

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PERSEU PADRE DE MACEDO

**MODELO MULTICRITÉRIO FUZZY PARA MELHORIA
DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Orientador: Prof. Caroline Maria de Miranda Mota, DsC.

RECIFE
2015

PERSEU PADRE DE MACEDO

**MODELO MULTICRITÉRIO FUZZY PARA MELHORIA
DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia de
Produção para obtenção do título de
Mestre em Engenharia de Produção

Área de Concentração: Pesquisa
Operacional

Orientador: Prof^ª. Caroline Maria de
Miranda Mota, DsC.

RECIFE

2015

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicea Alves, CRB-4 / 1260

M141m Macedo, Perseu Padre de.

Modelo multicritério fuzzy para melhoria da eficiência energética/
Perseu Padre de Macedo. - Recife: O Autor, 2015.
96 folhas, il., Qua., Tabs.

Orientador: Prof^a. DsC Caroline Maria de Miranda Mota.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 2015.
Inclui: Referências e Anexos.

1. Engenharia de Produção. 2. Apoio à decisão. 3. Modelo multicritério.
4. Intuitionistic fuzzy . 5. Percepção. 6. Eficiência energética. I. Mota. Caroline
Maria de Miranda (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2015-130



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA
DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE
MESTRADO ACADÊMICO DE

PERSEU PADRE DE MACEDO
“MODELO MULTICRITÉRIO FUZZY PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA
ENERGÉTICA”

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PESQUISA OPERACIONAL

A comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, sob a presidência do(a) primeiro(a), considera o candidato **PERSEU PADRE DE MACEDO, APROVADO.**

Recife, 23 de fevereiro de 2015.

Prof^ª. CAROLINE MARIA DE MIRANDA MOTA, Doutora (UFPE)

Prof^ª. DANIELLE COSTA MORAIS, Doutora (UFPE)

Prof. LUIZ HENRIQUE ALVES DE MEDEIROS, Docteur (UFPE)

RESUMO

Responsável pelo consumo de um terço de toda energia produzida e responsável pela emissão de 40% de CO_2 no planeta, o setor industrial é um alvo oportuno para o alcance da eficiência energética. A substituição dessas tecnologias por tecnologias eficientemente energéticas promove a indústria ganhos em produtividade, adequação as políticas ambientais e energéticas e outros benefícios. Esta pesquisa tem por objetivo propor a substituição de motores industriais não eficientes, para promover uma melhoria na eficiência energética de uma indústria, por meio do desenvolvimento de modelos multicritério para auxiliar a tomada de decisão. Os modelos propostos são o *IF-ELECTRE α* e o *IF-ELECTRE β* , que podem ser aplicados em conjunto para o apoio à tomada de decisão. O primeiro modelo propõe a ordenação das principais tecnologias a serem substituídas em função a sua criticidade. Dado esta ordenação, conforme restrições da empresa, as primeiras tecnologias passaram por uma análise final, assim, o segundo modelo realiza a seleção dessas tecnologias mais críticas para substituição imediata, por meio da captação da percepção otimista/pessimista do decisor, e de acordo com a percepção geral da equipe de planejamento da empresa. Os modelos propostos conseguem mensurar as preferências do decisor de forma menos complexa, dado a conversão do *Interval-Valued Fuzzy* para o *Intuitionistic Fuzzy*, captando a imprecisão das informações e a percepção pessimista/otimista do decisor. Como resultado, o modelo propõe a substituição de 4 tecnologias, com um investimento inicial de R\$9.520, a empresa economizará 33.655 kWh/ano de energia elétrica, um valor economizado em energia de R\$10.096,41/ano, com um investimento inicial de R\$9.520 com um retorno dentro de 0,94 ano, gerando uma redução na emissão de CO_2 de 2.456,79Kg/ano, o equivalente ao plantio de 16 árvores.

Palavras-chave: Apoio à decisão. Modelo multicritério. Intuitionistic fuzzy. Percepção. Eficiência energética.

ABSTRACT

Responsible for consuming a third of all energy produced and responsible for issuing 40% of CO₂ on the planet, the industrial sector is a target of opportunity for achieving energy efficiency. The replacement of these technologies for efficiently promotes energy technology industry gains in productivity, suitability environmental and energy policies and other benefits. This research aims to propose the replacement of inefficient industrial motors, to promote an improvement in energy efficiency of industry, through the development of a multi-criteria model to aid decision making. The proposed models are the *IF-ELECTRE α* and *IF-ELECTRE β* , which can be applied together to support decision-making. The first model assumes the ordering of key technologies to be replaced according to their criticality. Given this ordering, the constraints as now the first technologies have passed through the final analysis, then, the second model selection performs the most critical of these technologies ready replacement by capturing the optimistic/pessimistic perception of decision maker in accordance with general perception of the company's planning team. The proposed models can measure the preferences of the least complex form of decision-making, given the conversion of Interval-Valued Fuzzy to Intuitionistic Fuzzy, capturing the inaccuracy of the information and the optimistic/pessimistic perception of the decision maker. As a result, the model proposes to replace 4 technologies, with an initial investment of R\$ 9,520.00, the company will save 33,655.00 kWh/year of electricity, a value saved in energy R \$ 10,096.41/year, with an initial investment of R\$ 9,520.00 with a return within 0.94 years, generating a reduction in the emission of CO₂ of 2456,79.00 Kg/year, equivalent to planting 16 trees.

Keywords: Decision support. Multicriteria model. Intuitionistic fuzzy. Perception. Energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1 – Comparativo entre a lógica clássica e fuzzy.....	16
Figura 2.2 – Representação dos termos da variável linguística.....	18
Figura 2.3 – Interpretação geométrica das áreas otimistas e pessimistas.....	27
Figura 3.1 - Procedimento para resolução de um problema de decisão.....	30
Figura 4.1 - Modelo IF-ELECTRE α para ordenação de tecnologias.....	37
Figura 4.2 – Modelo IF-ELECTRE β para escolha de tecnologias.....	44
Figura 5.1 – Ordenação final.....	54
Figura 5.2 – Análise de Sensibilidade: alteração dos pesos dos critérios.....	56
Figura 5.3 – Relação de sobreclassificação (Tipo II – J).....	59
Figura 5.4 – Grafo das relações de sobreclassificação (Tipo II – J).....	60
Figura 5.5 – Análise de Sensibilidade II: alteração dos pesos dos critérios	60
Figura A.1 – Matriz de concordância dominante K.....	82
Figura A.2 – Matriz de discordância dominante L.....	82
Figura A.3 – Matriz de credibilidade.....	83
Figura B.1 – Teste ELOT	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Estrutura de preferências.....	11
Tabela 3.1 – Etapas do procedimento para resolução de um problema de decisão.....	31
Tabela 4.1 – Estudo de validade da escala do ELOT.....	45
Tabela 4.2 – Tipos de percepções do decisor.....	46
Tabela 5.1 – Índice dos critérios.....	52
Tabela 5.2 – Índice das alternativas.....	52
Tabela 5.3 – Energia Elétrica Economizada e Valor Economizado de Energia.....	55
Tabela 5.4 – Comparativo de eficiências.....	55
Tabela 5.5 – Limiares de concordância e discordância.....	59
Tabela 5.6 – Seleção das alternativas.....	60
Tabela 5.7 – Energia economizada x redução na emissão de CO_2	61
Tabela 5.8 – Investimento dos tipos de decisores.....	63
Tabela 5.9 – Variação nos limites de concordância e discordância.....	64
Tabela 5.10 – Variação nos pesos dos critérios	65
Tabela A.1 – Matriz IVF de decisão.....	80
Tabela A.2 – Matriz IF de decisão.....	81
Tabela B.1 – Matriz de decisão normalizada (Tipo II – J).....	85
Tabela B.2 – Matriz de concordância	85
Tabela B.3 – Matriz de discordância	85

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Definição do conjunto fuzzy.....	17
Equação 2.2 - Grau de pertinência fuzzy.....	17
Equação 2.3 - Representação fuzzy para discursos contínuos.....	17
Equação 2.4 - Representação fuzzy para discursos discretos.....	17
Equação 2.5 - Função de pertinência fuzzy.....	18
Equação 2.6 - Cálculo da pertinência de x em $\tilde{A}$	19
Equação 2.7 - Adição fuzzy.....	19
Equação 2.8 - Subtração fuzzy.....	19
Equação 2.9 - Multiplicação fuzzy.....	19
Equação 2.10 - Definição do Intuitionistic Fuzzy Set.....	19
Equação 2.11 - Grau de adesão.....	19
Equação 2.12 - Grau de não-adesão.....	19
Equação 2.13 - Condição dos graus IFS.....	19
Equação 2.14 - Grau de hesitação.....	19
Equação 2.15 - Relação dos conjuntos fuzzy com o IFS.....	20
Equação 2.16 - Função escore IFS.....	20
Equação 2.17 - Definição Interval-Valued Fuzzy.....	20
Equação 2.18 - Grau da alternativa IVF.....	20
Equação 4.1 - Matriz de decisão IF.....	38
Equação 4.2 - Concordância IF.....	39
Equação 4.3 - Concordância IF média.....	39
Equação 4.4 - Concordância IF fraca.....	39
Equação 4.5 - Discordância IF.....	39
Equação 4.6 - Discordância IF média.....	39
Equação 4.7 - Discordância IF fraca.....	40
Equação 4.8 - Índice de concordância.....	40
Equação 4.9 - Matriz de concordância G.....	40
Equação 4.10 - Índice de discordância.....	41
Equação 4.11 - Distância euclidiana.....	41
Equação 4.12 - Matriz de discordância H.....	41

Equação 4.13 - Matriz de concordância dominante K.....	41
Equação 4.14 - Matriz de discordância dominante L.....	42
Equação 4.15 - Coeficiente de relaxamento.....	42
Equação 4.16 - Operador P.....	46
Equação 4.17 - Operador Q.....	46
Equação 4.18 - Operador J*.....	46
Equação 4.19 - Operador J.....	46
Equação 4.20 - Operador M.....	47
Equação 4.21 - Operador H*.....	47
Equação 4.22 - Operador H.....	47
Equação 4.23 - Operador N.....	47
Equação 4.24 - Operador D.....	47
Equação 4.25 - Operador F.....	47
Equação 4.26 - índice de concordância II.....	48
Equação 4.27 - índice de discordância II.....	48
Equação 4.28 - Relação de sobreclassificação.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Cenário energético	1
1.2	Delimitação do Tema	3
1.3	Caracterização do problema	3
1.4	Objetivos.....	5
1.5	Justificativa	5
1.6	Estrutura do trabalho	6
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1	Apoio multicritério à decisão.....	8
2.2	Métodos de sobreclassificação.....	11
2.2.1	<i>Família de métodos ELECTRE</i>	12
2.2.2	<i>Família de métodos PROMETHEE</i>	14
2.3	Teoria dos conjuntos fuzzy	14
2.3.1	<i>Conjuntos fuzzy</i>	16
2.3.2	<i>Definições</i>	17
2.3.3	<i>Conjuntos fuzzy intuicionistas de Atanassov's</i>	19
2.3.4	<i>Conjuntos fuzzy intervalares (IVFS)</i>	20
2.4	A importância da utilização da lógica <i>fuzzy</i> no apoio à tomada de decisão ...	20
2.4.1	Modelos multicritério fuzzy	21
2.5	Otimismo e pessimismo nos modelos fuzzy.....	26
2.6	Análise do capítulo.....	28
3	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	29
3.1	Classificação da Pesquisa	29
3.2	Natureza do estudo	29
3.3	Campo de atuação	31
3.4	Síntese da metodologia.....	32

3.5	Análise do Capítulo	32
4	CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PARA APOIAR A MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	33
4.1	Eficiência energética e o sistema de motores	33
4.2	Fundamentos do modelo proposto	35
4.2.1	<i>Abordagens e métodos</i>	<i>35</i>
4.2.2	<i>Situações e princípios para aplicação do modelo.....</i>	<i>36</i>
4.3	Situação I – ordenação das tecnologias	36
4.4	Situação II – escolha dos motores.....	43
4.5	Análise do capítulo.....	49
5	APLICAÇÃO DO MODELO	50
5.1	Perfil da empresa estudada	50
5.2	Aplicação do modelo <i>IF-ELECTRE α</i> na situação I	50
5.2.1	<i>Definição dos parâmetros.....</i>	<i>51</i>
5.2.2	<i>Ordenação das tecnologias.....</i>	<i>53</i>
5.2.3	<i>Análise da situação I.....</i>	<i>54</i>
5.3	Aplicação do modelo <i>IF-ELECTRE β</i> na situação II	57
5.3.1	<i>Escolha das tecnologias.....</i>	<i>57</i>
5.3.2	<i>Análise da situação II</i>	<i>60</i>
5.4	Análise do capítulo.....	65
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
6.1	Resultados e contribuições do modelo	67
6.2	Limitações e recomendações	69
6.3	Sugestões para trabalhos futuros.....	70
	REFERÊNCIAS	72
	ANEXO A.....	80
	ANEXO B.....	84

1 INTRODUÇÃO

O capítulo tem o objetivo de apresentar o cenário energético, delimitando e caracterizando o problema para o alcance da eficiência energética, expondo a importância dos modelos multicritério com a lógica *fuzzy* para solucionar problemas com informações imprecisas. Neste capítulo também está presente os objetivos do trabalho, a justificativa e a estruturação do trabalho.

1.1 Cenário energético

Segundo as Nações Unidas (UN, 2010), por ser essencial para o desenvolvimento econômico e social, a energia tem um importante papel para o alcance da sustentabilidade. Ao observar os países em desenvolvimentos, aproximadamente 28% de sua população não possuem acesso à energia elétrica, isso reflete em impactos negativos a humanidade dado o uso de outras formas nocivas de energia. Para evitar isso, investimentos em energias renováveis estão sendo realizados para assegurar o suprimento pela diversificação da matriz energética, reduzir a emissão de gases de efeito estufa e gerar emprego e renda.

Além de promover esses benefícios, a melhoria na eficiência energética contribui para o aumento da competitividade do setor produtivo. A energia é um insumo essencial no processo produtivo e quando associado o seu custo com as paradas de produção e o desperdício de material, a perda de tempo e recursos financeiros, comprometem prazos de entrega, a qualidade dos produtos e a competitividade das organizações.

Dado o aumento da demanda mundial de energia previsto para mais de um terço até 2035, segundo as Nações Unidas (UN, 2010), com mais da metade deste crescimento vindo da China e Índia, a eficiência energética torna-se um pilar de metas de desenvolvimento. Os países além de se preocupar com o meio ambiente e os impactos sociais causados pelo uso intensivo das fontes de energia atuais, devem buscar diversificá-las, reduzindo a dependência externa e mitigando os efeitos das flutuações de preços.

Conforme a Empresa de Pesquisa Energética do Brasil (EPE, 2010), o país produz 46,8% de energias renováveis. Em relação à eletricidade, 85% da energia gerada vêm dessas fontes de energia, 76,9% de origem hidroelétrica. Somente o setor industrial brasileiro consome aproximadamente a metade da eletricidade ofertada no país.

Para promover a eficiência energética, investimentos em Pesquisa & Desenvolvimento de novas soluções energeticamente eficientes; níveis mínimos de eficiência; incentivos

financeiros para adoção dessa política energética; assistência técnica de programas governamentais e acordos com as empresas devem ser desenvolvidas (Geller *et al.*, 2006; Thollander *et al.*, 2007).

A eficiência energética é uma fonte invisível e subvalorizada, com potencial para apoiar o crescimento econômico, melhorar o desenvolvimento social, promover a sustentabilidade ambiental e garantir a segurança energética. Não se trata de apenas uma redução da demanda energética, mas uma estratégia de fornecimento de melhorias sociais e econômicas concretas. A eficiência energética tem se revelado uma grande oportunidade para alcançar metas de desenvolvimento, segundo o relatório da International Energy Agency (IEA, 2009), os investimentos globais neste setor podem gerar ganhos acumulados de US\$ 18 trilhões até 2035, quase a soma das economias dos Estados Unidos e Canadá. As economias geradas pela eficiência energética têm sido maior do que a energia fornecida a partir de qualquer outro combustível, com isso, passa a ser reconhecida como o “primeiro combustível” com grande potencial a ser explorado adequadamente. O mercado de eficiência energética deve ser desenvolvido, o país deve compreender o seu valor.

Com isso, o Ministério das Minas e Energia (Brasil, 2007), em seu Plano Nacional de Energia 2030, mostra que os atuais mecanismos de mercado brasileiro não são suficientes para promover os desejáveis e possíveis incrementos de eficiência no uso final da energia. Mesmo com o mecanismo de incentivo, por meio do decreto 4508/2002, que regulamenta a Lei 10.295/2001, a cerca da utilização facultativa dos índices mínimos de eficiência dos motores de indução, apenas 5% dos motores do país passaram a ser de alto rendimento nas indústrias (Garcia, 2003).

Esse comportamento levou o Governo Federal a optar por um mecanismo compulsório, proibindo desde 2010 a fabricação de motores tipo *standard* maiores ou iguais a 1HP. Contudo, os motores operam por 15 anos ou mais, logo, os motores comercializados até 2009 ainda estariam em uso. Outrossim, conforme McCoy & Douglass (2000), considerando a prática de rebobinamentos e reutilização de motores, as indústrias podem continuar a utilizar dessas tecnologias obsoletas por muito mais tempo, dado a falta de informação sobre a viabilidade de substituição dessas por tecnologias eficientes. Estas irão promover ganhos em produtividade, adequação as políticas energéticas ambientais e outros benefícios. (Sola & Mota, 2012).

1.2 Delimitação do Tema

Existem diversas maneiras de melhorar a eficiência energética (Sola, 2011), por meio da readequação do sistema de alimentação dos usos finais, inserção de dispositivos de controle e automação, programas de conscientização, treinamento para ações conservadoras de energia, entre outros. Porém, atuando no uso final da energia nos sistemas industriais, o presente trabalho, busca propor a substituição de tecnologias não eficientes por outras tecnologias mais eficientes, promovendo uma melhoria na eficiência energética, dado a aplicação deste em uma indústria.

1.3 Caracterização do problema

Com o aumento da estabilidade econômica, redução de taxas, incentivos públicos e fiscais, elevados preços da energia e a certeza que o preço desta irá aumentar diante o atual cenário, chega-se a um considerável ponto que investir em eficiência energética nos próximos anos é uma das soluções para promover a estabilidade econômica do país.

Porém a relutância das empresas a investir em rentáveis tecnologias energeticamente eficientes, vem sendo reconhecida desde o final da década de 1970, este *gap* de eficiência ficou conhecido por “paradoxo da energia”. Ou seja, as empresas rejeitam investimentos que proporcionam economia de energia mais do quanto estas custam. (JACKSON, 2010)

O processo de seleção da tecnologia a ser selecionada a fim de melhorar a eficiência energética, refere-se a um problema de decisão, diretamente ligado às barreiras para o uso eficiente da energia nas organizações. Os critérios e alternativas envolvidas nesse problema apresentam-se de forma escassa, dada a falta de experiência com o assunto, informações imprecisas sobre a poupança de energia, custos e benefícios das novas tecnologias, resultam em uma falha no planejamento e nos procedimentos geridos pelas organizações. (SOLA et al, 2011)

Em busca da solução deste problema, os métodos multicritério de apoio à decisão (MCDA) auxiliam o decisor a tomar a decisão de forma racional e eficiente, por meio de uma aproximação quantitativa, envolvendo múltiplos critérios e alternativas. Os métodos clássicos classificam-se em: critério único de síntese, sobreclassificação e interativos.

Destacando os métodos de sobreclassificação (*outranking*), estes comparam as alternativas as pares e determina quais são preferíveis uma em relação a outra comparando-as sistematicamente critério a critério, levando a resultados numéricos que mostra índices de

concordância e/ou discordância entre as alternativas. As famílias de métodos mais conhecidas são a ELECTRE e PROMETHEE.

Uma vantagem dos métodos de sobreclassificação está em sua capacidade de utilizar escalas ordinais sem converter as escalas originais para termos abstratos com uma determinada faixa arbitrária e ao mesmo tempo manter o significado verbal das informações existentes. Outra vantagem deste método é a relação de indiferença presente na eliciação de preferencias do decisor, que pode considerar informações incertas, possibilitando a solução que outros métodos não propiciam. Beccali et al (2003) mostra que os métodos ELECTRE vem sendo usados amplamente para problemas que envolvem o planejamento de energia

Uma das dificuldades do método ELECTRE está na necessidade de mensurar precisamente as informações dos critérios. Porém nos problemas do mundo real, a imprecisão está presente e a teoria dos conjuntos *fuzzy* torna-se ideal para lidar com essa ambiguidade encontrada na solução do problema o os problemas MCDA. (PEREZ-GLADISH et al,2010).

Outros métodos propostos por Belacel (2000), Doumpos e Zopounidis (2004) e Perny (1998), estão inserindo meta-heurísticas a esses métodos de sobreclassificação, deduzindo parâmetros *fuzzy*. Esses parâmetros *fuzzy* que vem sendo difundidos desde a década de 1965 por L. A. Zadeh em seu trabalho *Fuzzy sets*, utiliza da lógica *fuzzy* para tratar as incertezas associadas aos problemas de decisão, inserindo informações suficientes para prover maior segurança ao decisor na tomada de decisão. Segundo Zadeh (1965), é muito difícil para a quantificação convencional expressar de forma razoável situações complexas, é necessário o uso de variáveis linguísticas cujos valores sejam palavras em linguagem natural ou artificial.

Assim, de acordo com Hatami-Marbini e Tavana (2011), os métodos *fuzzy* de sobreclassificação foram desenvolvidos para lidar com as informações imprecisas das avaliações e dos pesos dos critérios envolvidos. Por meio dessa relação *fuzzy* de sobreclassificação, foi possível introduzir concordâncias e discordâncias *fuzzy*. Nestes métodos os números *fuzzy* são comparados com base em um nível de corte, necessidades de mensuração e comparação de áreas com números *fuzzy*. Isso permite os problemas relacionados a eficiência energética serem tratados com maior segurança, provendo maior confiança na tomada de decisão.

1.4 Objetivos

Esta pesquisa tem por objetivo propor um modelo multicritério para auxiliar a tomada de decisão no que se refere a eficiência energética na organização, por meio de um método de sobreclassificação com o uso da lógica *fuzzy*.

Para se atingir o objetivo geral, foram estabelecidas metas precisas por meio dos objetivos específicos a seguir:

- Destacar os principais aspectos referentes à eficiência energética;
- Avaliar e selecionar o método de sobreclassificação a ser aplicado para apoiar a priorização dos motores elétricos, integrando esse método a lógica *fuzzy* intuicionista;
- Testar o modelo proposto;
- Analisar e avaliar a consistência dos resultados do modelo, indicando conclusões a serem tomadas e sugerir propostas para trabalhos futuros.

1.5 Justificativa

As indústrias são responsáveis pelo consumo de um terço de toda energia produzida e são responsáveis pela emissão de 40% de CO₂ no planeta, sendo alvos oportunos para o alcance da eficiência energética. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), espera-se que o consumo de energia elétrica continue aumentando com o passar das décadas e isso irá requerer tecnologias que reduzam a emissão de gases, consequentemente isso trará as indústrias um ganho de produtividade e outros benefícios. (SOLA & MOTA,2012)

Algumas políticas estão sendo adotadas em todo o mundo, incluindo o Brasil (GELLER ET AL.,2004), a promoverem a eficiência energética. Conforme Garcia et al.(2007), a primeira política no Brasil, proposta pelo decreto 4508/2002, que estabeleceu uma eficiência mínima para os motores de alta eficiência, como norma voluntária até 2009. Porém esses motores são responsáveis por 10% de todos os motores que circulam as industrias brasileiras, mesmo com incentivos a favor de sua substituição.

De acordo com MME (2005), depois de 2010, a Lei de Eficiência Energética Brasileira para motores com alta eficiência tornou-se mandatória e desde então os fabricantes brasileiros oferecem motores que atendem a esta lei.

Mas, Sola et al.(2012) levantaram alguns pontos sobre isso:

- A atual Lei de Eficiência Energética Brasileira não implica no outro lado da cadeia de suprimentos e novas ações são necessárias para os clientes, especialmente para as indústrias e os responsáveis pela tomada de decisão nelas.
- Os motores padrão ainda podem ser utilizados por um longo tempo, considerando sua vida útil de 10 ou mais anos.
- Uma vez que as ofertas do mercado brasileiro de motores com alta eficiência são mais caras que o modelo padrão, a troca dos motores pelas indústrias, mesmo com eventuais perdas de energia, pode ser reforçada se os tomadores de decisão não possuírem informação suficiente sobre a viabilidade de substituir suas tecnologias.

A tomada de decisão nestas indústrias torna-se muitas vezes inviável pela não compreensão e falta de informação sobre o problema em questão. Stern e Aronson (1984) expõem que existem duas características principais nesta situação: a organização é um conjunto de atores potencialmente incompatíveis em seus objetivos e esta não trabalha com informações completas e precisas. Logo, essas diferentes preocupações devem atender a diferentes critérios, os quais uns são relevantes a nível operacional e outros a nível de decisão.

Neste contexto, os modelos de decisão multicritério podem ser utilizados para solucionar esses problemas complexos, caracterizados pela presença de interesses conflitantes, propondo uma ferramenta que permita a tomada de decisão de forma concisa. Os métodos de sobreclassificação, quando tratados com a lógica *fuzzy* podem trabalhar com a incerteza e avaliações linguísticas associadas as informações dos decisores.

Para Sola et al.(2011), a aplicação do MCDA na indústria de motores ainda não é tão explorada. Assim, no atual cenário, o apoio a tomada de decisão usando esses modelos multicritério pode auxiliar no alcance da eficiência energética.

Dessa forma, este trabalho busca encontrar com a inserção da lógica *fuzzy* aos modelos multicritério, uma classificação para os critérios e alternativas envolvidas no processo decisório na indústria de motores, dado os problemas encontrados por Sola et al.(2012) para atenderem a Lei de Eficiência Energética Brasileira, mediante as incerteza associadas a suas informações para lidar com a eficiência energética.

