

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO PARANÁ
ESCOLA POLITÉCNICA

FELIPE FIDELIS SCHAUENBURG

METODOLOGIA DE SELEÇÃO E PRIORIZAÇÃO DE PROJETOS BASEADA
EM FUZZY-AHP

CURITIBA

2014

FELIPE FIDELIS SCHAUBURG

METODOLOGIA DE SELEÇÃO E PRIORIZAÇÃO DE PROJETOS BASEADA
EM FUZZY-AHP

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção e Sistemas da
Pontifícia Universidade Católica do
Paraná como requisito para obtenção do
grau de mestre.

Orientador: Prof. Dr. Leandro dos
Santos Coelho

Co-orientador: Prof. Dr. Alexandre
Rasi Aoki

CURITIBA

2014

AGRADECIMENTOS

O autor deseja manifestar o seu mais sincero e profundo agradecimento a todas às instituições e pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos Institutos LACTEC pelo apoio financeiro, logístico, instalações e material. Ao Programa de Engenharia de Produção e Sistemas da Escola Politécnica da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, agradeço pela oportunidade de participar do programa de mestrado bem como ao apoio acadêmico. À Universidade Federal do Paraná e seus professores pelas aulas ofertadas e conhecimentos compartilhados e postos a serviço da conclusão desta dissertação.

Ao meu orientador Professor Dr. Leandro dos Santos Coelho pela oportunidade, orientação, paciência, confiança, dedicação e incentivo despendidos ao longo da condução deste trabalho. Agradeço também às sugestões e revisões desta escrita.

Ao meu co-orientador Professor Dr. Alexandre Rasi Aoki pela inestimável colaboração, auxílio logístico, conhecimento sobre o tema e esforços dependidos na elaboração da proposta. Meus agradecimentos se estendem aos demais profissionais dos Institutos LACTEC que contribuíram com esta pesquisa.

Aos profissionais da Companhia Paranaense de Energia (COPEL) que dispenderam suas horas colaborando prontamente com o desenvolvimento do produto de avaliação.

À família que é e que será, perto e longe, pelo apoio incondicional e incentivo irrestrito, desde os primeiros momentos. Sem seu auxílio, aqui não chegaria.

Em especial à Alana F. Miksza, pela compreensão das horas roubadas, por estar sempre ao meu lado e sem cujo incentivo não seria possível a conclusão desta dissertação.

RESUMO

O investimento em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico (P&D) revela-se de caráter estratégico para a consolidação tecnológica e posicionamento de vantagem estratégica para uma empresa em cenários de crescente competitividade. O maior interesse pela submissão de propostas que por vezes superam a capacidade de aporte das empresas promove a necessidade de priorização em projetos que possuam alinhamento estratégico e ofereçam os melhores benefícios. A montagem de um portfólio dentro deste contexto apresenta características complexas e é em sua natureza governado por decisões voltadas a múltiplos objetivos, por vezes conflitantes entre si. Diversas técnicas, oriundas de teorias clássicas e de metodologias da Computação Natural, são propostas para a busca da solução mais adequada a problemas que apresentam mais de um objetivo a ser priorizado, das quais se pode citar duas metodologias de interesse, a Análise Hierárquica de Processo e os sistemas *fuzzy*. Individualmente aplicadas apresentam capacidades e características úteis à resolução do problema proposto, mas esta dissertação busca a investigação dos benefícios de acoplamento das duas estratégicas em uma solução híbrida que almeja adicionar robustez e flexibilidade a uma sistemática mais eficiente e transparente na busca maximização de recursos frente à gestão dos programas de P&D. Neste trabalho foi apresentada a metodologia de desenvolvimento e clarificação do fluxo de informações dentro do sistema proposto, assim como a análise de sensibilidade. Obteve-se como resultado uma proposta adaptável e escalável, que diminui a carga de trabalho sobre os agentes de decisão e introduz uma sistematização ao processo permitindo a repetibilidade de resultados. A validação do sistema foi realizada com a colaboração de uma empresa concessionária do setor de energia elétrica que implementa um programa de P&D dentro da legislação estabelecida pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Palavras-chave: *Analytic Hierarchy Process*, sistemas *fuzzy*, *Multiple Criteria Decision Analysis*, Tomada de decisão, Sistemas híbridos, Sistemas inteligentes.

ABSTRACT

Investment in Research and Development (R&D) proves to be of a strategic nature for technological consolidation and gain of strategic advantage for companies in ever increasing competitiveness scenarios. The increased interest in submitting proposals sometimes outweighs the ability of companies to invest, promoting the need for prioritization in projects that have strategic alignment and offer the best benefits. The assembly of a portfolio in this context presents complex traits and is governed by the decisions facing multiple goals that sometimes conflict with each other. Several techniques, derived from classical theories and of Natural Computing methodologies, are proposed to search for the best solution to problems that have more than one objective to be prioritized; and one can mention two methodologies of interest, the Analytic Hierarchy Process and fuzzy systems. Applied individually they present capabilities and useful features to solve the proposed problem, but this dissertation aims to investigate the benefits of strategic coupling of the two in a hybrid solution that aims to add robustness and flexibility to a more efficient and transparent systematic search to maximize resources of R&D programs. The development of the methodology and clarification of information flow within the proposed system is presented, as well as sensitivity analysis. As a result it is obtained an adaptable and scalable proposal, which reduces the workload on the decision agents and introduces a systematic approach allowing results repeatability. The validation of the system is performed with the aid of an electric power sector company that implements a program of R & D within the laws established by ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

Keywords: Analytic Hierarchy Process, fuzzy systems, Multiple Criteria Decision Analysis, Decision making, Hybrid systems, Expert systems.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	JUSTIFICATIVA	3
1.2	OBJETIVOS.....	4
1.3	REVISÃO DA LITERATURA	4
1.3.1	<i>Investimentos em projetos – problema de decisão multicritério</i>	<i>5</i>
1.3.2	<i>AHP – Análise Hierárquica do Processo.....</i>	<i>6</i>
1.3.3	<i>Sistemas híbridos para análise de decisão multicritério.....</i>	<i>7</i>
1.3.4	<i>Sistema de seleção de projetos de P&D baseado em AHP</i>	<i>8</i>
2	ANÁLISE DE DECISÃO POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS.....	10
2.1	DESCRIÇÃO DO MÉTODO AHP	11
2.1.1	<i>Estruturação do problema – identidade e decomposição</i>	<i>13</i>
2.1.2	<i>Comparação – discriminação e julgamentos.....</i>	<i>14</i>
2.1.3	<i>Classificação de prioridades – síntese</i>	<i>18</i>
2.1.3.1	<i>Índice de consistência.....</i>	<i>19</i>
2.1.4	<i>Limitações.....</i>	<i>21</i>
2.2	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO AHP	22
3	SISTEMAS FUZZY	29
3.1	CONCEITOS.....	30
3.1.1	<i>Conjuntos fuzzy.....</i>	<i>30</i>
3.1.2	<i>Conjuntos fuzzy e variáveis linguísticas.....</i>	<i>32</i>
3.1.3	<i>“e” e “ou” fuzzy</i>	<i>33</i>
3.1.4	<i>Relações e inferência.....</i>	<i>35</i>
3.1.5	<i>Sistemas de inferência fuzzy.....</i>	<i>37</i>
4	METODOLOGIA	40
4.1	CRITÉRIOS E AGENTES DE DECISÃO.....	41
4.2	SOLUÇÃO HÍBRIDA DE INVESTIMENTOS EM P&D	44
4.2.1	<i>Processamento fuzzy.....</i>	<i>46</i>
4.2.1.1	<i>Fuzzificação.....</i>	<i>46</i>
4.2.1.1	<i>Base de conhecimento e inferência.....</i>	<i>49</i>
4.2.1.2	<i>Defuzzificação.....</i>	<i>50</i>
4.2.2	<i>Processamento AHP</i>	<i>51</i>
5	RESULTADOS.....	55
5.1	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	57

5.1.1	<i>Sistema fuzzy</i>	57
5.1.2	<i>Sistema AHP</i>	59
5.2	VALIDAÇÃO	63
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	70
6.1	CONCLUSÕES	70
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO	72

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 UMA HIERARQUIA DOMINANTE PARA APLICAÇÃO DO AHP.	14
FIGURA 2.2 - MATRIZ GENÉRICA DE COMPARAÇÕES NO AHP.	15
FIGURA 2.3 - HIERARQUIA DE ESCOLHA MÁQUINA PARA LINHA DE PRODUÇÃO.	23
FIGURA 2.4 - CÁLCULO DO ÍNDICE E TAXA DE COERÊNCIA DA MATRIZ CRITÉRIOS/OBJETIVO DO PROBLEMA DE VIAGEM.	27
FIGURA 2.5 – EXEMPLO DE CÁLCULO DA PRIORIDADE GLOBAL PARA A MÁQUINA A NO PROBLEMA DA LINHA DE PRODUÇÃO.	28
FIGURA 3.1 - A) FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA <i>CRISP</i> . B) FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA <i>FUZZY</i>	31
FIGURA 3.2 - CONJUNTOS <i>FUZZY</i> ASSOCIADOS AOS TERMOS DA VARIÁVEL POSIÇÃO RELATIVA.	33
FIGURA 3.3 - DIAGRAMA GENÉRICO DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>FUZZY</i>	37
FIGURA 3.4 - MAPEAMENTO DA ENTRADA VELOCIDADE EM UM SISTEMA <i>FUZZY</i>	38
FIGURA 4.1 - DIAGRAMA DA METODOLOGIA A INVESTIMENTOS EM P&D.	40
FIGURA 4.2 – ETAPA DE PROCESSAMENTO <i>FUZZY</i> DOS CRITÉRIOS.	47
FIGURA 4.3 – CONJUNTO <i>FUZZY</i> E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA INICIAIS.	47
FIGURA 4.4 – RELAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA PROCESSAMENTO <i>FUZZY</i>	48
FIGURA 4.5 – EXEMPLO DE DEFUZZIFICAÇÃO PELO MÉTODO DO CENTRO DE MASSA – CASO DE ESTUDO.	51
FIGURA 4.6 – EXEMPLO DE DEFUZZIFICAÇÃO PELO MÉTODO DO CENTRO DE MASSA – EXEMPLO NUMÉRICO.	51
FIGURA 4.7 – ETAPA DE PROCESSAMENTO AHP.	52
FIGURA 4.8 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO PARITÁRIA DOS PROJETOS EM RELAÇÃO A UM CRITÉRIO.	53
FIGURA 5.1 – TELA INICIAL DO PROGRAMA DE VALIDAÇÃO.	56
FIGURA 5.2 – CONJUNTO <i>FUZZY</i> E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FINAIS DO SISTEMA HÍBRIDO.	59
FIGURA 5.3 – EXEMPLO DE INTERFACE DE AQUISIÇÃO DE DADOS.	64
FIGURA 5.4 – NOTAS DADAS PELA CONCESSIONÁRIA PARA OS PROJETOS DE VALIDAÇÃO.	66

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO DE CRITÉRIOS PARA HIERARQUIA DA FIGURA 2.1	16
TABELA 2.2 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO DE SUBCRITÉRIOS PARA HIERARQUIA DA FIGURA 2.1	16
TABELA 2.3 – MATRIZ DE COMPARAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA HIERARQUIA DA FIGURA 2.1	17
TABELA 2.4 - ESCALA DE VALORES DE PREFERÊNCIA.....	18
TABELA 2.5 - ÍNDICES DE COERÊNCIA MÉDIOS	20
TABELA 2.6 - MATRIZ DE AVALIAÇÃO DOS CRITÉRIOS/OBJETIVO DO PROBLEMA DA MÁQUINA PARA LINHA DE PRODUÇÃO.....	24
TABELA 2.7 - MATRIZES DE AVALIAÇÃO ALTERNATIVAS/CRITÉRIOS DO PROBLEMA DA MÁQUINA PARA LINHA DE PRODUÇÃO	24
TABELA 2.8 – MATRIZ NORMALIZADA PARA CÁLCULO DO VETOR DE PRIORIDADES CRITÉRIOS/OBJETIVO DO PROBLEMA DA MÁQUINA PARA LINHA DE PRODUÇÃO.	25
TABELA 2.9 - VETOR NORMALIZADO DA MATRIZ DE COMPARAÇÃO PARITÁRIA DOS CRITÉRIOS DO PROBLEMA DA MÁQUINA PARA LINHA DE PRODUÇÃO.	25
TABELA 2.10 - VETORES NORMALIZADOS PARA AS MATRIZES DE ALTERNATIVAS/CRITÉRIOS DO PROBLEMA DA MÁQUINA PARA LINHA DE PRODUÇÃO.	26
TABELA 3.1 – RELAÇÕES <i>CRISP</i> E <i>FUZZY</i>	36
TABELA 4.3 – MATRIZ DE PRIORIDADES PARA O PROBLEMA DE INVESTIMENTO EM P&D.	53
TABELA 5.1 – NOTAS FICTÍCIAS PARA A VALIDAÇÃO DO SISTEMA <i>FUZZY</i>	58
TABELA 5.2 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO PROCESSAMENTO <i>FUZZY</i> UTILIZANDO CONJUNTO E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA INICIAIS.	58
TABELA 5.3 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO DO PROCESSAMENTO <i>FUZZY</i> UTILIZANDO CONJUNTO E FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA FINAIS.	59
TABELA 5.4 – NOTAS PARA OS 7 PROJETOS TESTE NA VALIDAÇÃO DO AHP.	61
TABELA 5.5 – MATRIZ DE PRIORIDADES BASE PARA A VALIDAÇÃO DO AHP.	61
TABELA 5.6 – MATRIZ DE PRIORIDADES COM ENFOQUE EM CUSTO PARA A VALIDAÇÃO DO AHP.	62
TABELA 5.7 – MATRIZ DE PRIORIDADES COM ENFOQUE EM APLICABILIDADE PARA A VALIDAÇÃO DO AHP.	62
TABELA 5.8 – RESULTADO DE PORTFÓLIO DE INVESTIMENTOS PARA A VALIDAÇÃO DO AHP.....	63
TABELA 5.9 – MATRIZ DE PRIORIDADES UTILIZADA NA VALIDAÇÃO DO SISTEMA HÍBRIDO.....	65
TABELA 5.10 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO COM A MATRIZ DE PRIORIDADES FORNECIDA PELA EMPRESA.	67
TABELA 5.11 – NOTA DOS CRITÉRIOS PARA OS SEIS PROJETOS DE VALIDAÇÃO – SAÍDA DO SISTEMA <i>FUZZY</i>	67
TABELA 5.12 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO COM A MATRIZ DE PRIORIDADES COM ENFOQUE EM CUSTO E EM APLICABILIDADE.	68

LISTA DE QUADROS

QUADRO 4.1 - CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS REVISADOS DE DECISÃO DE INVESTIMENTOS EM P&D.....	43
QUADRO 4.2 - MAPEAMENTO DE AGENTES DE DECISÃO E CRITÉRIOS E SUBCRITÉRIOS.....	45

LISTA DE ACRÔNIMOS

- AHP – *Analytic Hierarchy Process* (Análise Hierárquica do Processo)
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP - *Analytic Network Process* (Análise em Redes)
- CAPEX – *Capital Expenditure* (Despesas de Capital)
- CN – Computação Natural
- CROSS - *Consensual-Ranking Organization-Support System*
- ELECTRE - *Élimination et Choix Traduisant La Réalité*
- IC - Índice de Consistência
- MACBETH - *Measuring Attractiveness by a Categorical Evaluation Technique*
- MAH - *Maximize-Agreement Heuristic*
- MAUT - *Multi-Attribute Utility Theory*
- MCDA - *Multiple Criteria Decision Analysis* (Análise de Decisão Multicritério)
- NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
- OPEX – *Operational Expenditure* (Despesas Operacionais)
- P&D – Pesquisa e Desenvolvimento
- SIGE - Sistema Integrado de Gestão Empresarial
- SPEAII - *Strength Pareto Evolutionary Algorithm II*
- TC - Taxa de Consistência
- TOPSIS - *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*
- OPEX – *Operational Expenditure* (Despesas Operacionais)

1 INTRODUÇÃO

O processamento e avaliação de dados para tomada de decisão é um processo complexo, que se executado de forma não estruturada é subjetiva e contém frequentemente incertezas e procedimentos com objetivos de preferência conflitantes. Em contrapartida, a devida estruturação das decisões ou dos fatores analisados facilita a aplicação de procedimentos matemáticos que podem levar à sua resolução ou mensuração com maior objetividade e priorização adequada ao entendimento de um problema.

A seleção e avaliação de propostas de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) é em essência um problema envolvendo a análise concorrente de múltiplos critérios e encontra-se, em grande parte das vezes, classificado como não estruturado (Cetron, Martino e Roepcke, 1967). O investimento em projetos desta natureza representa oportunidade de melhorias internas e expansão de negócios ou mercado, uma vez que sua priorização esteja integrada aos objetivos estratégicos da empresa por uma sistemática de otimização na seleção de uma solução tecnológica. A adoção de metodologias de análise, validação, consistência e correlação entre dados agregam qualidade, robustez, flexibilidade e eficiência vinculadas ao desenvolvimento de sistemas de auxílio à tomada de decisão no âmbito de apreciação de propostas de projetos de P&D (Schrödkrf, 1971), assim como permitem a receptibilidade do processo de seleção e avaliação.

No âmbito das concessionárias de energia elétrica, o processo de avaliação de propostas de projetos revela este caráter estratégico para a composição do programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico conforme legislação vigente da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL. P&D e Eficiência Energética – Pesquisa e Desenvolvimento – Regulamentação, 2014). Regulamentado pelo órgão do governo, a realização de investimentos obrigatória por parte das empresas concessionárias, permissionárias e autorizadas do setor de energia elétrica resultou em considerável aumento de oferta de projetos e carga no processo decisório para escolha da proposta de maior aderência aos objetivos e estratégias das empresas (ANEEL. Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL, 2014). Frente esta

necessidade, procedimentos estruturados e transparentes são cada vez mais requeridos de modo a orientar tomadores de decisão na elaboração de planos de investimentos que beneficiem propostas criteriosamente avaliadas. Nestes casos, a instrumentalização dos processos de gestão com ferramentas acessíveis e flexíveis é essencial para a adaptação das necessidades de cada instituição.

Os sistemas inteligentes baseados em técnicas de Computação Natural (CN) para processamento de informação apresentam-se como alternativas para a resolução de problemas de tomada de decisão. Advindos de uma área de conhecimento que busca dispositivos que são capazes de simular a capacidade humana de modelagem e manipulação de conhecimento, podem ser uma estratégia para incorporar a sistemática na escolha.

Técnicas tais como redes neurais artificiais, sistemas *fuzzy*, inteligência de enxames e computação evolutiva são representantes da Computação Natural (CN), que pode ser definido como o ramo da ciência que se ocupa de desenvolver ferramentas para a resolução de problemas, criação ou aperfeiçoamento de sistemas baseada ou inspirada pela síntese e identificação de padrões encontrados na natureza (Castro, 2007). Pode-se dividir a CN em três grandes partes sob as quais classificam-se os métodos mencionados: computação inspirada na natureza, simulação da natureza por meios computacionais e computação por meios naturais.

