, 2017. ISSN 0140-7007.

BOUKHERROUB, T.; LEBEL, L.; RUIZ, A. A framework for sustainable forest resource allocation: A Canadian case study. **Omega-International Journal of Management Science**, v. 66, p. 224-235, Jan 2017. ISSN 0305-0483.

BRASIL, P. PIB agropecuário deve crescer 3,61% em 2017. 2017. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/economia-e-emprego/2017/02/pib-agropecuaria-deve-crescer-3-61-em-2017>>. Acesso em: 3 de Junho 2017.

CALILI, R. F. **Políticas de Eficiência Energética no Brasil: uma abordagem em um Ambiente Econômico sob Incerteza**. 2013. PUC-Rio

CALILI, R. F. et al. Estimating the cost savings and avoided CO₂ emissions in Brazil by implementing energy efficient policies. **Energy Policy**, v. 67, p. 4-15, 2014. ISSN 0301-4215.

CAMPOS, L. M. S. et al. Environmental performance indicators: a study on ISO 14001 certified companies. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, p. 286-296, Jul 2015. ISSN 0959-6526.

CARLI, R.; DOTOLI, M.; PELLEGRINO, R. A decision-making tool for energy efficiency optimization of street lighting. **Computers & Operations Research**, 2017. ISSN 0305-0548.

CAVALCANTE, C. A. V.; LOPES, R. S. Multi-criteria model to support the definition of opportunistic maintenance policy: A study in a cogeneration system. **Energy**, v. 80, p. 32-40, Feb 2015. ISSN 0360-5442.

CHAVES, R. T. **Estudo do uso de misturas de etanol hidratado e gasolinas automotivas em um motor ASTM-CFR**. 2013. Universidade Federal do Rio de Janeiro

CHEN, X. et al. Multi-criteria assessment and optimization study on 5 kW PEMFC based residential CCHP system. **Energy Conversion and Management**, v. 160, p. 384-395, 2018.

CONPET. Consulte o modelo de equipamento contemplado com o Selo CONPET., 2012. Disponível em: < http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/selo-conpet.shtml >. Acesso em: 11 de maio de 2017.

COSTA, H. G. Auxílio multicritério à decisão: método AHP. **Rio de Janeiro: Abepro**, 2006.

DA COSTA, C. C.; GUILHOTO, J. J. M.; DE MORAES, M. A. F. D. Impactos sociais do aumento de demanda de etanol hidratado versus gasolina c na Economia brasileira. **Revista Econômica do Nordeste**, v. 44, n. 1, p. 45-57, 2016. ISSN 2357-9226.

DE MORAES, M. A. F. D.; RODRIGUES, L.; KAPLAN, S. The Sugarcane Industry and the Use of Fuel Ethanol in Brazil: History, Challenges, and Opportunities. In: (Ed.). **Handbook of Bioenergy Economics and Policy: Volume II**: Springer, 2017. p.39-63.

ECONOMISTA. Setor industrial é um dos mais importantes para segurar a economia. 2015. Disponível em: < <https://www.oeconomista.com.br/setor-industrial-e-um-dos-mais-importantes-indicadores-da-saude-financeira-no-brasil-e-no-mundo/> >. Acesso em: 31 de maio de 2017.

EEL. 7 energy-efficiency improvement opportunities in lighting system. 2015. Disponível em: < <http://electrical-engineering-portal.com/7-energy-efficiency-improvement-opportunities-in-lighting-system> >.

EINI, S. et al. Multi-objective optimization of a cascade refrigeration system: Exergetic, economic, environmental, and inherent safety analysis. **Applied Thermal Engineering**, v. 107, p. 804-817, Aug 2016. ISSN 1359-4311.

ELETROBRAS-PROCEL. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2016.

EPE. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética / Ministério de Minas e Energia 2007a.

EPE. **Plano nacional de energia 2030**. Rio de Janeiro: EPE: 1970-2010 p. 2007b.

EPE. Projeção da Demanda de Energia Elétrica: para os próximos 10 anos (2013-2022). **Ministério de Minas e Energia, In Serie: Estudos de Demanda de Energia–Nota Técnica DEA**, v. 22, p. 12, 2012.