1.6 Estrutura do trabalho

Esta dissertação é apresentada em seis capítulos, incluindo a introdução. O Capítulo 2 descreve o apoio multicritério a decisão, apresenta à lógica *fuzzy* e algumas variações e uma

breve abordagem das percepções otimistas e pessimistas nos modelos MCDA. O Capítulo 3 apresenta os procedimentos metodológicos. O Capítulo 4 consiste na construção dos modelos *fuzzy* para o alcance da eficiência energética, também é apresentado a relação da eficiência energética com o sistema de motores. O Capítulo 5 traz a aplicação do modelo, com os resultados, análises de sensibilidade e outras informações pertinentes. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as considerações finais, expondo as contribuições e vantagem dos modelos. Neste capítulo também é exposto as limitações, recomendações e sugestões para trabalhos futuros. Os anexos encontram-se após este capítulo, com algumas tabelas e o questionário ELOT.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO DA LITERATURA

Dado a crescente discussão por diversos autores em diferentes contextos em relação aos modelos multicritério *fuzzy*, este capítulo tem como objetivo apresentar os principais termos e terminologias utilizados para a formulação do fundamento teórico e apresentar uma revisão da literatura sobre o uso desses modelos em diversos trabalhos, abordando a importância da utilização da lógica *fuzzy* nos modelos multicritério.

Entre os principais pontos trabalhados neste capítulo, destacam-se o apoio multicritério a decisão, com ênfase nos métodos de sobreclassificação, a teoria dos conjuntos *fuzzy*, conjuntos *fuzzy* intuicionistas de Atanassov's e o otimismo e pessimismo presente no apoio a tomada de decisão. Para elaboração, foram realizadas pesquisas em livros, dissertações, teses e artigos publicados em periódicos encontrados no banco de dados da Science Direct e Web of Science, de acordo com o grau de relevância.

2.1 Apoio multicritério à decisão

Um problema de decisão multicritério de acordo com Almeida (2013) consiste em uma situação onde há pelo menos duas alternativas de ação a serem escolhidas, a escolha deve ser conduzida pelo desejo de atender a múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes entre si. Os objetivos estão associados às consequências da escolha das alternativas escolhidas. E aos objetivos, variáveis associadas representam e permitem a avaliação de cada alternativa, com base em cada um deles, essas variáveis são chamadas de critérios ou atributos. Considerar diferentes escolhas torna a tomada de decisão em um problema multicritério (*Multiple Criteria Decision Making* – MCDM), cada decisão requer um balanceamento dos critérios.

A abordagem multicritério se destaca no campo das ferramentas de apoio à tomada de decisão, por sua robustez e capacidade de análise de modelos complexos. Para Vincke (1992), o apoio dado por essa ferramenta à decisão, tem o objetivo de fornecer ao decisor meios que possibilitem avanços na solução dos problemas, onde muitas vezes os objetivos são contraditórios e os pontos de vistas dos envolvidos no processo decisório devem ser levados em consideração. Uma característica forte dos modelos de decisão multicritério envolve o aprendizado do decisor e o entendimento do problema.

O principal objetivo da análise de decisão multicritério – *Multiple Criteria Decision Analysis* (MCDA) – é auxiliar os tomadores de decisão a se sentirem confortáveis e confiantes por meio de sua satisfação com os critérios abordados. Por meio de três conjuntos, o conjunto

das alternativas, o conjunto das consequências e o conjunto dos critérios (atendendo as propriedades de exaustividade e não redundância), pode-se formular um problema de decisão multicritério. Esses critérios podem ser entendidos como um meio de julgamento, assim no contexto da tomada de decisão, isso insinua um padrão pelo qual uma escolha particular pode ser julgada mais desejável que outras (BELTON; STEWART, 2002).

Para Almeida (2011), o conjunto de consequências, conhecidos também como *payoffs*, será a combinação entre as alternativas e os critérios, formando uma matriz com cada elemento p_{ij} representando a consequência da escolha da alternativa i em relação ao critério j . Sendo o critério definido como uma função sobre o conjunto de alternativas de ação, um problema de decisão com alternativas discretas, $A=\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, onde o número de alternativas é igual a n , e consequências determinísticas pode ser apresentado por uma matriz de consequências.

De acordo com Roy (1974) e Vincke (1992) os métodos de decisão multicritério são classificados nos seguintes grupos:

- a) Método de critério único de síntese: consiste em agregar diferentes pontos de vista dentro de uma única função de síntese, que pode ser posteriormente otimizada. Nesse caso, devem-se analisar as condições de agregação da função e de construção do modelo. Por exemplo, a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) (Keneey & Raiffa, 1976; Almeida, 2011).
- b) Método de Sobreclassificação (*outranking*): inspirada na Escola Francesa, essa família apoia, a construção de uma relação de sobreclassificação, que representa as preferências estabelecidas pelo decisor. O segundo passo consiste em explorar a relação de sobreclassificação de tal forma que ajude o decisor a resolver o seu problema. Os métodos mais conhecidos são os da família ELECTRE E PROMETHEE (Roy, 1996; Belton & Stewart, 2002).
- c) Abordagem do julgamento Interativo: são métodos que utilizam a abordagem de tentativas e erros e estruturas de programação matemática multiobjetivo (Clímaco et al., 2003).

Para Pardalos et al. (1995), um quarto grupo é acrescido na classificação apresentada anteriormente, a abordagem de desagregação de preferencias, que consiste na avaliação global das alternativas com base nas avaliações do decisor, construindo uma função de avaliação e agregação por critérios. Este é um caso particular dos métodos de critério único de síntese.

Almeida (2013) acrescenta por meio de outras classificações sugeridas na literatura:

- a) Métodos de agregação ordinal: A agregação dos critérios desenvolve-se para os casos em que as avaliações intracritério são apresentadas por meio de informações ordinais.
- b) Métodos de agregação baseados em informação parcial: Quando não se dispõe de todas as informações para realizar a avaliação, esse método pode ser considerado. Na maioria dos casos se refere à informações intercritério.
- c) Métodos com lógica *fuzzy*: Considerando a imprecisão das informações, estes métodos podem ser usados para tratar o problema. Essa incerteza nos métodos *fuzzy* está associada a dificuldade que o decisor tem em especificar preferências de forma completa ou ausência de outras informações relevantes ao problema. Esse conjunto de métodos está associado à informação parcial.

Para selecionar qual método trabalhar, deve-se inicialmente preocupar-se com qual problemática o problema está sujeito. Roy (1996) identifica quatro problemáticas que são tratadas pela decisão multicritério:

- a) Problemática de Escolha: Busca esclarecer a decisão pela escolha de um subconjunto do espaço de ações. Ou seja, realiza uma escolha, dentre um conjunto de alternativas. Por exemplo, o problema de otimização.
- b) Problemática de Classificação: Tem o objetivo de alocar cada ação a uma determinada classe, definidas a priori a partir de normas aplicadas ao conjunto de ações.
- c) Problemática de Ordenação: Envolve alocar ações em ordem de preferência.
- d) Problemática de Descrição: Busca apoiar a decisão através de uma descrição das ações e suas consequências, de forma estruturada e sistemática, facilitando a compreensão do decisor.

Outro elemento importante para a seleção do método MCDA está na estruturação das preferências. Um modelo de preferências é uma representação formal de comparações de elementos, ela consolida as preferências de um decisor em relação as consequências, dado um problema de decisão. Almeida (2013) trata de sete importantes relações e suas respectivas representações, dadas duas ações a e a' , conforme tabela 2.1 a seguir:

Tabela 2.1 – Estrutura de preferências

SITUAÇÃO	DEFINIÇÃO	RELAÇÕES BINÁRIAS
INDIFERENÇA (I)	Corresponde a existência de razões claras e positivas para justificar a equivalência entre 2 ações	Reflexiva: aIa Simétrica: $aIb \Rightarrow bIa$
PREFERÊNCIA ESTRITA (P)	Corresponde a existência de razões claras e positivas para justificar a preferência significativa em favor de uma das 2 ações	Irreflexiva: não (aPa) Assimétrica: $aPb \Rightarrow$ não (bPa)
PREFERÊNCIA FRACA (Q)	Corresponde a existência de razões claras e positivas que invalidem a preferência estrita em favor de uma das 2 ações. Não são suficientes para deduzir cada preferência estrita em favor de outra ação ou indiferença entre as 2 ações. Não permitindo que nenhuma das duas situações precedentes se distingam de forma apropriada	Irreflexiva: não (aQa) Assimétrica: $aQb \Rightarrow$ não (bQa)
INCOMPARABILIDADE (R)	Corresponde a ausência de razões claras e positivas para justificar uma das 3 razões anteriores	Irreflexiva: não (aRa) Simétrica: $aRb \Rightarrow bRa$
NÃO-PREFERÊNCIA (~)	Corresponde a ausência de razões claras e positivas que justifiquem preferência estrita ou preferência fraca em favor de uma das ações. Ela consiste em uma situação de Indiferença ou Incomparabilidade, sem ser capaz de distingui-las.	$a \sim a' \Rightarrow aIa' \text{ ou } aRa'$
PREFERÊNCIA (>)	Corresponde a existência de razões claras e positivas que justifiquem preferência estrita ou preferência fraca em favor de um a das ações. Consolida situações preferencias estritas e fracas, sem ser capaz de distingui-las.	$a > a' \Rightarrow aPa' \text{ ou } aQa'$
PREFERÊNCIA – J (J)	Corresponde a existência de razões claras e positivas que justifiquem a preferência fraca, não importa quão fraca, em favor de uma das ações ou a indiferença entre as ações Não há nenhuma divisão significativa entre as situações de preferência e indiferença.	$aJa' \Rightarrow aQa' \text{ ou } aIa'$
PREFERÊNCIA – K (K)	Corresponde a existência de razões claras e positivas que justifiquem a preferência estrita, em favor de uma das ações ou incomparabilidade entre as ações. Não há nenhuma divisão significativa entre as situações de preferência e incomparabilidade	$aKa' \Rightarrow aPa' \text{ ou } aRa'$
SOBRECLASSIFICAÇÃO (S)	Corresponde a existência de razões claras e positivas que justifiquem a preferência ou preferência-J em favor de uma das ações. Não há divisão significativa entre as situações de preferência estrita, preferência fraca e indiferença.	$aSa' \Rightarrow aPa' \text{ ou } aQa' \text{ ou } aIa'$

Fonte: Almeida (2013)

2.2 Métodos de sobreclassificação

Diante os métodos apresentados, os métodos de sobreclassificação, cuja denominação em inglês *outranking*, consistem em uma das principais escolas de métodos de decisão

multicritério. De acordo com Vincke (1992), tem o objetivo inicial de construir uma relação chamada de sobreclassificação, por meio de uma comparação par a par entre as alternativas.

Esta relação distingue-se dos métodos de agregação por meio de critério único de síntese, pois o método não realiza uma agregação analítica para o estabelecimento de um *score* para as alternativas, dessa forma permite a comparação entre elas.

Os métodos de sobreclassificação assumem a possibilidade da relação de incomparabilidade na estrutura de preferências do decisor. Assim os resultados desses métodos podem gerar resultados parciais ao apresentar as recomendações.

Uma importante característica dos métodos multicritério está quanto a compensação que pode existir entre os critérios, podendo ser classificados como compensatórios e não compensatórios.

- a) Métodos compensatórios: pode compensar um desempenho menor de uma alternativa em um dado critério por meio de um melhor desempenho em outro critério. Ou seja, consideram-se os *trade-offs* entre os critérios, ou compensações.
- b) Métodos não compensatórios: não pode haver uma clara compensação de desempenho entre as alternativas, ou seja, não há *trade-offs* entre as alternativas.

Assim, alguns métodos de sobreclassificação se diferenciam dos métodos de agregação por critério único de síntese por não serem compensatórios, não apresentam *trade-offs* entre as alternativas que está trabalhando.

Almeida (2013) acrescenta que a avaliação intracritério dos métodos de sobreclassificação pode ser representada pelos pesos dos critérios, assumindo noção de grau de importância, por não haver uma transformação de escalas de avaliações intracritério para uma escala de avaliação global. A noção dessa preferência de sobreclassificação do decisor indica que: dado A e B, dois subconjuntos da família de critérios C, A será mais importante que B se dado duas ações a e a' , de forma que a é melhor que a' para todos os critérios de A e a' é melhor que a para todos os critérios de B, a e a' são indiferentes para todos os outros critérios e a é globalmente melhor do que a' . Duas famílias são as mais utilizadas nestes métodos de sobreclassificação, as famílias de métodos ELECTRE e PROMETHEE.

2.2.1 Família de métodos ELECTRE

Desenvolvida por Roy (1974), a família ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) gera um modelo acessível em relação às técnicas de construção da função valor. De

acordo com Belton e Stewart (2002), os métodos ELECTRE diferem de acordo com o grau de complexidade, riqueza de informações necessária ou de acordo com a problemática do problema em análise.

Dois conceitos básicos utilizados para a construção da relação de sobreclassificação nesta família devem ser considerados:

- Concordância: o fato de que um subconjunto significativo dos critérios considera que a alternativa a é (fracamente) preferível à alternativa b .
- Discordância: o fato de que não existem critérios em que a intensidade da preferência de b em relação à alternativa a , ultrapasse um limite inaceitável.

Estes índices medem a força da hipótese de que uma alternativa sobreclassifica a outra, e a hipótese contrária, respectivamente, em relação a uma matriz de decisão final. Para considerar a avaliação da concordância, a possibilidade de ocorrência de interações entre critérios deve ser considerada. A discordância exercerá um papel de veto em relação à concordância, mas este pode ser tratado como sendo um outro parâmetro importante, definindo para cada critério e fixando um valor para a diferença $gj(b) - gj(a)$, que é a diferença em relação ao critério j e discordante da afirmativa aSb , a partir da qual não será aceita a proposição aSb . (ALMEIDA, 2013)

Dentre os métodos ELECTRE destacam-se:

- ELECTRE I: Trabalha com a problemática de escolha, com o objetivo de determinar qual alternativa apresenta melhor compromisso para a solução do problema. Utiliza o critério verdadeiro.
- ELECTRE II: Trabalha com a problemática de ordenação, com o objetivo de ordenar, produzindo uma ranqueamento das alternativas. Utiliza o critério verdadeiro.
- ELECTRE III: Trabalha com a problemática de ordenação, introduz o conceito dos limiares de preferência e indiferença. Utiliza o pseudo-critério.
- ELECTRE IV: Trabalha com a problemática de ordenação, porém é voltado para as circunstâncias onde não é possível especificar os pesos aos critérios. Utiliza o pseudo-critério.
- ELECTRE TRI: Trabalha com a problemática de classificação, aloca as alternativas em três classes: aceitável, inaceitável e indeterminado. Utiliza o pseudo-critério.

2.2.2 Família de métodos PROMETHEE

Desenvolvida por Brans et al. (1984), a família PROMETHEE (*Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation*) trata-se de outro método de sobreclassificação que destaca-se por sua facilidade de compreensão e por envolver conceitos e parâmetros que podem ser interpretados de forma física ou econômica. De acordo com Brans e Mareschal (2002), baseiam-se em duas fases:

- (i) Construção de uma relação de sobreclassificação, agregando informações entre as alternativas e os critérios.
- (ii) Exploração da relação de sobreclassificação para apoio a decisão, por meio da aplicação de um algoritmo.

Cavalcante (2005), em seu trabalho, *A multicriteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions*, realiza a aplicação do PROMETHEE III para apoiar a tomada de decisão em um problema de manutenção preventiva e apresenta a família PROMETHEE que inclui vários métodos que são aplicáveis em diferentes situações, como pode ser visto a seguir:

- PROMETHEE I: Utilizado para a problemática de ordenação, apresenta uma pré-ordem parcial.
- PROMETHEE II: Proporciona um ordenamento entre as alternativas por meio de uma pré-ordem completa.
- PROMETHEE III: Este método amplia a noção de indiferença, realiza um tratamento probabilístico entre os fluxos.
- PROMETHEE IV: Utilizado para a problemática de escolha e ordenação, apresenta uma pré-ordem completa ou parcial.
- PROMETHEE V: Para as alternativas selecionadas, incorpora-se a otimização inteira por meio de uma ordenação completa das alternativas.
- PROMETHEE VI: Utilizado para a problemática de escolha e ordenação por meio de uma pré-ordem completa ou parcial. Apropriado para casos em que o decisor não consegue determinar os pesos dos critérios.
- PROMETHEE – GAIA: Utiliza um procedimento iterativo e visual.

2.3 Teoria dos conjuntos fuzzy

A tomada de decisão é uma atividade muito complexa para ser entendida quantitativamente, porém, trabalhar com a imprecisão torna-se mais sucessível do que

trabalhar precisamente. A lógica *fuzzy* assemelha-se a esse raciocínio humano no uso de informações imprecisas para alcançar as decisões. Ao contrário da lógica clássica que requer uma maior compreensão do sistema, equações exatas e valores numéricos precisos, a lógica *fuzzy* gera um novo modo de pensar, permitindo a modelagem de sistemas complexos, usando um maior nível de abstração de nosso conhecimento e experiência

Antes da lógica *fuzzy*, Aristóteles postulou as “Leis do Pensamento” para elaborar uma lei lógica concisa e depois a matemática. Uma delas, a “Lei do Meio Excluído”, afirma que para toda proposição deve existir o que é Verdadeiro ou Falso. Mas havia fortes objeções, por exemplo as coisas poderiam ser simultaneamente verdadeiras ou não. Mas foi Platão que lançou as bases para o que viria a ser a lógica *fuzzy*, indicando que havia uma terceira região, além do Verdadeiro ou Falso, o que faria o postulado ser falho.

Por meio do polonês Jan Lukasiewicz, a lógica *fuzzy* surgiu, ao desenvolver uma lógica “multivalente” em 1930, refinando a lógica binária do sim-não, permitindo estados intermediários. Esta tem o objetivo de modelar aproximadamente o raciocínio humano, no processo da tomada de decisões em um ambiente de incerteza.

O termo *fuzzy* ao ser traduzido, tem o significado de vago, indefinido, incerto, difuso. A lógica *fuzzy* é um raciocínio que classifica em números um determinado cenário, trabalhando com variáveis incertas, para permitir o trabalho computacional (SHAW; SIMÕES,1999). Ou seja, a lógica *fuzzy* generalizou a lógica clássica, de modo que a sua implantação possa reduzir o projeto a um ponto entre $[0,1]$, passando os problemas intratáveis a serem factíveis de solução.

Em seu trabalho, *Knowledge representation in fuzzy logic*, Zadeh (1992) apresentou algumas características essenciais a lógica *fuzzy*, entre elas:

- Na lógica *fuzzy*, o raciocínio exato é visto como um caso extremo de raciocínio aproximado;
- Na lógica *fuzzy*, o conhecimento é interpretado como uma coleção expansível, equivalentemente, o *fuzzy* restringe isso a uma coleção de variáveis;
- Na lógica *fuzzy*, tudo é uma questão de grau;
- A inferência é vista como um processo de propagação das restrições;
- Qualquer sistema lógico pode ser transformado para a lógica *fuzzy* (*fuzzified*).

Assim, os sistemas *fuzzy* são adequados para o raciocínio aproximado ou impreciso, especialmente para modelos matemáticos difíceis de obterem, permitindo a tomada de decisão com valores estimados mediante informação incerta ou incompleta.

2.3.1 Conjuntos *fuzzy*

Em 1965, o matemático L. A. Zadeh introduziu essa noção da lógica *fuzzy* à teoria dos conjuntos por meio de sua seguinte observação: “Na maioria das vezes, as classes de objetos encontrados no mundo real, não tem critérios bem definidos” em seu artigo Conjuntos *Fuzzy* (Fuzzy Sets), o que possibilitou o uso da terminologia “teoria dos conjuntos *fuzzy*” para o ferramental matemático que tratasse com informações imprecisas em futuros estudos. (RUSS et al.,1996)

A partir do momento que não existam apenas dois níveis, sim-não, mas um grau intermediário, existindo assim vários níveis, isso se torna possível. Essa seria a lógica *fuzzy*, a não colocação de limites entre o sim-não, verdadeiro e falso, o preto e o branco, afirmada na lógica clássica, mas vários tons de cinza (BOTELHO, 2012), conforme a Figura 2.1 a seguir:

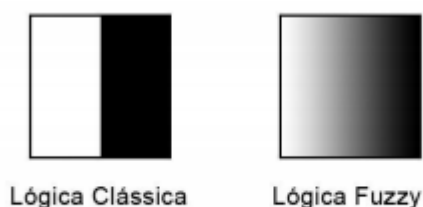


Figura 2.1 – Comparativo entre a lógica clássica e fuzzy
Fonte: Botelho (2012)

A noção dos conjuntos *fuzzy* provê um ponto de partida para a construção de um quadro conceitual que se assemelha a estrutura usada nos conjuntos comuns, porém mais robusto com maior alcance e aplicabilidade, especialmente nos campos de classificação padrão e processamento de informações. Esse quadro oferece maneiras de lidar com os problemas em que a fonte de imprecisão é a ausência de critérios bem definidos em uma classe e a ausência de variáveis aleatórias. (ZADEH, 1965)

A imprecisão abordada por Zadeh (1965) está no sentido de vagueza e não está ligada a falta de conhecimento sobre um parâmetro (como na análise de tolerância). A teoria dos conjuntos *fuzzy* fornece uma estrutura matemática rigorosa, também pode ser considerado como uma linguagem de modelagem adequada para situações em que existam relações *fuzzy*.

Logo, os conjuntos *fuzzy* são conjuntos sem fronteiras definidas, introduzidos por causa dos conjuntos existentes apresentarem limitações para lidar com os problemas, permitindo a transição de uma classe para a outra de forma viável.

De acordo com Ross (2004), o conjunto *fuzzy* pode ser apresentado como uma lógica que percorre o intervalo $[0,1]$, que define uma função de pertinência como aquela que

estabelece o grau de pertinência de um elemento x com um conjunto não definido A , que possui imagem no intervalo $[0,1]$ também. Logo, dado um universo X , um subconjunto *fuzzy* A de X é definido pela função de pertinência $f_A(x)$, que mapeia cada elemento x em X para um determinado número real no intervalo $[0,1]$. Isso quer dizer que, quanto maior for $f_A(x)$, mais forte será o grau de pertinência para x em A .

2.3.2 Definições

De acordo com Zadeh (1965) ξ_i é considerado um conjunto de possíveis valores para a variável X_i (universo do discurso), cujo elemento genérico do conjunto é representado por ξ_i^k . O conjunto *fuzzy* F é definido como um conjunto de pares ordenados entre um valor do universo e de discurso e o seu grau de pertinência, $\phi_F(\xi_i^k)$, vem de uma função a qual relaciona cada elemento de ξ_i com intervalo real $[0,1]$, conforme equações a seguir:

$$F = \{(\xi_i^k, \phi_F(\xi_i^k)) | \xi_i^k \in \xi_i\} \quad (2.1)$$

$$\phi_F: \xi_i \rightarrow [0,1] \quad (2.2)$$

Essa representação dos conjuntos *fuzzy* varia, para universos de discursos contínuos, são representados pela equação:

$$F = \int_{\xi_i} \phi_F(\xi_i^k) / \xi_i^k \quad (2.3)$$

Para os universos de discursos discretos, a representação utilizada é:

$$F = \sum_{\xi_i} \phi_F(\xi_i^k) / \xi_i^k \quad (2.4)$$

De acordo com Mendel (2000), com o objetivo de caracterizar um conjunto, relacionando cada elemento do universo de discurso ao seu respectivo grau de pertinência contido no intervalo real entre $[0,1]$, o valor apresentado pela função de pertinência, mede o “grau de aderência” do elemento ao conjunto, de tal forma que, quanto mais alto, maior a compatibilidade do elemento com o conjunto. A função de pertinência assume apenas dois valores (0 ou 1) na teoria clássica dos conjuntos, ou seja pertence ou não pertence. Na teoria

dos conjuntos *fuzzy*, esses conjuntos são chamados de *crisp* e a função pertinência é descrita por:

$$\phi_F(\xi_i^k) \begin{cases} 1 & \text{se } \xi_i^k \in F \\ 0 & \text{se } \xi_i^k \notin F \end{cases} \quad (2.5)$$

Os conjuntos *fuzzy* podem ser decompostos em subconjuntos a partir de certo nível de pertinência, estes são os α – *cut's*.