A combinação dos modelos inteligentes com metodologias de análise convencionais, como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), ou Análise Hierárquica do Processo, vislumbra vantagens potenciais, podendo-se ressaltar: a menor dependência de modelos quantitativos, a capacidade de aprendizagem, a otimização de índices de avaliação de desempenho, o auxílio na tomada de decisões e planejamento estratégico, a possibilidade de efetuar uma representação de conhecimento, flexibilidade de análise, a possibilidade de lidar com dados qualitativos ou que apresentam informações imprecisas e também de agrupar diversas opiniões mesmo que conflitantes.

Uma ferramenta computacional que incorpore um sistema híbrido, análise convencional e inteligência natural, pode modelar os aspectos quantitativos e qualitativos na seleção de projetos de P&D, ponderando incertezas e habilitando o processo a selecionar e reconhecer padrões de comportamento dinâmico, reduzir riscos econômicos, atribuir hierarquia e graus de preferência entre as alternativas,

testar e validar a consistência das decisões. A inovação tecnológica e flexibilidade de um sistema computacional inteligente podem aperfeiçoar os processos de tomada de decisão tornando-os mais transparentes e objetivos.

Tendo por base a estruturação proposta na dissertação de Levandoski (2009), que contempla a definição do fluxo de informações para o processo, identificação de escopo e áreas envolvidas, propõe-se a expansão da metodologia inteligente de análise de investimentos em P&D, incorporando ao AHP clássico técnicas de CN, especialmente a de sistemas *fuzzy*, para a geração de uma solução híbrida. Faz-se a necessidade de acoplamento de pré-processamento dos critérios de análise das propostas de projeto dentro de um sistema que capture a percepção e experiência dos agentes de decisão antes da aplicação do método clássico.

A proposta híbrida introduzida neste trabalho será validada, utilizando dados reais da concessionária, avaliando a coerência com relação a diversos cenários.

1.1 JUSTIFICATIVA

A análise e adoção de projetos de P&D é uma atividade relevante para a consolidação tecnológica e posicionamento de vantagem estratégica para uma empresa. Uma análise de propostas de projeto deve contemplar diversas dimensões na aderência e alinhamento ao mapa de objetivos estratégicos, assim como considerar o horizonte de planejamento e magnitude de execução.

O processo de avaliação é, em sua natureza, governado por decisões multiobjetivo e exibe características complexas, como a presença de cenários variantes no tempo e modelos matemáticos que apresentam incertezas. A metodologia AHP resolve em parte o problema, tratando em sua essência com o pareamento de decisões multicritério e propondo uma resolução para o problema de objetivos conflitantes.

Um sistema híbrido permite alternativas de inserção de características inspiradas na natureza e na representação e aplicação do conhecimento humano no apoio à tomada de decisão. Técnicas da computação natural oferecem benefícios de

robustez, flexibilidade, capacidade de aprendizado e menor dependência de processos subjetivos no processo de avaliação.

A associação de modelos almeja o desenvolvimento de uma sistemática mais eficiente no planejamento estratégico de investimentos para fornecer uma tentativa de maximização de recursos frente a gestão e legalidade dos programas de P&D.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo contribuir para otimização dos recursos envolvidos em investimentos em projetos de P&D e auxiliar na transparência do processo de tomada de decisão quanto a aprovação ou não de uma proposta de projeto de P&D.

Para tanto, os objetivos específicos a serem atingidos são:

- Pesquisar métodos de suporte a decisão baseados na Análise Hierárquica de Processo e sistemas *fuzzy*;
- Pesquisar metodologia de análise de investimentos em P&D proposta na dissertação de mestrado de Levandoski (2009);
- Desenvolver uma metodologia de agrupamento de dados (*data clustering*) e pré-processamento *fuzzy* de critérios para análise investimentos em P&D;
- Pesquisar métodos de otimização baseados em computação natural;
- Implementar metodologia em ferramenta computacional.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

Este estudo tem como foco a integração de uma metodologia tradicional de suporte a análise e tomada de decisão com múltiplos critérios, o AHP, a uma técnica de computação natural, os sistemas *fuzzy*, para obtenção de um sistema de seleção de projetos de P&D de uma concessionária de energia elétrica.

Para tanto, eximindo-se de uma revisão completa da literatura através de uma busca exaustiva, mas buscando fundamentação sólida em exemplos de outros trabalhos por uma pesquisa ilustrativa, apresenta-se a análise sob o enfoque dos temas relevantes para a delimitação do problema, contextualização da necessidade, embasamento de aplicação e continuidade de solução.

1.3.1 Investimentos em projetos – problema de decisão multicritério

A análise de projetos em diferentes âmbitos é tema de interesse por sua natureza complexa e resultados esperados, que variam da resolução de problemas de origem técnica à consolidação de gestão tecnológica de uma empresa ou governo. Um portfólio de aplicação de recursos coerentes e aderentes a objetivos estratégicos mostra-se fundamental para posicionamento de vanguarda de desenvolvimento e vantagem competitiva.

Em uma aplicação prática, Tavana (2003) estrutura uma metodologia para seleção de projetos no Centro Espacial Kennedy (KSC – *Kennedy Spacial Center*), Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*), para sistematizar o processo. O autor propõe o modelo *Consensual-ranking organization-support system* (CROSS) para auxiliar os agentes de decisão em um processo sequencial, racional e analítico, incorporando características do AHP, entropia e *maximize-agreement heuristic* (MAH). Como benefício potencial para a ferramenta, é apontada sua capacidade de examinar quão sensitivo são os fatores de sucesso de projeto para mudanças no *portfolio* e um alerta é feito para precaução em seu uso, assim como em outros modelos de suporte a decisão, para as limitações das estimativas subjetivas.

Um algoritmo de otimização por enxame de partículas (*particle swarm optimization*) é apresentado por Rabanni, Bajestani e Khoshkhou (2010) no âmbito de seleção de projetos voltado a três objetivos: maximizar o benefício total, minimizando custos e risco total. O algoritmo é comparado com outra técnica de computação natural, o algoritmo da computação evolutiva denominado *Strength Pareto Evolutionary Algorithm II* (SPEAII), obtendo resultados relevantes.

“É essencial em investir em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) alvos em oposição a uma variedade de ideias...” (Yi, 2008) e “..., como selecionar o projeto candidato ideal que possa fazer uso ótimo dos recursos limitados disponíveis é uma pergunta difícil” (Wang, Zhang e Kuang, 2010), ressaltam que a tarefa de escolha de portfólio de projetos é de natureza multi-objetivo e conflitante. Um trabalho teórico de aplicação de técnica *fuzzy* para atender a demanda é desenvolvido por Yi (2008), enquanto que Wang *et al.* (2010) propõem o uso de *Multi-Attribute Utility Theory* (MAUT) dinâmico.

1.3.2 AHP – Análise Hierárquica do Processo

O método do AHP mostra-se flexível para aplicação em inúmeras áreas que envolvem a análise de múltiplos critérios (Saaty, 1989). Para Thomaz (2006) a metodologia encontrou aplicação na avaliação e seleção pelo departamento de Recursos Humanos de funcionários para uma empresa do ramo petrolífero. O trabalho traz uma comparação adaptada entre o AHP e outras abordagens de decisão por múltiplos critérios, validando a escolha pelos aspectos de transparência, facilidade e tempo de análise (Guglielmetti, Marins e Salomon, 2003; Pamplona e Montevechi, 1999).

O AHP se mostra eficaz na resolução de conflitos e análise de composição da estrutura hierárquica, como demonstrado por Huang *et al.* (2006) em estudo para o Departamento de Saúde de Taiwan. A equipe multidisciplinar aplica a técnica para composição de consenso quanto aos padrões de pagamentos por programas de seguro de saúde.

A aplicação da Análise Hierárquica do Processo na identificação de causas de falhas de sistemas elétricos é apresentada por Araújo, Lemos e Pretto (2010), apropriando-se da observação de campo para demonstrar a capacidade do método em determinar a causa mais provável. Os autores demonstram a aplicação de escolha de alternativa e ressaltam a qualificação da informação como apoio a políticas da empresa.

1.3.3 Sistemas híbridos para análise de decisão multicritério

Em outra linha, aplicações de técnicas de computação natural buscam em suas inspirações biológicas a solução para problemas de decisão voltados a múltiplos critérios. A literatura traz a aplicação de diferentes modelos e algoritmos, com especial destaque para os sistemas *fuzzy*, cuja capacidade de modelar imprecisão é fundamental nos seus sucessos. Os métodos propostos por Laarhoven e Pedrycz (1983) e Boender (1989) são uma extensão ao método original, propondo o uso de números e escalas *fuzzy* para a comparação para a par e exige posterior *defuzzificação* para a obtenção do resultado final

A aplicação do *fuzzy-AHP* como inicialmente proposto para avaliar e selecionar um fornecedor em um modelo de cadeia de suprimentos para uma companhia do sul da Índia é usado por Haw e Kannan (2006) com sucesso. Enquanto Srdjevic e Medeiros (2008) aplicam o *fuzzy-AHP* modificado agregando os critérios e subcritérios em uma única matriz de avaliação para seleção da melhor estratégia de longo prazo no gerenciamento de águas na Bacia do Rio Jacuípe.

Em Kordi (2008) é comparada a aplicação do método AHP clássico e do *fuzzy-AHP* para tomada de decisão multicritério, usando sistemas de informação geográfica como base e analisando o caso de escolha de localidade de uma represa na Costa Rica. É apresentada a aplicação das duas variantes ao mesmo problema e definido que o AHP clássico apresenta em sua estrutura intrínseca tratamento para certo grau de incerteza, mas que os resultados diferem a medida que este grau aumenta. O autor ressalta também a dificuldade em lidar intuitivamente com números *fuzzy* em oposição a números *crisp*.

Andrade (2009) apresentou em sua dissertação a associação da técnica do AHP à lógica paraconsistente para tratar de forma natural as inconsistências de julgamento e ampliar a gama de aplicação da técnica. Segundo o autor, o uso da lógica paraconsistente fornece um tratamento sistemático para incongruências nos pesos dos critérios criando um sistema especialista eficaz na resolução de problemas complexos. O sistema foi utilizado no auxílio de planejamento para sistemas de distribuição da Companhia Energética de Brasília.

Kubat e Burce (2010) empregam a combinação de duas técnicas da Computação Natural, sistemas *fuzzy* e algoritmos genéticos, ao AHP no auxílio da seleção de fornecedores para a indústria em estruturas complexas como a possibilidade de mais de um fornecedor para produtos intermediários. Uma metodologia de otimização multiobjetivo incorporando a um algoritmo evolucionário um sistema de inferência *fuzzy* é proposta por Shen *et al.* (2010) para contornar as limitações da dominância de Pareto. Simulações mostraram a eficiência do método e trouxeram e redução da carga cognitiva exigida do agente de decisão.

Propondo uma extensão do método de entropia linguística (Zeleny, 1982), Lee, Chang e Chen (2011) estabelecem uma metodologia de síntese multi-nível *fuzzy* para a seleção de um Sistema Integrado de Gestão Empresarial (SIGE) avaliado por uma hierarquia de índices. Em outro trabalho, Fuqing, Yi e Dongmei (2005) discutem a aplicação de algoritmos genéticos na redução do espaço de busca em um problema de seleção de parceiros para empresas virtuais, demonstrando seu potencial na resolução o objetivo também em gerenciamento de subprojetos.

Por fim, Na busca por metodologias mais eficientes e completas, que atendam as demandas dos problemas *Multicriteria Decision Analysis* (MCDA), ou Análise de Decisão Multicritério, houve a hibridização dos modelos clássicos com métodos de computação natural. Como exemplo, Dhouib (2013) desenvolveu um sistema híbrido *fuzzy*-MACBETH para avaliar a engenharia reversa no desenvolvimento de pneus para a indústria automobilística através dos resíduos de reciclagem para minimizar a geração destes.

1.3.4 Sistema de seleção de projetos de P&D baseado em AHP

Por fim, buscou-se entender o problema a ser resolvido como estudo de caso: seleção de projetos de pesquisa e desenvolvimento no escopo de uma concessionária de energia elétrica (Levandoski, 2009).

Levandoski (2009) propôs o uso do método de Análise Hierárquica do Processo para a montagem de portfólio e priorização de projetos de pesquisa e

desenvolvimento para uma concessionária de energia elétrica operante no Brasil. Em seu estudo, o autor fez o delineamento dos critérios e sub-critérios de interesse para a avaliação das propostas, segundo fatores de relevância para a situação, como legislação, custo, viabilidade técnica e aderência aos objetivos estratégicos da empresa.

Ele estabeleceu também uma proposta de fluxograma de processo de tramitação para a submissão, avaliação, feedback e escolha dos projetos de P&D, apresentando o fluxo de informação entre a empresa e os proponentes, além da relação lógica de distribuição dos elementos de avaliação entre os diversos grupos decisores. Foi apresentada a metodologia em sua capacidade máxima de agregar informações e apresentar o problema de forma igual para todas as partes interessadas no processo.

Por fim, o autor comparou a aplicação do método proposto com o atual aplicado pela concessionária para validar junto a gerência a sistematização e facilidades introduzidas pelo AHP. Foi concluído que o sistema não é fixo, mas flexível para acomodar mudanças e ser aplicado em outros âmbitos. É sugerida a extensão do trabalho com técnicas de computação natural, no qual se apresenta a proposta desta dissertação.

2 ANÁLISE DE DECISÃO POR MÚLTIPLOS CRITÉRIOS

A análise de decisão por múltiplos critérios, ou MCDA (*Multiple Criteria Decision Analysis*), é um ramo da pesquisa operacional que se ocupa do auxílio a tomada de decisão quando esta avalia alternativas contra múltiplos padrões de interesse e diferentes objetivos, por vezes conflitantes entre si.

Os problemas do tipo MCDA são comuns ao processo de decisão humano e presentes no cotidiano, mesmo que nem sempre tão facilmente modeláveis e por vezes identificados como tal. Decisões do tipo que carro comprar ou qual roupa vestir são exemplos individuais de necessidade de escolha que devem satisfazer, em certo grau, diferentes critérios para que seja considerada a opção adequada. Preço, *design*, espaço, acessórios para o carro; finalidade, conforto, local para as roupas são alguns exemplos de avaliações a serem realizadas para as múltiplas alternativas do mercado ou do guarda-roupa.

Quando considerados, tais exemplos podem parecer triviais e de fácil resolução. Entretanto, extrapolando-se o conceito para eventos de decisão em que as consequências são substâncias, afetam diversas pessoas, não podem ser facilmente remediáveis e os impactos são de longo prazo; uma sistemática estruturada e métodos de auxílio são fundamentais no processo.

Problemas encontrados nas áreas corporativa e de administração pública, tais como onde abrir uma nova loja, priorização de projetos, seleção de arquiteturas de telecomunicação, entre outros, são exemplos nos quais inúmeras alternativas devem ser avaliadas, geralmente por mais de um decisor ou grupo de decisores dentro de vários critérios para que se chegue a escolha adequada.

São identificadas quatro problemáticas de aplicação para os métodos de decisão multicritério: escolha, classificação, posicionamento ou *ranking* e descrição por Roy (1996) *apud* Belton (2002), às quais os autores acrescentaram: projeto e montagem de portfólio.

Os métodos de decisão multicritério operam na estruturação de problemas naturalmente complexos que estão sujeitos a possibilidades subjetivas e probabilidades desconhecidas e buscam auxiliar na tomada de decisão integrando a

mensuração quantitativa com valoração qualitativa; explicitando e gerenciando a subjetividade (Belton, 2002).

Diferentes modelos foram propostos para o auxílio a tomada de decisão voltados a multicritérios e sua aplicabilidade varia do problema a ser resolvido à simplicidade de sua aplicação. Podem ser citados:

- Análise Hierárquica do Processo (*Analytic Hierarchy Process, AHP*), (Saaty e Vargas, 1989);
- TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*), proposto por (Hwang e Yoon, 1981);
- ELECTRE (*Élimination et Choix Traduisant La Réalité*), proposto por (Bernard, 1968);
- MACBETH (*Measuring Atractiveness by a Categorical Evaluation Technique*), proposto por (Bana Costa e Vansnick, 1999).

Além dos modelos específicos, outras técnicas, especialmente da computação natural, já foram aplicadas a esta categoria de problemas. Podemos citar o uso de algoritmos genéticos na seleção de parceiros para empresas virtuais (Fuqing, Yi, Dongmei, 2005); pesquisas em algoritmos evolutivos e usos de sistemas *fuzzy* para gerenciamento de escopo (Parreiras, 2006).

2.1 DESCRIÇÃO DO MÉTODO AHP

Dentre os métodos citados, um que ganhou destaque foi a Análise Hierárquica do Processo ou AHP, produto do trabalho desenvolvido pelo professor Thomas Lorie Saaty (1989), escolhido como método clássico a ser aplicado nesta dissertação. Procurou-se manter o AHP pela fácil compreensão e aplicação, por ter sido validado previamente com resultados satisfatórios por Levandoski (2009) e pela capacidade de associação aos sistemas *fuzzy*. O AHP e sua generalização o *Analytic Network Process* (ANP), ou Análise em Redes, foram temas de diversos livros do autor e cooperadores (Pittsburgh, 2013).

A técnica propõe a resolução de problemas de análise por múltiplos critérios através da simulação do processo de conceptualização humano, aplicando essencialmente três princípios: identidade e decomposição, discriminação e julgamentos comparativos e síntese de Saaty e Kearns (1985):

Ele organiza o raciocínio separando o problema em partes constituintes menores e guia os agentes de decisão através de uma série de julgamentos em comparações par-a-par (que estão documentadas e podem ser reexaminadas) para expressar a força ou intensidade de impacto relativos dos elementos da hierarquia.

A identidade e decomposição visa a simplificação de um problema ou decisão estabelecendo a construção de uma hierarquia representativa da situação. Nesta hierarquia, o nível mais alto representa o objeto final, enquanto que níveis intermediários são os critérios e subcritérios contra os quais são avaliadas as alternativas, que compreendem o último nível.

Uma vez estabelecida a hierarquia, cabe aos agentes de decisão discriminar e julgar comparativamente elementos dois a dois segundo uma propriedade em comum. É possível desta forma estabelecer comparação entre aspectos qualitativos e quantitativos indistintamente e de forma consistente, uma vez que os critérios podem ser tangíveis ou intangíveis, mensuráveis ou não.

Por fim, o método se ocupa de derivar escalas de importância relativa para cada elemento em correspondência a um elemento de nível imediatamente superior. Fundamentado em um processo de ponderação aditiva, o AHP fornece não a decisão “correta”, mas aquela que melhor atende aos objetivos dos agentes de decisão segundo a compreensão atual do problema.

O AHP se destaca entre outros métodos pela facilidade de uso e habilidade de manusear julgamentos inconsistentes – característica fundamental em sua escolha na abordagem do sistema de análise de projetos tema da tese, oferecendo a todos os envolvidos no processo a mesma abordagem para o problema e facilitando a interação entre os agentes de decisão e analistas. Suas etapas de aplicação remontam ao exposto nos parágrafos anteriores e são detalhadas nas subseções a seguir.