EPE. Plano decenal de expansão de energia 2023. **Brasil, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética**, 2014.

EPE. **Balço energético nacional 2017: Ano base 2016**. Brasil: Empresa de Pesquisa Energetica / Ministério de Minas e Energia 2017.

EVO. **International Performance Measurement & Verification Protocol Concepts and Options for Determining Energy and Water Savings Volume I. International Performance Measurement & Verification Protocol Committee.**: Efficiency Valuation Organization 2010.

FERGANI, Z.; TOUIL, D.; MOROSUK, T. Multi-criteria exergy based optimization of an Organic Rankine Cycle for waste heat recovery in the cement industry. **Energy Conversion and Management**, v. 112, p. 81-90, Mar 2016. ISSN 0196-8904.

FERNANDES, J. E. D. M.; GOMES, L.; SOARES DE MELLO, J. **Seleção de uma aeronave para atividades de charter regional: uma abordagem multicritério baseada no método NAIADE**: Artigo submetido para publicação em Gestão e Produção 2009.

FIRMEZA, C. E. **Programa de Eficiência Energética regulado pela ANEEL e Regras Para Apresentação de Projetos**. Encontro Nacional dos Conselhos de Consumidores de Energia Elétrica. Vitoria, Brasil.: 32 p. 2015.

FLEITER, T. et al. Energy efficiency in the German pulp and paper industry - A model-based assessment of saving potentials. **Energy**, v. 40, n. 1, p. 84-99, Apr 2012. ISSN 0360-5442.

FREITAS, E. D. Importância da agropecuária brasileira. 2017. Disponível em: < <http://brasilecola.uol.com.br/brasil/a-importancia-agropecuaria-brasileira.htm> >. Acesso em: 3 de Junho de 2017.

GOLDRATH, T.; AYALON, O.; SHECHTER, M. A combined sustainability index for electricity efficiency measures. **Energy Policy**, v. 86, p. 574-584, Nov 2015. ISSN 0301-4215.

GOMES, L. F. A. M.; GOMES, C. F. S. **Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério**. 4. São Paulo, Brasil: Editora Atlas SA, 2012. ISBN 8522488207.

GOMEZ, J. M. A. **Avaliação do impacto dos veículos flex-fuel no consumo de combustíveis no Brasil aplicando uma metodologia conjunta de cointegração e filtro de Kalman**. 2015. Universidade Federal do Rio de Janeiro

GROSSO, M. et al. Energy-efficient battery charging in electric vehicles with solar panels. *Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, 2016 IEEE 2nd International Forum on, 2016, IEEE. p.1-5.

HAHLBOHM, O. The "Two Team Project", The Project you should not miss. **WOCHENBLATT FUR PAPIERFABRIKATION**, v. 141, n. 5, p. 299-301, 2013. ISSN 0043-7131.

IEA. **Energy Efficiency Market Report**. International Energy Agency, p.142. 2016a

IEA. **Energy, climate change and environment** Paris, France: International Energy Agency: 133 p. 2016b.

IETD. Pulp and Paper. 2006. Disponível em: < <http://ietd.iipnetwork.org/content/pulp-and-paper> >.

INMETRO. Etiqueta de eficiência energética. 2017. Disponível em: < http://www2.inmetro.gov.br/pbe/a_etiqueta.php >. Acesso em: 11 de maio de 2017.

JAGTAP, H. P.; BEWOOR, A. K. Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments. **Materials Today- Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 1927-1936, 2017. ISSN 2214-7853.

JAUHAR, S. K.; PANT, M.; ABRAHAM, A. A novel approach for sustainable supplier selection using differential evolution: a case on pulp and paper industry. In: (Ed.). **Intelligent Data analysis and its Applications, Volume II**: Springer, 2014. p.105-117.

KINTO, O. T. et al. Sustainable Energy Technologies in the Industry Using Integrated Energy Resources Planning. **Energy Procedia**, v. 118, p. 4-14, 2017. ISSN 1876-6102.