Uma variável linguística é definida por uma quádrupla, que contempla o nome da variável, o universo de discurso, o conjunto de valores (em termos linguísticos) e as funções de pertinência que definem cada conjunto associado a um termo linguístico. (ZADEH,1965)

Por exemplo, conforme Fontes (2012) ao considerar a variável linguística “Altura de um indivíduo”, representada por X , dividida nos seguintes termos: $T(X)=\{\text{baixo}, \text{médio}, \text{alto}\}$. Cada termo pode ser caracterizado por conjuntos *fuzzy* em um universo de discurso, no caso os números reais, ou seja: $\xi_i = \mathbb{R}$. Isso pode ser visto na figura 2.2 a seguir:

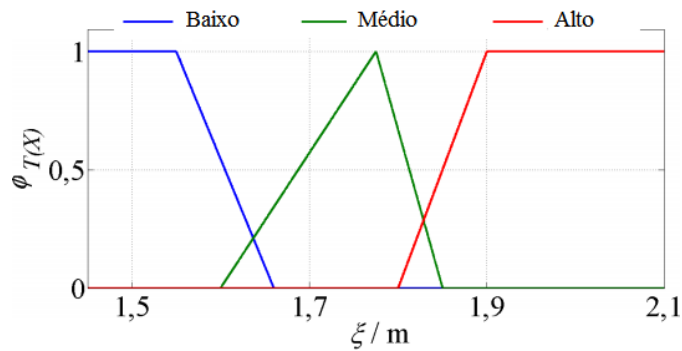


Figura 2.2 – Representação dos termos da variável linguística altura em conjuntos fuzzy

Fonte: Fontes (2012)

A arbitrariedade da função trapezoidal e triangular implica que pessoas diferentes podem definir conjuntos diferentes associados ao mesmo termo linguístico. Um número *fuzzy* trapezoidal $\tilde{n}$ é definido como uma quádrupla $\tilde{n}=(n_1; n_2; n_3; n_4)$. Para dado $x \in \mathbb{R}$, a função de pertinência de x em $\tilde{n}$ é calculada como a equação 2.6 e quando as componentes n_2 e n_3 possuem o mesmo valor, diz que $\tilde{n}$ é um número *fuzzy* triangular:

:

$$\mu_{\tilde{n}}(x) = \begin{cases} 0, x < n_1 \\ \frac{x - n_1}{n_2 - n_1}, n_1 \leq x \leq n_2 \\ 1, n_2 \leq x \leq n_3 \\ \frac{x - n_4}{n_3 - n_4}, n_3 \leq x \leq n_4 \\ 0, x > n_4 \end{cases} \quad (2.6)$$

Dados dois números trapezoidais $\tilde{a}=(a_1; a_2; a_3; a_4)$ e $\tilde{b}=(b_1; b_2; b_3; b_4)$, define-se a soma ($\oplus$) e a subtração ($\ominus$) *fuzzy* entre estes números como sendo respectivamente:

$$\tilde{a} \oplus \tilde{b} = (a_1 + b_1; a_2 + b_2; a_3 + b_3; a_4 + b_4) \quad (2.7)$$

$$\tilde{a} \ominus \tilde{b} = (a_1 - b_4; a_2 - b_3; a_3 - b_2; a_4 - b_1) \quad (2.8)$$

Quandos dois números *fuzzy* trapezoidais $\tilde{a}=(a_1; a_2; a_3; a_4)$ e $\tilde{b}=(b_1; b_2; b_3; b_4)$, pode-se aproximar a multiplicação *fuzzy* ($\otimes$) por meio:

$$\tilde{a} \otimes \tilde{b} = (a_1 b_1; a_2 b_2; a_3 b_3; a_4 b_4) \quad (2.9)$$

2.3.3 Conjuntos *fuzzy* intuicionistas de Atanassov's

Com o conceito *fuzzy* proposto inicialmente por Zadeh (1965), Atanassov (1986) iniciou a generalização deste conceito, definindo os *Intuitionistic Fuzzy Sets* (IFS). Um IFS A em X é desenvolvido da seguinte forma:

$$A = \{(x, \mu_A(x), \nu_A(x)) | x \in X\} \quad (2.10)$$

É caracterizado pelo grau de adesão (μ_A) e o grau de não-adesão (ν_A), onde:

$$\mu_A: X \rightarrow [0,1], x \in X \rightarrow \mu_A(x) \in [0,1] \quad (2.11)$$

$$\nu_A: X \rightarrow [0,1], x \in X \rightarrow \nu_A(x) \in [0,1] \quad (2.12)$$

Com a condição que:

$$\mu_A(x) + \nu_A(x) \leq 1, \forall x \in X \quad (2.13)$$

Para cada IFS A em X, se

$$\pi_A(x) = 1 - \mu_A(x) - \nu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (2.14)$$

Então $\pi_A(x)$, conhecido como grau de hesitação (ou grau de indeterminação) de x em A. Dessa forma, $\pi_A(x)$ encontra-se: $0 \leq \pi_A(x) \leq 1, \forall x \in X$.

Para cada conjunto *fuzzy* F em X, tem-se:

$$\pi_F(x) = 1 - \mu_F(x) - [1 - \mu_F(x)] = 0, \forall x \in X \quad (2.15)$$

Logo os conjuntos *fuzzy* são casos especiais dos IF. O grau de adesão de x em um IFS A , é delimitado por um subintervalo $[\pi_A(x), 1 - \nu_A(x)]$ de $[0,1]$.

Para cada $A=(\pi_A, \nu_A)$, existe uma interpretação. Por exemplo. Se $A=(0,5,0,3)$, então, vemos que $\pi_A = 0,5$ e $\nu_A = 0,3$, isso quer dizer que “o voto pela resolução é 5 a favor, 3 contra, com 2 abstenções”. Para cada número IF $A=(\pi_A, \nu_A)$, o escore de A pode ser obtido por meio de uma função escore s , obtida por

$$s(A) = \pi_A - \nu_A \quad (2.16)$$

2.3.4 Conjuntos *fuzzy* intervalares (IVFS)

Interval-Valued Fuzzy Set (IVFS) foram introduzidos por Zadeh (1975), trata-se um função de adesão valorada em um intervalo. São casos especiais dos conjuntos *fuzzy-L* propostos por Goguen (1967). Dado o conjunto A_i em X :

$$A_i = \{(x_j, M_{ij}) | x_j \in X\} \quad (2.17)$$

Onde $M_{ij}: X \rightarrow Int([0,1])$, em que:

$$x_j \rightarrow M_{ij} = [M_{ij}^-, M_{ij}^+]. \quad (2.18)$$

M_{ij} representa os possíveis graus que a alternativa A_i satisfaz o critério x_j . M_{ij}^- e M_{ij}^+ representam o limite inferior e o limite superior, respectivamente, do intervalo M_{ij} .

2.4 A importância da utilização da lógica *fuzzy* no apoio à tomada de decisão

A aceitação de sua teoria cresceu entre 1960 e 1970, no entanto, a primeira aplicação prática bem sucedida ocorreu no controle dos processos tecnológicos através de sistemas baseados nas regras *fuzzy*, chamado de controle *fuzzy* (*fuzzy control*). Isso impulsionou consideravelmente o interesse nesta área. Aplicações bem sucedidas em eletrodomésticos, eletrônicos, transportes e máquinas pesadas, principalmente no Japão, desencadeando o interesse e a pesquisa na década de 1980, de modo que em 1984 já havia mais de 4.000 publicações e em 2000 mais de 30.000. (RWTH, 2010)

Bellman e Zadeh (1970) introduziram a primeira abordagem sobre a tomada de decisão em um ambiente incerto. Sugeriram que os objetivos e restrições *fuzzy* podiam ser definidos de forma simétrica aos conjuntos *fuzzy* em certo espaço de alternativas, dado as restrições e metas almejadas. A decisão de ótima foi definida como um ponto no espaço de alternativas em que a função pertinência de uma decisão *fuzzy* atingisse seu valor máximo.

Depois disso, estudos sobre a utilização dos conjuntos *fuzzy* nas fases dos métodos MCDM, classificação dos criterios e das alternativas passaram a ser abordados com maior atenção.

Oito anos após o estudo de Bellman e Zadeh, Yager (1978) definiu o conjunto *fuzzy* de uma decisão como sendo a interseção de todas as metas incertas. A melhor alternativa deve ter os níveis mais elevados de adesão em relação a todos os critérios. Para se chegar a essa alternativa aceitável, ele sugeriu uma combinação dos operadores máximo e mínimo. Para a determinação da importância relativa de cada atributo ele sugeriu o uso do método de Saaty, por comparações aos pares com base em uma matriz.

Ao longo dos anos a teoria dos conjuntos *fuzzy* passou a ser estudada sobre duas fases. De acordo com Dubois (1979):

- a) Processo de classificação: uma teoria formal, que vem amadurecendo e tornando-se sofisticada por envolver áreas clássicas da matemática. Lida com a medição de indicadores de desempenho ou grau de satisfação em relação aos atributos de cada alternativa. A classificação agregada indica o desempenho global de cada alternativa, que podem ser obtidas através de operações de agregação dos critérios envolvidos.
- b) Classificação das alternativas: Como uma tecnologia *fuzzy*, ou seja, uma ferramenta para modelagem, resolução de problemas e mineração de dados, sendo comprovado a sua eficiência diante os métodos existentes e atratividade diante as abordagens clássicas. É realizada por meio de uma ordenação das alternativas existentes com as classificações agregadas de desempenho, resultantes da primeira fase.

2.4.1 Modelos multicritério *fuzzy*

Os métodos multicritério normalmente assumem que seus critérios e respectivos pesos devem ser expressos de forma clara, para que o ranqueamento das alternativas seja feito de forma eficiente. Porém em uma situação real, a aplicação dos métodos clássicos de MCDM podem enfrentar sérias limitações com os critérios, por conter imprecisões quanto as informações. Em muitos casos os critérios são expressos de forma qualitativa ou por outros termos linguísticos, o que certamente exigirá maior cuidado com o método escolhido.

Bellman e Zadeh (1970) afirma que a situação mais favorável para os problemas MCDM é quando os critérios e grau de importância são precisos. Porém, no âmbito real, os objetivos, restrições e consequências não são conhecidos com precisão. Tais situações

implicam em dizer que os problemas reais são complexos, parecendo pouco adequados para uma modelagem matemática por causa da imprecisão, que impede uma condição ideal dos métodos clássicos MCDM.

Por causa da ausência de limites definidos de um conjunto observado, o *fuzzy* pode ser atribuído a situações incertas como essa. Dessa forma, os métodos clássicos de MCDM não são eficazes, sendo mais adequados para lidar com problemas em que os critérios assumidos são conhecidos e possam apresentar números precisos.

A aplicação da teoria dos conjuntos *fuzzy* nos métodos MCDM conforme Zimmermann(1987), justifica-se quando os objetivos desejados não podem ser definidos ou julgados, a não ser por meio dos conjuntos *fuzzy*. A imprecisão aumenta a complexidade do problema durante o processo de classificação, ao procurar as alternativas preferíveis do decisor.

Com a introdução da teoria dos conjuntos *fuzzy* nos métodos MCDM por Bellman e Zadeh (1970), um novo campo de trabalho surgiu, com novas famílias de métodos a serem trabalhadas, o que antes era inacessível e impassível de solução já não era mais.

Publicações recentes, principalmente com os métodos da família ELECTRE e PROMETHEE, mostram as últimas áreas de interesse com sua aplicação.

Abedi et al.(2013) descrevem a aplicação de um novo modelo multicritério chamado de sobreclassificação *fuzzy* para o mapeamento da prospectividade mineral de Cu-Mo. No estudo de caso, por meio desse modelo 21 poços foram perfurados para explorar a região de interesse, as 13 camadas de depósito mineral localizadas na província de Kerman, Irã. Quando comparado os resultados do mapa de prospecção com a concentração de Cu-Mo dos poços, a ferramenta multicritério de sobreclassificação *fuzzy* mostrou-se uma ferramenta útil para o Mapeamento de Prospecção Mineral (MPM), apresentando um alto desempenho para o MPM, reduzindo custos de perfuração de poços exploratórios na região estudada.

Chatterjee et al.(2009) para resolver um problema de seleção de materiais para o desenvolvimento de produtos, utilizam duas ferramentas para a tomada de decisão multicritério (MCDM) e realizam uma comparação com seus respectivos resultados. Para ordenar os materiais, a primeira ferramenta utilizada foi o ELimination and Et Choice Translating Reality (ELECTRE), um método de sobreclassificação e a segunda ferramenta foi o Vlse Kriterijumska Optimizacija Kompromis no Resenje (VIKOR), um método de ordenação de compromisso desenvolvido para solucionar problemas MCDM com critérios conflitantes e não-comensuráveis (atributos com diferentes unidades), assumindo que o

compromisso pode ser aceitável por uma resolução de conflitos quando o decisor deseja uma solução que seja a mais próxima da ideal e as alternativas possam ser avaliadas de acordo com os critérios estabelecidos. Dois exemplos foram feitos para demonstrar e validar a efetividade e flexibilidade desses dois métodos.

Chatterjee et al.(2010) para resolver um problema de seleção de robôs para uma aplicação industrial a fim de atingir o resultado desejado com um custo mínimo e uma aplicação específica, realizam uma comparação entre os desempenhos de dois métodos MCDM por meio do ELECTRE e o VIKOR. Valida a aplicação e potencialidade desses métodos por meio de exemplos e observa que as ordenações obtidas dos robôs se aproximam daquelas derivadas de pesquisas passadas.

Chen et al.(2012) desenvolvem uma extensão do método de sobreclassificação QUALIFEX, que apresenta como vantagem sua flexibilidade a respeito das informações ordinais e cardinais. Essa extensão lida com problemas de decisão multicritério no contexto dos conjuntos *fuzzy* de intervalos *type-2*, formados por nítidos intervalos que são os mais utilizados nos conjuntos *fuzzy* por causa de sua simplicidade. Usando um sistema de classificação linguística convertido em intervalos *type-2* de valores trapezoidais *fuzzy*, o método investiga todas as permutações possíveis das alternativas em relação ao nível de concordância da ordem de preferência completa. Sua viabilidade e aplicação foram ilustradas em um problema de decisão médica sobre inflamação aguda e uma análise comparativa com outro método de sobreclassificação foi realizada para verificar a eficácia do QUALIFEX.

Devi & Yadav (2012) utilizam o método de sobreclassificação ELECTRE com a inserção de conjuntos *fuzzy*, para solucionar um problema de localização industrial em cenário de decisão em grupo que envolve imprecisão nas informações dos decisores, propondo um método *fuzzy*-ELECTRE. O desempenho das alternativas foi obtido em termos linguísticos e depois foram caracterizados em conjuntos triangulares *fuzzy* intuicionistas. Por meio dessa abordagem à matemática de acordo com a atividade mental construtiva humana, Os conjuntos *fuzzy* intuicionistas são eficientes para lidar com a imprecisão e ambiguidade. Essa combinação provê uma maior chance de sucesso aos problemas multicritério diante sua simplicidade ao conter a vaga percepção dos decisores.

Fernandez & Navarro (2011) propõem um novo método de aproximação baseado nas relações de sobreclassificação *fuzzy*, o THESUS. Comparado a outros métodos, ele utiliza uma nova forma de avaliar a atribuição de objetos a um conjunto de categorias ordenadas previamente definidas, baseado na comparação dessas atribuições as várias preferências

derivadas da relação de sobreclassificação *fuzzy*, onde a atribuição adequada é determinada por meio de uma seleção. Para uma correta atribuição, uma boa caracterização das categorias é necessária, apenas uma categoria de referência não é suficiente, assim o THESUS avalia as preferências contidas nos conjuntos de referências maiores, categorizando o problema multicritério, removendo inconsistências e aumentando a credibilidade dos limiares de preferência.

Gladish et al.(2007) desenvolvem uma ferramenta para auxiliar os profissionais de finanças na seleção de portfólios de fundos de investimento. Esse problema é caracterizado pela imprecisão nos dados que os investidores possuem para a tomada de decisão. Para amenizar esse problema, um modelo de três estágios baseado na indexação múltipla e nos diversos cenários do mercado descritos como imprecisos. O modelo *fuzzy* de sobreclassificação permite o decisor selecionar adequadamente um portfólio diante a imprecisão dos dados.

Hatami-Marbini et al.(2011) apresentam uma revisão a cerca dos métodos *fuzzy* da análise envoltória de dados, metodologia que mede a eficiência relativa de um conjunto de unidades na tomada de decisão que usam múltiplas entradas para produzir várias saídas. Os pesquisadores evidenciam a utilização do *fuzzy* para tratar a imprecisão das informações e ambiguidade dos dados, apresentando resultados dos últimos 20 anos de pesquisa na área sobre o nível de tolerância, aproximação baseada no nível α , ordenação *fuzzy* e possibilidades de aproximação.

Hatami-Marbini & Tavana (2011) propõem um método de sobreclassificação *fuzzy*, estendendo ao método ELECTRE I a lógica *fuzzy* para corrigir a lacuna deste método, sendo possível tratar conflitos entre os critérios diante a incerteza, imprecisão e avaliações linguísticas das informações, determinando qual ação é preferível, incomparável ou indiferente no ambiente *fuzzy* diante as relações de sobreclassificação de um grupo de decisores. E ao contrário da ordenação TOPSIS, o ELECTRE apresenta informações mais consistentes e inclui a relação de incomparabilidade das alternativas. Como vantagem desse método, encontra-se a composição em duas fases (construção global das relações de sobreclassificação e exploração dessas), utilização da aproximação de Hamming ao invés da Euclidiana para encontrar a diferença entre duas ações diante os conjuntos *fuzzy*, estruturação e lógica acessíveis ao entendimento dos decisores, por fim a sua capacidade de generalização para outros problemas.

Kaya & Çınar (2007) utiliza um método de sobreclassificação *fuzzy* para obter a melhor localização de uma instalação industrial mediante a imprecisão dos dados. Quando o sistema envolve a subjetividade humana, a lógica *fuzzy* fornece uma estrutura matemática para lidar com a imprecisão nos modelos de tomada de decisão, ao modelar as preferências dos decisores com relações de preferência *fuzzy*.

Ke et al.(2012) para demonstrar como a metodologia de elicitação de preferências pode envolver conflitos entre os decisores, por meio de uma variação *fuzzy* do ELECTRE III, que é empregado para obter os estados de classificação ou possíveis cenários em conflito do mais preferível ao pior, de acordo com o sistema de valores do decisor, utiliza do Graph Model for Conflict Resolution (GMCR), que captura características chave dos conflitos e provê suporte a decisão, não apenas aos envolvidos no conflito, mas para qualquer interessado nos resultados que estes conflitos podem trazer a decisão. Com isso a característica *fuzzy* permite os decisores estudarem seus comportamentos individuais de forma mais realista e compreensiva, diante a incerteza associada a suas informações.

Lin (2010) desenvolve um modelo evolutivo que integra números triangulares *fuzzy* e o método Analytic Hierarchy Process (AHP) para prover uma avaliação *fuzzy* que priorize os relativos pesos relacionados a qualidade dos *websites*. A teoria dos conjuntos *fuzzy* contribui no modelo por ser capaz de lidar com a imprecisão das informações e ao incorporá-la ao AHP, permite maior acurácia nos problemas de decisão multicritério, por capturar os imprecisos julgamentos do decisor.

Mousavi et al.(2013) apresentam um modelo de múltiplos estágios para a tomada de decisão com um intervalo valorado *fuzzy* para resolver o problema diante a imprecisão das informações. O modelo proposto auxilia os decisores a analisar as possíveis alternativas diante os critérios conflitantes em situações reais, o intervalo valorado *fuzzy* lida com a imprecisão intrínseca ao processo de cognição humana. Além de empregar variáveis linguísticas para obter de forma intuitiva a subjetividade dos decisores, utiliza intervalos valorados *fuzzy*, existe uma maior flexibilidade do que trabalhar com conjuntos *fuzzy* convencionais, pois garante que as preferências linguísticas expostas são suficientemente claras.

Ölçer & Odabasi (2005) desenvolvem um método multicritério com a lógica *fuzzy* para lidar com um problema de ordenação e seleção de alternativas. Dado a subjetividade das informações, foi aplicada uma técnica de agregação por atributos para um grupo de decisores. O método foi aplicado em um sistema naval de propulsão e a ferramenta se mostrou versátil,

capaz de utilizar dados em termos linguísticos e transformá-los em números trapezoidais *fuzzy*. Com isso, o problema foi tratado de forma mais realista, agregando as informações de maneira sistemática e eliminando dificuldades de ordenação de números *fuzzy*.

Sena & Göçken (2014) oferecem um modelo *fuzzy* para resolver o problema de atribuição de revisores em agências de financiamento, estes são responsáveis por avaliar o valor dos projetos de P&D. Com um conjunto de decisores envolvidos e um conjunto de propostas, o modelo busca maximizar o grau de correspondência destes diante algumas limitações impostas pelo problema, para isso são definidas variáveis linguísticas e obtidas as preferências dos especialistas. O modelo *fuzzy* por meio de sua estrutura matemática atende as limitações do problema, resolvendo-os por meio de um método *fuzzy*, um método de distância e um método *fuzzy* com valores integrais. Com isso, o modelo é capaz de gerar soluções ótimas, a eficácia de sua aplicação evidencia a maior precisão nos resultados dado a abordagem *fuzzy*, sendo capaz de assegurar tempo e dinheiro na tomada de decisão.

2.5 Otimismo e pessimismo nos modelos fuzzy

Inicialmente, Hey (1979) mostrou que o procedimento de Hurwicz, uma fusão dos métodos maximin e minmax que leva em consideração ambos os resultados, poderia lidar com um problema de decisão caso fosse abordado a percepção otimista ou pessimista do decisor, ao empregar um índice otimista-pessimista. Porém, dado a natureza não compensatória do processo de seleção, não poderia ser abordado em um problema multicritério.

Dando continuidade as pesquisas, Dubois & Prade (1995) propuseram um critério qualitativo otimista e pessimista baseado nas regras do maxmin e minmax, estes princípios foram desenvolvidos e justificados axiomáticamente. Baseado nisso, Dubois et al. (1999) propuseram dois algoritmos que consideravam a incerteza e as preferências, para calcular a decisão conforme as percepções.

Utilizando este conceito de um plano bipolar de uma única variável, ou seja, a propensão da mente humana avaliar objetos e tomar decisões com base em sentimentos agradáveis e desagradáveis ou aspectos positivos e negativos, em estudos recentes, modelos estão focando esta bipolaridade.

Por exemplo, Grabisch, Greco & Pirlot (2008) propuseram um modelo multicritério que utilizava escalas com respeito à percepção do decisor, esta escala dividia-se em duas zonas com um ponto neutro entre elas por meio de um plano bipolar com uma única variável. Em

escalas unipolares bivariadas, a alternativa pode receber ambas as avaliações em conjunto, refletindo em uma percepção contraditória. O trabalho discute os procedimentos e modelos que vem sendo utilizados para agregar as avaliações quando a escala de cada critério enquadra-se em um desses dois tipos de percepção. Enquanto, Ozturk & Tsoukias (2008) exploraram as reações positivas e negativas, quando as preferências sobre as alternativas devem ser consideradas. O modelo mostra que é possível generalizar os princípios de concordância e discordância na agregação das preferências e aplicar isso a um problema de agregação destas, expressando-as sob a forma de intervalos.

Chen (2011) desenvolve uma estimativa otimista e pessimista com operadores *fuzzy* para traçar essas influências na tomada de decisão multicritério em prol de uma melhor aproximação do que um modelo unidimensional. Ao contrário das aproximações unidimensionais de Hurcicz e Yager, o trabalho focou na aproximação bidimensional baseado no conjunto *fuzzy* de Atanassov, pois o otimismo e o pessimismo não representam polos opostos em uma única dimensão, mas são concebidos como duas dimensões parcialmente independentes. Diante fundamentos empíricos, fornece um método para a análise de decisão multicritério com uma abordagem múltipla de mensuração. Sua viabilidade e eficácia são ilustradas por meio de exemplos. O estudo desenvolveu operadores otimistas e pessimistas com informações *fuzzy* para traçar a influência do pessimismo e otimismo no apoio a tomada de decisão em prol de um melhor ajuste em relação a informação encontrada em um modelo unidimensional. Estes operadores foram traçados a partir de uma interpretação geométrica com áreas otimistas e pessimistas por ele traçadas, conforme Figura 2.3 a seguir:

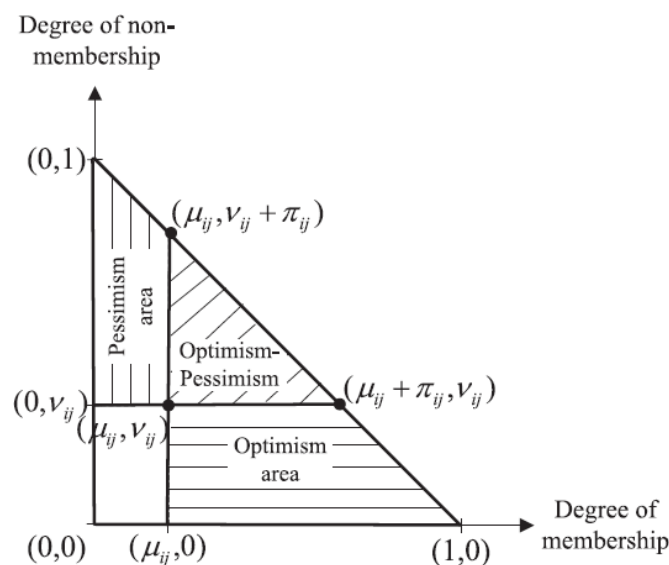


Figura 2.3 – Interpretação geométrica das áreas otimistas e pessimistas

Fonte: Chen (2011)

Baseado em uma série de novas funções, o método multicritério é desenvolvido de forma eficiente, que facilita a análise com uma aproximação aceitável de mensuração múltipla, a viabilidade do método é exposto por meio de sua aplicação.

2.6 Análise do capítulo

O capítulo apresentou alguns conceitos de apoio à tomada de decisão e os principais elementos do processo decisório, os conjuntos *fuzzy* e a importância de sua aplicação na tomada de decisão, como também os últimos modelos trabalhados com essa lógica, por fim inseriu os conceitos da percepção de risco nos modelos multicritério.

Os métodos multicritério auxiliam os participantes a encontrar soluções aceitáveis em situações de conflito para problemas complexos. Para auxiliar a compreensão, a intervenção de um analista se faz necessária para compreender os atores, articular os setores da empresa e selecionar apropriadamente o método e abordagem a ser utilizada.

Os métodos multicritério, principalmente os de sobreclassificação, vem sendo utilizados inclusive na área energética. A lógica *fuzzy* associada a esses métodos auxilia na captação da imprecisão do decisor ao elicitar as suas preferências, provendo maior segurança nos resultados do modelo. Porém, dado as diversas percepções dos atores, a inserção destas no modelo provê maior robustez, um resultado que atenda ao cenário o qual o problema está inserido.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo trata da metodologia seguida para a realização do estudo, contém uma discussão sobre a natureza do estudo, a escolha do campo de atuação, a descrição dos sujeitos envolvidos na pesquisa e a o procedimento utilizado para a coleta de dados do estudo.

3.1 Classificação da Pesquisa

Para o desenvolvimento de uma pesquisa científica, deve-se dar enfoque em sua classificação, de forma a direcionar técnicas e procedimentos para o alcance do propósito desta. Dessa forma, esta pesquisa se classifica como:

- a) Abordagem: de caráter dicotômico, contempla julgamentos qualitativos e quantitativos.
- b) Objetivos: com o caráter exploratório, busca proporcionar mais informações sobre o tema com o objetivo de familiarizar o tema pesquisado.
- c) Natureza: pesquisa aplicada, busca gerar conhecimentos para a aplicação prática, apontando a solução de problemas específicos, por meio de verdades e interesses locais (GIL,2010)

3.2 Natureza do estudo

A natureza do trabalho consiste na modelagem de um modelo multicritério, onde por meio de um problema, desencadeia-se o processo de construção deste para apontar uma ação a ser implementada, na expectativa de atender ao problema.