2.1.1 Estruturação do problema – identidade e decomposição

A primeira etapa de aplicação do AHP constitui na formulação do problema de decisão na forma de uma hierarquia de modo que este possa ser analisado. Uma hierarquia em sua definição mais básica é a estruturação estratificada de elementos em que todos, exceto o mais alto, esteja subordinado a um ou mais elementos.

Existem diversos tipos de hierarquia, que podem facilmente ser representadas por grafos. A hierarquia de interesse e necessária para a aplicação do método clássico é a de dominância, embora a generalização do AHP possa tratar de outros tipos como as holarquias (dominância com retroalimentação) ou hierarquias modulares (Saaty e Kearns, 1985).

É através dessa abordagem que se aumenta a compreensão sobre o problema como um todo, seu contexto e relações entre os decisores, assim como é possível decompor e analisar as informações das quais se dispõe sobre o objetivo, focando-se em um elemento por vez a medida que se progrida na hierarquia.

É fundamental que sejam os participantes do processo de decisão os responsáveis por formularem a constituição da hierarquia por diálogo e debate, para capturar todos os aspectos de relevância, mesmo que neste momento um consenso total sobre cada critério não seja necessário, uma vez que as preferências serão estabelecidas na etapa seguinte. Entretanto, é crucial que o nível, ou níveis, dependendo do tamanho da hierarquia, mais altos sejam acordados uma vez que são estes que irão influenciar nas estruturas subsequentes.

Para aplicação do método, o primeiro ou mais alto nível da hierarquia é a representação da decisão e foco do processo. Em seguida, define-se em uma camada inferior os critérios cuja avaliação irão resultar no objetivo. Se necessário, os critérios podem ser novamente divididos, resultando em uma terceira estratificação, e de forma subsequente o mesmo pode acontecer com todos os elementos da hierarquia. Vale ressaltar que o desdobramento deve vir da necessidade de determinar dimensões de análise significativas para determinado elemento e que todos os que deste derivam estão a ele subordinados, estabelecendo uma relação de lógica no processo de decomposição. É possível que determinados ramos de uma hierarquia apresentem maiores níveis de

aprofundamento que outros. Por fim, as alternativas sobre as quais serão proferidas julgamento representam o último nível. Um exemplo pode ser observado na Figura 2.1.

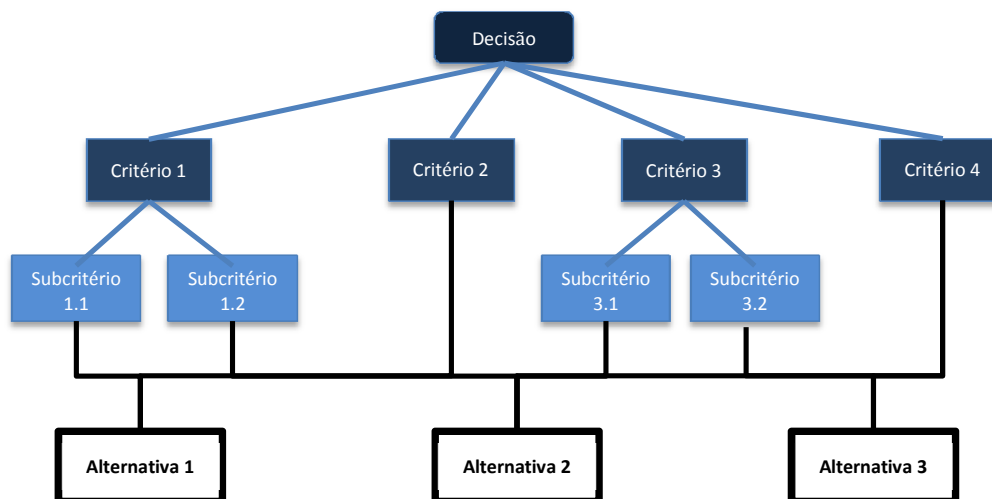


Figura 2.1 Uma hierarquia dominante para aplicação do AHP.

Não existe um limite para o número de critérios ou subcritérios e é possível a composição de quantos níveis forem convenientes para evidenciar todos os aspectos que irão influenciar a decisão. Não existe também a necessidade de simetria entre os critérios e a hierarquia usualmente apresenta uma forma de árvore ou pirâmide.

2.1.2 Comparação – discriminação e julgamentos

No AHP, os elementos de um mesmo nível são comparados par-a-par em favor de uma característica em comum (elemento superior da hierarquia). Tal julgamento pode ser traduzido e representado matematicamente através de uma matriz quadrada.

O intuito do método é a comparação do peso ou intensidade de cada componente em relação a outro segundo o objetivo em comum, através da razão da importância associada a cada um. Para facilitar a visualização do exposto,

considerando $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ como um conjunto de n elementos quaisquer e $w_1, w_2, w_3, \dots, w_n$ os pesos ou intensidades associadas a cada um, a Figura 2.2 é a representação da matriz associada.

	A_1	A_2	$A_3 \dots A_n$
A_1	$\frac{w_1}{w_1}$	$\frac{w_1}{w_2}$	$\frac{w_1}{w_3} \dots \frac{w_1}{w_n}$
A_2	$\frac{w_2}{w_1}$	$\frac{w_2}{w_2}$	$\frac{w_2}{w_3} \dots \frac{w_2}{w_n}$
A_3	$\frac{w_3}{w_1}$	$\frac{w_3}{w_2}$	$\frac{w_3}{w_3} \dots \frac{w_3}{w_n}$
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
A_n	$\frac{w_n}{w_1}$	$\frac{w_n}{w_2}$	$\frac{w_n}{w_3} \dots \frac{w_n}{w_n}$

Esta é uma linha – um “vetor” – da matriz (linha 1). Seus elementos são chamados de componentes.

Esta é uma coluna da matriz (coluna 2). Também é conhecido como um “vetor” da matriz.

Figura 2.2 - Matriz genérica de comparações no AHP.

Fonte: Adaptado de Saaty e Kearns (1985).

Na estruturação hierárquica do AHP, uma matriz deve ser constituída para firmar comparação de cada conjunto de elementos de um nível em favor de um elemento em comum que seja superior a estes. Desta forma, é possível inferir que existirá uma matriz para os critérios em função do objetivo, uma matriz para os subcritérios em função de cada critérios e assim por diante. Tomando como exemplo a Figura 2.1 deve-se construir as comparações das Tabela 2.1, Tabela 2.2 e Tabela 2.3. A matriz de comparação das alternativas em relação a um critério é apresentada de forma genérica, e deve-se entender que existe uma matriz desta para cada elemento da hierarquia superior de modo a apresentar julgamento de preferência das alternativas em relação a determinado critério. Neste exemplo, deveriam ser apresentadas as matrizes de ponderação das alternativas em relação aos subcritérios 1.1, 1.2, 3.1 e 3.2 e aos critérios 2 e 4.

Considerando-se que as comparações são pareadas, a reciprocidade da matriz se dá pelo fato da inversão da razão dos pesos associados a cada elemento, o que também resulta na matriz principal com valores unitários. É notório que não se

faz a necessidade de estabelecer todas as relações, uma vez que parte delas são derivadas pela simetria e o número de julgamentos necessários é dado pela equação (1), onde m é a quantidade de elementos comparados, tal que

$$\frac{m(m-1)}{2} \quad (1)$$

Tabela 2.1 – Matriz de comparação de critérios para hierarquia da Figura 2.1

..	Critério 1	Critério 2	Critério 3	Critério 4
Critério 1	$a_{11} = \left(\frac{w_1}{w_1}\right) = 1$	$a_{12} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)$	$a_{13} = \left(\frac{w_1}{w_3}\right)$	$a_{14} = \left(\frac{w_1}{w_4}\right)$
Critério 2	$a_{21} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right) = \frac{1}{a_{12}}$	$a_{22} = \left(\frac{w_2}{w_2}\right) = 1$	$a_{23} = \left(\frac{w_2}{w_3}\right)$	$a_{24} = \left(\frac{w_2}{w_4}\right)$
Critério 3	$a_{31} = \left(\frac{w_3}{w_1}\right) = \frac{1}{a_{13}}$	$a_{32} = \left(\frac{w_3}{w_2}\right) = \frac{1}{a_{23}}$	$a_{33} = \left(\frac{w_3}{w_3}\right) = 1$	$a_{34} = \left(\frac{w_3}{w_4}\right)$
Critério 4	$a_{41} = \left(\frac{w_4}{w_1}\right) = \frac{1}{a_{14}}$	$a_{42} = \left(\frac{w_4}{w_2}\right) = \frac{1}{a_{24}}$	$a_{43} = \left(\frac{w_4}{w_3}\right) = \frac{1}{a_{34}}$	$a_{44} = \left(\frac{w_4}{w_4}\right) = 1$

Tabela 2.2 – Matriz de comparação de subcritérios para hierarquia da Figura 2.1

..	Subcritério 1.1	Subcritério 1.2
Subcritério 1.1	1	a_{12}
Subcritério 1.2	$\frac{1}{a_{12}}$	1

Nota: Deve-se construir matriz semelhante para comparação dos subcritérios referentes ao critério

Tabela 2.3 – Matriz de comparação de alternativas para hierarquia da Figura 2.1

..	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Alternativa 1	1	$a_{12} = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)$	$a_{13} = \left(\frac{w_1}{w_3}\right)$
Alternativa 2	$a_{21} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right) = \frac{1}{a_{12}}$	1	$a_{23} = \left(\frac{w_2}{w_3}\right)$
Alternativa 3	$a_{31} = \left(\frac{w_3}{w_1}\right) = \frac{1}{a_{13}}$	$a_{32} = \left(\frac{w_3}{w_2}\right) = \frac{1}{a_{23}}$	$a_{33} 1$

Nota: Matriz refere-se à comparação das alternativas frente a um elemento de extrato superior da hierarquia. Devem-se construir matrizes semelhantes para as alternativas segundo todos os elementos a que estão ligadas, sejam critérios ou subcritérios.

Entende-se que os pesos ou intensidade podem ser facilmente obtidos quando associados a medidas quantitativas, como massa, custo. Entretanto, a percepção de dimensões abstratas também é parte integrante do processo decisório e para tal o método compreende a avaliação linguística dos critérios associados a uma escala numérica. Saaty (1977) experimentou diversas escalas (3, 5, 7, 9 e 20) e validou teoricamente e em aplicações práticas que a que melhor se adaptada ao método é a escala de 9, não limitando, entretanto, o uso de outras. A avaliação de critérios intangíveis pode ser feita de acordo com a Tabela 2.4 para responder os seguintes questionamentos (Saaty e Kearns, 1985):

- Qual é mais importante ou de maior impacto?
- Qual é mais provável de acontecer?
- Qual é mais preferível?

Similarmente aos pesos que podem ser fisicamente quantificados, a similaridade na matriz de preferências é obtida pela inversa do grau escolhido. Por exemplo, seja uma pedra A de massa 3 quilogramas e uma pedra B de massa 1 quilograma, afirma-se que a pedra A é três vezes mais pesada que a B, e que esta é

possui um terço da massa daquela ($\frac{w_A}{w_B} = \frac{3}{1}$; $\frac{w_A}{w_B} = \frac{1}{3}$). Analogamente, seja o custo A moderadamente mais importante que o tamanho B na compra de um carro, este é moderadamente menos importante que aquele ($\frac{w_A}{w_B} = \frac{3}{1}$; $\frac{w_A}{w_B} = \frac{1}{3}$). Fica claro a noção cognitiva permite a comparação de grandezas que não poderiam de outra forma equivaler-se.

Tabela 2.4 - Escala de valores de preferência

Valores Numéricos	Preferência
9	Importância absoluta
7	Importância muito grande ou demonstrada
5	Importância grande ou essencial
3	Importância pequena de uma sobre a outra
1	Mesma importância
2,4,6,8	Valores intermediários

2.1.3 Classificação de prioridades – síntese

A etapa final consiste na identificação da força, valor, desejo ou probabilidade relativa de cada alternativa pela síntese das prioridades locais e globais.

A síntese de prioridades locais é feita pelo cálculo e normalização do conjunto do conjunto de autovetores para cada matriz. É possível entretanto utilizar aproximações para estas operações com resultados satisfatórios. “Usando métodos de aproximação existe o perigo de mudar a ordem de ranking... Não cabe aos

matemáticos sofisticados “melhorar” o que os indivíduos podem querer ou não mudar” (Saaty, Kearns, 1985).

Uma abordagem consiste na multiplicação dos elementos em linha e extração da r -ésima raiz do resultado, onde r é o número de parcelas. Em seguida, normaliza-se o resultado dividindo-se cada resultado de linha pela soma de todas as raízes. Outra aproximação possível é normalizar as colunas (dividir cada elemento pela soma da coluna) e em sequência obter a média de cada linha.

Para obtenção da prioridade global, multiplica-se a prioridade local pela correspondente do critério acima e soma-se para cada elemento em um nível de acordo com o critério que a afeta. Realiza-se a síntese para cada nível iniciando pelo das alternativas e progredindo até o topo. É possível visualizar esta operação mais facilmente em um exemplo numérico como o da seção 2.2.

2.1.3.1 Índice de consistência

Um dos benefícios do método e etapa intermediária importante na validação dos julgamentos é o cálculo do índice de consistência ou coerência das prioridades locais. Pela propriedade de reciprocidade da matriz, dados três índices i, j e k , para se ter consistência deve ser verdadeiro $a_{ij} \cdot a_{jk} = a_{ik}$.

Sejam as dimensões abstratas ou mensuráveis, a consistência perfeita da matriz de julgamentos é improvável, especialmente quando muitos critérios ou alternativas são consideradas. Um desvio considerável pode e provavelmente levará a resultados inconsistentes, o que pode ser indesejável em alguns problemas ou menos prioritário em outros. Mesmo esta análise deve levar em conta o contexto do problema.

O cálculo do índice de consistência (IC) é realizado pela fórmula da equação (2), onde $\lambda_{máx}$ é o maior autovalor e t é a ordem da matriz, tal que:

$$IC = \frac{\lambda_{máx} - t}{t - 1} \quad (2)$$

O autovalor máximo pode ser aproximado pela soma da multiplicação elemento a elemento do vetor de soma das colunas da matriz pelo vetor de prioridades normalizado. Dividindo-se o valor obtido pela consistência média de matrizes de mesma ordem randômicas construídas com base na escala de nove, cujos valores podem ser observados na

, obtêm-se taxa de consistência (TC).

Tabela 2.5 - Índices de coerência médios

Elementos	IC médio
1	0,00
2	0,00
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56
14	1,57
15	1,59

Em padrão inicial quando o método foi proposto por Saaty (1977), valores aceitáveis eram menores que 10%. Entretanto, tal assertiva foi criticada por diversos autores especialmente pela dificuldade em obtê-los em aplicações reais. (Karapetrovic e Rosenbloom, 1998), não havendo portanto consenso definitivo sobre o ideal.

Padovani (2007) indica que IC até 20% são toleráveis dentro em alguns problemas, mas valores abaixo de 10% ainda são preferíveis. Segundo Andrade (2009), altos índices de consistência advém de diversos fatores, e cita entre eles: erros de digitação, não familiaridade com o problema, equívocos de interpretação e falhas de comunicação quando o processo envolve mais de uma pessoa.

2.1.4 Limitações

Apesar de encontrar diversas aplicações práticas, ser tecnicamente viável e de fácil uso, o método do AHP apresenta algumas limitações e críticas em sua estruturação.

Schmidt (1995) *apud* Levandoski (2009) apresentou alguns pontos em que a metodologia de Saaty pode apresentar restrições, geralmente advindas do mau uso do método, de uso ou que especial consideração é devida para não gerar resultados tendenciosos ou ilusórios. Para alguns destes itens, existe a possibilidade de contorno pela hibridização com outras técnicas ou variações em sua aplicação.

Pode-se citar:

- Análise criteriosa para identificação e caracterização das propriedades constituintes dos níveis de hierarquia que afetam o desempenho do objetivo mais alto, assegurando que os critérios camada sejam independentes ou suficientemente diferentes.
- Subjetividade nas matrizes de preferência e cuidado no consenso de priorização dos níveis mais altos da hierarquia, uma vez que estes governam as mesma,
- Requer procedimento para estruturar questionário de perguntas e preferências.

- Custo computacional sofre aumento sensível quanto maior o número de alternativas, o que também requer maior trabalho para os decisores (lembrando que são necessárias $2^n - 1$ comparações, onde n é o número de alternativas).

Outra crítica que o AHP sofre é um fenômeno conhecido como reversão de prioridades (*rank reversal*). Um dos axiomas da teoria de decisão afirma que quando uma nova alternativa é inserida no processo de avaliação, a prioridade das antigas não deve se alterar; o ocorrido é conhecido como reversão de prioridades.

Em sua formulação original o AHP permite que ocorra a reversão de prioridades quando se inserem alternativas idênticas ou similares. Em uma revisão, Forman (1993) apresentou uma nova forma de síntese para o AHP, a síntese ideal, em que a adição ou remoção de uma alternativa “irrelevante” não afetasse as prioridades já estabelecidas.

A aplicação de AHP com síntese ideal ou distributiva deve variar de acordo com a percepção do comportamento da decisão segundo o esperado para o problema em questão. Ou seja, deve-se avaliar se a reversão de prioridades é desejada ou não quando alternativas entram ou saem da hierarquia.

2.2 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO AHP

A metodologia do AHP pode ser aplicada a uma infinita gama de problemas que envolvam a tomada de decisão. Para exemplificar o método e utilizando a escala proposta de 1 a 9 para avaliação dos critérios, o método será aplicado na escolha de uma máquina para produção de peças intermediárias em uma linha de manufatura.

Uma empresa dispendo de capital de investimento e tendo a direção de comprar uma máquina para instalar uma segunda linha intermediária de produção para eliminação de gargalo realizou uma pesquisa de mercado e dois fornecedores competem em estágio final de avaliação. A decisão envolve a escolha do maquinário que se adeque dentro das expectativas de custo e volume de produção.

Frente a um problema de escolha, os decisores optam pela avaliação do objetivo sob o foco dos seguintes critérios: custo de aquisição, custo de manutenção periódica, disponibilidade nominal, consumo de energia e volume de produção. Em uma caracterização mais profunda do problema, os critérios poderiam ser subdivididos para maior clareza de raciocínio, como por exemplo, extrair os custos de amortização e gastos com peça e pessoal. Entretanto, a fim de simplificação será mantida apenas um nível intermediário de avaliação e a hierarquia do problema pode ser descrita pela Figura 2.3.

Em sequência deve-se iniciar a etapa ponderação e julgamento dos pesos de importância de cada elemento, tanto para os critérios em relação ao objetivo final como para as alternativas em relação a cada critério. Dadas as especificações dos fabricantes, testes em linha piloto com as máquinas e conhecimento do problema, chega-se às matrizes de avaliação para os critérios e para as alternativas. A primeira representada pela Tabela 2.6, onde *CA* é o custo de aquisição, *CM* é o custo de manutenção, *CE* é o custo de energia, *DN* é a disponibilidade nominal e *VP* é o volume de produção; as matrizes das alternativas estão dispostas na Tabela 2.7.