KLUCZEK, A. An overall multi-criteria approach to sustainability assessment of manufacturing processes. **14th Global Conference on Sustainable Manufacturing, Gcsm 2016**, v. 8, p. 136-143, 2017. ISSN 2351-9789.

KRAMER, K. J. et al. Energy efficiency improvement and cost saving opportunities for the pulp and paper industry. **An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers**. Berkeley, US: Energy Analysis Department, University of California, 2009.

KREJČÍ, J.; PAVLAČKA, O.; TALAŠOVÁ, J. A *fuzzy* extension of Analytic Hierarchy Process based on the constrained *fuzzy* arithmetic. **Fuzzy Optimization and Decision Making**, v. 16, n. 1, p. 89-110, 2017. ISSN 1568-4539.

LENZI, C. **As PCHs no contexto energético futuro no Brasil**. Campinas, SP.: ABRAGEL - Associação Brasileira de Geração de Energia Limpa: 18 p. 2013.

LIMA, A. G. G. Fontes de Energia. 2017. Disponível em: < <http://antoniolima.web.br.com/arquivos/fontesenergia.htm> >. Acesso em: 22 de maio de 2017.

LIMA, L. C. D. A.; GONÇALVES, P. R. C. Desafios do desenvolvimento sustentável: estudo sobre as mudanças na matriz energética brasileira. 2017.

LOIKKANEN, O.; LAHDELMA, R.; SALMINEN, P. Multicriteria evaluation of sustainable energy solutions for Colosseum. **Sustainable Cities and Society**, v. 35, p. 289-297, Nov 2017. ISSN 2210-6707.

MACHANI, M.; NOURELFATH, M.; D'AMOURS, S. A scenario-based modelling approach to identify robust transformation strategies for pulp and paper companies. **International Journal of Production Economics**, v. 168, p. 41-63, Oct 2015. ISSN 0925-5273.

MALICO, I. Energia da biomassa. **Geoboletim**, v. 7, p. 4-5, 2008. ISSN 1646-3676.

MANTOVANI, P. R. A.; NEUMANN, P. N.; EDLER, M. A. R. Matriz energética brasileira: em busca de uma nova alternativa. **Revista interdisciplinar de ensino, pesquisa e extensão**, v. 4, n. 1, 2017. ISSN 2358-6036.

MARCOCCIA, R. **A participação do etanol brasileiro em uma nova perspectiva na matriz energética mundial**. 2007. Universidade de São Paulo

MARINAKIS, V. et al. Multicriteria decision support in local energy planning: An evaluation of alternative scenarios for the Sustainable Energy Action Plan. **Omega**, v. 69, p. 1-16, 2017. ISSN 0305-0483.

MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. **Itajubá: FUPAI**, 2006.

MARTIN-GAMBOA, M. et al. A review of life-cycle approaches coupled with data envelopment analysis within multi-criteria decision analysis for sustainability assessment of energy systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 150, p. 164-174, May 2017. ISSN 0959-6526.

MARTINS, G. D. A. **Modelo Fuzzy AHP-TOPSIS para avaliação e seleção de tecnologias de geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis**. 2017. (Mestre em Metrologia). PósMQI, PUC-Rio, Rio de Janeiro.

MELLO, A. F. P. D. **Avaliação da regulamentação sobre recolhimento de alimentos no Brasil: proposição de indicadores**. 2015. 185 (Dissertação de Mestrado). PósMQI, PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brazil.

MME. **BALANÇO DE ENERGIA ÚTIL**. Brasília: Ministério de Minas e Energia 71 p. 2005.

MME. **Emissão de CO₂ no Brasil é menor que média mundial**. Brasil: Ministério de Minas e Energia 2016a.

MME. Energias renováveis abastecem 83% da oferta de energia elétrica brasileira. Brasil, 2016b. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/energias-renovaveis-abastecem-83-da-oferta-de-energia-eletrica-brasileira >. Acesso em: 19 de maio de 2017.

MME. **Boletim mensal de energia (Janeiro de 2017)**. Brasil: Ministério de Minas e Energia 2017.