Segundo Almeida (2013), o processo de modelagem, consiste na eliminação da possibilidade de alguns modelos a cada decisão tomada pelo analista. Cada decisão consiste em uma abordagem a ser escolhida nas etapas do processo, em hipóteses assumidas em relação ao problema em estudo ou outros fatores em relação à decisão analisada. O procedimento para construção de um modelo de decisão multicritério é mostrado na Figura 3.1 a seguir:

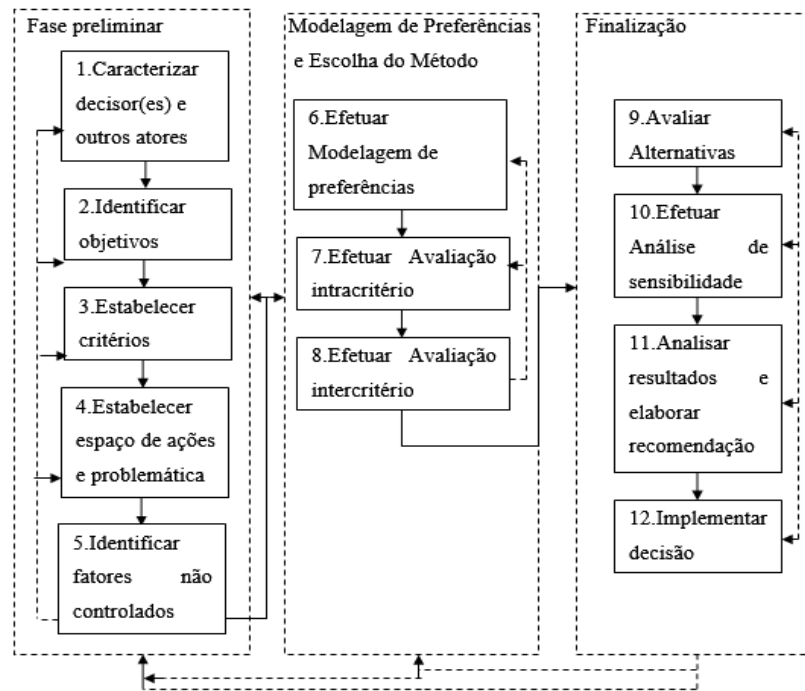


Figura 3.1- Procedimento para resolução de um problema de decisão

Fonte: Almeida (2013)

De acordo com este procedimento, a primeira fase possui cinco etapas básicas para a formulação do problema de decisão que influenciarão a forma que o modelo final terá.

A segunda fase, apresenta como os fatores influenciadores sobre a escolha do método de decisão multicritério são estruturados, nessa a flexibilidade e o uso de refinamentos sucessivos devem ser bem explorados. Com isso escolhe-se o método de decisão e constrói-se o modelo, realizando revisões em etapas passadas quando possível.

Na terceira fase, o modelo estando consolidado, as etapas finais para a resolução do problema e implementação da ação recomendada são realizadas. Para melhor compreensão, cada etapa é descrita na Tabela 3.1 a seguir:

Tabela 3.1: Etapas do procedimento para resolução de um problema de decisão.

Etapa	Descrição
1. Caracterizar decisor(es) e outros atores	Os decisores são definidos e seu envolvimento com o processo de decisão é caracterizado de forma clara.
2. Identificar objetivos	A identificação dos objetivos terá grande influência no modelo final. Métodos PSM podem ser utilizados para agregar qualidade a etapa.
3. Estabelecer critérios	Para cada objetivo estabelecido, critérios devem ser construídos de forma que os representem no processo de modelagem quantitativa.
4. Estabelecer espaço de ações e problemática	Ir-á estabelecer a estrutura do espaço de ações, determinará a problemática e gerará as alternativas
5. Identificar fatores não controlados	A identificação dos fatores não controlados consiste na avaliação e identificação de fatores relevantes que não estão sob o controle do decisor.
6. Efetuar modelagem de preferências	Esta etapa inicia a segunda fase do procedimento. Ir-á se avaliar a estrutura de preferências mais adequada para representar as preferencias do decisor.
7. Efetuar avaliação intracritério	A avaliação intracritério depende do tipo de método utilizado. Consiste na avaliação de cada alternativa i para cada critério j , levando a uma função valor $v_j(a_i)$.
8. Efetuar avaliação intercritério	Com base no método multicritério já estabelecido, parametrizasse o método, obtendo informações intercritério. Ou seja, considerando a combinação dos diferentes critérios.
9. Avaliar alternativas	Consiste na avaliação global das alternativas. Assim encerra-se a segunda fase.
10. Efetuar análise de sensibilidade	Apresenta um estudo para confrontar a robustez do modelo de decisão consolidado em relação aos dados de entrada e aos parâmetros empregados no modelo de decisão.
11. Analisar resultados e elaborar recomendação	Não havendo necessidade de retorno às etapas antecedentes, realiza-se a análise final dos resultados e a elaboração da recomendação ao decisor.
12. Implementar decisão	Consista na própria implementação da ação ou na adoção de procedimentos sobre o conjunto de ações indicadas, de acordo com a problemática abordada.

3.3 Campo de atuação

O campo de atuação do estudo será a o sistema de motores elétricos para compreender as dificuldades que os decisores possuem em adequar-se à Lei de Eficiência Energética Brasileira, em busca de aumentar sua eficiência energética. Para isso, o estudo irá propor um modelo de apoio à decisão para avaliação de alternativas para melhoria da eficiência energética, proporcionando uma ferramenta de avaliação às empresas que se encontram em situações como essa.

3.4 Síntese da metodologia

Para o alcance dos objetivos descritos inicialmente, para a coleta de dados e proposição do modelo, será necessários realizar:

- a) **Pesquisa bibliográfica:** Segundo Gil (2008), escolher um assunto por si só não é suficiente para iniciar a pesquisa bibliográfica, o assunto deve ser colocado em termos de um problema a ser solucionado. A partir de então se tem uma ideia clara do que se pretende tratar do assunto selecionado. Nesta fase será montado o conhecimento teórico referente a conceitos importantes para o estudo.
- b) **Construção do modelo:** A partir dos dados obtidos, o modelo multicritério será estruturado com base no procedimento proposto por Almeida (2013), que se baseou em procedimentos anteriores desenvolvidos por Roy (1996), Pomerol e Barba-Romero (2000) e Belton e Stewart (2002).
- c) **Estudo de caso:** Por meio do modelo a ser proposto, o modelo será aplicado a um caso particular de uma empresa do setor de energia e sua aplicação irá gerar informações acerca da robustez do modelo. O estudo pode ser feito por dados reais ou aleatórios, gerados computacionalmente.

3.5 Análise do Capítulo

O capítulo apresentou os principais aspectos que constituem a metodologia deste estudo. Apresenta uma abordagem dicotômica, por contemplar julgamentos qualitativo e quantitativo. A natureza da pesquisa é aplicada e possui caráter exploratório. O estudo busca modelar um modelo multicritério para atender ao problema proposto. Sua aplicação é limitada ao sistema de motores elétricos, em busca da adequação destes a Lei de Eficiência Energética Brasileira. Neste capítulo, também é apresentado o procedimento para construção deste modelo, conforme Almeida (2013).

4 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS PARA APOIAR A MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para elaboração do modelo é necessário compreender o problema para elaborar uma estruturação formal, conforme visto nos procedimentos metodológicos, para prover um modelo multicritério eficiente ao apoio à tomada de decisão. Este capítulo apresenta a relação da eficiência energética e o sistema de motores e os procedimentos realizados para a construção dos modelos *IF-ELECTRE α* e *IF-ELECTRE β* .

4.1 Eficiência energética e o sistema de motores

Conforme (McKane et al, 2007; Oikonomou et al, 2009; Sola e Xavier, 2007) a concepção do conceito de eficiência energética é relativa, pois um produto ou processo será energeticamente eficiente dependendo de alguma referência ou padrão. Porém em relação ao uso final da energia, Sola e Mota (2012) definem eficiência energética como a razão entre a quantidade de energia consumida e a quantidade de energia demandada.

De acordo com Sola et al (2011) a adoção de medidas para mensurar a eficiência energética são importantes e economicamente viáveis para a economia de energia nas organizações. Russel (2005) expõe que a eficiência energética tem sido amplamente promovida como uma ferramenta de gerenciamento de risco, reduzindo os custos da energia e as chances de alteração nos preços desta.

O sistema de energia industrial diferente dos demais, uma vez que a energia, aquecimento e resfriamento ligado ao processo, é um elemento fundamental para o processamento dos produtos finais, por apresentar uma maior complexidade quanto suas tecnologias, economia e estrutura organizacional. Esses sistemas de energia, conforme DOE (2004) são classificados como: sistemas de motores, geração de vapor, aquecedores a gás, refrigeradores e arrefecimentos, geradores de energia e de cogeração.

Os sistemas de motores em especial, desempenham um papel fundamental nas indústrias por serem os responsáveis por gerar a eletricidade consumida e apresentar potencial economia de energia com o seu correto gerenciamento. (KAYA et al., 2008)

Estes sistemas de motores tratam-se do uso coletivo de alguns motores elétricos dentro do processo produtivo, como: bombas, ar comprimido, ventiladores, transportadores e misturadores. Quando aperfeiçoados, oferecem meios a empresa de reduzir custos, aumentar a produtividade e garantir outros benefícios operacionais, para manter-se competitiva no

mercado. E para prover isso, existem avançadas tecnologias no mercado, além de um fluxo contínuo dessas tecnologias que se adaptam as necessidades do cliente.

No entanto, essas barreiras das organizações, como: informações divergentes, caracterizadas pela má distribuição da informação nos setores e a ausência de metas voltadas para a eficiência energética, impedem o desenvolvimento de projetos voltados a esse tema, conforme Worrel et al. (2001) estão em sua maioria ligadas à:

- Processos de tomadas de decisão;
- Incertezas nas informações;
- Falhas nas ferramentas de gerenciamento;
- Falta de tempo e recursos para coletar e processar informações;
- Capital disponível limitado, destinado a outras prioridades a serem investidas;
- Informação e acesso a outras tecnologias, principalmente nos casos de dependência de fornecedores e os riscos envolvidos com novas tecnologias;
- Baixo percentual de pessoas especializadas, o foco está na produção;
- Custo e risco de parar a produção;
- Responsabilidades financeiras e econômicas;
- Dados incompletos acerca da depreciação da tecnologia existente
- Outras formas de investimento consideradas mais importantes;
- Elevado custo inicial e falta de segurança quanto aos recursos processados por essa nova tecnologia.

Sola e Mota (2012), mostram que essas tecnologias para o alcance da eficiência energética dos motores incluem: substituição da tecnologia atual, tornando a carga do motor adequada as normas; acionamento de velocidades variáveis, banco de capacitores, dispositivos de otimização da energia, gestão da manutenção, informação e educação.

No Brasil, de acordo com a proposta do decreto 4508/2002, foi estabelecida uma eficiência mínima para os motores de alta eficiência, como norma voluntária até 2009, por meio da Lei de Eficiência Energética Brasileira. No entanto, esses motores são responsáveis por 10% de todos os motores que circulam nas indústrias brasileiras, mesmo com incentivos a favor de sua substituição e o oferecimento desses motores que atendem a lei. Assim, a adoção desses motores de alta eficiência ajuda a melhorar a eficiência energética e a competitividade.

De acordo com Bortoni (2009), com as diversas classes de motores elétricos para atender diferentes níveis de eficiência, para a sua adequação, as indústrias devem compreender as dimensões que a substituição de seus motores além de atender a lei,

economiza perdas suficientes para pagar um novo motor, pois quando este encontrasse sobrecarregado apresenta perdas de eficiência e reduz a sua vida útil.

A substituição do sistema de motores por um de melhor eficiência energética deve ser feita de forma cautelosa, pois deve-se conhecer o valor de carga e eficiência de cada motor, informações que muitas vezes são imprecisas como exposto anteriormente.

4.2 Fundamentos do modelo proposto

4.2.1 Abordagens e métodos

Conforme Gomes *et al.* (2006), a escolha de um método multicritério depende das características do problema analisado, do contexto considerado, da estrutura de preferências do decisor e da problemática. Cada ator possui suas preocupações, conhecimentos e valores próprios que devem ser levados em consideração no processo de modelagem. Com isso, devem-se diferenciar os níveis (operacional e de decisão) nos quais o modelo será aplicado.

Sola (2011) descreve a composição dos sistemas industriais de energia como tecnologias que possuem diferentes níveis de desgaste, de eficiência energética e graus de impacto no processo produtivo.

Dessa forma, a nível operacional, torna-se necessário o reconhecimento das prioridades para a substituição das tecnologias, estabelecidas por uma problemática de ordenação. Para este problema, uma abordagem construtivista é indicada, devido as barreiras organizacionais que implicam uma forte interação entre as áreas da organização. Isso pode gerar ações de difícil comparação, assim, um método de sobreclassificação é recomendável. Por meio desse método de relações binárias, as preferencias não são necessariamente transitivas e alguns pares de alternativas podem ser incomparáveis. Acrescenta-se ainda que os critérios são não-compensatórios, dado a caracterização da estrutura de preferências dos diversos setores, ou seja, não é possível compensar um critério com outro.

No nível gerencial acrescenta-se o interesse nas consequências da decisão. Os conceitos de otimismo e pessimismo são construtos fundamentais para refletir a postura do decisor frente ao problema de decisão. Isso afeta a maneira como os julgamentos subjetivos são construídos. Fischer & Chalmers (2008) mostram que embora as teorias difiram em suas especificidades, a principal ideia é que os otimistas e pessimistas divergem na maneira como explicam e predizem eventos futuros. Os otimistas interpretam suas vidas positivamente e antecipam resultados desejáveis, enquanto os pessimistas constroem suas vidas negativamente e antecipam resultados não favoráveis. Assim, incluir essas influências no processo decisório

torna-se imprescindível. Assim, os operadores otimistas e pessimistas elaborados por Chen (2011) permitem a avaliação das consequências de uma decisão por meio da percepção otimista/pessimista do decisor. Com a identificação do tipo de decisor, torna-se possível selecionar a opção mais vantajosa de acordo com a sua percepção, aumentando as possibilidades de substituição das tecnologias.

4.2.2 Situações e princípios para aplicação do modelo

Os modelos propostos são aplicáveis à substituição de tecnologias de qualquer sistema industrial de energia, em duas situações. Para a situação I, a empresa mostra interesse em priorizar as tecnologias a serem substituídas. Neste caso, necessita-se uma ordenação das tecnologias utilizando um método de sobreclassificação. Para a situação II, a empresa se depara com um problema mais complexo onde a percepção do decisor está sendo levada em conta para melhor selecionar a tecnologia a ser substituída.

A fim de obter maior segurança na aplicação do modelo, alguns dos princípios apresentados por Sola (2011) foram considerados:

- **Acurácia:** A confiabilidade dos resultados é de suma importância para a aceitação das soluções. As medições da energia devem seguir os princípios de engenharia, cálculos financeiros. Os métodos de apoio à decisão devem ter um nível de precisão considerável.
- **Comprometimento:** A gerência e os demais funcionários devem estar comprometidos para a realização do trabalho na organização.
- **Intervenção pouco invasiva:** Diante o foco da produção, carência de tempo e de mão de obra no setor industrial, é recomendável que o processo de modelagem seja feito por um agente externo, pouco invasivo, que não prejudique a produção.
- **Multidisciplinaridade:** Deve ser considerado as diversas áreas de conhecimento que envolve o sistema produtivo.

4.3 Situação I – ordenação das tecnologias

Um problema multicritério pode ser representado em uma matriz de decisão, cujo elemento x_{ij} indica a avaliação ou valor da alternativa i , A_i , com respeito ao critério j , C_j . Este modelo desenvolve o formato clássico da matriz para uma matriz de decisão intuicionista R , conforme proposto por Atanassov (1986). Sendo, A um conjunto de alternativas e C um

conjunto de critérios, onde $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$ e $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$. Assume-se que as características da alternativa A_i são apresentadas como conjuntos fuzzy intuicionistas de Atanassov, *Atanassov's intuitionistic fuzzy sets* (A-IFS), $A_i = \{(C_n, \mu_{in}, \nu_{in})\}$, $i = 1, 2, \dots, m$

Onde μ_{ij} indica o grau que cada alternativa A_i satisfaz o critério C_j , ν_{ij} indica o grau que cada alternativa A_i não satisfaz o critério C_j (μ_{ij}, ν_{ij}), $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$. Com isso, com o uso dos conjuntos fuzzy intuicionistas e o método de sobreclassificação ELECTRE III, o modelo apresentado na Figura 4.1 a seguir, busca fornecer uma ordenação das alternativas dado o ambiente incerto que as informações do decisor se encontram:

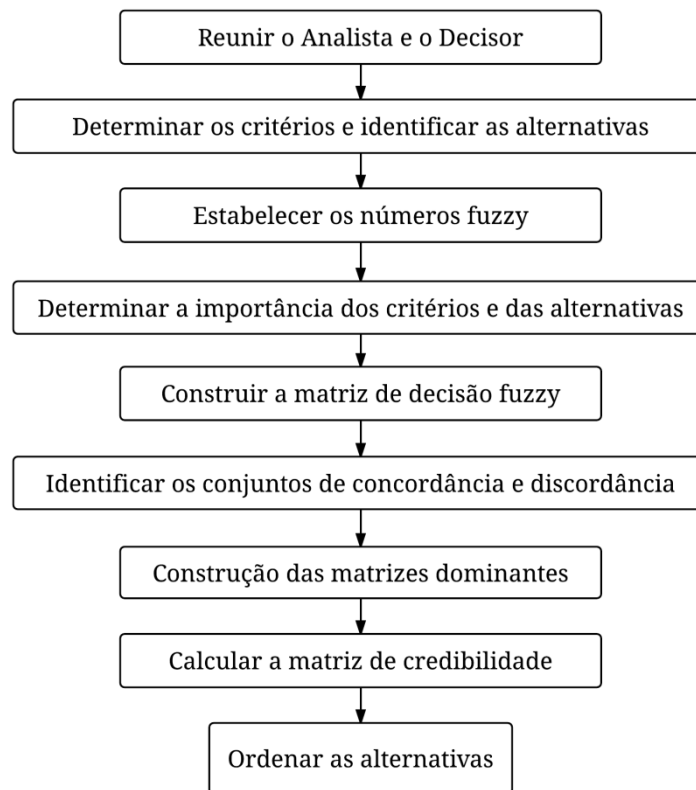


Figura 4.1 – Modelo IF-ELECTRE α para ordenação de tecnologias

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Passo 1: Reunir o analista e o decisor. O analista tem a função de interagir com o decisor – e outros atores – com o objetivo de conhecer o problema e expandir o conhecimento por meio de uma sólida fundamentação teórica na área de decisão. Ambos devem expor as informações necessárias para realizar uma abordagem correta do problema.

Passo 2: Determinar os critérios e identificar as alternativas. A fim de conhecer quais critérios estão envolvidos para a tomada de decisão e alternativas disponíveis, conforme

o problema apresentado, estas devem ser identificadas nessa etapa, evitando redundâncias e eliminação de opções indesejáveis ou irrelevantes.

Passo 3: Estabelecer os números fuzzy. Trabalhando com o *Intuitionistic Fuzzy* (IF), o decisor deve fornecer dois dados para elicitar cada preferência, o grau de adesão (μ) e o grau de não-adesão (ν) para construir a matriz IF de decisão quando comparado com os dados do IVF. No entanto, isso pode não assegurar que os dados obtidos no IF possam ser utilizados, pois a soma do grau de adesão e de não-adesão deve ser menor ou igual a um. A teoria do IF é matematicamente equivalente a teoria do IVF.

Devido à restrição da soma desses graus, trabalhar com o IVF é de mais fácil compreensão do que trabalhar com os dados IF. Sendo $\text{Int}([0,1])$ um conjunto de pontos interiores a um intervalo de 0 a 1, o IVF de A_i da i -ésima alternativa de X dado por:

$$A_i = \{(x_j, M_{ij}) | x_j \in X\}$$

Onde $M_{ij}: X \rightarrow \text{Int}([0,1])$, em que $x_j \rightarrow M_{ij} = [M_{ij}^-, M_{ij}^+]$. M_{ij} representa os possíveis graus que a alternativa A_i satisfaz o critério x_j . M_{ij}^- e M_{ij}^+ representam o limite inferior e o limite superior, respectivamente, do intervalo M_{ij} .

Assim, o decisor avalia as alternativas dentro de um intervalo fechado $[M_{ij}^-, M_{ij}^+]$. Com isso, $M_{ij}^- = \mu_{ij}$ e $M_{ij}^+ = 1 - \nu_{ij}$. Portanto, $[M_{ij}^-, M_{ij}^+] = (\mu_{ij}, 1 - \nu_{ij})$. Para transformar os dados IVF em IF, este conceito pode ser usado, visto a equivalência entre essas teorias.

Passo 4: Determinar a importância dos critérios e das alternativas. O conjunto dos graus de importância, W , devem ser definidos porque os critérios não podem assumir a mesma importância. Com base na escala qualitativa do Interval-Valued *Fuzzy*, realiza-se o procedimento de elicitação das preferências do decisor, obtendo o valor de cada alternativa.

Passo 5: Construir a matriz de decisão fuzzy. Sendo a alternativa A_i do A-IFS, representada por $A_i = \{(x_j, X_{ij}) | x_j \in X\}$, onde $X_{ij} = (\mu_{ij}, \nu_{ij})$. Onde, X_{ij} indica respectivamente o grau de adesão, μ_{ij} , e não adesão, ν_{ij} , da i -ésima alternativa com respeito ao critério j e $0 \leq \mu_{ij} + \nu_{ij} \leq 1$, $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$, $\pi_{ij} = 1 - \mu_{ij} - \nu_{ij}$. A matriz de decisão IF é expressa como:

$$M = \begin{matrix} A_1 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{m1} & \cdots & X_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\mu_{11}, \nu_{11}, \pi_{11}) & \cdots & (\mu_{1n}, \nu_{1n}, \pi_{1n}) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (\mu_{m1}, \nu_{m1}, \pi_{m1}) & \cdots & (\mu_{mn}, \nu_{mn}, \pi_{mn}) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Passo 6: Identificar os conjuntos de concordância e discordância. Utilizando os conceitos de função escore, função acuracidade e grau de hesitação dos valores fuzzy

intuicionistas (IF) propostos por Chen e Tan (1994), para distinguir os diferentes tipos de concordância e discordância. Neste passo, encontram-se C_{kl} , C'_{kl} , C''_{kl} , D_{kl} , D'_{kl} e D''_{kl} para as comparações par-a-par das alternativas.

A concordância C_{kl} é obtida por:

$$C_{kl} = \{j | \mu_{kj} \geq \mu_{lj}, v_{kj} < v_{lj} \text{ e } \pi_{kj} < \pi_{lj}\} \quad (4.2)$$

Onde $J = \{j | j = 1, 2, \dots, n\}$, um escore elevado indica um elevado valor IF, um alto grau de acuracidade indica um baixo grau de hesitação.

A concordância média C'_{kl} é obtida por:

$$C'_{kl} = \{j | \mu_{kj} \geq \mu_{lj}, v_{kj} < v_{lj} \text{ e } \pi_{kj} \geq \pi_{lj}\} \quad (4.3)$$

A maior diferença entre essas concordâncias está no grau de hesitação, o grau de hesitação da k -ésima alternativa com respeito ao j -ésimo critério é maior que a l -ésima alternativa com respeito ao j -ésimo critério na concordância média. Com isso, a equação 4.2 é mais concordante que a equação 4.3.

A concordância fraca C''_{kl} é obtida por:

$$C''_{kl} = \{j | \mu_{kj} \geq \mu_{lj} \text{ e } v_{kj} \geq v_{lj}\} \quad (4.4)$$

O grau de não-adesão da k -ésima alternativa com respeito ao j -ésimo critério é maior que a l -ésima alternativa com respeito ao j -ésimo critério na concordância fraca. No entanto, a equação 4.3 é mais concordante que a equação 4.4.

Cada critério cujo A_k não seja preferível a A_l , corresponde a um elemento do conjunto de discordância.

Para obter a discordância D_{kl} , os mesmos conceitos citados acima são utilizados também:

$$D_{kl} = \{j | \mu_{kj} < \mu_{lj}, v_{kj} \geq v_{lj} \text{ e } \pi_{kj} \geq \pi_{lj}\} \quad (4.5)$$

Com isso, um escore elevado indica um maior valor IF e um alto grau de acuracidade refere-se a um baixo grau de hesitação.

A discordância média D'_{kl} é obtida por:

$$D'_{kl} = \{j | \mu_{kj} < \mu_{lj}, v_{kj} \geq v_{lj} \text{ e } \pi_{kj} < \pi_{lj}\} \quad (4.6)$$

A discordância fraca D''_{kl} é obtida por:

$$D''_{kl} = \{j | \mu_{kj} < \mu_{lj} \text{ e } v_{kj} < v_{lj}\} \quad (4.7)$$

Ressalta-se que assim como a equação 4.5 é mais discordante que 4.6, a equação 4.6 é mais discordante que 4.7, pois o grau de adesão e não-adesão da k -ésima alternativa com respeito ao j -ésimo critério são menores que os da l -ésima alternativa com respeito ao j -ésimo critério na discordância fraca.

Passo 7: Construção das matrizes dominantes. Com as matrizes de concordância e discordância calculadas, o próximo passo é encontrar as matrizes de concordância G e discordância H , para obter as matrizes dominantes K e L .

A matriz de concordância G representa o índice da matriz de concordância, que é o resultado operacional dos diferentes pesos associados a cada critério com as relações contidas nas diferentes concordâncias. A matriz de discordância H representa o índice da matriz de discordância é o resultado operacional das diferentes discordâncias encontradas e seus respectivos pesos.

Conforme proposto por Chen (2011), o índice de concordância g_{kl} entre A_k e A_l pode ser definido como:

$$g_{kl} = w_C \times \sum_{j \in C_{kl}} w_j + w_{C'} \times \sum_{j \in C'_{kl}} w_j + w_{C''} \times \sum_{j \in C''_{kl}} w_j \quad (4.8)$$

Onde w_C , $w_{C'}$ e $w_{C''}$ são os pesos da concordância, concordância média e concordância fraca, respectivamente. O índice de concordância reflete a dominância relativa de uma determinada alternativa sobre uma alternativa concorrente, baseado no peso relativo associado aos sucessivos critérios.

Com isso, a matriz de concordância G é obtida por:

$$G = \begin{bmatrix} - & g_{12} & \dots & \dots & g_{1m} \\ g_{21} & - & g_{23} & \dots & g_{2m} \\ \dots & \dots & - & \dots & \dots \\ g_{(m-1)1} & \dots & \dots & - & g_{(m-1)m} \\ g_{m1} & g_{m2} & \dots & g_{(m-1)m} & - \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Onde o valor máximo de g_{kl} é denotado por g^* , que indica o ponto positivo ideal, um alto valor de g_{kl} também indica que a alternativa A_k é preferível a A_l .