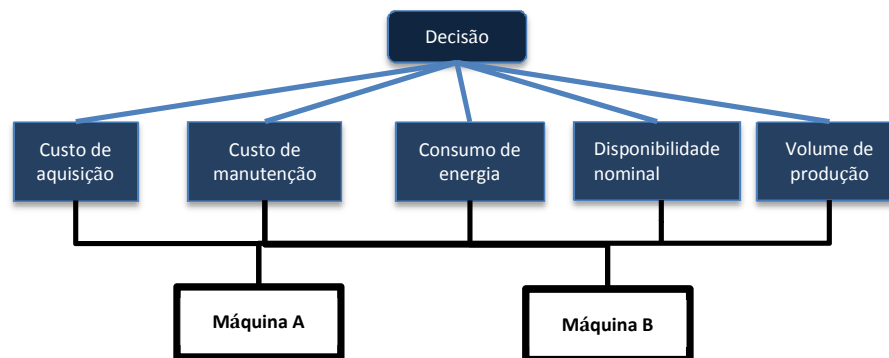


Figura 2.3 - Hierarquia de escolha máquina para linha de produção

Uma vez estabelecidas as preferências, dá-se início a etapa final do processo: a síntese de prioridades locais e globais, procedimento fundamental que permite analisar e ponderar a subjetividade das avaliações e elementos quantitativos.

Tabela 2.6 - Matriz de avaliação dos critérios/objetivo do problema da máquina para linha de produção.

..	CA	CM	CE	DN	VP
CA	1	$\frac{1}{5}$	3	1	1
CM	5	1	5	3	3
CE	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
DN	1	$\frac{1}{3}$	3	1	$\frac{1}{3}$
VP	1	$\frac{1}{3}$	5	3	1

Tabela 2.7 - Matrizes de avaliação alternativas/critérios do problema da máquina para linha de produção

..	Máquina A	Máquina B
Custo de aquisição		
Máquina A	1	7
Máquina B	$\frac{1}{7}$	1
Custo de manutenção		
Máquina A	1	$\frac{1}{9}$
Máquina B	9	1
Consumo de energia		
Máquina A	1	5
Máquina B	$\frac{1}{5}$	1
Disponibilidade nominal		
Máquina A	1	7
Máquina B	$\frac{1}{7}$	1
Volume de produção		
Máquina A	1	$\frac{1}{5}$
Máquina B	5	1

Para o cálculo das prioridades locais, é necessária normalização das matrizes para o estabelecimento do vetor de prioridades normalizado associado. Foram apresentados dois métodos de para aproximação de cálculo dos autovetores e optou-se por utilizar a soma de colunas com posterior média de linha.

Considerando a matriz de prioridades da Tabela 2.6, pode-se construir a matriz normalizada da Tabela 2.8, seguindo a mesma convenção de nomenclatura, e seguindo o processo escolhido obtêm-se o vetor normalizado da Tabela 2.9. Já a Tabela 2.10 traz o resultado para as outras matrizes de decisão.

Tabela 2.8 – Matriz normalizada para cálculo do vetor de prioridades critérios/objetivo do problema da máquina para linha de produção.

..	CA	CM	CE	DN	VP
CA	0,120	0,097	0,176	0,120	0,181
CM	0,600	0,484	0,294	0,360	0,542
CE	0,040	0,097	0,059	0,040	0,036
DN	0,120	0,161	0,176	0,120	0,060
VP	0,120	0,161	0,294	0,360	0,181

Tabela 2.9 - Vetor normalizado da matriz de comparação paritária dos critérios do problema da máquina para linha de produção.

Critério	Peso
Custo de aquisição	0,139
Custo de manutenção	0,456
Consumo de energia	0,054
Disponibilidade nominal	0,128
Volume de produção	0,223

Tabela 2.10 - Vetores normalizados para as matrizes de alternativas/critérios do problema da máquina para linha de produção.

Máquina A	Máquina B
Critério: Custo de aquisição	
0,875	0,125
Critério: Custo de manutenção	
0,100	0,900
Critério: Consumo de energia	
0,833	0,167
Critério: Disponibilidade nominal	
0,875	0,125
Critério: Volume de produção	
0,167	0,833

Etapa importante nesta avaliação é o cálculo do índice de coerência verificar a consistência dos julgamentos e possível necessidade de reavaliação. Para este cálculo, foi apresentada uma alternativa de aproximação na seção 2.1.3.1, que será utilizado para cada matriz de prioridades.

Dados a matriz expandida da análise dos critérios em relação ao objetivo principal e o vetor normalizado de prioridades associado, é possível obter o índice e a taxa de coerência segundo o explicitado pela Figura 2.4. Para as comparações de alternativas frente aos critérios não é necessária a avaliação do índice de coerência uma vez que apenas dois destinos são julgados, de forma tal que o julgamento é de medida de preferência direta de uma sobre a outra e portanto sempre consistente. Faz-se uso da medida quando mais de duas alternativas são ponderadas e existe a possibilidade de inconsistência nas comparações.

O valor de 7,2% obtido está abaixo do limiar usual de 10%, o que caracteriza a consistência no estabelecimento de prioridades e que o resultado estará alinhado com as expectativas dos decisores e refletem seus valores e preferências de escolha.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = (0,139 \cdot 8,333) + (0,456 \cdot 2,067) + (0,054 \cdot 17,000) + (0,128 \cdot 8,333) + (0,223 \cdot 5,533)$$

$$\lambda_{m\acute{a}x} = 5,322$$

$$IC = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1}$$

$$IC = \frac{5,322 - 5}{5 - 1} = \mathbf{0,080}$$

$$TC = \frac{IC}{1,12} = \frac{0,080}{1,12} = \mathbf{0,072}$$

$$TC = \mathbf{7,2\%}$$

Figura 2.4 - Cálculo do índice e taxa de coerência da matriz critérios/objetivo do problema de viagem.

A última etapa da metodologia compreende o *ranking* das alternativas pela síntese global. O procedimento de cálculo se dá pela soma da multiplicação do peso de prioridade para determinada alternativa em relação a um critério pelo peso relativo deste critério no vetor normalizado da comparação paritária de critérios. Essencialmente é uma composição de ponderações dentro da hierarquia.

Por exemplo, para a máquina A obtêm-se a prioridade global pela multiplicação exemplificada na Figura 2.5, considerando que o vetor normalizado de prioridades para a matriz de critérios é dado como na Tabela 2.9.

Realizando-se os cálculos no exemplo dado, obtêm-se por fim o seguinte ranking:

- Máquina A: **0,361**;
- Máquina B: **0,639**.

Fica evidente a superioridade da máquina B em relação à máquina A no processo de escolha. Analisando os dados de entrada, é possível inferir que o julgamento do custo de manutenção, qualitativamente superior para a máquina B, foi responsável pela decisão, mesmo a outra alternativa apresentando-se superior em outros critérios.

$$P(A) = (0,139 \cdot 0,875) + (0,456 \cdot 0,1) + (0,054 \cdot 0,833) + (0,128 \cdot 0,875) + (0,223 \cdot 0,167)$$

$$P(A) = 0.361$$

Figura 2.5 – Exemplo de cálculo da prioridade global para a máquina A no problema da linha de produção.

3 SISTEMAS FUZZY

A tomada de decisão é um processo que lida com informações e a percepção que um indivíduo tem destas, justificada pelo seus sistemas de valores e interação com outros e com o meio. Pela natureza subjetiva do processo, é inerente a este a incerteza e imprecisão. Para tratar deste aspecto não quantitativo, Zadeh (1965) introduziu em seu trabalho seminal um paralelo da teoria de conjuntos, batizada de *fuzzy sets*, ou conjuntos *fuzzy*. Para clara distinção, a teoria de conjuntos como ramo da matemática conhecido até então será denominada clássica. Apesar da tradução para português do termo como “nebuloso” ou “difuso”, preferiu-se manter o vocábulo em inglês, sem prejuízo do entendimento do trabalho, por considerar-se o termo original largamente difundido.

Em sequência e como paralelo a teoria das probabilidades, Zadeh (1978) propôs a teoria das possibilidades, que em conjunto com o primeiro estudo forneceu as bases para o desenvolvimento da lógica *fuzzy* e dos sistemas *fuzzy*, de ampla aplicação em inúmeras áreas com destaque para o controle de processos complexos (Arkov, Kulikov e Breikin, 1999; Lu et al, 2000; Haber et al, 2011).

Um sistema *fuzzy* é tal que deriva de um sistema de inferência baseado em regras linguísticas e que usa de números e da lógica *fuzzy* como ferramentas matemáticas para derivar ações sobre um determinado padrão de entrada. É um tópico da CN com abordagem simbólica que busca assemelhar-se ao processo cognitivo de decisão humano baseado na imprecisão das informações avaliadas.

Por suas características, diversos estudos enfocam a abordagem *fuzzy* pura ou hibridizada com modelo clássica, como, por exemplo, o *fuzzy-AHP*, ou outras técnicas de computação natural, como as redes neurais e sistemas *neuro-fuzzy*, para a resolução de problemas MCDA (*Multi-Criteria Decision Analysis*) (Dote e Kano, 1992; Mon, 1995; Shahri, Evans e Naghdy, 1996; Tsai, 2008; Sadiq, 2009; Barin, 2010; Calabrese e Costa, 2013; Chou, Sun e Yen, 2012;).

3.1 CONCEITOS

Os sistemas *fuzzy* tem por base matemática os conceitos de conjuntos *fuzzy*, operações associadas, da lógica e da inferência. Esta seção trata de apresentar estes desenvolvimentos e de sua agregação em um sistema completo como este se apresenta nas aplicações de engenharia.

3.1.1 Conjuntos *fuzzy*

Os conjuntos *fuzzy* foram introduzidos como uma generalização da até então conhecida e agora nomeada teoria clássica dos conjuntos, de modo tal que esta pode ser considerada uma especificidade da outra.

Na teoria clássica, têm-se a pertinência de elementos como um conceito definido de modo absoluto e dual em 0 ou 1, sim ou não: diz-se que um elemento pertence ou não a determinado conjunto segundo uma função característica. Em termos matemáticos, dado um conjunto A , um elemento x e f_A como a função característica, diz-se que:

$$f_A(x) \begin{cases} 1, & \text{se e somente se } x \in A \\ 0, & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases} \quad (3)$$

Os conjuntos *fuzzy* definem a pertinência não apenas em valores absolutos mas de modo tal que esta possa assumir valores infinitos dentro de um reticulado, que é uma estrutura matemática parcialmente ordenada possuindo um único superior e um único inferior. No estudo dos conjuntos *fuzzy* é suficiente e conveniente restringir-se no intervalo unitário $[0,1]$ (Zadeh, 1965). Define-se desta maneira um grau de pertinência de um elemento x a um conjunto A pela sua função de pertinência μ_A , de modo tal que $\mu_A(x) \in [0,1]$ e o conjunto A pode ser expresso como um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{\mu_A(x) \mid x\} \quad (4)$$

É possível entender um conjunto clássico, denominado *crisp*, como um conjunto *fuzzy* cuja função de pertinência pode assumir valores de 0 ou 1 apenas, ou seja, $\mu_A = \{0,1\}$. A Figura 3.1 exemplifica a diferenciação entre os dois conceitos para um conjunto exemplo do que seria considerado a temperatura normal de um ser humano.

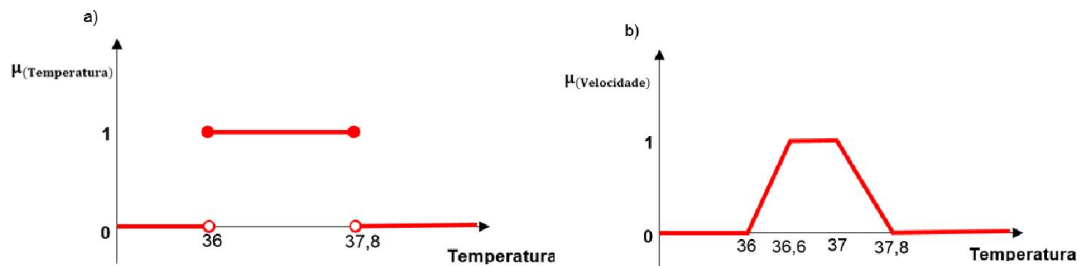


Figura 3.1 - a) Função de pertinência *crisp*. b) Função de pertinência *fuzzy*.

Na teoria dos conjuntos *fuzzy* é possível ainda associar os seguintes conceitos: suporte, núcleo, cardinalidade e cortes de nível (cortes- α).

Denotado por Su , o conjunto de suporte é aquele que agrupa todos os elementos compatíveis em qualquer grau com o conjunto *fuzzy*. Enquanto que o núcleo, representado por Nu , são os elementos considerados totalmente compatíveis. Pode-se expressar em notação matemática os conjuntos de suporte e núcleo de um conjunto *fuzzy* A em um universo X , tal como:

$$Su(A) = \{x \in X / \mu_A(x) > 0\} \quad (5)$$

$$Nu(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\} \quad (6)$$

Os conjuntos *fuzzy* podem ser definidos em um universo X discreto ou contínuo e sua cardinalidade expressa por:

- Em um universo contínuo

$$|A| = \int_{x \in X} \mu_A(x) \quad (7)$$

- Em um universo discreto

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \quad (8)$$

Por fim, pode-se aproximar a representação de um conjunto *crisp* em um conjunto *fuzzy* pelo estabelecimento de cortes de nível ou cortes- α que extrai todos os elementos do conjunto que possuam pertinência maior ou igual ao limite de corte ou número α . Em termos matemáticos:

$$A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (9)$$

3.1.2 Conjuntos *fuzzy* e variáveis linguísticas

As funções de pertinência de um conjunto *fuzzy* podem assumir diferentes formas de acordo com o a função de pertinência que define sua composição. Tais funções podem ser analíticas para o conjunto inteiro ou descontínuas, compostas por segmentos de retas ou arcos, sendo as mais utilizadas, na prática, as formas triangulares ou trapezoidais por exemplo. Um conjunto *fuzzy* que possua apenas com um único elemento com total compatibilidade, ou seja, existe um único elemento x_n tal que $\mu_A(x_n) = 1$, é denominado *singleton*.

As variáveis linguísticas são a expressão de conceitos em sentenças ou palavras de linguagem natural ou artificial ao qual é possível associar conjuntos

fuzzy com diferentes funções de pertinência (Zadeh, 1975). É uma tentativa de modelar um conceito pela percepção e intuição humanas de determinada grandeza expressa de modo não quantitativo.

Tais variáveis podem ser definidas por uma quádrupla $(V, X, T(V), M)$, onde V é o nome da variável, X é o universo de discurso em que se estabelece o conceito, $T(V)$ ou termos linguísticos são os valores possíveis de serem associados e M uma função que associa conjuntos *fuzzy* a cada termo. A forma dos conjuntos associados pode variar de entre preceptores e faz parte da captação de experiência do modelo.

Como exemplo, seja considerada a variável *posição relativa*, definida para o afastamento entre dois objetos. Um sujeito pode classificar tal conceito entre os termos: *muito perto*, *perto*, *adequada*, *longe* e *muito longe*. No caso da posição, pode-se estabelecer o universo de discurso na medida da distância entre os objetivos de interesse em metros. A cada um dos termos, pode-se associar um conjunto *fuzzy* que manifeste a impressão do especialista, como expresso na Figura 3.2, onde μ é a pertinência de um elemento ao conjunto e m é a distância em metros entre os objetos de interesse.

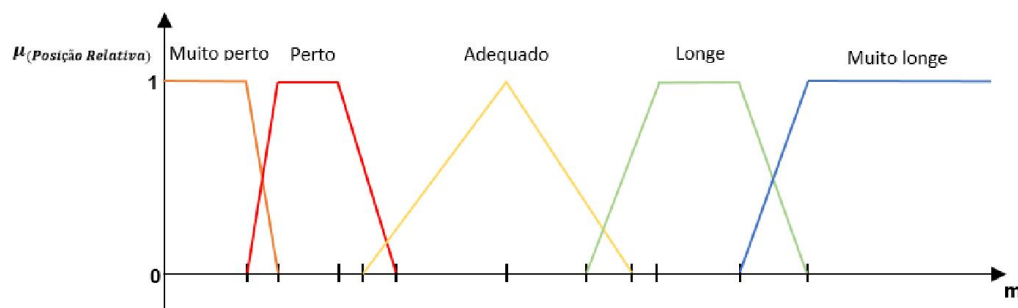


Figura 3.2 - Conjuntos *fuzzy* associados aos termos da variável **posição relativa**.

3.1.3 “e” e “ou” *fuzzy*

Assim como para os conjuntos *crisp*, definem-se operações sobre os conjuntos *fuzzy*. Os dois conceitos mais relevantes para os sistemas de interesse são a união e interseção, mas também são apresentados a determinação do conjunto vazio, complemento e subconjunto.

Para que um conjunto *fuzzy* seja considerado vazio, é necessário que sua função de pertinência seja 0 para todos os elementos do universo de discurso, ou seja, $\mu_A(x) = 0$ para todo $x \in X$. Um subconjunto *fuzzy* B existe quando sua função de pertinência é menor ou igual à função de pertinência de A sobre o universo X, ou seja, $B \subset A$, se $\mu_b(x) \leq \mu_A(x)$. O complemento de um conjunto, representado por A' , é usualmente definido como:

$$\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in A \quad (10)$$

Na teoria dos conjuntos clássicos, a união de dois conjuntos é definido como um novo conjunto que consiste de todos os elementos que pertencem aos originais. Ou seja, dados os conjuntos A e B, a união U destes, representada por $U = A \cup B$, tem a função característica dada por $f_U = f_A \vee f_B$, onde \vee é o operador binário **ou**. O conjunto intersecção I, denota por $I = A \cap B$, é formado por todos os elementos que simultaneamente pertencem ao conjunto A e ao conjunto B, e tem função característica dada por $f_U = f_A \wedge f_B$, onde \wedge é o operador binário **e**.

Para os conjuntos *fuzzy* as operações de união e intersecção são implementadas por operadores conhecidos como t-normas e t-conormas, respectivamente (Menger, 1942; Schweizer e Sklar, 1961). Tais operadores devem satisfazer as propriedades de comutatividade, associatividade, monotonicidade e possuir um elemento neutro, sendo a unidade para as t-normas e o elemento nulo para as t-conormas.

Definindo as operações binárias t-norma como $T: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$ e t-conorma $\perp: [0,1]^2 \rightarrow [0,1]$, têm-se $\forall a, b, c, d \in [0,1]$:

- Comutatividade:

$$T(a, b) = T(b, a) \quad (11)$$

$$\perp(a, b) = \perp(b, a) \quad (12)$$

- Associatividade:

$$T(a, T(a, c)) = T(T(a, b), c) \quad (13)$$

$$\perp(a, \perp(a, c)) = \perp(\perp(a, b), c) \quad (14)$$

- Monotonicidade:

$$T(a, b) \leq T(c, d), \quad \text{se } a \leq c \text{ e } b \leq d \quad (15)$$

$$\perp(a, b) \leq \perp(b, a), \quad \text{se } a \leq c \text{ e } b \leq d \quad (16)$$

- Elemento neutro:

- t-norma: $T(a, 1) = a$ (17)

- t-conorma: $\perp(a, 0) = a$ (18)

Zadeh (1965) propôs inicialmente os operadores *min* e *max* para representar a intersecção e união dos conjuntos *fuzzy*, e estes ainda são utilizados.