MORAES, L. F. **Avaliação multicritério de projetos de produção da indústria de petróleo no Brasil: uma análise comparativa dos métodos Prométhée e Todim**. 1999. Tese de Mestrado em Engenharia de Produção da UFF, Niterói

MUHSEN, D. H.; KHATIB, T.; ABDULABBAS, T. E. Sizing of a standalone photovoltaic water pumping system using hybrid multi-criteria decision making methods. **Solar Energy**, v. 159, p. 1003-1015, Jan 2018. ISSN 0038-092X.

M'HAMDI, A. I. et al. Life cycle assessment of paper production from treated wood. **Energy Procedia**, v. 128, p. 461-468, 2017. ISSN 1876-6102.

NAKICENOVIĆ, N. Freeing energy from carbon. **Daedalus**, v. 125, n. 3, p. 95-112, 1996. ISSN 0011-5266.

OZCAN, E. C.; UNLUSOY, S.; EREN, T. A combined goal programming - AHP approach supported with TOPSIS for maintenance strategy selection in hydroelectric power plants. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 78, p. 1410-1423, Oct 2017. ISSN 1364-0321.

PATIL, S. K.; KANT, R. A *fuzzy* AHP-TOPSIS framework for ranking the solutions of Knowledge Management adoption in Supply Chain to overcome its barriers. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 2, p. 679-693, 2014. ISSN 0957-4174.

PITTERI, S. **Tomada De Decisão**. Clube de Autores, 2016.

PROCEL. Eficiência energética no poder público. 2017. Disponível em: < <http://www.procelinfo.com.br/main.asp?TeamID=%7B0C24456E-2980-4704-B2CB-9B5518636BBE%7D> >. Acesso em: 3 de Junho de 2017.

RAINERI, R. Integración Energética en América del Sur: Experiencias, Posibles Beneficios, Miedos y Retos1. **ELÉCTRICA**, p. 214, 2016.

RANGLES, R. H.; WOLFE, D. A. **Introduction to the theory of nonparametric statistics**. Wiley New York, 1979.

REN, P. J. et al. A thermodynamic method of intuitionistic *fuzzy* MCDM to assist the hierarchical medical system in China. **Information Sciences**, v. 420, p. 490-504, Dec 2017. ISSN 0020-0255.

ROCHA, C. R.; BAJAY, S.; GORLA, F. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria. **Brasília: CNI**, p. 58, 2010.

SAATY, T. L. Método de análise hierárquica. **Livro, São Paulo, Editora Makron, 1991.**

SDP. **Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural 2016.** PRODUÇÃO, S. D. D. E. Brasil: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 7 p. 2016.

SHAHRESTANI, M.; YAO, R.; COOK, G. K. A *fuzzy* multiple attribute decision making tool for HVAC&R systems selection with considering the future probabilistic climate changes and electricity decarbonisation plans in the UK. **Energy and Buildings**, v. 159, p. 398-418, 2018. ISSN 0378-7788.

SHIH, H. S.; SHYUR, H. J.; LEE, E. S. An extension of TOPSIS for group decision making. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 45, n. 7-8, p. 801-813, Apr 2007. ISSN 0895-7177.

SI, J. et al. Assessment of building-integrated green technologies: A review and case study on applications of Multi-Criteria Decision Making (MCDM) method. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 106-115, 2016. ISSN 2210-6707.

SILVA, A. M.; VIEIRA, R. M. F. Wind energy: concepts and basic characteristics for a possible supplement of the brazilian energy matrix. **Revista Direito Ambiental E Sociedade**, v. 6, n. 2, p. 53-76, Jul-Dec 2016. ISSN 2316-8218.

SILVA, F. L. C. D. **Extensão Estocástica Bayesiana da Abordagem Bottom-up Determinística para a Previsão de Longo Prazo do Consumo de Energia.** 2017. 96 (Tese de Doutorado). Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro.

SUHR, M. et al. Best available techniques (BAT)–Reference document for the production of pulp, paper and board. **European Commission**, 2015.

TRINDADE, J. E. D. O. **Mensuração e Avaliação da Capacidade Inovativa de Micro, Pequenas e Médias Empresas: aplicação de métodos multicritério *fuzzy* de apoio à decisão.** 2016. 107 (Mestre em Metrologia). PósMQI, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

UMM E, H.; ASGHAR, S.; IEEE. A Survey on Multi-Criteria Decision Making Approaches. International Conference on Emerging Technologies (ICET 2009), 2009, Islamabad, PAKISTAN. Ieee, Oct 19-20. p.321-+.