O índice de discordância h_{kl} entre A_k e A_l pode ser definido como uma avaliação de uma determinada alternativa A_k ser pior em relação a uma alternativa A_l avaliada. Este pode ser obtido conforme equação 4.10 a seguir:

$$h_{kl} = \frac{\max_{j \in D_{kl}} w_D^* \times d(X_{kj}, X_{lj})}{\max_{j \in J} d(X_{kj}, X_{lj})} \quad (4.10)$$

Onde $d(X_{kj}, X_{lj})$ é definido pela distância Euclidiana normalizada entre X_{kj} e X_{lj} , proposto para medir a diferença entre os dois, conforme equação 4.11 abaixo:

$$d(X_{kj}, X_{lj}) = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{j=1}^n (\mu_{X_{kj}}(x_j) - \mu_{X_{lj}}(x_j))^2 + (v_{X_{kj}}(x_j) - v_{X_{lj}}(x_j))^2 + (\pi_{X_{kj}}(x_j) - \pi_{X_{lj}}(x_j))^2} \quad (4.11)$$

O valor de w_D^* é igual aos pesos w_D , $w_{D'}$ e $w_{D''}$, dependendo dos diferentes tipos de discordância obtidas anteriormente, discordância, discordância média e discordância fraca, respectivamente. Com isso, a matriz de discordância H é obtida por:

$$H = \begin{bmatrix} - & h_{12} & \dots & \dots & h_{1m} \\ h_{21} & - & h_{23} & \dots & h_{2m} \\ \dots & \dots & - & \dots & \dots \\ h_{(m-1)1} & \dots & \dots & - & h_{(m-1)m} \\ h_{m1} & h_{m2} & \dots & h_{(m-1)m} & - \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Onde o valor máximo de h_{kl} é denotado por h^* , que indica o ponto negativo ideal, um alto valor de h_{kl} também indica que a alternativa A_k é menos preferível a A_l .

Construídas as matrizes de concordância G e discordância H, baseado no conceito que a alternativa escolhida deve ter a menor distância da solução positiva ideal, encontra-se a matriz de concordância dominante K por:

$$K = \begin{bmatrix} - & k_{12} & \dots & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & - & k_{23} & \dots & k_{2m} \\ \dots & \dots & - & \dots & \dots \\ k_{(m-1)1} & \dots & \dots & - & k_{(m-1)m} \\ k_{m1} & k_{m2} & \dots & k_{(m-1)m} & - \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Onde $k_{kl} = g^* - g_{kl}$, que refere-se distância de cada alternativa a solução positiva ideal, Um alto valor de k_{kl} indica que A_k é menos preferível a A_l .

Baseado no conceito que a alternativa escolhida deve ter a maior distância da solução negativa ideal, encontra-se a matriz de discordância dominante L por:

$$L = \begin{bmatrix} - & l_{12} & \dots & \dots & l_{1m} \\ l_{21} & - & l_{23} & \dots & l_{2m} \\ \dots & \dots & - & \dots & \dots \\ l_{(m-1)1} & \dots & \dots & - & l_{(m-1)m} \\ l_{m1} & l_{m2} & \dots & l_{(m-1)m} & - \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

Onde $l_{kl} = h^* - h_{kl}$, que refere-se distância de cada alternativa a solução negativa ideal, Um alto valor de l_{kl} indica que A_k é preferível a A_l .

Passo 8: Calcular a matriz de credibilidade. Construídas as matrizes de concordância dominante K e discordância dominante L, para cada par de alternativas $(a, b) \in A_k \times A_l$, é possível ter uma medida de concordância e discordância.

Ao combiná-las, pode-se chegar a um grau de sobreclassificação, uma matriz de credibilidade que avalia a afirmação que “*a é pelo menos tão boa quanto b*”. O grau de credibilidade para cada par $(a, b) \in A_k \times A_l$ é definido como:

$$S(a, b) = \begin{cases} C(a, b) & , \text{ se } d_j(a, b) \leq C(a, b) \quad \forall j \\ C(a, b) \prod_{j \in J(a, b)} \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - C(a, b)}, & \text{ onde } J(a, b) \text{ é o conjunto dos critérios} \\ & \text{para os quais } d_j(a, b) > C(a, b) \end{cases}$$

Onde, $J(a, b)$ é o conjunto dos critérios para os quais ocorre $d_j(a, b) > C(a, b)$. Conforme Buchanan *et al.* (1998), se a distancia for igual a 1, para apenas um critério, não se tem credibilidade na afirmação que aSb . De outra forma, se a discordância for igual a 0, tem-se credibilidade em afirmar que aSb .

Passo 9: Ordenar as alternativas. Conforme abordagem do método ELECTRE III, a técnica de destilação constrói duas ordenações, uma ascendente e outra descendente. Conforme Vincke (1992), primeiramente determina-se um valor λ , o qual será o valor máximo da matriz de credibilidade, $\lambda = \max S(a, b)$. Em seguida define-se um coeficiente de “relaxamento” para λ , através da fórmula 4.15 a seguir:

$$\lambda_\alpha = \lambda - s(\lambda) \quad (4.15)$$

Em seguida, adota-se o valor da credibilidade para cada critério e compara-se com λ , formando uma matriz $Q_M(A)$, onde os valores apresentam-se como 0 ou 1, 0 para credibilidade nula e 1 para credibilidade alta.

Com as informações dessa matriz, retira-se a melhor alternativa classificada, concluindo a 1ª etapa da destilação descendente. O processo repete-se para as demais alternativas,

excluindo a alternativa previamente classificada, ao final das destilações, tem-se a pré-classificação descendente.

Para a classificação ascendente, o mesmo procedimento é realizado, porém em cada etapa retira-se a pior ação classificada. Com as duas pré-classificações, determina-se a classificação final, que será a interseção das duas.

Conforme Maystre *et al.*(1994), para a ordenação final, algumas regras de classificação são apresentadas:

- Se a é preferível a b dentro das duas pré-classificações, então a será preferível a b no ordenamento final;
- Se a é equivalente a b em uma das pré-classificações, mas ela é preferível na outra, então a é preferível a b ;
- Se a é preferível a b em uma das pré-classificações, mas na outra pré-classificação b é preferível a a , então as duas opções são incomparáveis entre si.

Com isso, o modelo *IF-ELECTRE* α propõe uma ordenação para as tecnologias diante o problema para melhoria da eficiência energética. Antes de analisar os resultados e elaborar as recomendações, Almeida (2013) sugere também uma análise de sensibilidade dos resultados, para confrontar sua robustez em relação aos dados de entrada e aos parâmetros empregados no modelo de decisão.

4.4 Situação II – escolha dos motores

O segundo modelo multicritério relaciona o otimismo e pessimismo diante um ambiente incerto de decisão, sob a ótica dos conjuntos *fuzzy* de Atanassov, *Atanassov's Fuzzy Sets* (AFSs). Em um cenário AFSs, as influências do otimismo e pessimismo são tratadas de forma diferente, usando um modelo unipolar bivariado e a relação ao risco otimista/pessimista é tratada de forma separada por meio da hesitação.

Por meio do Teste de Orientação Prolongado para a Vida, do original *Extended Life Orientation Test* (ELOT), de Chang, Maydeu-Olivares e D'Zurilla (1997), o trabalho de Chen (2011), que desenvolveu algumas ferramentas úteis para lidar com os resultados dos diferentes tipos de decisores (otimista completo, otimista moderado, otimista racional, otimista limitado, pessimista completo, pessimista moderado, pessimista racional, pessimista limitado, otimista-pessimista completo e otimista-pessimista moderado) e o método de sobreclassificação ELECTRE I.

O modelo apresentado na Figura 4.2 a seguir, fornece a escolha das melhores alternativas para a substituição das tecnologias por mais eficientes, dado a incerteza das informações e do ambiente, conforme a percepção do decisor:

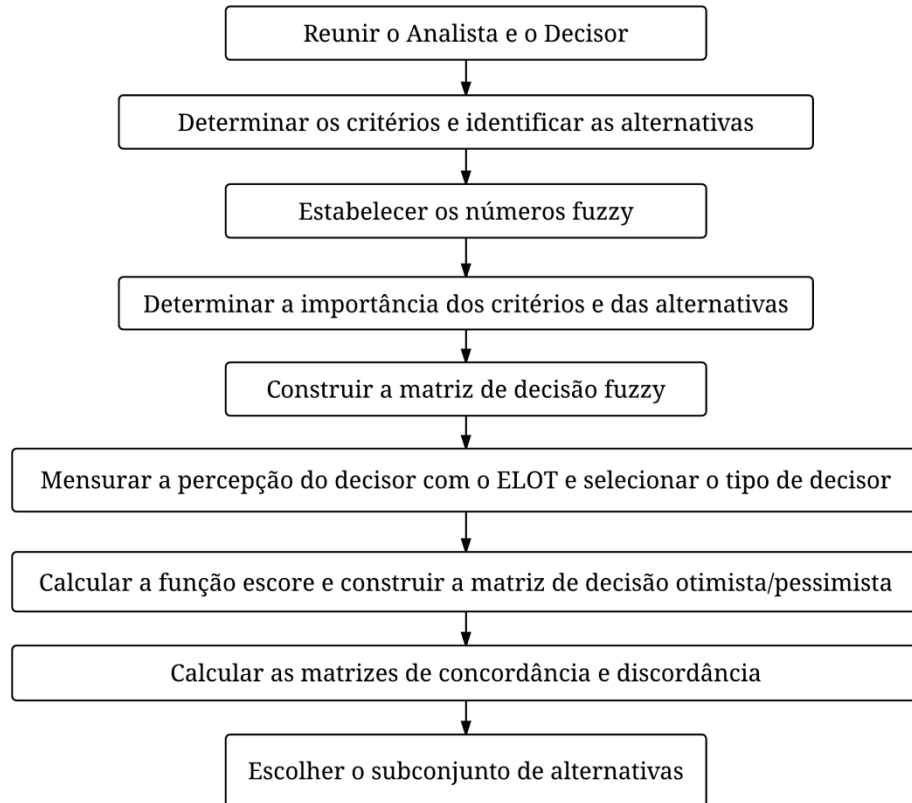


Figura 4.2 – Modelo IF-ELECTRE β para escolha de tecnologias

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Os cinco passos iniciais deste modelo são os mesmos do modelo anterior, de forma similar deve-se realizar uma reunião com o analista, o decisor e sua equipe para conhecimento do problema, para poder estabelecer os critérios e identificar as alternativas. Com isso, dado a imprecisão das informações, o analista propõe uma escala baseada em termos linguísticos e a associa aos números IVF para possibilitar a construção da matriz IF posteriormente.

Passo 6: Mensurar a percepção do decisor com o ELOT e selecionar o tipo de decisor.. O Teste de Orientação Prolongado para a Vida, do original *Extended Life Orientation Test* (ELOT), de Chang, Maydeu-Olivares e D’Zurilla (1997), é um instrumento que pretende medir o otimismo e pessimismo enquanto expectativas de resultados positivos ou negativos diante uma situação futura.

O teste foi criado por meio da junção dos questionários LOT (*Life Orientation Test*) e LOT-R (*Life Orientation Test Revised*) de Scheier & Carver (1985) e OPS (*Optimism Pessimism Scale*) de Dember *et al.* (1989).

A versão utilizada por esse modelo é a portuguesa de Perloiro (2002), constante no Anexo A. Ele é composto por 20 itens que estão organizados em duas dimensões. Seis itens constituem a sub-escala de otimismo (itens 3, 6, 8, 11, 15 e 19), nove itens avaliam o pessimismo (itens 2, 4, 5, 10, 12, 14, 16, 18 e 20), os outros cinco itens restantes são chamados de *filler itens* (itens 1, 7, 9, 13 e 17)

As respostas são apresentadas diante uma escala de Likert de cinco ponto, em que 1 corresponde a “discordo fortemente”, 2 a “discordo”, 3 a “neutro”, 4 a “concordo” e 5 a “concordo fortemente”.

Em sua pesquisa, Perloiro (2002) indicou que o otimismo e o pessimismo são dois conceitos distintos embora fortemente correlacionados, não opostos e que se relacionam com uma variável de segunda ordem a que designa de “orientação face à vida”. Quanto a consistência dessa pesquisa, avaliada pelo alfa de cronbach das suas sub-escalas para a amostra em estudo, constatou-se os seguintes resultados, conforme Tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Estudo de validade da escala do ELOT

Sub-escala	Alfa de Cronbach	
	Chang, Maydeu-Olivares e D’Zurilla (1997)	Perloiro (2002)
Otimismo	0,77	0,68
Pessimismo	0,89	0,83

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Chen (2011) em seu trabalho aplicou o ELOT em um estudo composto por 380 participantes, pode categorizar o perfil dessa amostra em quatro quadrantes conforme a média obtida da pontuação do otimismo e pessimismo, quando considerados de forma bidimensional.

Quando contrastado os resultados com a unidimensionalidade proposta pela aproximação de Hurcicz’s e Yager’s, observou-se a falta de possibilidade em reconhecer tais perfis. Com isso, baseado em fundamentos empíricos, operadores otimistas e pessimistas foram desenvolvidos para identificar os resultados conforme a percepção do decisor, conforme apresentados na descrição do trabalho de Chen (2011) na seção 2.5. Essa categorização pode ser vista na Tabela 4.2 a seguir:

Tabela 4.2 – Tipos de percepções do decisor

Tipo I Otimismo Baixo & Pessimismo Baixo	Tipo II Otimismo Elevado & Pessimismo Baixo
Operadores: P – Otimismo Limitado Q – Pessimismo Limitado	Operadores: J* – Otimismo Completo J – Otimismo Moderado M – Otimismo Racional
Tipo III Otimismo Baixo & Pessimismo Elevado	Tipo IV Otimismo Elevado & Pessimismo Elevado
Operadores: H* – Pessimismo Completo H – Pessimismo Moderado N – Pessimismo Racional	Operadores: D – Otimismo-Pessimismo Completo F – Otimismo-Pessimismo Moderado

Fonte: Chen (2011)

Passo 7: Calcular a função escore e construir a matriz de decisão otimista/pessimista. Diferenciado o tipo de decisor conforme a pontuação obtida no ELDT, neste passo agora deve-se calcular um dos quatro casos conforme o tipo do decisor encontrado:

Caso I – Para o decisor Tipo I aplica-se a equação 4.16 para encontrar o operador P (Otimismo Limitado) ou a equação 4.17 para encontrar o operador Q (Pessimismo Limitado) para cada $X_{ij} \in AFS(X)$ na matriz de decisão:

$$S_P(X_{ij}) = \max(\mu_{ij}, \alpha_{ij}) - \min(v_{ij}, \beta_{ij}) \quad (4.16)$$

$$S_Q(X_{ij}) = \min(\mu_{ij}, \alpha_{ij}) - \max(v_{ij}, \beta_{ij}) \quad (4.17)$$

Onde $S_P(X_{ij}), S_Q(X_{ij}) \in [-1, 1]$.

Caso II – Para o decisor Tipo II aplica-se a equação 4.18 para encontrar o operador J* (Otimismo Completo), a equação 4.19 para o operador J (Otimismo Moderado) ou a equação 4.20 para encontrar o operador M (Otimismo Racional) para cada $X_{ij} \in AFS(X)$ na matriz de decisão:

$$\begin{aligned} S_{J^*}(X_{ij}) &= \mu_{ij} + \alpha_{ij}(1 - \mu_{ij} - \beta_{ij} \cdot v_{ij}) - \beta_{ij} \cdot v_{ij} \\ &= \alpha_{ij} + (1 - \alpha_{ij})\mu_{ij} - \beta_{ij}(1 + \alpha_{ij})v_{ij} \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} S_J(X_{ij}) &= \mu_{ij} + \alpha_{ij} \cdot \pi_{ij} - \beta_{ij} \cdot v_{ij} \\ &= \alpha_{ij} + (1 - \alpha_{ij})\mu_{ij} - (\alpha_{ij} + \beta_{ij})v_{ij} \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned}
S_M(X_{ij}) &= \mu_{ij} + \alpha_{ij} \cdot \pi_{ij} - v_{ij} \\
&= \alpha_{ij} + (1 - \alpha_{ij})\mu_{ij} - (1 + \alpha_{ij})v_{ij}
\end{aligned} \tag{4.20}$$

Onde $S_{J^*}(X_{ij}), S_J(X_{ij}), S_M(X_{ij}) \in [-1,1]$.

Caso III – Para o decisor Tipo III aplica-se a equação 4.21 para encontrar o operador H^* (Pessimismo Completo), a equação 4.22 para o operador H (Pessimismo Moderado) ou a equação 4.23 para encontrar o operador N (Pessimismo Racional) para cada $X_{ij} \in AFS(X)$ na matriz de decisão:

$$\begin{aligned}
S_{H^*}(X_{ij}) &= \alpha_{ij} \cdot \mu_{ij} - v_{ij} - \beta_{ij}(1 - \alpha_{ij} \cdot \mu_{ij} - v_{ij}) \\
&= \alpha_{ij}(1 + \beta_{ij})\mu_{ij} - (1 - \beta_{ij})v_{ij} - \beta_{ij}
\end{aligned} \tag{4.21}$$

$$\begin{aligned}
S_H(X_{ij}) &= \alpha_{ij} \cdot \mu_{ij} - v_{ij} - \beta_{ij} \cdot \pi_{ij} \\
&= (\alpha_{ij} + \beta_{ij})\mu_{ij} - (1 - \beta_{ij})v_{ij} - \beta_{ij}
\end{aligned} \tag{4.22}$$

$$\begin{aligned}
S_N(X_{ij}) &= \mu_{ij} - v_{ij} - \beta_{ij} \cdot \pi_{ij} \\
&= (1 + \beta_{ij})\mu_{ij} - (1 - \beta_{ij})v_{ij} - \beta_{ij}
\end{aligned} \tag{4.23}$$

Onde $S_{H^*}(X_{ij}), S_H(X_{ij}), S_N(X_{ij}) \in [-1,1]$.

Caso IV – Para o decisor Tipo IV aplica-se a equação 4.24 para encontrar o operador D (Otimismo-Pessimismo Completo) ou a equação 4.25 para encontrar o operador F (Otimismo-Pessimismo Moderado) para cada $X_{ij} \in AFS(X)$ na matriz de decisão:

$$\begin{aligned}
S_D(X_{ij}) &= \mu_{ij} + \alpha_{ij} \cdot \pi_{ij} - v_{ij} - (1 - \alpha_{ij})\pi_{ij} \\
&= 2(1 - \alpha_{ij})\mu_{ij} - 2\alpha_{ij} \cdot v_{ij} + 2\alpha_{ij} - 1
\end{aligned} \tag{4.24}$$

$$\begin{aligned}
S_F(X_{ij}) &= \mu_{ij} + \alpha_{ij} \cdot \pi_{ij} - v_{ij} - \beta_{ij} \cdot \pi_{ij} \\
&= (1 - \alpha_{ij} + \beta_{ij})\mu_{ij} - (1 + \alpha_{ij} - \beta_{ij})v_{ij} + \alpha_{ij} - \beta_{ij}
\end{aligned} \tag{4.25}$$

Onde $S_D(X_{ij}), S_F(X_{ij}) \in [-1,1]$.

Conforme os valores obtidos, constrói-se uma nova matriz de decisão, com a percepção do decisor inserida no problema.

Passo 8: Calcular as matrizes de concordância e discordância. Neste passo inicia-se a aplicação do ELECTRE I, cuja ideia é reduzir o tamanho do conjunto de alternativas A , para um subconjunto A , com o menor número possível de alternativas (ALMEIDA, 2013).

Para iniciar as comparações par-a-par das alternativas, deve-se calcular as matrizes de concordância e discordância, obtendo seus respectivos índices $C(a, b)$ e $D(a, b)$ para a afirmação aSb . O índice de concordância é dado conforme equação 4.26 e o índice de discordância conforme a equação 4.27

$$C(a, b) = \sum_{i: g_i(a) \geq g_i(b)} p_i, \text{ sendo } \sum_i p_i = 1 \quad (4.26)$$

$$D(a, b) = \max \left(\frac{g_i(b) - g_i(a)}{Escala_i} \right), \forall i | g_i(b) > g_i(a) \quad (4.27)$$

Onde $Escala_i = \max[g_i(c) - g_i(d)], \forall i, c, d$.

Encontrados os índices de concordância e discordância, deve-se definir um limiar para cada um, c e d , respectivamente, permitindo estabelecer uma relação de sobreclassificação, conforme condição a seguir:

$$aSb \text{ se e somente se } \begin{cases} C(a, b) \geq c \\ D(a, b) \leq d \end{cases} \quad (4.28)$$

Quanto aSb e bSa , um circuito ocorrerá, havendo um empate, assim, não há preferência, devendo considerar a comparação como indiferente.

Passo 9: Escolher o subconjunto das alternativas. Esta etapa consiste no procedimento para selecionar o *kernel*. Segundo Gomes *et al.*(2006), o *kernel* consiste no subconjunto de alternativas não sobreclassifica nenhuma outra alternativa também integrante do *kernel* e obrigatoriamente, para toda alternativa não pertencente ao *kernel*, existe uma alternativa pertencente ao *kernel* que a supera.

Com isso, além do uso de grafos para analisar esse problema, pode ser utilizado o seguinte procedimento, conforme apresentado por Almeida (2013), dividido em duas etapas:

- Selecionar para o *kernel* todas as alternativas que não são sobreclassificadas por nenhuma outra do conjunto A ;
- Do subconjunto restante, ou seja, as alternativas que são sobreclassificadas selecionam-se aquelas que não são sobreclassificadas pelas alternativas que já estão no *kernel*, conforme etapa anterior, e não são serão sobreclassificadas pelas que integrarão o *kernel* nesta etapa.

Com isso, o modelo *IF-ELECTRE* β propõe uma escolha, dentro de um subconjunto de alternativas, para a substituição das tecnologias diante o problema da melhoria da eficiência

energética. Maystre *et al.* (1994) sugere após a aplicação do modelo, uma análise de sensibilidade dos resultados faz-se necessária por meio da variação de parâmetros, provendo uma recomendação mais robusta e sintética ao decisor, informando-lhe quanto à capacidade da solução proposta resiste às variações entre a realidade e o modelo para representa-la

4.5 Análise do capítulo

Um modelo de decisão multicritério para substituição de tecnologias nos sistemas indústrias de energia é proposto baseado na acurácia, comprometimento, intervenção pouco invasiva e multidisciplinaridade.

O primeiro modelo faz uma ordenação das tecnologias a serem substituídas, destas, as oito primeiras são priorizadas. Antes de substituir as tecnologias mais críticas, faz-se necessário uma seleção das que melhor atendem os critérios envolvidos, levando em conta a percepção do cenário da equipe de atores, permitindo um planejamento estratégico para substituição imediata, ou a médio e longo prazo.

A nível operacional, o primeiro modelo encontra-se estruturado para ordenação das tecnologias. Este modelo requer participação de todos os setores e exige um conhecimento na área de decisão e energética.

O segundo modelo, encontra-se estruturado no nível de decisão, que busca captar a percepção dos decisores associadas a imprecisão de suas informações, para selecionar as tecnologias que melhor atendam o cenário o qual o problema está inserido.

5 APLICAÇÃO DO MODELO

O capítulo apresenta a aplicação dos modelos propostos para substituição dos sistemas motrizes de uma indústria para o alcance da eficiência energética. A seção 5.1 descreve o perfil da empresa estudada. A seção 5.2 apresenta a aplicação do modelo *IF-ELECTRE α* na situação I e sua respectiva análise de dados. A seção 5.3 apresenta a aplicação e análise de dados do modelo *IF-ELECTRE β* na situação II.

5.1 Perfil da empresa estudada

Para as aplicações dos modelos, a pesquisa de Sola (2011) serviu como fonte de informação quanto às alternativas e critérios a serem utilizados, assim como as preferências dos decisores, dado o desenvolvimento de seu estudo em uma indústria do ramo químico, localizada na cidade de Ponta Grossa, Paraná. O presente trabalho diferencia-se dado a conversão destes dados em números *fuzzy*, situação decisória diferente da abordada em seu estudo e aplicação com métodos multicritérios distintos.

Este setor foi escolhido por estar entre os setores industriais com maior consumo de energia no estado, juntamente com o setor de alimentos e bebidas, papel e celulose e cimento e cerâmica, conforme dados do balanço energético do Paraná, elaborado pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL em 2009. A planta industrial é alimentada com tensão de 380v e 150kW de potência média consumida pelo sistema motriz, sistema constituído pelo conjunto motor-carga, isso representa cerca de 80% da demanda total consumida.

O desbalanceamento de tensão, ou seja, diferença entre as tensões nas três fases da rede apresenta uma variação em torno de 2%, significativamente abaixo do máximo recomendado de 10% para evitar perdas elétricas e problemas operacionais. Isso mostra a perda de eficiência energética na indústria, a substituição dessas tecnologias, por tecnologias mais eficientes torna-se necessária para atender a Lei de eficiência energética.

5.2 Aplicação do modelo *IF-ELECTRE α* na situação I

De acordo com o modelo proposto, no intuito de buscar o comprometimento de todos os envolvidos, o Analista deve conhecer o problema da empresa e explicar o propósito do trabalho para definir os parâmetros (5.2.1) da forma mais confiável possível. A ordenação das tecnologias (5.2.2) depende dos conhecimentos do Analista quanto a estrutura do modelo multicritério a ser utilizado.

Além disso, caso o Analista não tenha conhecimento da área energética, é sugerido a presença de um especialista na área para trabalhar em conjunto.

5.2.1 Definição dos parâmetros

Por meio de uma reunião com os setores envolvidos, o analista e o decisor iniciam a definição dos parâmetros. A determinação dos critérios, identificação das alternativas e definição das preferências devem ser feitas de forma consensual.