3.1.4 Relações e inferência

Assim como na teoria clássica, pode-se estabelecer relações entre os conjuntos *fuzzy* de modo tal que generalizadas estabelecem um grau de associação entre elementos ao invés de apenas a presença ou ausência da interação. Para universos infinitos é útil a representação analítica de uma relação, enquanto que em universos finitos é possível expressar a relação entre dois conjuntos de forma tabular, em uma *matriz relacional*.

Pode-se exemplificar as relações *crisp* e *fuzzy* admitindo-se por exemplo um conceito de “temperatura ideal” em graus Celsius que poderia ser usado em um sistema de controle ambiente para uma casa com dois moradores. A Tabela 3.1 mostra as relações entre os conjuntos $A = \{15, 17, 21\}$ e $B = \{\text{João, Maria}\}$.

Tabela 3.1 – Relações *crisp* e *fuzzy*.

..	15°	17°	21°
Relação <i>crisp</i>			
João	1	1	0
Maria	0	1	1
Relação <i>fuzzy</i>			
João	0,54	1	0,35
Maria	0	0,85	0,61

Importante para os sistemas de inferência é a composição de relações que pode ser definido para dois conjuntos *crisp* quando se consideram as relações $R:A \rightarrow B$ e $S:B \rightarrow C$ como $R \circ S = \{(a, c) \mid (\exists b \in B)(aRb \wedge bSc)\}$. Para os conjuntos *fuzzy* tal regra pode ser generalizada como (Zadeh, 1965):

$$\mu_{R \circ S}(a, c) = \sup[\mu_R(a, b) T \mu_S(b, c)] \quad (19)$$

onde T é uma t-norma e \sup o operador *supremum*, que em um universo finito pode ser expresso pelo operador *max*.

As inferências são regras do tipo **Se** <premissa> **Então** <conclusão> e podem ser representados pelos operados de inferência, que estabelecem uma relação entre a premissa e a conclusão. Usualmente as t-normas são usadas para expressar a inferência, representando a operação $I(a,b)$.

Também denominadas de declaração condicional *fuzzy* as implicações destes conjuntos são geralmente denominadas apenas como **regras linguísticas**.

3.1.5 Sistemas de inferência *fuzzy*

A teoria dos conjuntos *fuzzy* pode ser aplicada a uma infinidade de modelos e diferentes problemas que requerem o tratamento impreciso de informações, especialmente de variáveis linguísticas. Se destaca a criação de sistemas de inferência, muito utilizado na engenharia de controle não linear. (Yager e Filev, 1994).

Um sistema de inferência *fuzzy* é tal que aceita como entrada números *crisp*, realiza um processamento de inferência *fuzzy* através de uma base de regras linguísticas, e devolve ao meio externo uma saída processada, também *crisp*. O diagrama da Figura 3.3 ilustra um modelo genérico clássico, que pode ser variado de acordo com projeto ou método de inferência utilizado. É possível identificar os elementos que compõe o sistema: *fuzzificação*, base de regras e *defuzzificação*.

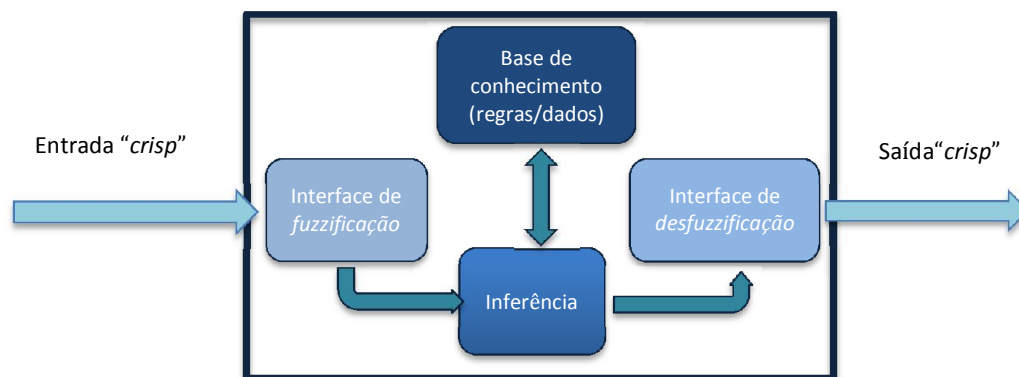


Figura 3.3 - Diagrama genérico de um sistema de inferência *fuzzy*.

A base de regras ou conhecimento é composta por uma série de regras linguísticas, podendo ser fornecida por especialistas do processo ou ajustado por algoritmos de inteligência artificial. Tais regras existem no formato de inferência, como descrito na seção anterior, e caracterizam a relação de combinação das entradas do sistema (premissa) com as saídas (conclusão). As premissas das regras são geralmente ligadas pelos operadores de união ou intersecção definidos para os conjuntos *fuzzy*. É na base de conhecimento que também se as definições das funções de pertinência dos termos *fuzzy*.

A interface de *fuzzificação* é onde ocorre o mapeamento das entradas *crisp* para identificação das regras que serão ativadas de acordo com a definição das variáveis linguísticas. É nesta etapa que ocorre é detectado com qual grau de pertinência os termos de uma variável irão operar de acordo com o estabelecido na base de regras. Por exemplo, dado uma variável *velocidade* com termos *baixa*, *adequada* e *alta*, uma entrada *crisp* de 55 km/h, a Figura 3.4 descreva as funções de pertinência e mapeamento *fuzzy*.

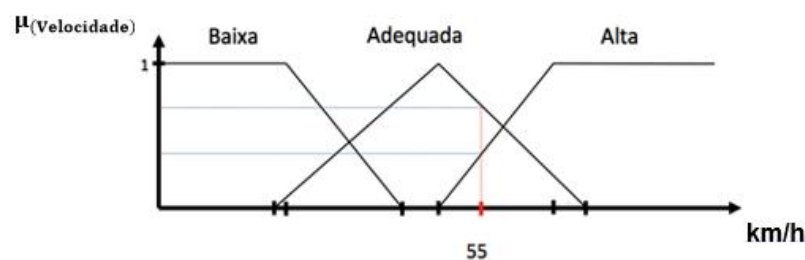


Figura 3.4 - Mapeamento da entrada velocidade em um sistema *fuzzy*.

O componente de inferência é responsável por identificar as regras que serão ativadas de acordo com as entradas, ou premissas, que sejam afetadas em algum grau de pertinência pelo mapeamento da interface inicial. É nesta etapa que ocorrem as operações sobre os conjuntos e o estabelecimento das relações para obtenção de saídas *fuzzy* pela combinação do resultado das regras de inferência, usualmente através de um t-conorma.

Por fim, a etapa de *defuzzificação* trata de traduzir a(s) saída(s) obtida(s) como pertinência dos termos das variáveis de saída em números *crisp* para devolver ao processo um resultado *preciso*. Alguns métodos clássicos de *defuzzificação* são pelo centro de gravidade, que estabelece o número *crisp* como representando o centróide da figura geométrica resultante da combinação dos conjuntos *fuzzy* de saída, e média dos máximos, ponto médio entre os valores que tem maior grau de pertinência inferido pelas regras. Os modelos clássicos de sistema de inferência seguem o exposto, e como exemplo cita-se o modelo de Mamdani (1974) e Larsen (1980).

Outros modelos de inferência desobrigam a necessidade da etapa de *defuzzificação*, como o modelo Takagi-Sugeno (Takagi e Sugeno, 1985), que estabelece o consequente das regras linguísticas como uma função linear das variáveis dos antecedentes. As saídas obtidas são ponderadas para obtenção do polinômio final. Tais modelos são geralmente referenciados pelo grau da saída, em que, por exemplo, um modelo Takagi-Sugeno de ordem zero fornece uma saída constante.

4 METODOLOGIA

A metodologia para a análise de investimentos em P&D almeja fornecer, através da hibridização da teoria de conjuntos *fuzzy* com o método de Análise Hierárquica do Processo, subsídios para auxílio na montagem de portfólio de prioridades com o intuito de fornecer flexibilidade para aceitação de projetos que se adequem a atual filosofia da empresa.

A associação das duas técnicas foi realizada de maneira extrínseca de modo tal que o modelo é composto essencialmente por dois processos de análise acoplados sequencialmente e que atuam de maneira individual. O primeiro compõem-se de um sistema de inferência *fuzzy* com o objetivo de coletar as entradas de avaliação dos diversos subcritérios e inferir valores de ponderação para cada um dos critérios principais. A segunda etapa consiste na montagem e solução automática das matrizes de comparação paritária de cada alternativa frente à matriz de pesos fornecida pela empresa avaliadora com final síntese de prioridades relativas para cada projeto.

Um diagrama de descrição da solução pode ser observado na Figura 4.1. Na parte esquerda é representada a etapa da técnica de computação natural que aceita como entrada os julgamentos dos diferentes decisores para cada um dos subcritérios considerados e fornece um valor sintetizado para cada um dos critérios por projeto. A saída deste processamento é a entrada para o segundo passo que consiste na comparação automática através do AHP das diferentes propostas frente às notas recebidas e produz por fim uma listagem de priorização segundo o entendimento dos pesos atribuídos a cada critério.

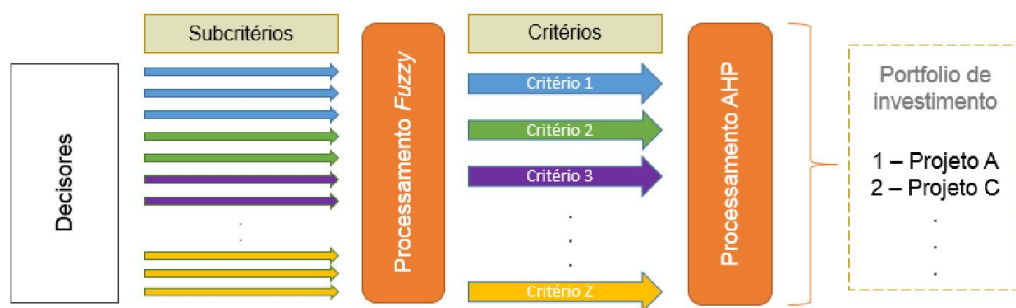


Figura 4.1 - Diagrama da metodologia a investimentos em P&D.

O uso do sistema como introduzido busca através da etapa inicial apreciar a análise qualitativa dos envolvidos no processo de tomada de decisão e diminuir a dimensão do problema a ser tratado pelo método AHP. A segunda etapa consiste em facilitar a comparação pareada de alternativas tornando-a automática e usar do poder de síntese da técnica para priorizar as alternativas segundo os múltiplos critérios estabelecidos como relevantes na análise de um projeto de P&D no âmbito do setor elétrico.

A execução do projeto é apresentada como a extensão do proposto por Levandoski (2009) e passou inicialmente por uma reavaliação dos critérios propostos assim como o mapeamento de critérios e agentes de tomada de decisão. Em seguida, foi gerada uma ferramenta no aplicativo MATLAB (MathWorks, 2014) que implementa os dois blocos do sistema híbrido juntamente com uma interface de entrada de dados, usada para a validação da proposta. As seções a seguir, descrevem em maiores detalhes cada etapa do desenvolvimento.

4.1 CRITÉRIOS E AGENTES DE DECISÃO

A avaliação de um projeto de P&D e decisão de prioridade de investimentos não são problemas que visam a maximização, minimização ou suficiência de um objetivo específico. As propostas devem ser avaliadas sob diferentes óticas e contemplar mais de um aspecto que indica a sua viabilidade técnica e financeira, aderência à missão e negócio de uma empresa, assim como os benefícios decorrentes e riscos envolvidos em sua execução.

As dimensões a serem avaliadas devem portanto ser suficientes para que permitam a devida ponderação quantitativa ou qualitativa sobre as menores variações de valoração que uma proposta pode apresentar frente a outra; mantidas ao mínimo necessário para não introduzir demasiada complexidade ou redundância; e significantes para explorar ao máximo o potencial de retorno.

Junto ao instituto de pesquisa LACTEC e à empresa concessionária que participou no estudo de caso, os critérios principais que se mostram relevantes para

a avaliação e priorização das alternativas de investimento que visam atender às metas e objetivos da empresa são cinco: estratégico, aplicabilidade, custo, técnico/científico e capacidade técnica. Cada um dos critérios foi expandido para subcritérios cuja associação comporiam a nota final em determinada dimensão.

O critério estratégico refere-se a adequação da proposta frente ao planejamento da empresa que visa cumprir a missão que lhe foi estabelecida frente a avaliação de clientes e mercado, ao processos internos e ao aprendizado e crescimento. A aplicabilidade estabelece os parâmetros de abrangência e benefícios esperados. O custo retrata o empenho em investimento necessária e a relação de capital e resultados. A avaliação técnico/científica abrange a visão descritiva e analítica da proposta de projeto pela composição apresentada e entregas planejadas. Por fim, o critério da capacidade técnica examina a equipe que se propõe à realização.

O Quadro 4.1 apresenta de forma gráfica o agrupamento e relação entre critérios e subcritérios, que totalizam 35 ao total.

Ainda neste contexto, deve-se estabelecer os agentes de decisão, ou aqueles que tem voz ativa de julgamento e participam em maior ou menor grau do processo. A definição das atribuições de papéis e a relação com os critérios avaliados é de extrema importância para a transparência do procedimento. Pode-se entender um agente como um único indivíduo, um grupo de indivíduos, uma ou várias entidades que influenciam no processo e que podem ou não deter o poder de decisão ou veto.

No problema de avaliação de investimentos em P&D, entende-se que as dimensões devem ser avaliadas por indivíduos devidamente qualificados e com comprovada experiência na área. Três agentes foram identificados como fundamentais para garantir a abrangência do objetivo: gerente de projeto (GP), gerente da área (GA) e comissão de avaliação técnica (CAT).

O primeiro agente é responsável por analisar primariamente a aplicabilidade de uma proposta e seu alinhamento de custo. Deve ser um profissional capacitado tecnicamente e na área de execução a ser considerada para se capaz de apreciar a inserção e impacto do projeto nas operações da empresa.

Quadro 4.1 - Critérios e subcritérios revisados de decisão de investimentos em P&D.

Critério	Subcritério (nível 1)	Subcritério (nível 2)	
Estratégico	Clientes e Mercado	Garantir a satisfação dos clientes	
		Garantir a expansão do mercado de forma rentável e sustentável	
	Financeira	Maximizar o valor para o acionista de forma sustentável	
	Processos Internos	Aumentar a eficiência operacional	
		Investir na renovação e na modernização dos ativos	
		Atender os requisitos de qualidade definidos pelo órgão regulador	
		Ser excelente em gestão de OPEX (<i>Operational Expenditure</i>) e CAPEX (<i>Capital Expenditure</i>)	
		Garantir o equilíbrio financeiro da tarifa	
	Aprendizado e crescimento	Prover soluções inovadoras e eficazes em tecnologias	
		Promover excelência em segurança do trabalho	
		Preservar o conhecimento da companhia	
		Ter pessoas capacitadas, motivadas, comprometidas e felizes	
		Expandir P&D+I com agregação de valor	
	Aplicabilidade	-	Contexto
		-	Benefícios esperados
-		Resultados	
-		Abrangência	
Custo	-	Razoabilidade	
	-	Viabilidade econômica	
Capacidade Técnica	-	Capacitação profissional	
	-	Equipe	
	Capacitação tecnológica	Produção técnico-científica	
		Apoio e infraestrutura	
		Propriedade intelectual	
-	Impactos socioambientais		
Técnico / Científico	Visão descritiva	Preâmbulo	
		Descrição/Motivação	
		Objetivos	
		Justificativas	
		Metodologia	
		Trabalhos correlatos e bibliografia	
	Visão Analítica	Estado da arte	
		Desafio (Complexidade)	
		Avanço	
		Produto	

Nota: alguns critérios não possuem subdivisão em primeiro nível, ausência notada pelo (-).

O gerente da área deve focar o exame na adequação da proposição ao mapa estratégico da empresa e sua aderência ao entendimento da missão a que a organização se propõe, assim como à obrigação financeira necessária. À comissão de avaliação técnica cabe a análise dos aspectos técnicos de execução de um projeto e da capacitação da equipe de execução.

A metodologia baseia-se na atribuição de avaliação dos subcritérios para cada agente segundo as características de cada agente e suas atribuições e área de atuação. Entende-se que existe a necessidade e valia de que determinados subcritérios sejam revistos por mais de um agente devido à importância e pertinência de cada função introduzindo portanto a sobreposição de ponderações. Onde tal efeito ocorre, escolheu-se dar a cada agente o mesmo poder de influência e a média aritmética das notas atribuídas aos subcritérios.

Vale ressaltar que o acima exposto é uma primeira reavaliação de metodologia segundo os desdobramentos da continuidade de pesquisa e que tais critérios e agentes não devem ser imutáveis. O projeto busca introduzir uma base de referência que pode e deve ser adequada a necessidade de diferentes empresas, sobre a qual é possível aplicar a solução híbrida de um sistema *fuzzy* com o AHP. O Quadro 4.2 traz o mapeamento entre os agentes de decisão e os critérios atribuídos para sua avaliação.

4.2 SOLUÇÃO HÍBRIDA DE INVESTIMENTOS EM P&D

Uma vez definidos os critérios, subcritérios e agentes que tomariam parte no processo de decisão, deram-se sequência a modelagem e implementação das partes constituintes da solução híbrida. Como explicado anteriormente, foi escolhida uma associação extrínseca constituindo-se de um processamento *fuzzy* e um posterior processamento AHP para fornecer os resultados finais.

Quadro 4.2 - Mapeamento de agentes de decisão e critérios e subcritérios.

Critério	Subcritério (nível 2)	GP	GA	CAT
Estratégico	Garantir a satisfação dos clientes		X	
	Garantir a expansão do mercado de forma rentável e sustentável		X	
	Maximizar o valor para o acionista de forma sustentável		X	
	Aumentar a eficiência operacional		X	
	Investir na renovação e na modernização dos ativos		X	
	Atender os requisitos de qualidade definidos pelo órgão regulador		X	
	Ser excelente em gestão de OPEX e CAPEX		X	
	Garantir o equilíbrio financeiro da tarifa		X	
	Prover soluções inovadoras e eficazes em tecnologias		X	
	Promover excelência em segurança do trabalho		X	
	Preservar o conhecimento da companhia		X	
	Ter pessoas capacitadas, motivadas, comprometidas e felizes		X	
	Expandir P&D+I com agregação de valor			
Aplicabilidade	Contexto	X		X
	Abrangência	X		X
	Resultados	X		X
	Benefícios esperados	X		X
Custo	Viabilidade econômica	X	X	X
	Razoabilidade	X	X	X
Capacidade Técnica	Capacitação profissional			X
	Equipe			X
	Produção técnico-científica			X
	Apoio e infraestrutura			X
	Propriedade intelectual			X
	Impactos socioambientais			X
Técnico / Científico	Preâmbulo			X
	Descrição/Motivação	X	X	X
	Objetivos	X	X	X
	Justificativas	X	X	X
	Metodologia			X
	Trabalhos correlatos e bibliografia			X
	Estado da arte			X
	Desafio (Complexidade)			X
	Avanço			X
	Produto			X

Nota: GP – Gerente de Projeto, GA – Gerente da Area, CAT – Comissão de Avaliação Técnica

A etapa do projeto foi feita de forma interativa, propondo-se uma solução inicial para as definições de conjuntos *fuzzy* e matrizes para posterior ajustes na etapa de validação. Para implementação foi escolhida a ferramenta MATLAB, que oferece plataforma para desenvolvimento de aplicações em uma linguagem de alto nível assim como criação de interface gráfica e funções e a disponibilização de modelos pré-programados.

