

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELAGEM DE UM *ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM* PARA
ANÁLISE DE RISCO EM PROJETOS**

DANIEL CRUZ DE FRANÇA

JOÃO PESSOA

2016

DANIEL CRUZ DE FRANÇA

**MODELAGEM DE UM *ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM* PARA
ANÁLISE DE RISCO EM PROJETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Doutor Márcio Botelho da Fonseca Lima

JOÃO PESSOA

2016

F814m França, Daniel Cruz de

Modelagem de um adaptive neuro fuzzy inference system para análise de risco em projetos. / Daniel Cruz de França. – João Pessoa, 2016.

102f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Márcio Botelho da Fonseca Lima

Dissertação (Curso de Mestrado em Engenharia de Produção). Centro de Tecnologia - CT. Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

1. Gestão de projetos 2. Gerenciamento de riscos 3. Lógica fuzzy 4. ANFIS I. Título.

MODELAGEM DE UM ADAPTIVE NEURO FUZZY INFERENCE SYSTEM PARA ANÁLISE DE RISCO EM PROJETOS

DANIEL CRUZ DE FRANÇA

Esta Dissertação foi julgada e aprovada em sua forma final para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal da Paraíba.

João Pessoa, 22 de fevereiro de 2016.

Prof. Márcio Botelho da Fonseca Lima, Doutor
(Orientador)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Ricardo Moreira da Silva, Doutor
(Examinador interno)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Claurton de Albuquerque Siebra, Doutor
(Examinador externo)
Universidade Federal da Paraíba

RESUMO

Diversas pesquisas ressaltam a importância do gerenciamento de risco na gestão de projetos. Muitos autores propõem modelos tradicionais com métodos estatísticos ou determinísticos, entretanto alguns problemas de gerenciamento de risco em projetos são baseados em estruturas conceituais, na opinião especializada e na experiência humana. Esse tipo de problema dificulta a utilização de modelos clássicos, mas pode ser tratado matematicamente por meio da lógica *fuzzy*. Além disso, dados históricos de projetos podem fornecer informações sobre a experiência de análise de risco da organização e ser modelados por mecanismo de aprendizagem. O mecanismo utilizado nesse trabalho é o *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System* (ANFIS), que é capaz de agregar a capacidade de tratamento matemático de modelos conceituais com um algoritmo de aprendizagem híbrido. Desse modo, o objetivo desse trabalho é modelar um *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System* capaz de analisar os riscos de projetos. Um conjunto de projetos foi analisado por meio de uma lista de verificação com fatores de risco organizados em uma estrutura analítica de risco (EAR). As estimativas foram realizadas por meio de matrizes de probabilidade e impacto e opinião especializada. O risco de cada projeto foi definido como um número inteiro entre 1 e 10. Foram utilizados 84% dados na validação cruzada 10-fold para seleção do melhor modelo entre 32 diferentes configurações de ANFIS. O modelo com os melhores resultados de validação foi selecionado e testado com os dados restantes. Os resultados alcançados na avaliação foram: erro quadrático médio (MSE) de 0,2207, erro absoluto médio de 0,3084, coeficiente de determinação (R^2) de 0,9733 e acurácia de 80%. Esses resultados indicam que o gerenciamento de riscos em projetos pode ser realizado com sucesso através do ANFIS. Isso possibilita a modelagem de conhecimento e experiências humanas e pode diminuir custos com mão de obra especializada e aumentar a velocidade das análises.

Palavras-chave: Gestão de projetos; Gerenciamento de riscos; Lógica *fuzzy*; ANFIS.

ABSTRACT

Several researches highlight the importance of risk management in project management. Many authors propose traditional models with statistical and deterministic methods, though some risk project management issues are based on conceptual frameworks, expert opinion and human experience. This kind of problem makes difficult the use of classical models, but can be mathematically treated using fuzzy logic. In addition, historical data of projects can provide information about the organization's risk analysis experience and be modelled by a learning mechanism. The method used in this work is the Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS), which is capable of aggregating the mathematical treatment capacity of conceptual models with a hybrid learning algorithm. Thus, the aim of this study is to model an ANFIS that is able to analyze the risks of projects. A set of projects was analyzed by means of a risk management checklist with factors arranged in a risk breakdown structure (RBS). Estimates were made using probability and impact matrix, and expert opinion. The risk of each project was defined as an integer between 1 and 10. To select the best model among 32 different ANFIS settings, 84% of the data were used in 10-fold cross-validation. The model with the best results in validation process was selected and tested with the remaining data. The results attained in the evaluation were: mean squared error (MSE) of 0.2207, mean absolute error (MAE) of 0.3084, coefficient of determination (R^2) of 0.9733 and 80% of accuracy. These results indicate that the project risk management can be successfully performed by ANFIS. This enables the modeling of knowledge and human experience and can reduce costs of skilled labor and improve the speed of analysis.