Os critérios selecionados devem ser aqueles que representem maior relevância no contexto. Assim, neste modelo optou-se por trabalhar com os critérios encontrados na pesquisa de Sola (2011), onde os setores escolheram critérios relevantes ao contexto do nível operacional, por mais que pudessem optar por outros ligados a diferentes características, tal como: máquinas, operação, manutenção, produção e financeiro. Assim, os critérios escolhidos foram:

- Critério 1 (C1) – Potência do Motor: os motores maiores estão em processos estratégicos e tem preferência na substituição.
- Critério 2 (C2) – Importância para a Produção: diante uma escala de 0 (motor menos importante) a 10 (motor mais importante, a equipe atribuiu uma nota.
- Critério 3 (C3) – Número de Rebobinamentos: normalmente por sobreaquecimento, este critério reflete quantas vezes os enrolamentos dos motores sofreram processo de queima.
- Critério 4 (C4) – Número de Falhas: reflete problemas relacionados a parada das máquinas por problemas em peças dos motores.
- Critério 5 (C5) – Valor Presente Líquido (VPL): obtido apenas para motores com eficiência *Premium* (classe IE3), por representar maior nível de eficiência e serem referência no mercado brasileiro.
- Critério 6 (C6) – Carregamento do Motor: por revelar um indicativo de perda de energia.
- Critério 7 (C7) – Anos em Uso: mesmo com menor relevância, a equipe preocupou-se em destaca-lo, mesmo que a manutenção preventiva seja capaz de reduzir perder e prolongar a vida útil do equipamento.

Para definir o peso dos critérios, ainda nesta reunião, é aconselhável atribuir um valor de 0 (menor importância) a 100 (maior importância), normalizando esses valores depois. Com isso, conforme Tabela 5.1 a equipe atribui os seguintes pesos:

Tabela 5.1 – Índice dos critérios

Critério	Valor	Valor Normalizado
C1	100	0,256
C2	80	0,205
C3	60	0,154
C4	40	0,103
C5	50	0,128
C6	40	0,103
C7	20	0,051

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Por exemplo, observa-se que a equipe entendeu que o critério Potência do Motor (C1) é o mais importante para a produção, visto que os motores maiores encontram-se em processos estratégicos, atribuindo um peso igual a 100, quando normalizado, um peso de 0,256.

Além destes pesos, os pesos das concordâncias e discordâncias que o modelo *IF-ELECTRE* α exige devem ser atribuídos nesta etapa para as comparações par-a-par das alternativas. Com isso, os seguintes pesos para, C_{kl} , C'_{kl} , C''_{kl} , D_{kl} , D'_{kl} e D''_{kl} foram selecionados como 1, 0,66, 0,33, 1, 0,66 e 0,33, respectivamente.

Para a montagem da matriz de decisão, visando à ordenação das tecnologias, as alternativas foram obtidas pela seleção de vinte motores do processo produtivo. Em busca da redução da imprecisão das informações, por meio do uso de uma escala baseada em termos linguísticos associados ao *Interval-Valued Fuzzy Set*, a equipe elícita suas preferências de forma consensual, por meio dos termos: Ótimo, Muito Bom, Bom, Razoavelmente Bom, Razoável, Razoavelmente Ruim, Ruim, Muito Ruim e Péssimo; conforme Tabela 5.2 a seguir:

Tabela 5.2 – Índice das alternativas

Termo Linguístico	Interval-Valued Fuzzy Set	
Ótimo (O)	0,95	0,95
Muito Bom (MB)	0,85	0,90
Bom (B)	0,75	0,85
Razoavelmente Bom (RB)	0,65	0,75
Razoável (R)	0,50	0,60
Razoavelmente Ruim (RR)	0,35	0,45
Ruim (RU)	0,25	0,35
Muito Ruim (MR)	0,15	0,20
Péssimo (P)	0,05	0,05

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Com as preferências elicitadas, a matriz *Interval-Valued Fuzzy* (IVF) de decisão é obtida, conforme Tabela A.1 presente no Anexo. Como mostrado anteriormente, estes dados podem ser transformados em dados IF para construir a matriz IF de decisão e iniciar o processo de

ordenação das alternativas. Esta nova matriz de decisão IF, pode ser vista na Tabela A.2 em Anexo.

5.2.2 Ordenação das tecnologias

Nesta fase, iniciando o passo 6 do modelo IF-ELECTRE α , dá-se início a ordenação dos motores. Para identificar conjuntos de concordância (C_{kl} , C'_{kl} , C''_{kl}) e discordância (D_{kl} , D'_{kl} e D''_{kl}), os graus de adesão, não-adesão e hesitação são utilizados conforme condições citadas anteriormente, atribuindo o valor de 1 caso a afirmativa seja verdadeira e 0 caso contrário.

No Passo 7, as matrizes de concordância e discordância encontradas são transformadas em matrizes de dominância, obtendo as matrizes K e L (Figura A.1 e Figura A.2, presentes em Anexo).

O Passo 8 consiste na construção da matriz de credibilidade por meio das matrizes de concordância dominante K e discordância dominante L. Caso o índice de discordância presente na matriz L seja inferior ou igual ao índice de concordância da matriz K, ou seja, $d_j(a, b) \leq C(a, b)$, o índice de credibilidade $S(a, b) = C(a, b)$, caso contrário $S(a, b) = C(a, b) \times \prod_{j \in J(a, b)} \frac{1 - d_j(a, b)}{1 - C(a, b)}$. Com isso, obtemos a Figura A.3, presente em Anexo.

O último passo consiste na ordenação das alternativas, por meio da exploração das relações de sobreclassificação obtidas na matriz de credibilidade, obtendo duas pré-ordens completas que podem ser analisadas em conjunto, conforme procedimento apresentado por Vincke (1992). Com isso, conforme Figura 5.1, a seguinte ordenação foi obtida:

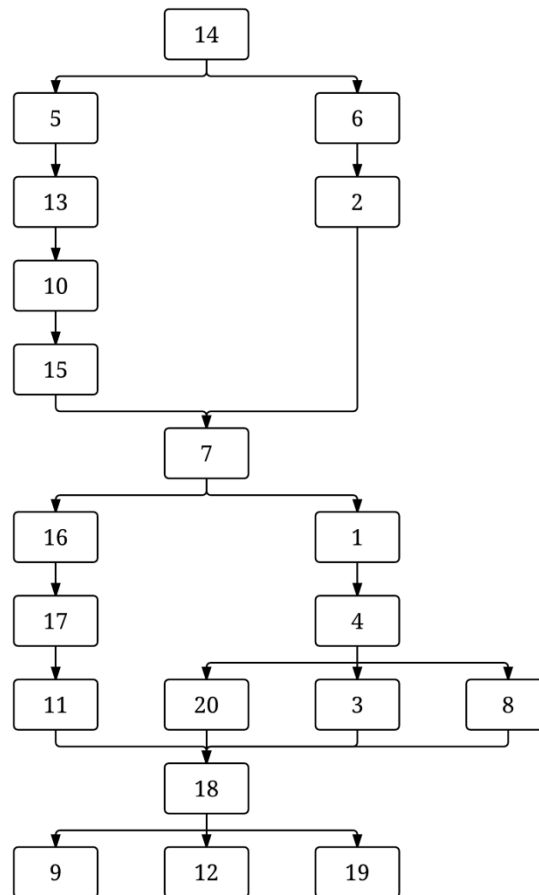


Figura 5.1 – Ordenação final

Fonte: Esta pesquisa (2014)

5.2.3 Análise da situação I

O modelo IF-ELECTRE α permitiu a ordenação dos motores em função da sua necessidade de maior atenção gerencial, isto é, as alternativas posicionadas nas primeiras posições merecem uma atenção especial. Porém, cabe ao decisor realizar uma análise final, escolhendo quais motores devem ser gerenciados com maior atenção. Com isso, definindo um limite de alternativas consideradas mais críticas. Isso é necessário porque o modelo gera uma ordenação das alternativas em função da sua criticidade e não uma seleção das alternativas mais críticas.

Logo, Com as restrições orçamentárias e planejamento alinhado a com a gerência, para adequação a Lei de Eficiência Energética, dado a ordenação dos vinte motores estudados, a empresa mostrou-se interessada em realizar uma análise final com os oito motores mais críticos do seu processo, motores que dificultam o alcance efetivo da eficiência energética, para planejar quais necessitariam ter uma maior atenção para substituição.

A ordenação obtida na situação I pôde expor dentre os vinte motores quais apresentavam maior nível de criticidade para substituição, com preferência dada aos oito primeiros motores que são: 14, 6, 5, 2, 13, 10, 15 e 7.

Realizando uma análise de desempenho energético nesses motores, dado a incomparabilidade entre os motores 6 e 5 e 2 com 13, 10 e 15, uma melhor avaliação das alternativas pode ser feita para verificar a correlação entre a Energia Economizada em relação a ordenação destas.

Com os dados dos motores atuais e dos motores *Premium*, foram calculados a quantidade de Energia Elétrica Economizada (EEE) e do Valor Economizado de Energia (VEE), conforme Tabela 5.3, para um custo médio de energia de R\$0,30 em 8760h/ano:

Tabela 5.3 – Energia Elétrica Economizada e Valor Economizado de Energia

Alternativa	EEE (kWh/ano)	VEE (R\$/ano)
14	8.197	2.459,06
6	5.811	1.743,31
5	8.919	2.675,57
2	5.464	1.639,11
13	8.637	2.591,18
10	11.810	3.543,05
15	7.744	3.323,07
7	4.991	1.497,32

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Estes motores críticos promovem uma economia energética de 61.573 kWh/ano e uma economia no valor de R\$18.471,67 ao ano. O motor 10 proporciona o maior retorno, aproximadamente 19,2% do valor total.

Ao comparar o ganho em eficiência energética ao substituir estes motores por motores *Premium*, conforme valores informados pelo *software* de cálculo de eficiência energética da WEG, percebe-se um ganho considerável em eficiência, conforme Tabela 5.4 a seguir:

Tabela 5.4 – Comparativo de eficiências

Alternativa	Potência (HP)	Eficiência do Motor em Operação (%)	Eficiência do Motor <i>Premium</i> (%)
14	40	91,7	94,4
6	7,5	82,0	91,0
5	50	92,2	94,6
2	15	87,8	92,4
13	30	90,2	94,0
10	7,5	76,0	93,4
15	10	83,0	92,0
7	20	90,2	93,4

Fonte: compilado pelo autor a partir de informações de Sola (2011) e *software* da WEG

Esses oito motores atingem uma eficiência energética média na indústria de 86,64%, com a substituição destes, a eficiência energética média pode subir para 93,15%, uma melhoria de 6,5%.

Para garantir a robustez dos resultados obtidos no modelo, foram propostas três situações que alteram o peso dos critérios.

- A primeira situação promove uma inversão dos pesos nos critérios mais importantes C1 (Potência) e C2 (Importância para a Produção), de 100 e 80, para 80 e 100 respectivamente.
- A segunda situação promove uma redução de 20% no critério C1 e aumento de 20% nos demais critérios.
- Por fim, considerando que a Importância para a Produção foi tendenciosa e obtida erroneamente sob a perspectiva da equipe, mantendo-se o peso de C1, reduzindo o peso de C2 em 20% e aumentando os demais critérios em 10%, estabelece-se a terceira situação.

Com essas alternâncias, a análise pode mostrar que com essas variações não houve uma inversão considerável entre as alternativas para promover a priorização de outras em relação às oito obtidas anteriormente. Conforme pode ser visto na Figura 5.2 a seguir:

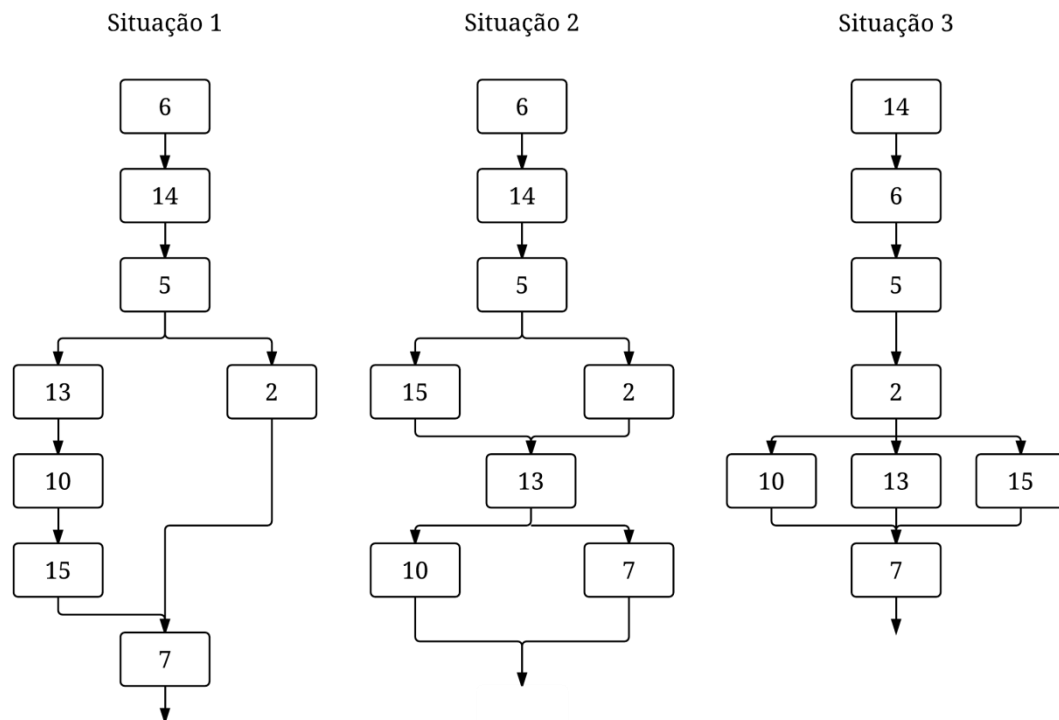


Figura 5.2 – Análise de Sensibilidade: alteração dos pesos dos critérios

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Essa análise de sensibilidade para a problemática de ordenação é mais rigorosa que na problemática de escolha, logo, por apresentar uma baixa variabilidade, onde os oito motores mais críticos selecionados para uma avaliação final não foram substituídos por outras alternativas, apenas inversão de posição entre elas, a solução mostra-se aceitável e robusta.

5.3 Aplicação do modelo *IF-ELECTRE* β na situação II

De acordo com o segundo modelo proposto, dado a ordenação dos motores mais críticos no modelo *IF-ELECTRE* α , diante o planejamento para substituição imediata, a percepção do decisor diverge da equipe da empresa nesta escolha, a ordenação obtida não pode ser seguida daquela forma, porque o resultado do problema é uma ordenação dos motores em função da sua criticidade e não uma seleção dos motores mais críticos.

Logo, dado as restrições orçamentarias e planejamento que deve estar alinhado com a alta gerência, mediante a imprecisão das informações, o modelo captou a percepção do decisor mediante o ELOT e da equipe da empresa, para o decisor avaliar quais motores priorizar substituição imediata, dentre os oito motores selecionados dado a ordenação anterior.

Para definição dos parâmetros e obtenção da matriz IF de decisão, os mesmos dados apresentados anteriormente na seção 5.2.1 foram utilizados. A escolha das tecnologias, novamente dependerá dos conhecimentos do Analista quanto à estrutura do modelo multicritério a ser utilizado e sobre o problema abordado.

5.3.1 Escolha das tecnologias

O Passo 5 do modelo inicia o procedimento de escolha das tecnologias, como proposto, para captar a percepção do decisor em relação ao problema, em contraste com a percepção da equipe da empresa, o Teste de Orientação Prolongado para a Vida, do original *Extended Life Orientation Test* (ELOT), conforme Figura B.1, que encontra-se em Anexo, foi aplicado. Este teste irá mensurar o otimismo e pessimismo de cada envolvido, enquadrando em uma única percepção, que resulte em uma solução unificada a ser avaliada pelo decisor.

O teste é feito de forma individual, com um limite de 30 minutos, sem influências externas. Caso haja dúvida, o analista deve ser procurado para fornecer o apoio necessário, porém sem influenciar a resposta do indivíduo.

Dando início ao Passo 6, após aplicação do ELOT, diante o conhecimento do analista a cerca dos operadores propostos por Chen (2011) e da escala Likert, para classificar a percepção dos envolvidos no planejamento de substituição, realiza-se uma abordagem

quantitativa para estabelecer o ranking médio (RM) para o questionário ELOT, para mensurar o grau de concordância das respostas.

Para o cálculo do RM, utilizou-se o método de análise proposto por Malhotra (2001) e utilizado por Tresca e De Rose (2004) e Cassiano (2005). Dessa forma, estabelece-se uma faixa a critério do analista a partir das respostas obtidas na sub-escala de otimismo (itens 3, 6, 8, 11, 15 e 19) e os nove itens da sub-escala de pessimismo (itens 2, 4, 5, 10, 12, 14, 16, 18 e 20), e classifica-se o Tipo de decisor e sua percepção otimista/pessimista. Neste problema, obteve-se como classificação da equipe de decisão o TIPO II (Otimismo Elevado & Pessimismo Baixo), com a percepção do operador $J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$ (Otimista Moderado)

Sendo $\alpha_{ij} = \mu_{ij}$ e $\beta_{ij} = v_{ij}$ para os operadores $J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$, $J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$, $M_{\alpha_{ij}}$, $H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$, $H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$, $N_{\beta_{ij}}$ e $F_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$ para cada $A_i \in A$ e $x_j \in X$. Essa designação original para α_{ij} e β_{ij} leva os cálculos do modelo para o caso neutro nos operadores $P_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$ e $Q_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$. Por isso uma pequena variação é realizada para idealizar os casos de baixo otimismo e baixo pessimismo. Dessa forma, $\alpha_{ij} = \mu_{ij} + 0,05$ e $\beta_{ij} = v_{ij} - 0,05$ para $P_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$ e $\alpha_{ij} = \mu_{ij} - 0,05$ e $\beta_{ij} = v_{ij} + 0,05$ em $Q_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$. Para o operador $D_{\alpha_{ij}}$, atribuiu-se $\alpha_{ij} = \frac{(\mu_{ij}+v_{ij})}{2}$ para cada $A_i \in A$ e $x_j \in X$.

Logo, os cálculos da função escore para cada $X_{ij} \in IFS$ na matriz de decisão são calculados para cada tipo de decisor conforme equações expressas no passo 7 na seção 4.4.

Considerando o perfil do decisor enquadrando-se no Tipo II (Otimismo elevado e Pessimismo baixo), devem-se calcular os operadores nele presentes, o J^* (otimismo completo), J (Otimismo moderado) e o M (Otimismo racional) para efeito comparativo, como a percepção J foi a obtida no passo anterior, os próximos cálculos serão feitos para este operador. No final desta aplicação, o resultado para todos os perfis dos decisores serão mostrados.

Com os dados das funções escores obtidas, o próximo passo é montar as matrizes otimistas/pessimistas para iniciar o procedimento para ranquear as alternativas, para isso, basta organizar os resultados obtidos em matrizes conforme os respectivos tipos de decisores.

Como os valores trabalhados por estes operadores variam entre -1 e 1, para prosseguir com o cálculo da concordância e discordância, deve-se aplicar o procedimento de normalização, esta matriz pode ser vista na Tabela B.1 em Anexo.

A seguir, é estabelecida a construção das relações de sobreclassificação, para obtenção de uma matriz que permita a comparação par a par entre as alternativas. As considerações do

método ELECTRE I apresentadas no passo 9 são utilizadas para conduzir a relação aSb , permitindo a obtenção dos índices de concordância e discordância, conforme observado no Anexo, por meio das Tabelas B.2 e B.3, respectivamente.

Obtidas as matrizes com os índices de concordância e discordância a equipe estabelece os limiares de concordância e discordância de acordo com as preferências que melhor atendem a realidade da empresa. Neste estudo, os valores definidos encontram-se na Tabela 5.5 a seguir:

Tabela 5.5 – Limiares de concordância e discordância

Índice	Limiar
Concordância (c)	0,8
Discordância (d)	0,2
Fonte: Esta pesquisa (2014)	

As tecnologias que apresentam maior criticidade para substituição são as alternativas que apresentarem as condições $c_{i,k} > c$ e $d_{i,k} < d$. Ao realizar as comparações par a par entre as alternativas, é obtida a matriz de sobreclassificação, onde 1 significa que aSb , caso contrário 0, conforme Figura 5.3:

	0	0	1	0	0	1	0
0		0	0	0	0	1	0
0	0		0	0	0	0	0
0	1	0		0	0	1	0
0	0	1	0		0	0	0
0	1	0	0	0		1	0
0	0	0	0	0	0		0
0	0	1	0	0	0	1	

Figura 5.3 – Relação de sobreclassificação (Tipo II – J)

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Obtida a matriz de sobreclassificação, o próximo passo consiste em utilizar a Teoria dos Grafos para analisar as relações de sobreclassificação e escolher o subconjunto de alternativas que melhor se adequam ao problema, conforme Figura 5.5:

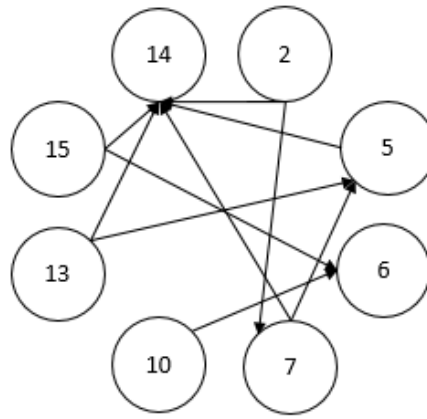


Figura 5.4 – Grafo das relações de sobreclassificação (Tipo II – J)

Fonte: Esta pesquisa (2014)

5.3.2 Análise da situação II

Conforme obtido pelo ELLOT, a percepção considerada no estudo enquadra-se no Tipo II. Dado a faixa considerada na escala de Likert, o problema de decisão classificou o decisor como Otimista Moderado ($J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$). Para efeito de comparação, a seleção dos motores foi feita para as demais percepções como pode ser observado na Tabela 5.6 a seguir:

Tabela 5.6 – Seleção das alternativas

Tipo de decisor		Seleção	
Neutro		2, 10, 13	
Tipo I	Otimismo Limitado	$P_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2, 10, 13
	Pessimismo Limitado	$Q_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2, 10, 13
Tipo II	Otimismo Completo	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	2, 10, 13, 15
	Otimismo Moderado	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2, 10, 13, 15
	Otimismo Racional	$M_{\alpha_{ij}}$	2, 10, 13
Tipo III	Pessimismo Completo	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	2, 7, 10, 13
	Pessimismo Moderado	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2, 7, 10, 13
	Pessimismo Racional	$N_{\alpha_{ij}}$	2, 10, 13
Tipo IV	Otim./Pessim. Completo	$D_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2, 10, 13
	Otim./Pessim. Moderado	$F_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2, 7, 10, 13

Fonte: Esta pesquisa, 2014.

Como observado no grafo da Figura 5.4, os motores 5, 6, 7 e 14 são sobreclassificados pelo menos uma vez, com o motor 14 sendo sobreclassificado por cinco motores por exemplo, logo os mesmos não são selecionados como prioritários para substituição imediata dentre os

oito motores mais críticos dado a percepção do decisor captada neste segundo modelo que trata-se de um problema de seleção.

Considerando a percepção que predomina sobre o problema, os motores 2, 10, 13 e 15 devem ser priorizados para substituição imediata. Os motores 2, 10 e 13 estão presentes em todos os Tipos de decisores, havendo a inserção dos motores 15 ou 7 em alguns casos, o motor 15 para a percepção mais otimista do problema e o motor 7 para a visão mais pessimista.

Conforme a Agencia Internacional de Energia (International Energy Agency – IEA), referente aos dados de 2013, com valores válidos para o Brasil, a substituição desses motores reduzem a emissão de CO_2 no meio ambiente por meio da economia de energia, isso pode ser observado na Tabela 5.7 a seguir:

Tabela 5.7 – Energia economizada x redução na emissão de CO_2

Alternativa	Energia Economizada (kWh/ano)	Redução na emissão de CO_2 (Kg/ano)	Equivalência de plantio de árvores (un)
2	5.464	398,85	3
10	11.810	862,14	5
13	8.637	630,52	4
15	7.744	565,28	4
TOTAL	33.655	2.456,79	16

Fonte: Esta pesquisa, 2014.

Por exemplo, o motor 10 apresenta uma maior quantidade economizada de energia elétrica (11.810 kWh/ano), consequentemente sua redução na emissão de CO_2 é superior aos demais, ele representa cerca de 35,01 % de toda redução energética e de gases dentre a seleção dos motores. Com essa seleção, realizando uma análise do desempenho energético, com base nos motores em operação e futuros motores *Premium*, obtemos a Figura 5.5 com dados referentes a Energia Elétrica Economizada, Valor Economizado de Energia, Investimento Total e o Retorno do Investimento:

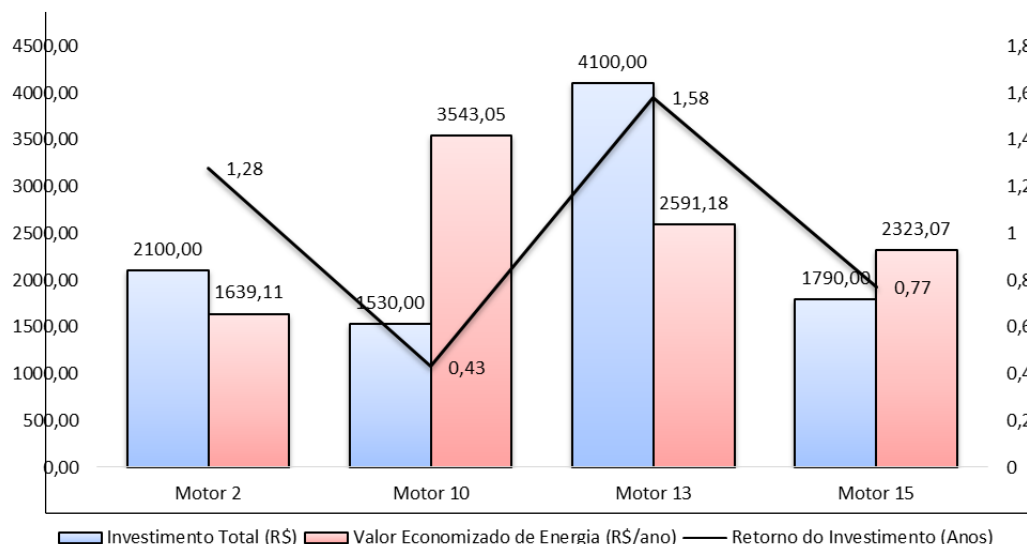


Figura 5.5– Análise de Sensibilidade II: alteração dos pesos dos critérios

Fonte: Esta pesquisa (2014)

O motor responsável por representar a maior economia de energia para a empresa é o Motor 10. Quando substituído pelo motor *Premium* que custa R\$1.530, o valor desta aquisição corresponderá a 9,89 % da energia que ele consumirá em um ano.