4.2.1 Processamento *fuzzy*

A etapa inicial do sistema, como descrito na Figura 4.2, visa a aquisição dos dados de julgamento dos agentes de decisão e simplificação no número de critérios para o posterior processamento dentro do AHP. Para tanto, utilizou-se de técnicas de lógica *fuzzy* para capturar os julgamentos dos 35 subcritérios segundo o mapeamento da tabela Quadro 4.2 e convergir como saída uma nota consistente de para cada um dos 5 critérios considerados de um projeto.

Por ser a lógica *fuzzy* um sistema MISO (*Multiple Input, Single Output*), ou de múltiplas entradas e uma saída, o objetivo se deu pela associação de múltiplas instâncias operando em paralelo para realizar a devida redução. Observando a Figura 4.4 e entendendo a relação das entradas e saídas desejadas segundo o mapeamento de avaliação, percebe-se que existem 11 sistemas de inferência *fuzzy* operando individualmente para realizar a síntese de avaliações, representados pelas junções. Cada um dos sistemas segue o modelo exposto na seção 3.1.5.

4.2.1.1 Fuzzificação

O primeiro passo na aplicação do sistema de inferência consiste na tradução dos dados de entrada para o devido mapeamento nas funções de pertinência que definem o conjunto *fuzzy* de entrada utilizado.



Figura 4.2 – Etapa de processamento *fuzzy* dos critérios.

Segundo o manual da ANEEL (ANEEL. P&D e Eficiência Energética – Pesquisa e Desenvolvimento – Regulamentação, 2014) as notas possíveis de se atribuir a um projeto de P&D no âmbito do setor elétrico variam de 1 a 5, com associação respectiva aos conceitos de inadequado, insuficiente, aceitável, bom e excelente. Baseado na premissa do órgão regulador, definiu-se os conjuntos a serem utilizados com variável linguística nos mesmos termos e funções de pertinência iniciais tais que se assemelham a trapézios e triângulos, como descrito na Figura 4.3. Os perfis foram escolhidos em função da experiência do autor. Desta forma, o processo de fuzzificação se dá pelo mapeamento dos valores de avaliação dentro dos conjuntos estabelecidos, podendo uma mesma nota corresponder em maior ou menor grau a mais de um conceito.

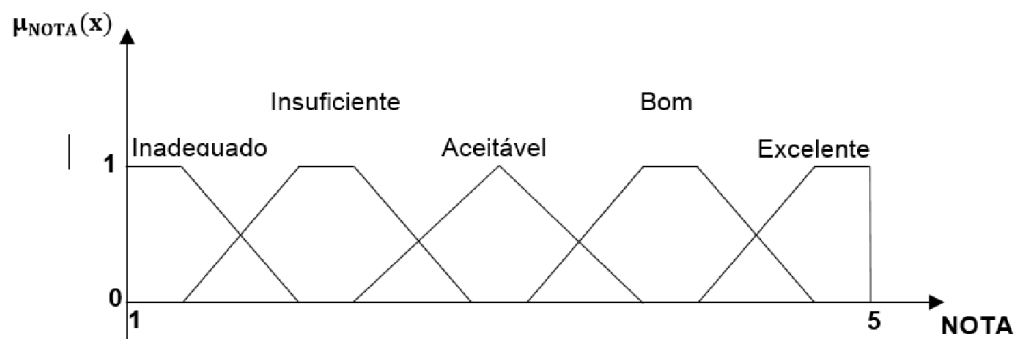


Figura 4.3 – Conjunto *fuzzy* e funções de pertinência iniciais.

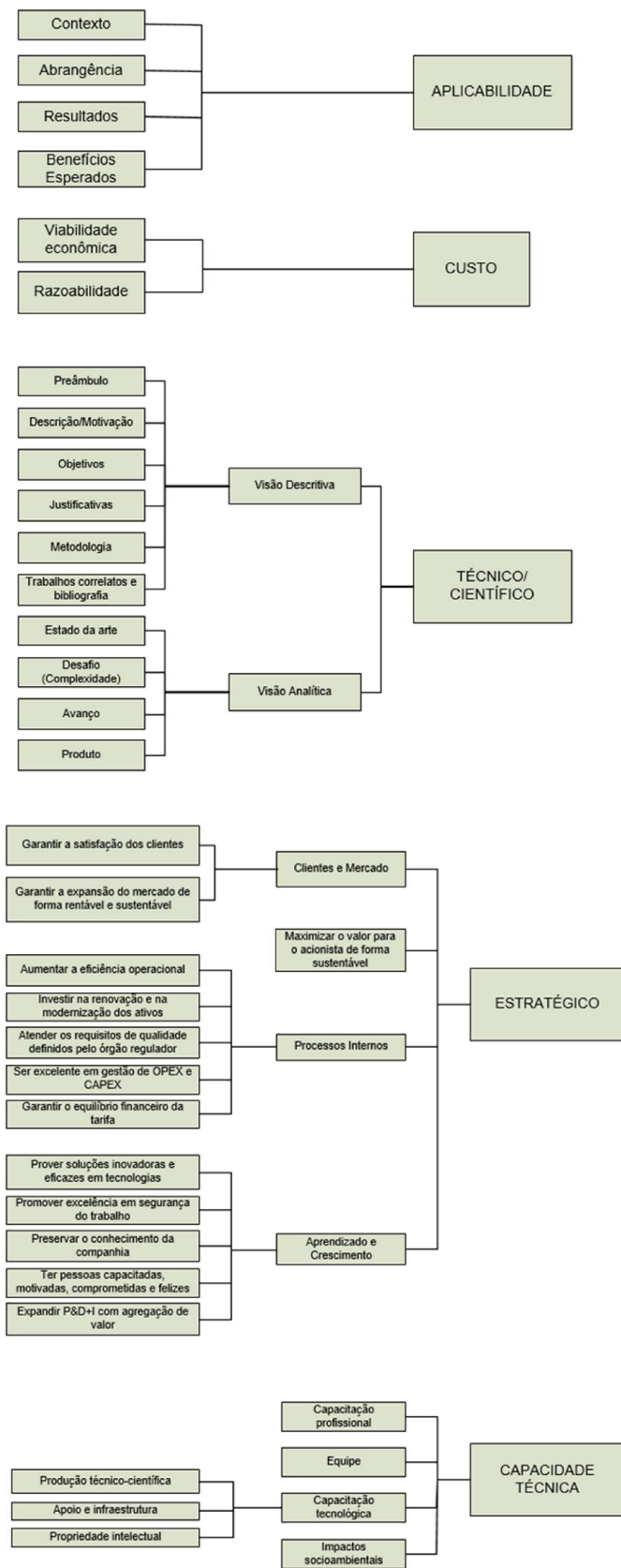


Figura 4.4 – Relação de critérios para processamento *fuzzy*.

4.2.1.1 Base de conhecimento e inferência

A segunda etapa do sistema de inferência consiste no estabelecimento das relações para obtenção das saídas pela combinação dos resultados das regras de inferência sobre a base de conhecimento ou regras pré-estabelecidas.

No sistema de avaliação de P&D a base de regras foi criada automaticamente pela combinação de todas as possíveis entradas de um sistema considerando os valores inteiros e tendo como saída a média aritmética arredondada dos conceitos combinados, como exemplificado na equação (20), onde p representa o número de entradas.

$$Saída \approx \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p Entrada_i \quad (20)$$

Considerando os possíveis sistemas do problema em questão, foram definidas as bases de regras para conjuntos de 2, 3, 4, 5 e 6 entradas com tamanhos de 25 a 10756 regras, respectivamente. Para o sistema de inferência, o modelo utilizado foi o de Mamdani (1974), e pela combinação de entradas, é possível que mais de uma regra seja ativada, resultando em mais de um conjunto *fuzzy* de saída que é avaliado pela última etapa do processo de processamento *fuzzy*. Novamente usou-se da experiência do autor para fazer a escolha. Outros modelos não foram testados nesta pesquisa.

A avaliação das regras ativadas pela combinação das entradas e aplicação do operador de inferência escolhidos constituem o maior esforço computacional do processo.

4.2.1.2 Defuzzificação

Passo final do procedimento inicial, a defuzzificação é responsável pela conversão dos conjuntos ativados durante a inferência para uma saída em um valor escalar que representa a síntese das entradas. Dentre os métodos disponíveis, o empregado no desenvolvimento foi o centro de gravidade ou centroide. Lembrando que o consequente do sistema de inferência obtido pela composição das regras é uma variável *fuzzy*, o escalar correspondente é calculado como a média ponderada das regiões, representando centro de gravidade da figura geométrica constituída pela intersecção dos conjuntos ativados, conforme apresentado na Figura 4.5, para o caso de estudo.

Em termos numéricos, pode-se considerar o exemplo da Figura 4.6, em que se apresenta a combinação de regras para uma variável Velocidade, considerando os termos *Baixo*, *Médio* e *Alto*. Dados os resultados das regras de inferência com as pertinências expostas, pode-se calcular o centro de gravidade C de forma amostrada conforme a equação (21), onde o é o número de quantização da saída, d_t representa o valor da variável no intervalo de quantização t e $\mu_A(d_t)$ o grau de pertinência. Nos casos em que as funções de pertinência são contínuas, o somatório traduz-se em uma integral no intervalo considerado.

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{\sum_{t=0}^o d_t \cdot \mu_A(d_t)}{\sum_{t=0}^o \mu_A(d_t)} \\
 &= \frac{(10 + 20 + 30 + 40) \cdot 0,2 + (50 + 60 + 70) \cdot 0,25 + (80 + 90 + 100) \cdot 0,75}{0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,2 + 0,25 + 0,25 + 0,25 + 0,75 + 0,75 + 0,75 +} \quad (21) \\
 &= \frac{267,5}{3,8} = \mathbf{70,4}
 \end{aligned}$$

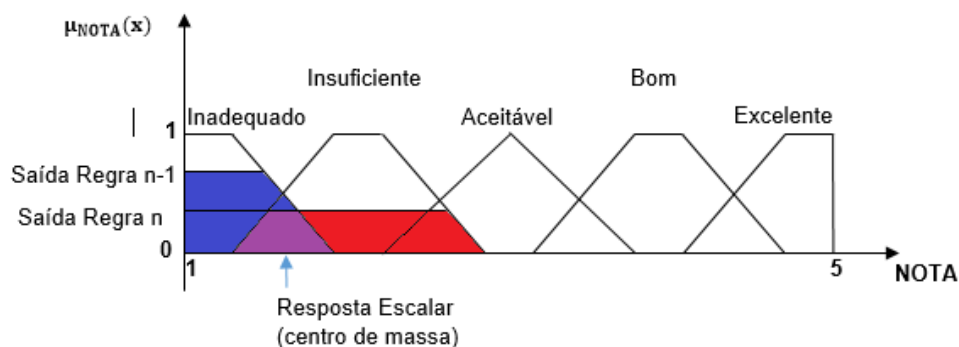


Figura 4.5 – Exemplo de defuzzificação pelo método do centro de massa – caso de estudo.

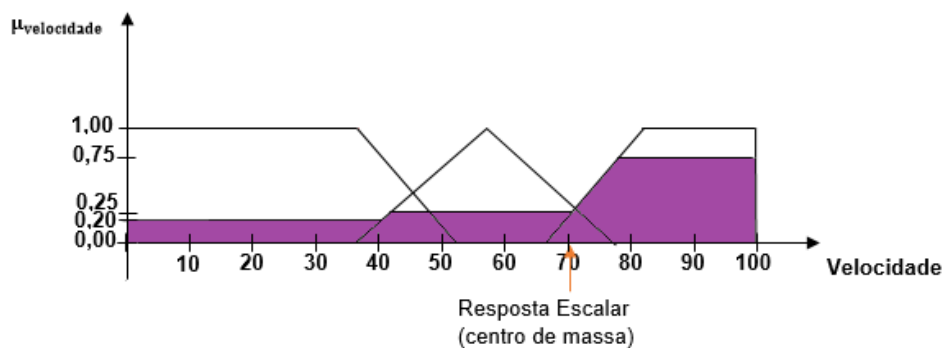


Figura 4.6 – Exemplo de defuzzificação pelo método do centro de massa – exemplo numérico.

4.2.2 Processamento AHP

A segunda etapa da metodologia consiste na avaliação das saídas do processamento *fuzzy* dentro do sistema AHP. A concepção do método foi realizada de forma a dispensar as avaliações paritárias intermediárias de subcritérios para facilitar a captura de dados dos avaliadores e diminuir a carga de trabalho requerida nas comparações, introduzindo agilidade ao processo mas mantendo a devida transparência e peso de julgamento dos agentes, conforme descrito na Figura 4.7. As entradas para este estágio são a síntese das notas provenientes do processamento anterior a matriz de prioridades de critérios fornecida pelos agentes de decisão.

Estas avaliações constituem uma das entradas para o processamento AHP juntamente com a matriz de prioridades a ser definida pela empresa.

A matriz de prioridades foi concebida para ser flexível e refletir a política da empresa a ser seguida para a priorização de investimentos em projetos de P&D. Os elementos da matriz representam na escala de Saaty (1 a 9) o grau de importância percebido que cada critério possui em relação ao outro e é possível de ser atualizada de acordo com o planejamento da empresa para determinado período. A Tabela 4.1 exemplifica a elaboração da matriz, que representa o último nível de avaliação segundo o descrito na seção 2.1.2, com valores de fictícios de exemplo.

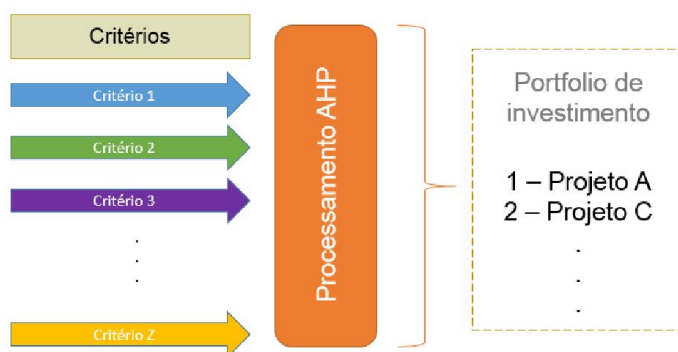


Figura 4.7 – Etapa de processamento AHP.

A comparação paritária da nota de cada projeto em relação a um determinado critério é realizada de forma automática pelo sistema, montando as matrizes a serem utilizadas pelo método AHP. Segundo os requerimentos, para cada critério é preparada uma matriz em que cada linha e coluna representam os projetos e os elementos a relação das notas obtidas na fase anterior, sendo que a diagonal principal é composta do valor unitário uma vez que representa a comparação de determinado projeto com ele mesmo. A Figura 4.8 exemplifica a montagem da matriz para um critério, onde NP representa a nota de determinado projeto.

Segundo os critérios da ANEEL, os julgamentos são fornecidos na escala de 1 a 5 e para manter a consistência do sistema, é necessário transpor as notas obtidas para a escala de Saaty (1 a 9). Para tanto, foi realizada a linearização das relações dentro das matrizes de comparação de projetos segundo a equação (22).

Tabela 4.1 – Matriz de prioridades para o problema de investimento em P&D.

..	Estratégico	Aplicabilidade	Custo	Capacidade Técnica	Técnico / Científico
Estratégico	1	$\frac{1}{3}$	5	$\frac{1}{3}$	9
Aplicabilidade	3	1	7	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{5}$
Custo	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{7}$	1	3	$\frac{1}{3}$
Capacidade Técnica	3	5	$\frac{1}{3}$	1	3
Técnico / Científico	$\frac{1}{9}$	5	3	$\frac{1}{3}$	1

	Projeto 1	Projeto 2	...	Projeto n
Projeto 1	1	$\frac{NP_1}{NP_2}$...	$\frac{NP_1}{NP_n}$
Projeto 2	$\frac{NP_2}{NP_1}$	1	...	$\frac{NP_2}{NP_n}$
...
Projeto n	$\frac{NP_n}{NP_1}$	$\frac{NP_1}{NP_2}$...	1

Figura 4.8 – Matriz de comparação paritária dos projetos em relação a um critério.

$$ES(P_i, P_j) = \begin{cases} \frac{10}{9} \cdot \frac{NF_i}{NF_j} - \frac{1}{9}, & NF_i < NF_j \\ 2 \cdot \frac{NF_i}{NF_j} - 1, & NF_i \geq NF_j \end{cases} ; i \neq j \quad (22)$$

$$i = 1..g, j = 1..g$$

Onde $ES(P_i, P_j)$ representa a nota na escala Saaty do projeto i em relação ao projeto j , NF_i é a saída *fuzzy* para o projeto i , NF_j saída *fuzzy* para o projeto j , g é o número de projetos avaliados e i e j os projetos comparados. Todos os elementos das matrizes construídas automaticamente para a cada critério passam pelo processo.

A linearização compreende dois domínios, um considerando a relação maior ou igual à unidade e um para a escala inversa considerando os valores fracionários possíveis. A fim de apreciar as menores variações nas notas, considerou-se utilizar a escala de forma contínua, não se limitando apenas aos valores inteiros e suas correspondes fracionárias.

Uma vez calculadas e fornecidas as entradas, o sistema ocupa-se de determinar a saída pelo cálculo da síntese do AHP conforme descrito na seção 2.1.3 e fornecer o vetor de prioridades para cada alternativa considerada. O capítulo cinco é reservado para a validação e resultados obtidos com a metodologia.

5 RESULTADOS

Definida a metodologia do sistema híbrido, faz-se necessária sua aplicação para validar a proposta. Este capítulo ocupa-se da análise das partes individuais do sistema assim como de sua completude frente a valores fictícios e avaliações reais obtidas junto da empresa concessionária de energia parceira no desenvolvimento do projeto.

A primeira seção trata da análise de sensibilidade realizada para o sistema *fuzzy* e para o AHP a fim de verificar a consistência das abordagens. A segunda seção introduz o processamento completo para seis projetos reais com montagem do vetor de prioridade de investimento.

Como descrito anteriormente, o aplicativo de validação foi desenvolvido em MATLAB e munido de um interface gráfica para entrada de dados e separação das partes constituintes do sistema para melhor visualização. Como desenvolvido, a interface gráfica proporciona a comparação de apenas dois projetos, mas permite que os dados sejam salvos para posterior análise. O processamento *fuzzy* e o AHP foram implementados em rotinas independentes permitindo sua reutilização em observações mais complexas, como o caso dos seis projetos, ou sistemas que estendam a aplicação da técnica para mais entradas.