VELASQUEZ, M.; HESTER, P. T. An analysis of multi-criteria decision making methods. **International Journal of Operations Research**, v. 10, n. 2, p. 56-66, 2013.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: o Brasil no contexto mundial. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009. ISSN 0100-4042.

WANG, H. C. et al. Developing a multicriteria decision support framework for CHP based combined district heating systems. **Applied Energy**, v. 205, p. 345-368, Nov 2017. ISSN 0306-2619.

WANG, J.-J. et al. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2263-2278, 2009. ISSN 1364-0321.

YAGMUR, L. Multi-criteria evaluation and priority analysis for localization equipment in a thermal power plant using the AHP (analytic hierarchy process). **Energy**, v. 94, p. 476-482, Jan 2016. ISSN 0360-5442.

ZHENG, C. Y. et al. Impacts of feed-in tariff policies on design and performance of CCHP system in different climate zones. **Applied Energy**, v. 175, p. 168-179, Aug 2016. ISSN 0306-2619.

ANEXO A – Descrição dos critérios e subcritérios

CRITÉRIO: ECONÔMICO

• **Custo do investimento inicial:** Avalia o risco ou a incerteza de realizar um investimento inicial em nova tecnologia em função do período de tempo (medido em anos) necessário para recuperá-lo. Considera aspecto como: facilidade de financiamento, estabilidade do mercado e melhoras de infraestrutura. O custo do investimento inicial em função do tempo de retorno em quantificado em \$/anos.

• **Custo da energia consumida:** Este subcritério refere-se, exatamente, à eficiência energética de cada tecnologia desde o ponto de vista econômico, ou seja, quanto é o gasto econômico relacionado ao consumo energético. Os parâmetros fundamentais para avaliar esses subcritérios são: consumo de combustível, consumo de energia elétrica e impacto energético das atividades no setor industrial. É quantificado em \$/MWh.

• **Custo de operação e manutenção:** Este subcritério avalia, em termo da operação, os gastos associados ao funcionamento da tecnologia assim como o treinamento ao pessoal operativo. Já, com relação à manutenção, considera-se um fator fundamental a confiabilidade e disponibilidade da tecnológica em função dos seus custos. O custo da operação é quantificado em \$/MWh gerado. Já o indicador do custo da manutenção é dado \$/horas de manutenção.

• **Custo da energia consumida e exergia gerada:** Este subcritério refere-se, exatamente, à eficiência energética de cada tecnologia desde o ponto de vista econômico. Para o caso particular dos equipamentos, além de analisar o consumo energético, vale a pena realizar uma análise termodinâmica e levar em conta os custos exergoeconômicos, ou seja, o quanto custa a exergia gerada pelo equipamento avaliado. É quantificado em \$/MWh.

CRITÉRIO: AMBIENTAL

• **Poluição ambiental em relação às emissões de gases do efeito estufa (GEE):** Um maior consumo energético implica em uma maior produção para atender a demanda. Consequentemente, os efeitos de GEE (CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFC e SF₆) constituem-se em umas das principais causas de poluição ambiental que impactam diretamente na vida humana. Os impactos dos GEE são medidos em CO₂eq, unidade esta que expressa o impacto de cada um dos gases em termos de quantidade de CO₂ necessária para causar a mesma quantidade de aquecimento no planeta.

• **Uso dos recursos naturais:** Este subcritério avalia como a alternativa tecnológica afetará os recursos naturais, principalmente, a escassez do fornecimento de matérias-primas (principalmente da madeira) e cumprir as políticas de proteção florestal.

• **Proteção da biodiversidade e ecossistemas:** Uma das prioridades para as indústrias é coletar, tratar e eliminar o desperdício de quantidades crescentes. Os impactos potenciais causados por resíduos no meio ambiente e seus distintos ecossistemas (poluição de ar, solo, superfície e águas subterrâneas) e uma má gestão de mecanismos para a proteção da biodiversidade e ecossistemas que aumentam os perigos para a saúde de todos os seres vivos.