Com isso, em 36,09 dias o motor consumirá em energia o valor de sua aquisição. Ao considerar uma vida útil de 20 anos deste novo motor, o valor de aquisição vai para 0,49% da energia consumida pela empresa nesses anos.

Essa alta quantidade de energia economizada ocorre dado o contraste entre a eficiência real do motor atual em operação (76%) e a eficiência do novo motor (93,4%), conforme Tabela 5.9 apresentada anteriormente.

No total terá de ser investido R\$9.520,00 para a substituição dos motores, isso resultará em uma economia de R\$10.096,41 ao ano, com um retorno do investimento estimado em 0,94 anos. Essas análises quando realizadas para os outros tipos de decisores, observa-se a seguinte comparação, conforme Tabela 5.8:

Tabela 5.8 – Investimento dos tipos de decisores

Alternativa		Energia Economizada (kWh/ano)	Valor Economizado de Energia (R\$/ano)	Investimento Total (R\$)	Redução na emissão de CO ₂ (Kg/ano)	Equivalência de plantio de árvores (un)
Neutro		25.911	7.773,34	7.730	1.891,51	12
Tipo I	$P_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	25.911	7.773,34	7.730	1.891,51	12
	$Q_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	25.911	7.773,34	7.730	1.891,51	12
Tipo II	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	33.655	10.096,41	9.520	2.456,79	16
	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	33.655	10.096,41	9.520	2.456,79	16
	$M_{\alpha_{ij}}$	30.902	9.270,66	10.370	2.255,86	14
Tipo III	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	30.902	9.270,66	10.370	2.255,86	14
	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	30.902	9.270,66	10.370	2.255,86	14
	$N_{\alpha_{ij}}$	25.911	7.773,34	7.730	1.891,51	12
Tipo IV	$D_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	25.911	7.773,34	7.730	1.891,51	12
	$F_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	30.902	9.270,66	10.370	2.255,86	14

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Essa escolha promove um ganho de 23,01% em Energia Economizada ao ano em relação aos decisores que apresentaram uma economia de 25.911 kWh/ano e 8,18% em relação aos demais. Esse percentual condiz também para o Valor Economizado de Energia, um ganho respectivo de R\$2.323,07 e R\$825,75 ao ano. Ao contrário do esperado, a substituição que promove os melhores retornos não é a que requer maior investimento.

Para verificar a robustez dos resultados obtidos para o problema com percepção Otimista Moderada, inicialmente foram realizadas variações nos limites de concordância (C) e discordância (D), sendo propostas três situações:

- Mantendo o limite de concordância (C=0,7) e reduzindo o limite de discordância em 10% (D=0,3).
- Com o acréscimo de 10% no limite de concordância (C=0,8) e limite de discordância inalterado.
- Realizando uma pequena variação de 10% nos limites (C=0,60 e D=0,30)

Essas alternâncias podem ser vistas na Tabela 5.9 a seguir:

Tabela 5.9 – Variação nos limites de concordância e discordância

Tipo de decisor		Seleção final			
		C=0,7 D=0,4	C=0,7 D=0,3	C=0,8 D=0,4	C=0,6 D=0,3
Neutro		2,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
Tipo I	$P_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
	$Q_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
Tipo II	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	2,10,13,15	2,10,13,15	2,7,10,13,15	10,13,15
	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13,15	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
	$M_{\alpha_{ij}}$	2,7,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
Tipo III	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	2,7,10,13	2,7,10,13	2,7,10,13,15	7,10,13
	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,7,10,13	2,7,10,13	2,7,10,13,15	7,10,13
	$N_{\alpha_{ij}}$	2,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
Tipo IV	$D_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15
	$F_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,7,10,13	2,7,10,13,15	2,7,10,13,15	7,10,13,15

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Especificamente para a percepção do problema, o modelo mostrou-se robusto, permanecendo os motores 10, 13 e 15 em todas as variações. Porém o motor 7 apresenta-se como forte concorrente a entrar nessa seleção, para verificar isso, deve-se revisar cuidadosamente as preferências do decisor sobre esse motor.

Analisando em conformidade com as demais percepções, para a primeira situação, apenas os tipos $J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$, $H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$ e $H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$ mantiveram a seleção original. Para os demais tipos houve a inserção dos motores 7 e 15 naqueles que não haviam o selecionado. Na segunda situação perde-se uma análise concreta sobre os perfis, o alto nível de concordância iguala a seleção para todos, sendo aconselhável reavaliar as alternativas e os pesos dos critérios. Com a terceira situação, o motor 2 é retirado da seleção e substituído pelo motor 7.

Dessa forma, quando o limite de concordância encontra-se muito elevado ou o limite de discordância muito baixo, perde-se a característica do modelo de explorar a escolha de um conjunto de alternativas diante a percepção do decisor sobre o problema. Por fim, conforme Tabela 5.10, uma segunda análise de sensibilidade foi realizada, por meio da alternância do peso dos critérios, as situações propostas são as mesmas do modelo anterior.

Tabela 5.14 – Variação nos pesos dos critérios

Tipo de decisor		Original	Situação 1	Situação 2	Situação 3
Neutro		2,10,13	2,10,13,15	10,13	2,10,13
Tipo I	$P_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13	2,10,13,15	10,13	2,10,13
	$Q_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13	2,10,13,15	10,13	2,10,13
Tipo II	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	2,10,13,15	2,10,13,15	10,13,15	2,10,13,15
	$J_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13,15	2,7,10,13,15	10,13,15	2,10,13,15
	$M_{\alpha_{ij}}$	2,7,10,13	2,7,10,13,15	7,10,13	2,7,10,13
Tipo III	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}^*$	2,7,10,13	2,7,10,13,15	7,10,13	2,7,10,13
	$H_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,7,10,13	2,7,10,13,15	7,10,13	2,7,10,13
	$N_{\alpha_{ij}}$	2,10,13	2,10,13,15	10,13	2,10,13
Tipo IV	$D_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,10,13	2,10,13,15	10,13	2,10,13
	$F_{\alpha_{ij},\beta_{ij}}$	2,7,10,13	2,7,10,13,15	7,10,13	2,7,10,13

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Com a inversão no peso dos critérios mais importantes, houve alteração inserção do motor 7 na seleção. Na segunda situação, com a redução em 20% de C1 e aumento em 20% nos demais critérios, houve a retirada do motor 2 da seleção, logo a baixa importância dos demais critérios, reflete na sua permanência na seleção. Por fim, considerando a terceira situação, não houve variação na seleção. Dessa forma, sem grandes alterações dos motores selecionados no problema, o modelo mostra-se robusto e a decisão obtida é confiável.

5.4 Análise do capítulo

O capítulo mostrou a aplicação do modelo proposto em uma indústria do setor químico para a substituição de motores. O setor apresenta um consumo elevado de eletricidade, com isso, o alcance da eficiência energética traz benefícios expressivos. Inicialmente foram identificados os interesses da empresa e limitações presentes. Foi observado que as barreiras organizacionais devem ser superadas, pois o uso racional da energia depende da conscientização de todos os funcionários, um amplo envolvimento se faz necessário para o alcance dos resultados.

Sob a ótica de sete critérios, vinte motores foram avaliados. As preferências foram obtidas por meio dos números *fuzzy* intuicionistas de Atanassov. Para isso, o analista precisou ter conhecimento desta lógica, para efetuar as corretas operações matemáticas, buscando reduzir esforços na obtenção dos resultados e facilitando o processo de elicitação de preferências. Em busca da ordenação das alternativas dado a imprecisão das informações do

decisor, isso foi obtido por meio dos conjuntos *fuzzy* intuicionistas e o método de sobreclassificação ELECTRE III.

Diante o planejamento para substituição imediata, desta ordenação, os oito primeiros motores foram selecionados dado a restrições orçamentarias e alinhamento com o planejamento da alta gerência em substituir apenas uma certa quantidade de motores inicialmente. Porém, a percepção da equipe nesta escolha divergia muito em relação a percepção do decisor, a ordenação obtida não poderia ser seguida daquela forma. Com isso, por meio do Teste de Orientação Prolongado para a Vida, do original *Extended Life Orientation Test* (ELOT), os operadores *fuzzy* intuicionistas de Chen (2011) e o método de sobreclassificação ELECTRE I foram utilizados para lidar com os diferentes tipos de decisores, indicando de forma mais consistente quais motores priorizar para substituição imediata.

Para garantir a robustez do modelo, testes de sensibilidade foram realizados no modelo que gerou a ordenação. Com essas alternâncias, a análise mostrou que mesmo variando os parâmetros, não houve uma inversão considerável entre as alternativas para promover a priorização de outras em relação às oito obtidas anteriormente, logo, por apresentar uma baixa variabilidade, a solução mostra-se aceitável e robusta. Realizando esta análise de sensibilidade no outro modelo, o mesmo não apresentou grandes alterações, mostrando-se robusto e confiabilidade na decisão final obtida.

Com relação a solução, dois oito motores mais críticos obtidos dado a ordenação das vinte alternativas existentes, apenas 4 exigem substituição imediata para atender o planejamento da empresa e a percepção da equipe, no caso Tipo II, Otimista Moderado. Os motores 2, 10, 13 e 15 promovem um total de 33.655kWh/ano de energia economizada, com um investimento total de R\$9.520, recuperando o valor investido em menos de um ano, dado que o valor economizado de energia com essa substituição é de R\$10.096,41/ano. Isso promove uma redução na emissão de CO_2 de 2.456,79Kg/ano, o equivalente ao plantio de 16 árvores.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido à complexidade de se trabalhar com a imprecisão das informações, por falta de um gerenciamento adequado das organizações, a determinação da criticidade dos motores serve como base para possibilitar o alcance da eficiência energética em atendimento às normas do país. Porém dado à equipe responsável pelo planejamento energético da empresa, as percepções dela com a do decisor tendem a divergir muito, por terem de trabalhar de forma unificada e alinhar os pensamentos com as restrições da empresa e visão da alta gerência. Portanto ao trabalhar a percepção em cima da ordenação feita, priorizando a quantidade sugerida pela equipe, a escolha dos motores a serem substituídos de forma imediata é mais segura e robusta, promovendo maior certeza à empresa ao tomar essa decisão.

A seguir serão apresentadas as contribuições do modelo proposto, resultados, limitações e recomendações e sugestões para futuros trabalhos.

6.1 Resultados e contribuições do modelo

Neste sentido, a pesquisa realizada propôs dois modelos de decisão multicritério para a substituição de motores em sistemas industriais de energia para o alcance da melhoria energética, contribuindo no apoio à decisão desses sistemas considerando as necessidades e particularidades da empresa, contribuindo estrategicamente para o país quanto às políticas públicas de impacto social e ambiental com a substituição dos motores

Com a fundamentação teórica e revisão da literatura, pode-se perceber a necessidade de incorporar a imprecisão, por meio da lógica *fuzzy*, no apoio à tomada de decisão multicritério, permitindo corrigir essa lacuna que alguns problemas impõem.

O modelo *IF-ELECTRE α* permitiu a ordenação dos motores em função da sua necessidade de maior atenção gerencial, ou seja, uma ordenação das alternativas em função da sua criticidade e não uma seleção das alternativas mais críticas. Coube ao decisor limitar os esforços com os primeiros oito motores, dado restrições orçamentárias e disponibilidade da empresa em substituição imediata de alguns motores que dificultam o alcance efetivo da eficiência energética, para planejar quais necessitariam ter uma maior atenção para substituição. Assim, dentre os vinte motores ordenados, os motores 14, 6, 5, 2, 13, 10, 15 e 7 foram avaliados com maior atenção.

A análise de sensibilidade para a problemática de ordenação é mais rigorosa que na problemática de escolha, e por ter apresentado uma baixa variabilidade, sem a substituição

dos oito motores avaliados por outros, apenas inversão de posição entre eles, a solução mostrou-se robusta.

O modelo IF-ELECTRE β permitiu a seleção dos motores a serem priorizados para substituição imediata mediante a ordenação dos oito motores anteriores, ordenados em função de sua criticidade. O modelo captou a percepção do decisor e da equipe da empresa mediante o ELOT, para o decisor avaliar quais motores priorizar substituição imediata.

Os motores 5, 6, 7 e 14 foram sobreclassificados pelo menos uma vez, com isso os mesmos não foram selecionados como prioritários para substituição imediata. Ao considerar a percepção que predomina sobre o problema, tipo II – J, os motores 2, 10, 13 e 15 foram priorizados para substituição imediata.

Por meio da análise de sensibilidade também se mostrou robusto, as variações encontradas não foram significativas, logo ficou constatada uma baixa variabilidade, promovendo a viabilidade do modelo e atingindo o objetivo do trabalho, um modelo multicritério de sobreclassificação *fuzzy* para o alcance da melhoria energética, com a utilização da percepção do decisor.

O desempenho energético obtido com a substituição desses motores foi satisfatória, dado a priorização dos oito motores mais críticos, inserção da percepção da equipe de decisão responsável pelo planejamento de substituição dos motores e escolha de acordo com isso, os motores selecionados 2, 10, 13 e 15, apresentam resultados expressivos no desempenho energéticos, promovem uma economia de energia elétrica de 33.655 kWh/ano, essa quantidade reflete-se no valor economizado em energia de R\$10.096,41/ano, isso com um investimento inicial de R\$9.520 com um retorno dentro de 0,94 anos.

O valor desta aquisição corresponderá a 31,63% da energia que eles consumirão em um ano. Em 115,42 dias, os motores irão consumir em energia o valor de sua aquisição em conjunto, considerando uma vida útil de 20 anos destes novos motores substituídos, o valor de aquisição vai para 1,58% da energia consumida pela empresa nesses próximos anos. Essa economia de energia elétrica reflete na redução de CO_2 em 2.456,79 Kg/ano, o equivalente ao plantio de 16 árvores, uma relação direta da economia de energia com a seleção das tecnologias mediante as preferências dos decisores.

O principal diferencial deste modelo criado está no uso dos *Intuitionistic Fuzzy* (IF) para mensurar a imprecisão das informações ao montar a matriz *fuzzy* de decisão, por meio de suas duas variáveis: grau de adesão e grau de não-adesão.

Uma segunda vantagem de se trabalhar com os números IF, encontra-se nos conceitos de função escore, função acuracidade e grau de hesitação por meio das suas duas variáveis, diversos tipos de comparações aos pares podem ser feitos, obtendo conjuntos de concordância e discordância que refletem em uma matriz de sobreclassificação mais significativa.

Outra vantagem está na obtenção das preferências, por trabalhar com os números IF, o decisor precisaria elicitar duas variáveis (grau de adesão e não-adesão), porém para sua obtenção, utilizasse uma escala verbal associada a números *Interval-Valued Fuzzy* (IVF), por meio de uma avaliação das alternativas dentro de um intervalo fechado $[M_{ij}^-, M_{ij}^+]$. Dado a sua estrutura matemática, estes podem ser transformados em números IF. Caso o decisor opte por trabalhar com valores IF, o analista deve ter cuidado para os valores não serem aleatórios demais sem algum embasamento, pois isso pode comprometer a eficácia do modelo.

O modelo que pode ser compreendido como a união de dois sub-modelos IF-ELECTRE α e IF-ELECTRE β , criados a partir da elicitação das preferências com o *Interval-Valued Fuzzy*, convertidos em seguida para o *Intuitionistic Fuzzy*, pode gerar a ordenação das alternativas em função da sua criticidade mediante integração dos números IF com o ELECTRE III e prover a seleção das alternativas ordenadas, mediante integração dos números IF com o ELECTRE I, respectivamente.

O IF-ELECTRE β , ainda possui como vantagem a inserção da percepção do decisor, captado com o uso do questionário de ELOT e os operadores pessimistas/otimistas de Chen(2011), por considerar os graus dos números IF, que conseguem refletir a natureza otimista e pessimista diante mensuração da preferência.

Este modelo também auxiliou a transposição de algumas barreiras organizacionais por contribuir com a conscientização da empresa quanto à importância da eficiência energética, providenciando apoio à tomada de decisão mediante os objetivos e critérios conflitantes entre os setores e imprecisão das informações.

6.2 Limitações e recomendações

Uma das limitações observadas neste trabalho encontra-se na utilização do método ELECTRE, dado sua necessidade de tratamento preliminar dos dados, dificuldade na compreensão da eliminação de alternativas, ao contrário do método PROMETHEE que fornece como resultado um fluxo para alternativas que podem ser ordenadas, sem perder informações. Ausência de *software* gratuito que utilize como entrada dados *fuzzy* intuicionistas, comprometendo tempo e esforço na construção do programa. Por envolver

apenas um decisor para elicitar as preferências mediante as informações disponibilizadas pelos setores. Empresas possuem diversos gestores em seus departamentos com objetivos distintos, logo estes devem participar de forma ativa no processo de elicitação, sendo recomendado um modelo de decisão em grupo para o problema.

. Outros pontos podem ser destacados:

- Deve-se ter atenção com uma melhor definição do processo, para evitar que motores críticos façam parte do estudo e não sejam deixados de lado;
- O analista ao conduzir o processo precisa de um conhecimento profundo em relação a estrutura do modelo, além dos outros métodos multicritério;
- Quanto maior o conhecimento e comprometimento da empresa, melhores resultados serão obtidos;
- Dado a falta de um banco de dados, isso promove um aumento na imprecisão nas informações.

Para isso a indústria precisa de um comprometimento com a gerência e os setores das empresas, conscientizando os envolvidos sobre o tema em questão, a eficiência energética.

Porém este modelo auxiliou a compreensão da importância da eficiência energética, não só em cumprimento das leis nacionais, mas o retorno financeiro e ambiental que essa eficiência pode promover. Como recomendação, um ciclo de palestras aos funcionários sobre o tema e a disseminação de uma cultura empresarial focada na eficiência energética, deve ser trabalhado. Futuramente sugere-se a implantação de um Sistema de Gestão de Energia, o modelo mostra-se eficaz para fazer parte deste, para auxiliar a tomada de decisões.

6.3 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, espera-se que este estudo sirva de subsidio para melhorias ou para a condução de novos estudos, visto a sistemática por ele abordada, relacionando a imprecisão das informações por meio da lógica *fuzzy* associada a captação da percepção otimista/pessimista do decisor no apoio a tomada a decisão multicritério.

Em virtude a utilização de planilhas eletrônicas, a elaboração de um *software* pode reduzir esforços repetitivos e cansativos, agilizando o processo e garantindo resultados de forma mais eficiente. Sugere-se também:

- Ajustar estes modelos a outros métodos multicritério, por exemplo, o PROMETHEE;

- Realizar um estudo comparativo destes modelos com outros modelos multicritério que abordem a percepção otimista/pessimista do decisor;
- Explorar mais critérios;
- Aplicar os modelos em outros setores, a ponto de ser aprimorado e fornecer informações cada vez mais conformes aos princípios neles presentes.

REFERÊNCIAS

- ABEDI, M. NOROUZI, G.H. FATHIANPOUR. Fuzzy outranking approach: A knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 556-567, 2013.
- ALMEIDA, A. T. O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio à decisão. Recife, Editora Universitária UFPE, 2011.
- ALMEIDA, A. T. Processo de decisão nas organizações: Construindo modelos de decisão multicritério. Recife, Editora Atlas S.A., 2013.
- ATANASSOV, K. T. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 20, 87–96, 1986.
- BECCALI M, CELLURA M, MISTRETTA M. Decision-making in energy planning. Application of the Electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*; 28(13): 2063–87, 2003.
- BELACEL, N. Multicriteria assignment method PROAFTN: methodology and medical applications. *European Journal of Operational Research*; 125: 175–83, 2000.
- BELLMAN, R.; ZADEH, L.A., 1972, Decision-making in a fuzzy environment, *Management Sciences*, 17: 141–164.
- BELTON, V.; STEWART, T.J.; Multiple Criteria Decision analysis. Kluwer. Academic Publishers, 2002.
- BORTONI, E.C. Are my motors oversized? *Energy Convers Manage*; 50: 2282–7, 2009.
- BOTELHO, T. G.; Uma nova proposta para a implementação computacional do princípio de extensão de Zadeh / Tiago Gonçalves Botelho. – Lavras: UFLA, 2012.
- BRANS, J.; MARESCHAL, B. PROMETHEE V: MCDM problems with segmentation constraints. *INFOR*, v.30, n.2, p. 85-96, 1992.
- BRANS, J.; MARESCHAL, B.; VINCKE, P. PROMETHEE: a new family of outranking methods in multicriteria analysis. In Brans, J., editor, *Operational Research, IFORS 84*, page 477–490, 1984.

- BUCHANAN, J; SHEPPARD, P; VANDERPOOTEN, D. Project ranking using Electre III. Research report 99-01, University of Waikato, New-Zealand,1999.
- CASSIANO, R. M. Estratégias competitivas das empresas produtoras de sementes de soja: um estudo exploratório no Sul de Mato Grosso. CNEC/FACECA. Faculdade Cenecista de Varginha. Varginha, 2005.
- CAVALCANTE,C.A.V. ALMEIDA,A.T. A multicriteria decision-aiding model using PROMETHEE III for preventive maintenance planning under uncertain conditions. Jpurnal of Quality in Maintenance Engineering,13,385-397,2007.
- CHATTERJEE, P. ALTHAWALE, V.M. CHAKRABORTY, S. Selection of materials using compromise ranking and outranking methods. Materials and Desing,30,4063-4053, 2009.
- CHATTERJEE, P. ALTHAWALE, V.M. CHAKRABORTY, S. Selection of industrial robots using compromise ranking and outranking methods. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,26,486-489, 2010.
- CHEN, T. A multimeasure approach to optimism and pessimism in multiple criteria decision analysis based on Atanassov fuzzy sets. Expert Systems with Applications,38,1259-12584, 2011.
- CHEN, T. CHANG, C.H. LU, J.R. The extended QUALIFLEX method for multiple criteria decision analysis based on interval type-2 fuzzy sets and applications to medical decision making. European Journal of Operational Research,226,615-625, 2012.
- CLIMACO, J.N.;ANTUNES, C.H.; ALVES, M.J.G. Programação linear multiobjetivo. Imprensa na Universidade de Coimbra, 2003.
- COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Balanço energético do Paraná,2009.
- DEMBER, W. M. MARTIN, S. H. HUMMER, M. K. HOWE, S. R. MELTON, R. S. The measurement of optimism and pessimism. Current Psychology: Research & Reviews, 8, 102-119,1989.
- DEVI, K. YADAV, S.P. A multicriteria intuitionistic fuzzy group decision making for plant location selection with ELECTRE method. International Journal Advancing Manufacturing Technology,66,1219-1229, 2013.

- DOE – US Department of Energy. Energy loss reduction and recovery in industrial energy systems. Washington, DC: DOE; November, 2004.
- DOUMPOS, M, ZOPOUNIDIS C. A multicriteria classification approach based on pairwise comparisons. *European Journal of Operational Research*;158(2): 378–89, 2004.
- DUBOIS D, PRADE H. Fuzzy real algebra: some results. *Fuzzy Set Syst*, 2:327–348, 1979.
- DUBOIS, D. PRADE, H. Possibility theory as a basis for qualitative decision theory. *International joint conference on artificial intelligence*,1924–1930,1995.
- DUBOIS, D. LE BERRE, D. PRADE, H. SABBADIN, R. Using possibilistic logic for modeling qualitative decision: ATMS-based algorithms. *Fundamental Informaticae*, 37, 1–30,1999.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). Balanço Energético Nacional 2010: Ano base 2009. Rio de Janeiro: EPE, 2010.
- FERNANDEZ, E. NAVARRO, J. A new approach to multi-criteria sorting based on fuzzy outranking relations: The THESUS methos. *European Journal of Operational Reasearch*,213,405-413, 2011.
- FISCHER, R. CHALMERS, A. Is optimism universal? A meta-analytical investigation of optimism levels across 22 nations. *Personality and Individual Differences*, 45, 378-382.2008.
- FONTES, R. M. Identificação de modelos dinâmicos com incerteza de medição através da lógica fuzzy. Salvador: UFBA,2012.
- GARCIA, A.G.P. Impacto da Lei de eficiência energética para motores elétricos no potencial de conservação de energia na indústria. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético. COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro, 2003.
- GELLER,H. HARRINGTON, P. ROSENFELD,A.H. TANISHIMA,S. UNANDER,F. Policies for increasing energy efficiency: Thirty years of experience in OECD countries. *Energy Policy*,34,556-573, 2006.
- GIL, A.C.; Métodos e técnicas de pesquisa social. 6ed. São Paulo. Atlas, 2008.

- GIL, A. C. Como Elaborar Projetos de Pesquisa. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- GLADISH, B.P. JONES,D.F. TAMIZ, M. TEROL,A.B. Na interactive three-stage model for mutual funds portfolio selection. *Omega*,35,75-88, 2007.
- GOGUEN J.A. L-fuzzy sets. *J. Math. Anal.Appl.*, 8, 145-174, 1967.
- GOMES, L. F. A. M., GOMES, C. F. S. e ALMEIDA, A. T., Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério, 2. ed, Atlas, São Paulo, 2006.
- GRABISCH, M. GRECO, S.PIRLOT, M. Bipolar and bivariate models in multicriteria decision analysis: Descriptive and constructive approaches. *International Journal of Intelligent Systems*, 23, 930–969, 2008.
- HATAMI-MARBINI, A.; TAVANA, M. An extension of Electre I method for group decision-making under a fuzzy environment. *Omega*, 39, 2011.
- HATAMI-MARBINI,A. EMROUZNEJAD,A. TAVANA,M. A taxonomy and review of the fuzzy data envelopment analysis literature: Two decades in the making. *European Journal of Operational Research*,214,457-472, 2011.
- HEY, J.D.Uncertainty in microeconomics. Martin Robertson, Oxford. 1979.
- IEA – International Energy Agency. Energy technology transistions for industry. Paris, France: OECE/IEA, 2009.
- JACKSON, J. Promoting energy efficiency investments with risk management decision tools. *Energy Policy*, 38, 2010.
- KAYA, I.ÇINAR,D. Facility location selection using a fuzzy outranking method. *Journal of Multi-Valued Logic & Soft Computing*,14,251-263, 2007.
- KAYA D, YAGMUR EA, YIGIT KS, KILIC FC, EREN AS, CELIK C. Energy efficiency in pumps. *Energy Convers Manage*;49:1662–73, 2008.
- KE,G.Y. FU,B. DE,M. HIPEL, K.W. A hierarchical multiple criteria model for eliciting relative preferences in conflict situations. *Journal System Science Syst Engineering*,21,56-76, 2012.