A Figura 5.1 apresenta a tela inicial do programa desenvolvido. O programa apresenta os painéis necessários a sua operação devidamente rotulados. O painel **Entrada de dados** está subdividido da seguinte forma:

- **Projeto:** Seleciona o projeto ao qual se está avaliando, limitado a dois.
- **Avaliadores:** pelo clique dos botões inicia-se a rotina para cada um dos agentes de decisão. Um indicador evidencia se determinado avaliador já realizou a entrada de dados para os projetos.
- **Matriz de comparação paritária:** seleciona entre 3 matrizes pré-determinadas que contam as prioridades dos critérios.
- **Salvar/carregar Arquivo:** permite ao usuário enviar para disco as avaliações dos projetos ou recuperar de um arquivo previamente salvo.

O painel **Avaliação** contém as rotinas de processamento e de apresentação de resultados. Apresenta as seguintes funcionalidades:

- **Processar fuzzy:** realiza a síntese de subcritérios para os dois projetos segundo a primeira etapada da metodologia e apresenta os resultados nos painéis adjacentes.
- **Processar AHP:** realizar as linearizações e comparações segundo a matriz de prioridade estabelecida, e apresenta os resultados de prioridade para cada projeto.
- **Gerar dados aleatórios:** cria notas para os subcritérios para testes seguindo a distribuição de probabilidade uniforme limitada aos valores mínimo e máximo das notas, respectivamente 1 e 5.
- **Reiniciar:** reinicializa todas as variáveis do sistema para aceitar nova avaliação.

Entrada de dados

Projeto

Projeto 1 Projeto 2

Avaliadores

	Projeto 1 OK?	Projeto 2 OK?
Gerente de Projeto	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gerente da Área	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Comissão Técnica	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Matriz Comparação Peritória

Caso base
 Foco no custo
 Foco na aplicabilidade

Salvar/Carregar Arquivo

Salvar Carregar

Inicializado. Pronto para entrada de dados.

Avaliação

	Projeto 1	Projeto 2
Processar Fuzzy		
Processar AHP		
Gerar dados aleatórios		
Reiniciar		
Estratégico	0	0
Aplicabilidade	0	0
Custo	0	0
Técnico / Científico	0	0
Capacidade Técnica	0	0

AHP 0 0

Figura 5.1 – Tela inicial do programa de validação.

5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O primeiro ciclo de validação foi analisar os sistemas independentemente para validar sua aplicação individual frente aos objetivos propostos para cada componente.

Para o sistema de inferência *fuzzy*, procurou-se verificar a dinâmica na síntese das notas vista pequenas variações presentes nas notas de entrada, uma vez que foi utilizada uma escala constante entre os valores 1 a 5. No caso do AHP, averiguou-se as variações nas prioridades dos projetos em virtude das notas dadas aos critérios e da matriz de prioridades utilizada.

5.1.1 Sistema *fuzzy*

A fim de realizar a validação da etapa de processamento *fuzzy*, examinou-se o comportamento do sistema quando da variação nos valores de entrada para compreender a influência na saída. Utilizou-se para tanto o conjunto estabelecido como descrito na Figura 4.3 e dois projetos fictícios com notas iguais para todos os subcritérios considerados exceto um. Escolheu-se variar a apreciação dada ao conceito **Custo** entre as duas propostas, segundo o descrito na Tabela 5.1, para todos os avaliadores.

Aplicada a rotina de processamento *fuzzy* do aplicativo de validação obteve-se os resultados descritos na Tabela 5.2. É possível observar que mesmo para entradas diferentes os valores de saída foram iguais.

Tal fenômeno se deve ao formato de projeto das funções de inferência escolhidos inicialmente como trapezoidais uma vez que a base menor do trapézio mapeia mais de um valor de entrada para o mesmo grau de pertinência dentro do conjunto, ignorando variações de pequenos intervalos.

Para eliminar este efeito, as funções de pertinência foram remodeladas para formatos triangulares que mapeiam de forma única cada possível valor de entrada, como demonstrado na Figura 5.2. Optou-se pelas formas triangulares por

mapearem linearmente as entradas e não possuem zonas mortas. Outros perfis possíveis de serem utilizados mas não testados seriam parábolas. Rodando novamente a rotina para os valores de entrada considerados para o teste e utilizando as novas funções de pertinência pode-se observar a variação esperada nos resultados para o critério Técnico/Científico, como apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.1 – Notas fictícias para a validação do sistema *fuzzy*.

Critério	Projeto 1	Projeto 2
Custo	2,1	2
Outros subcritérios	2	2

Tabela 5.2 – Resultados da validação do processamento *fuzzy* utilizando conjunto e funções de pertinência iniciais.

Critério	Projeto 1	Projeto 2
Estratégico	2	2
Aplicabilidade	2	2
Custo	2	2
Capacidade Técnica	2	2
Técnico / Científico	2	2

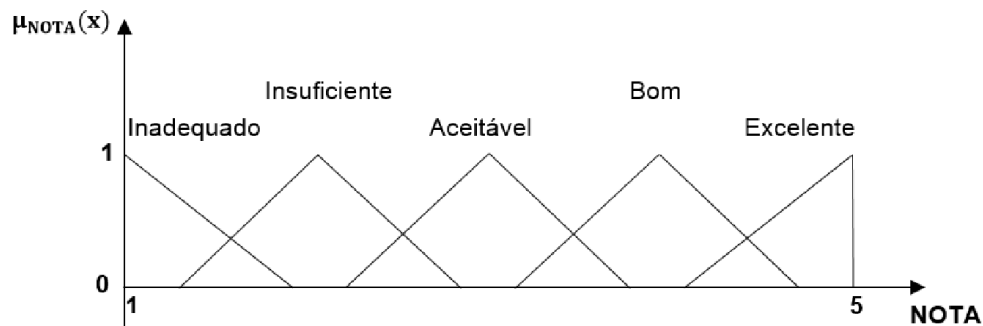


Figura 5.2 – Conjunto *fuzzy* e funções de pertinência finais do sistema híbrido.

Tabela 5.3 – Resultados da validação do processamento *fuzzy* utilizando conjunto e funções de pertinência finais.

Critério	Projeto 1	Projeto 2
Estratégico	2	2
Aplicabilidade	2	2
Custo	2,3216	2
Capacidade Técnica	2	2
Técnico / Científico	2	2

5.1.2 Sistema AHP

A etapa do AHP considera como entrada as saídas do sistema *fuzzy* que fornecem as notas dos projetos considerados em cada critério. Para realizar a validação deste passo, foram atribuídas notas fictícias para 7 projetos ponderando pesos diferentes para determinados critérios em cada avaliação a fim de determinar se a priorização realizada pelo sistema apresenta o comportamento esperado.

Vale lembrar que a matriz de prioridades para os critérios é também parâmetro de entrada e constituída pelo julgamento dos agentes segundo o planejamento estratégico da empresa para determinado período. Nesta validação, foram consideradas também diferentes matrizes para averiguar a aderência da montagem de portfólio segundo as prioridades informadas. De um total de 3, sendo a primeira um caso base sem priorizações, a segunda matriz apresenta maior peso ao critério custo e a terceira ao critério aplicabilidade. Os índices de consistência para todas as matrizes são apresentados para referência.

As notas utilizadas nos 7 projetos teste são apresentadas na Tabela **5.4**. É possível observar em vermelho o destaque dados aos critérios de enfoque, sendo: projeto 1 o case base sem nenhum viés, projeto 2 com melhor nota no estratégico, projeto 3 com melhor nota no custo, projeto 4 com melhor nota na aplicabilidade, projeto 5 com pior nota em custo, projeto 6 com pior nota em aplicabilidade e projeto 7 com enfoque na capacidade técnica. As matrizes de prioridades para os critérios são apresentadas a seguir, sendo a matriz base representada na Tabela **5.5**, a matriz com inclinação para o custo na Tabela **5.6** e a matriz com propensão para a aplicabilidade na Tabela **5.7**. As matrizes apresentam taxas de coerência de 7,2%, 7,8% e 6,3%, respectivamente.

Utilizando a rotina de validação do AHP obteve-se os resultados descritos na Tabela **5.8**. É possível observar que para cada matriz utilizada foram obtidos portfólios de prioridades diferentes evidenciando a influência da matriz de comparação de prioridades no resultado final da análise. O processamento do caso base é o ponto de comparação para as outras duas execuções e como esperado, o projeto 3 que apresentava avaliação de custo superior recebeu maior priorização quando utilizada a matriz com enfoque neste critério, assim como o projeto 4 com viés para aplicabilidade se a síntese é feita com o matriz da Tabela **5.7**. Em contrapartida, os projetos 5 e 6 apresentaram as piores colocações quando processados pelo AHP com uso das matrizes que priorizam os critérios custo e aplicabilidade, respectivamente.

Tabela 5.4 – Notas para os 7 projetos teste na validação do AHP.

Critério	Proj. 1	Proj. 2	Proj. 3	Proj. 4	Proj. 5	Proj. 6	Proj. 7
Estratégico	3	5	3	3	2	3	3
Aplicabilidade	3	3	2	5	3	1	3
Custo	3	2	5	3	1	4	3
Capacidade Técnica	4	4	3	2	4	3	5
Técnico / Científico	4	4	4	4	3	2	4

Tabela 5.5 – Matriz de prioridades base para a validação do AHP.

..	Estratégico	Aplicabilidade	Custo	Capacidade Técnica	Técnico / Científico
Estratégico	1	1	3	1	1
Aplicabilidade	1	1	5	3	3
Custo	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	1	1	$\frac{1}{3}$
Capacidade Técnica	1	$\frac{1}{3}$	1	1	$\frac{1}{3}$
Técnico / Científico	1	$\frac{1}{3}$	3	3	1

Tabela 5.6 – Matriz de prioridades com enfoque em custo para a validação do AHP.

..	Estratégico	Aplicabilidade	Custo	Capacidade Técnica	Técnico / Científico
Estratégico	1	1	$\frac{1}{7}$	1	1
Aplicabilidade	1	1	$\frac{1}{5}$	3	3
Custo	7	5	1	7	5
Capacidade Técnica	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{7}$	1	$\frac{1}{3}$
Técnico / Científico	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	3	1

Tabela 5.7 – Matriz de prioridades com enfoque em aplicabilidade para a validação do AHP.

..	Estratégico	Aplicabilidade	Custo	Capacidade Técnica	Técnico / Científico
Estratégico	1	$\frac{1}{5}$	3	1	1
Aplicabilidade	5	1	5	7	5
Custo	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	1	1	$\frac{1}{3}$
Capacidade Técnica	1	$\frac{1}{7}$	1	1	$\frac{1}{3}$
Técnico / Científico	1	$\frac{1}{5}$	5	3	1

Tabela 5.8 – Resultado de portfólio de investimentos para a validação do AHP.

Projeto	Base		Foco custo		Foco aplicabilidade	
	AHP	Posição	AHP	Posição	AHP	Posição
1	0,1566	3	0,1533	3	0,1567	3
2	0,1819	2	0,1327	6	0,1741	2
3	0,1350	5	0,2073	1	0,1245	5
4	0,1923	1	0,1656	2	0,2156	1
5	0,1147	6	0,0724	7	0,1231	6
6	0,0769	7	0,1341	5	0,0655	7
7	0,1425	4	0,1346	4	0,1404	4

5.2 VALIDAÇÃO

Visto a confirmação do comportamento esperado das partes constituintes da solução, prosseguiu-se com a validação do processamento completo do sistema híbrido tendo como entrada notas de avaliação de projetos e saída a classificação de prioridades destes em relação aos pesos estabelecidos para os critérios.

Para este fim, obteve-se junto a empresa concessionária de energia avaliações de seis projetos em trâmite no programa de investimentos em P&D realizadas dentro do aplicativo de validação. Uma vez que a interface permite apenas a comparação direta de dois projetos, utilizou-se da capacidade de salvar os dados para aplicar então as devidas rotinas de processamento.

Para potencializar o conceito de experiência no sistema *fuzzy* e desprender os agentes de decisão de fatores numéricos no momento da ponderação dos

subcritérios, desenvolveu-se uma interface de aquisição de dados baseada em um código de cores. Associando os conceitos extremos de inadequado ao vermelho e excelente ao verde, percepções intermediárias estão associadas ao gradiente entre estes dois pontos limites que representam respectivamente notas 1 e 5. Para capturar a conversão da associação linguística a um número real utilizou-se uma barra de rolagem dentro dos limites de nota estabelecidos, como descreve a Figura 5.3.

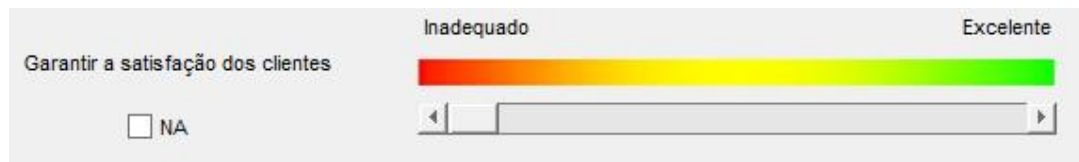


Figura 5.3 – Exemplo de interface de aquisição de dados.

Para uso particular da companhia do estudo de caso, as avaliações da comissão técnica são fornecidas como notas inteiras na gradação estabelecida pela ANEEL e portanto o aplicativo permite também para tais subcritérios a entrada numérica de dados, sem prejuízo para a metodologia em si. Por fim, foi definido que os subcritérios do critério Estratégico podem não ser todos aplicáveis a qualquer proposta. Caso o exposto seja verdadeiro, a nota considerada é 0 e o subcritério é desconsiderado na execução do sistema *fuzzy*. Na interface é possível ver a implementação através da caixa NA ao lado da barra de rolagem, significando não aplicável.

Todos os outros julgamentos foram fornecidos por funcionários habilitados no programa através da interface de cores. Extraíndo-se dos dados salvos, as notas de cada projeto estão descritas na Figura 5.4.

A metodologia foi sintonizada de acordo com os conjuntos estabelecidos como finais na seção 5.1.1 e a matriz de prioridades foi dada pela empresa concessionária como descrito na Tabela 5.9. Calculando a taxa de consistência sobre a matriz informada encontra-se o valor de 63,4%, o que indica alta predisposição a favorecer um critério. Utilizando estes parâmetros de entrada, os resultados obtidos estão descritos na Tabela 5.10. A Tabela 5.11 apresenta os valores de saída do processamento *fuzzy* com a nota de cada critério para os seis

projetos. Por fim, a título de comparação, utilizou-se sobre a avaliação dos funcionários as matrizes de prioridades com enfoque em custo e aplicabilidade e obteve-se os resultados da Tabela 5.12.

Verificando os resultados obtidos com a matriz base, percebe-se que o projeto 5 obteve a melhor ponderação e dentro das prioridades de investimento seria a primeira proposta a ser considerada. Verificando novamente a matriz é possível notar que apesar de tendenciosa, apresenta o critério Técnico/Científico com peso superior a todos os outros. Isto fica evidenciado pelo fato de que a linha não apresenta nenhum valor fracionário o que indica que individualmente este critério foi considerado de maior importância em menor ou maior grau que todos os outros.

Tabela 5.9 – Matriz de prioridades utilizada na validação do sistema híbrido.

..	Estratégico	Aplicabilidade	Custo	Capacidade Técnica	Técnico / Científico
Estratégico	1	5	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$	$\frac{1}{3}$
Aplicabilidade	$\frac{1}{5}$	1	5	3	$\frac{1}{5}$
Custo	3	$\frac{1}{5}$	1	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{5}$
Capacidade Técnica	5	$\frac{1}{3}$	3	1	1
Técnico / Científico	3	5	5	1	1

Critério	Subcritério	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3			Projeto 4			Projeto 5			Projeto 6		
		PM	DM	CE	PM	DM	CE	PM	DM	CE	PM	DM	CE	PM	DM	CE	PM	DM	CE
Estratégico	Garantir a satisfação dos clientes	0,00000			3,04106			4,69502			0,00000			4,02639			2,82991		
	Garantir a expansão do mercado de forma rentável e sustentável	0,00000			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000		
	Maximizar o valor para o acionista de forma sustentável	3,63971			3,63930			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000		
	Aumentar a eficiência operacional	2,95994			4,87097			4,74194			4,51908			3,88583			3,59237		
	Investir na renovação e na modernização dos ativos	0,00000			4,55425			3,32258			3,92255			3,92082			0,00000		
	Atender os requisitos de qualidade definidos pelo órgão regulador	0,00000			4,77713			4,58944			4,12024			3,58238			2,88856		
	Ser excelente em gestão de OPEX e CAPEX	3,85044			4,86827			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000		
	Garantir o equilíbrio financeiro da tarifa	3,69795			4,06504			3,09971			3,22874			2,66915			0,00000		
	Prover soluções inovadoras e eficazes em tecnologias	4,17888			5,00000			3,90909			3,88217			4,03812			0,00000		
	Promover excelência em segurança do trabalho	4,67156			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000		
	Preservar o conhecimento da companhia	0,00000			0,00000			0,00000			4,12023			3,67449			3,75660		
	Ter pessoas capacitadas, motivadas, comprometidas e felizes	0,00000			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000			0,00000		
Expandir P&D+I com agregação de valor	3,52200			4,06158			2,88856			4,42522			2,34897			3,51026			
Aplicabilidade	Contexto	2,97847		4	3,45882		3	4,08235		5	3,81176		4	4,35290		5	3,91765		4
	Abrangência	4,28235		4	4,07059		4	3,54118		4	5,00000		3	4,98824		4	3,16471		4
	Resultado	5,00000		3	3,54118		3	4,12941		4	4,60000		3	3,64706		4	3,78824		5
	Benefícios esperados	4,27059		3	4,06235		3	4,16471		4	5,00000		4	4,74118		4	3,87059		5
Custo	Rezoabilidade	4,44868	3,04106	5	3,06452	3,79179	4	4,12023	2,92375	5	3,39296	3,24047	4	3,89736	4,10850	4	3,59238	3,51026	4
	Viabilidade econômica	5,00000	2,44282	3	3,92082	4,51908	3	3,73313	3,46334	4	3,62898	2,70088	3	4,94134	3,69795	5	3,68278	4,14370	3
Técnico / Científico	Dados Gerais			5			5			5			5			5			4
	Descrição / motivação	4,02353	3,83530	4	3,01176	4,70588	4	5,00000	3,81176	5	4,18824	4,28235	4	3,03530	4,45882	4	2,82353	4,15294	3
	Objetivos	5,00000	3,92941	4	3,91784	5,00000	4	4,31765	3,34118	5	4,25882	3,85882	4	4,58824	3,76471	5	3,51765	3,91765	3
	Justificativas	4,16471	3,63530	5	4,08235	5,00000	3	4,56470	3,88235	4	3,52941	3,77847	3	5,00000	3,80000	4	3,57847	4,23530	4
	Metodologia			4			4			5			4			5			4
	Trabalhos correlatos e bibliografia			3			3			5			4			4			3
	Estado da arte			4			4			5			4			4			4
	Desafio (complexidade)			4			3			4			3			5			3
	Avanço			3			2			4			4			4			3
Produto			4			3			5			3			5			4	
Capacidade Técnica	Equipe de pesquisa			4			4			5			4			5			4
	Capacitação profissional			3			3			4			3			5			4
	Produção técnico-científica			4			5			4			4			4			4
	Apoio à infraestrutura			4			4			4			4			5			4
	Propriedade intelectual			3			4			5			5			5			4
	Impactos Ambientais			5			5			5			5			5			5

Figura 5.4 – Notas dadas pela concessionária para os projetos de validação.