Keywords: Project management; Risk management; Fuzzy logic; ANFIS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificações de tolerância ao risco.....	21
Figura 2 – Procedimento de gerenciamento de risco.....	23
Figura 3 – Matriz de probabilidade e impacto.....	26
Figura 4 – Exemplo de estrutura analítica de riscos – EAR.....	27
Figura 5 – Exemplo de interpretação gráfica do <i>modus ponens</i> generalizado.	39
Figura 6 – Raciocínio <i>fuzzy</i> com várias regras e vários antecedentes.	39
Figura 7 – Estrutura de um sistema de inferência <i>fuzzy</i> com três regras <i>fuzzy</i>	41
Figura 8 – Sistema de inferência <i>fuzzy</i> de Mamdani	42
Figura 9 – Sistema de inferência <i>fuzzy</i> de Sugeno.....	43
Figura 10 – Exemplo de arquitetura ANFIS.....	44
Figura 11 – Exemplo de formulário	57
Figura 12 – Estrutura de um ANFIS para o exemplo.	58
Figura 13 – Iterações da validação cruzada 10-fold.	59
Figura 14 – Fluxograma de etapas da pesquisa.	62
Figura 15 – Estrutura analítica de riscos do conjunto de projetos.....	64
Figura 16 – Matriz de probabilidade e impacto utilizada para as estimativas.....	69
Figura 17 – Estrutura da ANFIS com Duas Funções de Pertinência.	76
Figura 18 – Estrutura da ANFIS com Três Funções de Pertinência.....	76

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Funções de pertinência de valores linguísticos	30
Gráfico 2 – Função de pertinência convexa, normal e simétrica	32
Gráfico 3 – Exemplos de funções de pertinência unitária, convexa e não-convexa.	32
Gráfico 4 – Principais classes de MFs unidimensionais parametrizadas	33
Gráfico 5 – Exemplo das principais operações com conjuntos <i>fuzzy</i>	35
Gráfico 6 – Funções de pertinência para as variáveis probabilidade e impacto.....	68
Gráfico 7 – Superfície de probabilidade, impacto e risco.	70
Gráfico 8 – Histograma de frequência percentual dos índices gerais de risco.....	75
Gráfico 9 – Valores previstos pelo ANFIS vs risco dos projetos.....	80
Gráfico 10 – Funções de pertinência <i>psigmf</i> do ANFIS selecionado.....	81
Gráfico 11– Superfícies do ANFIS para análise de risco.....	82
Gráfico 12 -Valores previstos pelo ANFIS vs risco dos projetos para todo conjunto de dados	85
Gráfico 13 – MFs unidimensionais parametrizadas	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Defuzzificação das MF triangulares para as variáveis Probabilidade e Impacto. ..	69
Tabela 2 – Dados e resultados da probabilidade, impacto e risco dos grupos.	71
Tabela 3 – Parte dos pares de dados de entrada e saída	73
Tabela 4 – Medidas estatísticas da Validação Cruzada 10- <i>fold</i>	78
Tabela 5 – Dados de saída do modelo ANFIS.....	83
Tabela 6 – Fatores de risco	96

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Tema e Problema de Pesquisa	12
1.2	Objetivos	13
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	Justificativa.....	14
1.4	Delimitação do Trabalho	16
1.5	Estrutura do Trabalho	17
2	Fundamentação Teórica	18
2.1	Gerenciamento de Riscos em Projetos	18
2.1.1	O conceito de risco	19
2.1.2	A tolerância aos riscos	20
2.1.3	Os processos de gerenciamento de riscos	21
2.1.4	Identificação de riscos	24
2.1.5	Análise qualitativa	25
2.1.6	Análise quantitativa	27
2.2	Lógica <i>Fuzzy</i>	29
2.2.1	Conjuntos <i>fuzzy</i>	29
2.2.2	Funções de pertinência.....	31
2.2.3	Operações <i>fuzzy</i>	34
2.2.4	Regras <i>fuzzy if-then</i>	36
2.2.5	Raciocínio <i>fuzzy</i>	38
2.2.6	Sistemas de inferência <i>fuzzy</i>	40
2.2.7	<i>Adaptive neuro-fuzzy inference system</i>	44