- KEENEY, R. L.; RAIFFA, H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. Wiley, New York. Reprinted, Cambridge Univ. Press, New York, 1976.
- LIN, H.F. An application of fuzzy AHP for evaluating course website quality. *Computers & Education*, 54, 877-888, 2010.
- MALHOTRA, N. Pesquisa de Marketing: uma orientação aplicada. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- MAYDEU, O. A. D'ZURILLA, T.J. The factor structure of the Problem Solving Inventory. *European Journal of Psychological Assessment*, 13, 206-215, 1997.
- MAYSTRE, L. Y.; PICTET, J. & SIMOS, J. —Méthodes multicritères ELECTRE. 1. ed. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, 1994.
- MCCOY, G. A. & DOUGLASS, J.G. Energy Management for Motor Driven System. Washington, USA: U.S. Department of Energy (DOE), March, 2000.
- MCKANE A, PRICE L, de la Rue du Can S. Policies for promoting industrial energy efficiency in developing countries and transition economies. Lawrence Berkeley National Laboratory; 2007.
- MENDEL, J. M. Uncertain rule-based fuzzy logic system: introduction and new directions. 1. ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall. ISBN 0-13-040969-3, 2000.
- MME – Ministério das Minas e Energia. Portaria Interministerial n 553, de 8 de dezembro de 2005. Estabelece MEPS para motores elétricos de indução trifásicos com rotor tipo gaiola esquilho. Brasília, DF: MME, 2005.
- MOUSAVI, S.M. VAHDANI, B. TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. EBRAHIMNEJAD, S. AMIRI, M. A multi-stage decision-making process for multiple attributes analysis under an interval-valued fuzzy environment. *International Journal Advancing Manufacturing Technology*, 64, 1263-1273, 2013.
- OIKONOMOU, V.; BECCHIS, F.; STEG, L.; RUSSOLILLO, D. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*; 37:4787–96, 2009.

- OLCER,A.I. ODABASI,A.Y. A new multiple attributive group decision making methodology and its application to propulsion/manoeuvring system selection problem. *European Journal of Operational Research*,166,93-11,2005.
- ÖZTÜRK, M. TSOUKIÀS, A. Bipolar preference modeling and aggregation in decision support. *International Journal of Intelligent Systems*, 23(9), 970–984,2008.
- PARDALOS, P.; SISKOS, Y.; ZOPOUNIDIS, C. (Org.). *Advances in multicriteria analysis*. Kluwer Academic Publishers, 1995.
- PEREZ-GLADISH B, GONZALEZ I, BILBAO-TEROL A, ARENAS-PARRA M. Planning a TVadvertising campaign: a crisp multiobjective programming model from fuzzy basic data. *Omega*;38(1–2):84–94, 2010.
- PERLOIRO, M. F. Versão portuguesa do Teste de Orientação Prolongada de Vida – ELOT-PT. (Tradução e adaptação do original em língua inglesa Extended Life Orientation Test (ELOT). Chang, Maydeu-Olivares & D’Zurilla, 1997, cit. por Perloiro, 2002.
- PERNY P. Multicriteria filtering methods based on concordance and non-discordance principles. *Annals of Operations Research*;80:137–67, 1998.
- POLMEROL, J.C; BARBA-ROMERO, S. *Multicriteria decision in management: principles and practice*. Kluwer,2000.
- ROSS, T J. *FuzzyLogic with Engineering Applications*. England: John Wiley and SonsLTD, pp. 308-357, 2004.
- ROY, B. Critères multiples et modélisation des préférences: l'apport des relations de surclassement. *Revue d'Economie Politique* 1,1974.
- ROY, B. *Multicriteria Methodology for Decision Aiding*. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1996.
- RUSS, E.; DOBBINS, R.; SIMPSON, P. *Computational Inteligence. PC Tools*, This book is printed on acid-free paper. USA, 1996.

- RUSSELL, C. Strategic industrial energy efficiency: reduce expenses, build revenues, and control risk. *Energy Engineering: Journal of the Association of Energy Engineering* 102, 7–273, 7–27, 2005.
- RWTH Aachen, Korneliusstr. 5, 52076 Aachen, Germany; John Wiley & Sons, Inc. Volume 2, May/June 2010.
- SCHEIER, M. F. CARVER, C. Optimism, coping and health: Assessment and implications of generalized outcome expectancies. *Health Psychology*, 4, 219–247, 1985.
- SENA, G. D. GOCKEN, T. A fuzzy approach for the reviewer assignment problem. *Computers & Industrial Engineering*, 72, 50–57, 2014.
- SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. *Controle e modelagem Fuzzy*. São Paulo: E. Blücher. 200 p., 1999.
- SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. M. A multi-attribute decision model for portfolio selection aiming to replace technologies in industrial motor systems. *Energy Conversion and Management*, 57, 2012.
- SOLA, A. V. H.; XAVIER, A. A. P. Organizational human factors as barriers to energy efficiency in electrical motors systems in industry. *Energy Policy*; 35:5784–94, 2007.
- SOLA, A. V. H.; MOTA, C. M. M. A.; KOVALESKI, J. L. A model for improving energy efficiency in industrial motor system using multicriteria analysis. *Energy Conversion and Management, Energy Policy*, 39, 2011.
- STERN PC, ARONSON E, editors. *Energy use: the human dimension*. New York: W.H. Freeman; 1984.
- THOLLANDER, P.; MARDAN, N.; KARLSOON, M. Optimization as investment decision support in a Swedish medium-sized iron foundry – A move beyond traditional energy auditing *Applied Energy*, 86, 433–440, 2009.
- TRESCA, R. P. DE ROSE, J. D. *Estudo comparativo da motivação intrínseca em escolares praticantes e não praticantes de dança*, 2004.
- UN – United Nations. *Delivering on Energy*. New York: United Nations, 2010.

VINCKE, P. Multicriteria decision-aid. Bruxelles, João Wiley & Sons, 1992.

WORRELL, E.; VAN BERKEL, R.; FENGQI, Z.; MENKE, C.; SCHAEFFER, R.; WILLIAMS, R. Technology transfer of energy efficient technologies in industry: a review of trends and policy issues. *Energy Policy*;29:29–43, 2001.

YAGER, R.R. Fuzzy decision making including unequal objectives. *FSS* 4, 235-242, 1978.

ZADEH, L.A.; Fuzzy sets. *Inform Control*, 8:338–353. 1965.

ZADEH, L.A.; Knowledge representation in fuzzy logic, In: R.R.Yager and L.A. Zadeh eds., *An introduction to fuzzy logic applications in intelligent systems*(Kluwer Academic Publisher, Boston, 2-25. 1992.

ZIMMERMANN H-J. *Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems*. Boston: Kluwer; 1987.

ANEXO A

Tabela A.1 – Matriz IVF de decisão

CRIT.	ALTERNATIVA									
	A1		A2		A3		A4		A5	
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
C1	0,85	0,9	0,75	0,85	0,75	0,85	0,75	0,85	0,05	0,05
C2	0,65	0,75	0,65	0,75	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
C3	0,5	0,6	0,75	0,85	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
C4	0,5	0,6	0,75	0,85	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
C5	0,65	0,75	0,15	0,2	0,85	0,9	0,65	0,75	0,05	0,05
C6	0,75	0,85	0,15	0,2	0,85	0,9	0,85	0,9	0,05	0,05
C7	0,65	0,75	0,65	0,75	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
CRIT.	A6		A7		A8		A9		A10	
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
C1	0,85	0,9	0,65	0,75	0,85	0,9	0,95	0,95	0,85	0,9
C2	0,05	0,05	0,65	0,75	0,25	0,35	0,35	0,45	0,15	0,2
C3	0,05	0,05	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,85	0,75	0,85
C4	0,5	0,6	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,85	0,75	0,85
C5	0,5	0,6	0,15	0,2	0,65	0,75	0,85	0,9	0,5	0,6
C6	0,65	0,75	0,05	0,05	0,05	0,05	0,85	0,9	0,75	0,85
C7	0,05	0,05	0,65	0,75	0,75	0,85	0,35	0,45	0,05	0,05
CRIT.	A11		A12		A13		A14		A15	
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
C1	0,75	0,85	0,85	0,9	0,35	0,45	0,15	0,2	0,85	0,9
C2	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,25	0,35
C3	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,5	0,6	0,5	0,6
C4	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,5	0,6	0,5	0,6
C5	0,75	0,85	0,85	0,9	0,35	0,45	0,05	0,05	0,5	0,6
C6	0,75	0,85	0,85	0,9	0,5	0,6	0,05	0,05	0,65	0,75
C7	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,85	0,35	0,45
CRIT.	A16		A17		A18		A19		A20	
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+	M-	M+
C1	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,85	0,9	0,95	0,95
C2	0,65	0,75	0,15	0,2	0,25	0,35	0,35	0,45	0,35	0,45
C3	0,5	0,6	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,75	0,85
C4	0,5	0,6	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,5	0,6
C5	0,5	0,6	0,65	0,75	0,65	0,75	0,75	0,85	0,5	0,6
C6	0,15	0,2	0,25	0,35	0,15	0,2	0,75	0,85	0,5	0,6
C7	0,95	0,95	0,05	0,05	0,35	0,45	0,25	0,35	0,35	0,45

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Tabela A.2 – Matriz IF de decisão

CRIT.	ALTERNATIVA														
	A1			A2			A3			A4			A5		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
C1	0,85	0,1	0,05	0,75	0,15	0,1	0,75	0,15	0,1	0,75	0,15	0,1	0,05	0,95	0
C2	0,65	0,25	0,1	0,65	0,25	0,1	0,05	0,95	0	0,05	0,95	0	0,05	0,95	0
C3	0,5	0,4	0,1	0,75	0,15	0,1	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0
C4	0,5	0,4	0,1	0,75	0,15	0,1	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0
C5	0,65	0,25	0,1	0,15	0,8	0,05	0,85	0,1	0,05	0,65	0,25	0,1	0,05	0,95	0
C6	0,75	0,15	0,1	0,15	0,8	0,05	0,85	0,1	0,05	0,85	0,1	0,05	0,05	0,95	0
C7	0,65	0,25	0,1	0,65	0,25	0,1	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0
CRIT.	A6			A7			A8			A9			A10		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
C1	0,85	0,1	0,05	0,65	0,25	0,1	0,85	0,1	0,05	0,95	0,05	0	0,85	0,1	0,05
C2	0,05	0,95	0	0,65	0,25	0,1	0,25	0,65	0,1	0,35	0,55	0,1	0,15	0,8	0,05
C3	0,05	0,95	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,75	0,15	0,1	0,75	0,15	0,1
C4	0,5	0,4	0,1	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,75	0,15	0,1	0,75	0,15	0,1
C5	0,5	0,4	0,1	0,15	0,8	0,05	0,65	0,25	0,1	0,85	0,1	0,05	0,5	0,4	0,1
C6	0,65	0,25	0,1	0,05	0,95	0	0,05	0,95	0	0,85	0,1	0,05	0,75	0,15	0,1
C7	0,05	0,95	0	0,65	0,25	0,1	0,75	0,15	0,1	0,35	0,55	0,1	0,05	0,95	0
CRIT.	A11			A12			A13			A14			A15		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
C1	0,75	0,15	0,1	0,85	0,1	0,05	0,35	0,55	0,1	0,15	0,8	0,05	0,85	0,1	0,05
C2	0,05	0,95	0	0,05	0,95	0	0,05	0,95	0	0,05	0,95	0	0,25	0,65	0,1
C3	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,5	0,4	0,1	0,5	0,4	0,1
C4	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,5	0,4	0,1	0,5	0,4	0,1
C5	0,75	0,15	0,1	0,85	0,1	0,05	0,35	0,55	0,1	0,05	0,95	0	0,5	0,4	0,1
C6	0,75	0,15	0,1	0,85	0,1	0,05	0,5	0,4	0,1	0,05	0,95	0	0,65	0,25	0,1
C7	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,75	0,15	0,1	0,35	0,55	0,1
CRIT.	A16			A17			A18			A19			A20		
	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π	μ	ν	π
C1	0,85	0,1	0,05	0,85	0,1	0,05	0,85	0,1	0,05	0,85	0,1	0,05	0,95	0,05	0
C2	0,65	0,25	0,1	0,15	0,8	0,05	0,25	0,65	0,1	0,35	0,55	0,1	0,35	0,55	0,1
C3	0,5	0,4	0,1	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,75	0,15	0,1
C4	0,5	0,4	0,1	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,95	0,05	0	0,5	0,4	0,1
C5	0,5	0,4	0,1	0,65	0,25	0,1	0,65	0,25	0,1	0,75	0,15	0,1	0,5	0,4	0,1
C6	0,15	0,8	0,05	0,25	0,65	0,1	0,15	0,8	0,05	0,75	0,15	0,1	0,5	0,4	0,1
C7	0,95	0,05	0	0,05	0,95	0	0,35	0,55	0,1	0,25	0,65	0,1	0,35	0,55	0,1

Fonte: Esta pesquisa (2014)

	0,33	0,43	0,39	0,37	0,28	0,33	0,50	0,66	0,45	0,40	0,61	0,32	0,32	0,37	0,47	0,50	0,50	0,54	0,50
0,57		0,61	0,61	0,37	0,49	0,46	0,62	0,57	0,57	0,61	0,69	0,52	0,23	0,49	0,55	0,66	0,62	0,66	0,54
0,29	0,28		0,41	0,33	0,29	0,37	0,49	0,44	0,37	0,41	0,58	0,33	0,16	0,36	0,39	0,55	0,53	0,53	0,36
0,37	0,28	0,54		0,33	0,33	0,37	0,58	0,48	0,42	0,54	0,62	0,37	0,16	0,40	0,43	0,63	0,61	0,66	0,40
0,52	0,52	0,66	0,66		0,52	0,66	0,66	0,52	0,54	0,66	0,66	0,66	0,37	0,52	0,55	0,71	0,69	0,69	0,52
0,71	0,42	0,50	0,50	0,44		0,42	0,67	0,83	0,68	0,50	0,67	0,38	0,44	0,63	0,63	0,69	0,71	0,74	0,72
0,48	0,44	0,61	0,61	0,32	0,45		0,57	0,40	0,40	0,61	0,61	0,44	0,15	0,40	0,50	0,57	0,57	0,57	0,40
0,41	0,19	0,35	0,31	0,32	0,28	0,33		0,54	0,23	0,35	0,52	0,26	0,13	0,30	0,40	0,44	0,51	0,62	0,45
0,17	0,33	0,36	0,27	0,37	0,00	0,42	0,24		0,15	0,27	0,36	0,27	0,15	0,09	0,24	0,24	0,25	0,31	0,38
0,50	0,33	0,43	0,43	0,37	0,31	0,42	0,67	0,74		0,40	0,61	0,32	0,23	0,50	0,50	0,62	0,71	0,71	0,63
0,37	0,28	0,57	0,49	0,33	0,37	0,37	0,54	0,52	0,42		0,66	0,37	0,16	0,40	0,43	0,59	0,57	0,61	0,40
0,20	0,11	0,32	0,24	0,33	0,20	0,28	0,41	0,44	0,29	0,24		0,24	0,16	0,27	0,31	0,46	0,44	0,44	0,36
0,52	0,37	0,66	0,66	0,33	0,52	0,54	0,62	0,52	0,54	0,66	0,66		0,16	0,52	0,52	0,67	0,66	0,69	0,48
0,71	0,79	0,76	0,76	0,48	0,59	0,72	0,74	0,79	0,79	0,76	0,76	0,76		0,71	0,74	0,79	0,79	0,79	0,76
0,66	0,42	0,43	0,43	0,37	0,33	0,42	0,61	0,81	0,53	0,43	0,61	0,32	0,32		0,58	0,54	0,62	0,71	0,70
0,54	0,30	0,42	0,42	0,35	0,39	0,30	0,49	0,64	0,53	0,42	0,59	0,33	0,27	0,43		0,57	0,52	0,55	0,56
0,44	0,16	0,35	0,31	0,28	0,30	0,33	0,55	0,57	0,32	0,35	0,52	0,26	0,15	0,40	0,37		0,58	0,66	0,48
0,44	0,16	0,35	0,31	0,28	0,28	0,33	0,48	0,55	0,23	0,35	0,52	0,26	0,15	0,32	0,37	0,44		0,62	0,47
0,33	0,16	0,35	0,26	0,28	0,22	0,33	0,37	0,50	0,20	0,27	0,52	0,23	0,15	0,23	0,37	0,37	0,40		0,38
0,43	0,37	0,43	0,43	0,37	0,22	0,42	0,37	0,61	0,31	0,43	0,43	0,32	0,18	0,24	0,36	0,37	0,38	0,47	

Figura A.1 – Matriz de concordância dominante K

Fonte: Esta pesquisa (2014)

	0,60	0,38	0,38	0,50	1,00	0,46	0,46	0,17	0,62	0,38	0,38	0,38	0,86	1,00	0,38	0,38	0,04	0,00	0,17
0,34		0,34	0,34	0,65	0,54	0,00	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,44	0,85	0,34	0,47	0,47	0,34	0,34	0,34
0,34	0,38		1,00	1,00	0,90	0,48	0,79	0,57	0,90	1,00	0,00	1,00	1,00	0,69	0,34	0,90	0,69	0,64	0,57
0,34	0,38	0,00		1,00	0,90	0,48	0,79	0,57	0,90	0,00	0,00	1,00	1,00	0,69	0,34	0,90	0,69	0,64	0,57
0,34	0,34	0,34	0,34		0,39	0,34	0,34	0,00	0,39	0,34	0,34	0,34	0,85	0,34	0,34	0,39	0,34	0,34	0,00
0,34	0,34	0,00	0,00	0,00		0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34
0,34	0,42	0,34	0,34	0,60	0,52		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,85	0,34	0,34	0,37	0,34	0,34	0,34
0,34	0,24	0,34	0,34	0,79	0,52	0,24		0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	1,00	0,34	0,34	0,46	0,34	0,34	0,34
0,00	0,57	0,00	0,00	0,38	1,00	0,64	0,52		1,00	0,00	0,00	0,00	0,52	1,00	0,00	0,59	0,65	0,00	1,00
0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	1,00	0,45	0,36	0,09		0,00	0,00	0,00	0,34	0,34	0,00	0,51	0,44	0,06	0,34
0,34	0,34	0,00	0,21	1,00	0,90	0,45	0,78	0,57	0,90		0,00	1,00	1,00	0,69	0,34	0,90	0,69	0,64	0,57
0,34	0,38	1,00	1,00	1,00	1,00	0,48	0,79	0,57	0,90	1,00		1,00	1,00	0,69	0,34	0,90	0,69	0,64	0,57
0,27	0,34	0,00	0,00	1,00	0,47	0,37	0,30	0,00	0,47	0,00	0,00		1,00	0,14	0,27	0,47	0,14	0,27	0,00
0,34	0,34	0,34	0,34	0,32	0,39	0,34	0,34	0,06	0,39	0,34	0,34	0,00		0,34	0,34	0,39	0,34	0,34	0,00
0,00	0,34	0,00	0,00	0,33	1,00	0,45	0,45	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,43		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,65	0,49	0,38	0,38	0,50	0,86	0,32	0,32	0,41	0,69	0,38	0,38	0,38	1,00	0,58		0,55	0,26	0,38	0,55
0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,89	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,31	0,00		0,34	0,00	0,42
0,06	0,24	0,00	0,00	0,33	0,86	0,34	0,34	0,34	0,34	0,00	0,00	0,00	0,43	0,43	0,00	0,86		0,34	0,60
0,02	0,39	0,00	0,00	0,21	1,00	0,49	0,36	0,42	1,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,76	0,00	1,00	0,77		0,76
0,00	0,46	0,00	0,00	0,38	0,93	0,40	0,40	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,48	0,58	0,00	0,00	0,00	0,00	

Figura A.2 – Matriz de discordância dominante L

Fonte: Esta pesquisa (2014)

-	0,04	0	0	0	0	0,06	0,21	0	0	0	0	0	0,01	0	0,39	0	0,01	0	0
0,35	-	0,11	0,08	0	0,19	0	0,11	0,20	0,08	0,06	0,11	0	0	0,25	0,56	0	0,08	0,12	0,2
0,65	0,38	-	0,14	0,02	0	0,22	0,53	0,71	0	0,14	0,33	0,09	0	0,47	0,68	0	0,33	0,23	0,66
0,69	0,32	0,37	-	0,02	0	0,22	0,57	0,75	0	0,37	0,37	0,09	0,04	0,47	0,68	0	0,39	0,33	0,66
0,85	0,85	0,35	0,42	-	0	0,71	0,62	0,72	0	0,35	0,35	0,42	0,61	0,85	0,78	0	0,59	0,58	0,76
0,37	0,16	0	0	0	-	0	0	0,25	0,18	0	0	0	0,07	0,20	0,43	0	0	0	0,28
0,50	0,55	0,2	0,19	0	0,32	-	0,14	0,35	0,30	0,17	0,19	0,05	0,04	0,35	0,54	0,05	0,17	0,17	0,35
0,26	0	0,09	0,07	0	0,11	0	-	0,43	0,08	0,09	0,09	0,05	0,09	0,16	0,35	0	0,13	0,15	0,31
0,33	0,16	0,08	0,04	0	0,36	0,12	0,18	-	0,07	0,04	0,07	0,02	0	0,10	0,46	0,05	0,10	0	0,16
0,58	0,27	0,11	0,11	0	0,38	0,23	0,49	0,51	-	0,15	0,11	0,04	0,11	0,50	0,57	0,21	0,46	0,15	0,54
0,61	0,41	0,23	0,12	0	0	0,26	0,53	0,72	0	-	0,21	0,09	0	0,47	0,68	0	0,33	0,28	0,66
0,65	0,38	0,33	0,14	0,02	0	0,22	0,53	0,71	0	0,14	-	0,09	0	0,47	0,68	0	0,33	0,23	0,66
0,72	0,70	0,39	0,39	0,16	0	0,53	0,61	0,72	0	0,42	0,39	-	0	0,72	0,77	0	0,46	0,40	0,75
0,59	0,59	0,30	0,28	0,14	0,21	0,61	0,59	0,46	0,21	0,31	0,30	0	-	0,59	0,62	0,21	0,50	0,36	0,54
0,42	0,11	0,10	0,10	0	0,34	0,14	0,33	0,21	0	0,10	0,10	0,03	0,04	-	0,50	0	0	0	0
0,14	0,03	0	0	0	0	0,05	0,120	0,07	0	0	0	0	0,04	0,05	-	0	0,09	0,03	0,07
0,56	0,14	0,13	0,10	0	0,31	0,14	0,54	0	0	0,15	0,13	0,07	0,11	0,33	0,61	-	0,50	0	0,60
0,47	0	0,13	0,10	0	0,29	0,08	0,38	0,47	0,18	0,15	0,13	0,05	0,10	0,22	0,54	0	-	0,15	0,49
0,58	0,36	0,27	0,17	0	0,44	0,22	0,36	0,61	0,18	0,25	0,26	0,10	0	0,41	0,63	0,20	0,32	-	0,56
0,39	0,11	0,05	0,05	0	0,23	0,12	0,15	0,13	0	0,05	0,05	0,02	0,08	0,14	0,47	0	0	0	-

Figura A.3 – Matriz de credibilidade

Fonte: Esta pesquisa (2014)

ANEXO B

Responda às questões a cerca de si próprio, considerando O MODO COMO HABITUALMENTE PENSA E COMO SE SENTE ATUALMENTE (não no modo como tenha se sentido eventualmente no passado). Uma resposta não influencia a outra.

	1 Discordo fortemente	2 Discordo	3 Neutro	4 Concordo	5 Concordo fortemente
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

Se estiver disponível para participar futuramente de outra pesquisa, deixe o seu contato:

Nome:

Contato:

Figura B.1 – Teste ELOT

Fonte: Chang, Maydeu-Olivares & D’Zurilla (1997); Adaptado por Perloiro (2002)

Tabela B.1 – Matriz de decisão normalizada (Tipo II – J)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A2	0,948	1	0,887	0,651	0,241	0,184	0,796
A5	0	0	1	1	0	0	1
A6	1	0	0	0	1	0,898	0
A7	0,852	1	1	1	0,241	0	0,796
A10	1	0,205	0,887	0,651	1	1	0
A13	0,529	0	1	1	0,732	0,762	1
A14	0,174	0	0,676	0	0	0	0,887
A15	1	0,394	0,676	0	1	0,898	0,495

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Tabela B.2 – Matriz de concordância

	2	5	6	7	10	13	14	15
2		0,692	0,513	0,744	0,513	0,462	0,949	0,513
5	0,308		0,513	0,410	0,308	0,513	0,744	0,308
6	0,487	0,692		0,487	0,436	0,692	0,795	0,590
7	0,641	0,949	0,513		0,513	0,718	0,949	0,513
10	0,744	0,692	1,000	0,487		0,692	0,949	0,744
13	0,538	1,000	0,513	0,538	0,308		1,000	0,308
14	0,051	0,692	0,513	0,154	0,051	0,205		0,308
15	0,487	0,692	1,000	0,487	0,641	0,692	0,949	

Fonte: Esta pesquisa (2014)

Tabela B.3 – Matriz de discordância

	2	5	6	7	10	13	14	15
2		0,349	0,759	0,349	0,816	0,578	0,090	0,759
5	1,000		1,000	1,000	1,000	0,762	0,174	1,000
6	1,000	1,000		1,000	0,887	1,000	0,887	0,676
7	0,184	0,204	0,898		1,000	0,762	0,090	0,898
10	0,796	1,000	0,000	0,796		1,000	0,887	0,495
13	1,000	0,000	0,471	1,000	0,471		0,000	0,471
14	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000		1,000
15	0,651	1,000	0,000	1,000	0,651	1,000	0,392	

Fonte: Esta pesquisa (2014)