Tabela 5.10 – Resultados da validação com a matriz de prioridades fornecida pela empresa.

Projeto	AHP	Posição
1	0,165307	5
2	0,1690920	3
3	0,171476	2
4	0,166079	4
5	0,173357	1
6	0,162860	6

Tabela 5.11 – Nota dos critérios para os seis projetos de validação – saída do sistema *fuzzy*.

Projeto	Estratégico	Aplicabilidade	Custo	Capacidade Técnica	Técnico / Científico
1	3,78152	4,00000	4,13925	4,00000	4,00000
2	4,00209	3,53300	4,02315	4,00000	4,00000
3	4,02151	4,00630	4,03943	4,05642	4,24613
4	4,00048	4,00000	4,15357	4,00005	4,00000
5	3,60667	4,12626	4,00010	4,02078	4,65176
6	3,78918	4,08428	4,08262	4,00000	4,00000

Tabela 5.12 – Resultados da validação com a matriz de prioridades com enfoque em custo e em aplicabilidade.

Projeto	Foco custo		Foco aplicabilidade	
	AHP	Posição	AHP	Posição
1	0,169350	2	0,167781	3
2	0,161131	6	0,154809	6
3	0,168048	3	0,170790	2
4	0,169527	1	0,167660	4
5	0,166564	4	0,172639	1
6	0,165380	5	0,166322	5

Destacando na Tabela **5.11** as maiores notas dentro da cada critério nota-se que o projeto 5 realmente apresenta-se como destaque no quesito, o que explica a classificação obtida. O projeto que apresentou a segunda melhor nota no quesito, projeto 3, obteve a segunda posição, corroborando as conclusões da análise de sensibilidade que comprova a influência da matriz de prioridades nos resultados.

Quando aplicadas as matrizes de enfoque em custo e aplicabilidade, observa-se comportamento semelhante quando a melhor posição é obtida pelos projetos 4 e 5, respectivamente. Comparando-se os resultados do sistema *fuzzy* é manifesto que sejam estes que apresentem as melhores notas nos quesitos de interesse.

Por fim, é necessário uma observação sobre as saídas dos sistemas de inferência. Analisando a Tabela **5.11** que apresenta os resultados é notório que para muitos quesitos a nota aparente resultante é igual, o que não é necessariamente verdade. Para fins de clareza neste dissertação inclui-se apenas as cinco primeiras casas decimais quando pelo aplicativo é possível verificar que as devido a semelhança das notas as diferenças são perceptíveis apenas próximas a décima

sexta casa decimal, limite de precisão da máquina computacional, mas que influencia nos cálculos.

Contata-se também que parte das saídas estão no entorno do conceito **Bom** representado pelo escalar 4. Tal observação é sugestiva de que testes de sensibilidades aprofundados ou técnicas mais avançadas para a criação e ajuste dos conjuntos *fuzzy* e base de regras sejam requeridas para melhorar a percepção da técnica junto ao problema.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Apresentam-se neste capítulo as conclusões acerca do pesquisado e desenvolvido, assim como sugestões para extensões deste trabalho.

6.1 CONCLUSÕES

O propósito desta dissertação foi apresentar uma extensão de metodologia de avaliação e priorização de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento baseada no método de Análise Hierárquica de Processo pela hibridização com um sistema de inferência *fuzzy*. A associação com a técnica da Computação Natural foi realizada de maneira extrínseca, ou seja, de forma tal que as duas etapas de processamento ocorrem de forma sequencial. O objetivo desta combinação é ofertar uma solução que contribua para a otimização de investimento de recursos em um portfólio de projetos mantendo a transparência no processo de tomada de decisão possibilitando a verificação das potencialidades e limitações de cada proposta, o que permitirá que os proponentes possam aperfeiçoar suas propostas.

Buscou-se definir claramente as entradas do sistema e o fluxo de informação para desenvolver uma proposta que se mostre flexível para ser estendida quanto ao número de critérios avaliados bem como na definição dos parâmetros de peso de cada critério nos procedimentos de julgamento. Explanou-se na elaboração da metodologia de que forma age cada estágio do processamento, assim como as entradas e saídas esperadas, com o intuito de tornar o sistema adaptável à incorporação de melhorias e aplicação em problemas com diferentes escopos.

As principais modificações introduzidas no modelo e que trouxeram contribuições para a melhoria da técnica foram: o método de entrada de dados, sistema de inferência *fuzzy* para síntese dos subcritérios de avaliação, substituição de escala discreta por escala contínua para o AHP e comparação paritária automatizada das alternativas em relação aos critérios de julgamento.

Para a entrada de dados no sistema, substitui-se a atribuição de notas inteiras dentro da escala 1 a 5 pelo uso de uma escala de percepção de aderência

de determinada proposta ao conceito linguístico de satisfação de determinado subcritério segundo descrito no Capítulo 4. Propiciou-se desta forma potencializar a captura de experiência dos usuários e aumentar a gama de sensibilidade na diferenciação de avaliação de diferentes propostas.

Aliado a nova interface de entrada, o uso do sistema de inferência *fuzzy* realiza a síntese dos subcritérios para fornecer a valoração final em cada quesito que será utilizado como entrada de processamento do AHP, mantendo a sensibilidade adquirida pelo sistema. Percebe-se que variações mínimas de notas atribuídas aos projetos refletem em diferentes valores na *defuzzificação* permitindo a diferenciação entre as propostas.

Para acoplar as duas técnicas transpõem-se linearmente a relação das notas finais de cada proposta para a escala proposta inicialmente para o AHP (1 a 9) de forma automática para cada conjunto de duas propostas, realizando a comparação paritária das alternativas sem a interação dos decisores. Abstrai-se portanto da interação humana a necessidade de acareação nos níveis intermediários da hierarquia. Cabe aos usuários apenas estabelecer as relações de importância entre os critérios, representado no nível mais alto da hierarquia do problema, e avaliar o grau de aderência de cada proposta à determinado subcritério; reduzindo a carga de trabalho inerente à aplicação do AHP em sua forma pura.

Por fim, ressalta-se que o sistema como tal permite repetibilidade e reprodução dos resultados de análise a qualquer tempo, uma vez que estejam avaliados os projetos. A priorização final é sempre baseada no número de projetos avaliados, porém fica clara a sistematização dos julgamentos e definição do processo que determinam os pesos finais. Lembra-se também a importância do estabelecimento da hierarquia de análise uma vez que o sistema é dependente da qualidade de sua formação. Mostra-se fundamental a participação dos agentes de decisão e especialistas de escopo para estabelecimento de elementos que sejam significativos e independentes entre si, lembrando que a explosão de dimensões pode levar a uma maior oneração do sistema computacional de análise.

Conclui-se portanto que foi desenvolvida e validada a proposta de hibridização do sistema que atende às necessidades levantadas pela montagem de um portfólio de investimentos de projetos em P&D no âmbito de uma empresa

concessionária do setor de energia elétrica; objetivo ratificado gentilmente pelos parceiros da pesquisa.

6.2 SUGESTÕES DE TRABALHO FUTURO

A associação da técnica de sistemas *fuzzy* com o AHP proveu uma solução flexível e de simples aplicação capaz de suprir a necessidade de gestores na identificação de prioridades em investimentos quando apresentados a uma gama de projetos. Entretanto, a solução como proposta não se encontra em forma otimizada ou aplicada a diferentes cenários da indústria, podendo então sofrer as devidas extensões.

Como futuras pesquisas, sugere-se a extensão da metodologia a outras áreas de atuação que tenham a atividade de P&D como crucial para o desenvolvimento de vantagem competitiva e a investigação matemática dos parâmetros de projeto e aplicação de diferentes métodos no processamento AHP e *fuzzy*. Pode-se citar como possíveis alterações: otimização na análise do fator de coerência do AHP, exploração e otimização de forma das funções de inferência, aplicação de diferentes metodologias de defuzzificação, cálculo de aproximação de auto-valores e auto-vetores e otimização na geração dos bancos de regras dos sistemas de inferência *fuzzy*.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL. 3**. Em <<http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/revistap&d3.pdf>>. Acesso em: 31 maio 2014.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **ANEEL - P&D e Eficiência Energética - Pesquisa e Desenvolvimento - Regulamentação**. Em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=546&idPerfil=6&idiomaAtual=0>>. Acesso em 31 de maio 2014.

Andrade, G. C. C. **Uma Aplicação do PAHP no Planejamento de Sistemas Elétricos**. 2009. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

Araújo, E.; Lemos, F. A.; Pretto, C. O. *Aplicação do Método AHP para Auxílio na Identificação de Causas de Falhas em Sistemas Elétricos. XVII Congresso Brasileiro de Automática*. Bonito, MT, 2010.

Arkov, V.; Kulikov, G.G.; Breikin, T.V. *International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Fuzzy Markov Modeling in Automatic Control of Complex Dynamics Systems*, p. 287-289, 1999.

Bana e Costa, C. A.; Vansnick, J.C. *Mathematical Modelling: Theory and Applications - The MACBETH approach: Basic ideas, software, and an application. Advances in Decision Analysis*, v. 4, pp. 131-157, 1999.

Barin, A. C. Seleção de Fontes Alternativas de Geração e Distribuição Utilizando Uma Análise Multicriterial Baseada no Método AHP e Lógica Fuzzy. **Revista Controle & Automação**, v. 21, n. 5, p. 477, 2010.

Belton, V. J. **Multiple Criteria Decision Analysis - An Integrated Approach**. 1ª ed. Norwell, Kluwer Academic Publishers, 2002.

Bernard, R. *Classement et Choix en Présence de Points de Vue Multiples (La Méthode ELECTRE)*. **Recherche Opérationnelle**, v.1, n. 2, p. 57-75, 1968.

Boender, C. G.; Graan, J. G.; Lootsma, F. A. *Multicriteria Decision Analysis with Fuzzy Pairwise Comparisons*. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 29, n. 2, p. 133-143, 1989.

Calabrese, A.; Costa, R. (2013). *Using Fuzzy AHP to Manage Intellectual Capital assets: An Application to the ICT Service Industry*. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 9, p. 3747-3755, 2013.

Castro, L. N. **Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications**. 1^a ed. Boca Raton: CRC, 2007.

Cetron, M.; Martino, J.; Roepcke, L. *The Selection of R&D Program Content — Survey of Quantitative Methods*. **IEEE Transactions on Engineering Management**, v. 14, n. 1, p. 4 – 13, 1967

Chou, Y. C.; Sun, C.C.; Yen, H.Y. *Evaluating the Criteria for Human Resource for Science and Technology (HRST) Based on an Integrated Fuzzy AHP and Fuzzy DEMATEL Approach*. **Applied Soft Computing**, v. 12, n. 1, p. 64-71, 2012.

Dhouib, D. *Fuzzy Macbeth Method to Analyze Alternatives in Automobile Tire Wastes Reverse Logistics*. **International Conference on Advanced Logistics and Transport**. Tunisia, p. 321-326, 2013.

Dote, Y.; Kano, K. *Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation*. **DSP-based Neuro-Fuzzy Position Controller for Servomotor**, v. 2, p. 986-989, 1992.

Fuqing, Z., Yi; H.; Dongmei, Y. *A MultiObjective Optimization Model of the Partner Selection Problem in a Virtual Enterprise and its Solution with Genetic Algorithms*. **International Journal of Advanced Manufacturing Technologies**, v. 28, p. 1246-1253. 2005.

Guglielmetti, F. R.; Marins, F. A.; Salomon, V. A. *Comparação Teórica Entre Métodos de Auxílio à Tomada de Decisão por Múltiplos Critérios*. **XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Ouro Preto, MG, 2003.

Haber, R. E. et al. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*. **An Optimal Fuzzy Controller for A High-Performance Drilling Process Implemented Over an Industrial Network**, v. 7, n. 3, p. 1481-1498, 2011.

- Haw, A. N.; Kannan, G. *Fuzzy Analytical Hierarchy Process for Evaluating and Selecting a Vendor in a Supply Chain Model. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, v. 29, n. 7-8, p. 826-835, 2006.
- Huang, Y. et al. *An AHP Model for Bringing Experts to Consensus on Medical Payment Standards. **Journal of Systems Science and Systems Engineering***, v. 15, n. 2, p. 247-255, 2006.
- Hwang, C.-L.; Yoon, K. ***Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications A State-of-the-Art Survey***. 1^a ed. [S.I.]: Springer, 1981.
- Karapetrovic, S.; Rosenbloom, E.S. *European Journal of Operational Research. **A Quality Control Approach to Consistency Paradoxes in AHP***, v. 119, p. 704-718, 1999.
- Kordi, M. ***Comparison of Fuzzy and Crisp Analytic Hierarchy Process (AHP) Methods for Spatial Multi-Criteria Decision Analysis in GIS***. 2008. Dissertação (Mestrado) - University of Gävle, Gävle, 2008.
- Kubat, C.; Yuce, B. *A Hybrid Intelligent Approach for Supply Chain Management System. **Journal of Intelligent Manufacturing***, v. 23, n. 1, p. 1237-1244, 2012.
- Laarhoven, P. M.; Pedrycz, W. *A Fuzzy Extension of Saaty's Priority Theory. **Fuzzy Sets and Systems***, v.11, n. 1-3, p. 199-227, 1983.
- Larsen, M. *Industrial Applications of Fuzzy Logic Control. **International Journal of Man-Machine Studies***, v. 12, n. 1, p. 3-10, 1980.
- Lee, M.; Chang, J.; Chen, J. *An Entropy Decision Model for Selection of Enterprise Resource Planning System. **International Journal of Computer Trends and Technology***, v. 1, n. 1, p. 111-115, 2011.
- Levandoski, L. F. ***Sistema de Análise de Investimentos em Inovação e Tecnologia***. 2009. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), Curitiba, PR, 2009.
- Mamdani, E. H. *Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers Control & Science***, v. 121, n. 12, p.1585-1588, 1974.

MathWorks. **MATLAB: The language of technical computing.** Em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/>>. Acesso em: 31 maio 2014.

Menger, K. *Statistical Metrics. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 28, n. 12, p. 535-537, 1942.

Mon, D. L. *Proceedings of the International Joint Conference of the Fourth IEEE International Conference on Fuzzy Systems and the Second International Fuzzy Engineering Symposium. Evaluating Weapon System Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process Based on Entropy Weight*, v. 2, p. 591-598, 1995.

Padovani, M. **Apoio à Decisão do Portfólio de Projetos: Uma Abordagem Híbrida Usando os Métodos AHP e Programação Inteira.** 2007. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, 2007.

Pamplona, E. O.; Montevechi, A. B. Justificativas para Aplicação do Método de Análise Hierárquica. **19o Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENGEPE)**, Rio de Janeiro, RJ 1999.

Parreiras, R. O. **Algoritmos Evolucionários e Técnicas de Tomada de Decisão em Análise Multicritério.** 2006. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2006.

Pittsburgh, U. **Thomas L. Saaty | Joseph M. Katz Graduate School of Business. Retrieved March 24, 2013, from Joseph M. Katz Graduate School of Business.** Em <<http://www.business.pitt.edu/katz/faculty/saaty.php>>. Acesso em: 31 de maio de 2014.

Rabanni, M.; Bajestani, M. A.; Khoshkhou, G. B. *A Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Project Selection. Expert System with Applications*, v. 37, n. 1, p. 315-321, 2010.

Saaty, T. L.; Kearns, K. P. **Analytical Planning: The Organization of Systems.** 1ª ed., Pittsburgh, USA: RWS Publications, 1985.

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

Saaty, T. L.; Vargas, L. G. **The Logic of Priorities.** 1ª ed. Pittsburgh, USA: RWS Publications, 1989.

Sadiq, R. T. *Environmental Decision-Making Under Uncertainty Using Intuitionistic Fuzzy Analytic Hierarchy Process (IF-AHP)*. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 23, p. 75–91, 2009.

Sandri, S.; Correa, C. Lógica Nebulosa. **V Escola de Redes Neurais**, p. 73-90, 1999.

Schrödkrf, H. *R&D Project Evaluation and Selection Models for Development: A Survey of the State of the Art*. **Socio-Economic Planning Sciences**, v. 5, n. 1, p. 25–39, 1971.

Schweizer, B., Sklar, A. *Associative Functions and Statistical Triangle Inequalities*. **Publicaciones Mathematicae Debrecen**, p. 168-186, 1961.

Shahri, A. M.; Evans, B. J., Naghdy, F. *Proceedings of the Australian New Zeland Conference on Intelligent Information Systems*. **Nuero-Fuzzy Adaptive Torque Control of a SCARA Robot**, 1996.

Shen, X. et al. *A Multi-Objective Optimization Evolutionary Algorithm Incorporating Preference Information Based on Fuzzy Logic*. **Springer Computational Optimization and Applications**, v. 46, n. 1, p. 159-188, 2010.

Srdjevic, B.; Medeiros, Y. D. *Fuzzy AHP Assessment of Water Management Plans*. **Water Resource Management**, v. 22, n. 1, p. 877–894, 2008.

Takagi, S.; Sugeno, M. *Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control*. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, v. 5, n. 1, p. 116-132, 1985.

Tavana, M. *CROSS: A Multicriteria Group-Decision-Making Model for Evaluating and Prioritizing Advanced-Technology Projects at NASA*. **Interfaces**, v. 33, n. 3, p. 40-56, 2003.

Thomaz, H. J. **Seleção de Empregados em Indústria de Petróleo: Uma Análise pelo Método AHP**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Economia e Finanças IBMEC, Rio de Janeiro, 2006.

Tsai, M. T. *Fuzzy Decision Making for Market Positioning and Developing Strategy for Improving Service Quality in Department Stores*. **Quality & Quantity**, v. 42, n. 1, p. 303–319, 2008.

Wang, Z.; Zhang, S.; Kuang, J. *A dynamic MAUT decision model for R&D project selection. International Conference on Computing, Control and Industrial Engineering*, China, p. 423-427, 2010.

Yager, R. R.; Filev, D. P. **Essentials of Fuzzy Modeling and Control**. 1^a ed. New York: John Wiley & Sons, 1994.

Yi, C. *A Decision-making Approach for R&D Project Selection in a Fuzzy Environment. International Seminar on Business and Information Management*, USA, p. 372-375, 2008.

Zadeh, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

Zadeh, L. A. *Fuzzy Sets as a Basis For A Theory of Possibility. Fuzzy Sets and Systems*, v. 1, p. 3-28, 1978.

Zadeh, L. A. *The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - I. Information Sciences*, v. 8, p. 199-249, 1975.

Zeleny, M. **Multiple Criteria Decision Making**. [S.I.]: Mcgraw-Hill, 1982.