• **Consumo de água:** O consumo de água constitui um dos principais fatores de preocupação na produção de energia. Uma maior demanda energética, impacta indiretamente, num maior consumo de água. A construção de novas hidroelétricas para atender a demanda de energia no país implica em uma determinada quantidade total de água doce utilizada para produzir diferentes produtos do setor industrial. A unidade de medida é expressa em m³ por unidade de eletricidade gerada.

• **Geração de resíduos:** Este subcritério avalia o impacto que teria com o meio ambiente o tratamento da tecnologia uma vez finalizem o ciclo de vida útil.

• **Impacto positivo na qualidade ambiental interna:** Para implementar a tecnologia, diversos impactos ambientais internos podem ser gerados. Este subcritério, considera alguns aspectos como: a qualidade do ar interno, o ruído ou conforto acústico gerado, o conforto visual e redução do consumo energético. Este atributo é qualitativo. Entre maior seja o impacto positivo da tecnologia na qualidade ambiental, melhor.

CRITÉRIO: TÉCNICO

• **Qualidade da tecnologia:** Esse subcritério avalia a eficiência energética de cada tecnologia. Idealmente, seria esperado uma eficiência próxima de 100%, mas na prática é claro que isto não possível, principalmente por limitação em quanto a sua construção, operação, manutenção e condições ambientais.

• **Flexibilidade e simplicidade de implementação:** Este subcritério representa, de forma qualitativa, o tempo de implementação da tecnologia, desde a projeção até o seu funcionamento. Quanto menor o tempo empregado, o indicador é considerado melhor.

• **Confiabilidade da tecnologia:** Este subcritério, é analisado de forma qualitativa e avalia o quanto é confiável a implementação da tecnologia considerando, entre outros aspectos: resistência a falhas, tempo meio de falhas e tempo de operação.

• **Tempo de vida útil:** Esse subcritério avalia o tempo de duração ou vida útil que a tecnologia pode operar garantindo uma alta eficiência energética. Para avaliar este subcritério, considerasse o deslocamento da curva de operação da bomba em função da seleção, operação e manutenção. Um maior tempo de vida útil com alta eficiência é considerado melhor.

• **Disponibilidade da tecnologia:** Este subcritério, é analisado de forma qualitativa e avalia o quanto é a disponibilidade de uma bomba durante a operação. São considerados aspectos como o tempo médio de reparação, o tempo médio para a substituição de um equipamento, o tempo médio para substituir um equipamento que está com manutenção preventiva programada, o tempo meio da falha e o tempo meio entre as falhas. Entre maior seja a disponibilidade, melhor será avaliado este atributo.

• **Conforto térmico:** Este subcritério representa, de forma qualitativa, o estado de conforto que oferece a tecnologia para cada aplicação da indústria. O indicador é considerado melhor, caso o conforto térmico seja maior.

CRITÉRIO: SOCIAL

• **Aceitação social da tecnologia:** Este subcritério considera o quanto a instalação e operação de nova tecnologia terá aceitação pelo recurso humano do setor industrial. Os equipamentos envolvidos, dependendo do local de uso (estado ou cidade) podem ter uma aceitação social distinta de acordo com as prioridades do setor. O sucesso também depende da situação de certos fatores diretamente relacionado ao país, às condições iniciais e oportunidades relacionadas à estratégia de desenvolvimento social.

• **Segurança ocupacional:** Este subcritério avalia o grau de segurança da tecnologia em relação ao uso, instalação, manutenção e todos os aspectos relacionados às máquinas térmicas na indústria. Na fase de instalação e operação, distintos fatores devem ser considerados para preservar a saúde e vida humana, tais como acidentes ocupacionais e fatais, gases tóxicos, queimaduras, assim como outros perigos.

• **Geração de emprego:** Esse subcritério qualitativo mostra a potencialidade da tecnologia gerar novos empregos desde a comercialização, instalação, operação, treinamento e manutenção de um novo sistema de bombeamento ou bomba em particular utilizada para o setor industrial.