2.3 Trabalhos Relacionados	47
2.3.1 Pesquisas sobre gerenciamento de risco em projetos	47
2.3.2 Lógica <i>fuzzy</i> no gerenciamento de risco em projetos.....	48
2.3.3 ANFIS e outros métodos de aprendizagem	51
2.3.4 Considerações sobre a literatura pesquisada e o presente trabalho	52
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	54
3.1 Classificação da Pesquisa	54
3.2 Caracterização da Empresa Pesquisada.....	55
3.3 Procedimentos de Coleta e Análise de Dados.....	55
3.3.1 Procedimento de seleção e avaliação do modelo ANFIS	58
3.3.2 Medidas de estatísticas utilizadas	60
3.4 Etapas da Pesquisa.....	62
4 RESULTADOS.....	63
4.1 Fatores e Grupos de Risco.....	63
4.2 Matriz de Probabilidade e Impacto	68
4.3 Modelagem do ANFIS	73
4.3.1 Configuração do ANFIS	75
4.3.2 Validação cruzada.....	77
4.3.3 Teste e avaliação	79
4.3.4 Modelo ANFIS selecionado.....	80
4.3.5 Saídas do Modelo.....	83
4.4 Considerações Sobre os Resultados.....	86
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
5.1.1 Conclusões	87
5.1.2 Trabalhos Futuros	88

5.1.3 Limitações.....	89
REFERÊNCIAS	90
Anexo A – Fatores de risco	96
Anexo B – Outras Funções de Pertinência	101

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o uma breve discussão sobre o tema e o problema de pesquisa, os objetivos do trabalho, a justificativa para a realização da pesquisa, a delimitação e a estrutura do trabalho.

1.1 TEMA E PROBLEMA DE PESQUISA

Na definição da norma ISO/IEC *Guide* 73, risco é a combinação da probabilidade de um evento e sua consequência. Nesse conceito, probabilidade é definida como a medida que um evento é susceptível de ocorrer, por outro lado consequência é o resultado de um evento. Nesse contexto, a consequência pode ter um resultado positivo ou negativo (ISO, 2002). Na mesma linha, o PMI (2013) define risco como um evento ou condição incerta que, se ocorrer, provocará um efeito positivo ou negativo nos objetivos do projeto. Esta visão do risco como sendo uma incerteza neutra, com potencial para ocasionar efeitos positivos ou negativos, não parece ser a perspectiva dominante entre os interessados de projetos reais. Todavia, ela é amplamente utilizada na teoria e em pesquisas da área (HARTONO et al., 2014).

Dessa forma, gerenciar os riscos em projetos, segundo o *Office of Government Commerce* - OGC (2009), é identificar, avaliar e controlar as incertezas e, como resultado, melhorar a capacidade do projeto de obter sucesso. Logo, o gerenciamento dos riscos do projeto busca aumentar a probabilidade e o impacto dos eventos positivos e reduzir a probabilidade e o impacto dos eventos negativos no projeto (PMI, 2013). Nesse contexto, tratando da importância do gerenciamento de riscos em projetos, a pesquisa de Zwikaël *et al.* (2014) mostra que o planejamento tem um impacto relativo no sucesso do projeto, e esse impacto está relacionado ao nível de risco. Isto é, quanto maior o risco, maior a necessidade de planejamento e análise das incertezas.

Dada a importância do gerenciamento de riscos, a análise dos riscos em gestão de projetos é um tema que tem despertado interesse, pois os riscos “nunca estiveram tão presentes” (MARLE *et al.*, 2013 p. 225). Segundo Lehtiranta (2014), pesquisas publicadas em quatro dos principais periódicos de gestão de projetos entre os anos 2000 a 2012 têm tratado de discussões sobre a visão dos riscos (incertezas, ameaças e/ou oportunidades): a forma de abordar os riscos previstos e não previstos; a alocação de responsabilidades pelos

riscos e o papel multiorganizacional no gerenciamento de riscos. Atualmente, pesquisas têm buscado integrar a análise qualitativa e quantitativa dos riscos através de técnicas multicritério e lógica difusa, como mostra Taylan *et al.*(2014). Também procuram analisar os riscos de forma integrada através de técnicas de clusterização (MARLE; VIDAL; BOCQUET, 2013). Além disso, buscam medir o impacto da incerteza nos custos de projetos por meio de redes bayesianas (KHODAKARAMI; ABDI, 2014). Outras pesquisas procuram utilizar técnicas de simulação de Monte Carlo para análise de riscos de projetos reais de construção (CHOUDHRY *et al.*, 2014). Algumas investigações têm por objeto criar metodologias para gerenciamento de riscos em pequenas empresas (MARCELINO-SÁDABA *et al.*, 2014) e, por fim, interessam-se em propor processos de solução de risco ambiental por meio de sistemas dinâmicos (YANG; YEH, 2014).

Pode-se considerar que o esforço acadêmico direcionado para a análise de risco em projetos nos últimos anos é evidência clara da importância da pesquisa nesta área. O tema é amplo e rico em diferentes abordagens, mas ainda há muito a avançar na integração das análises qualitativa e quantitativa e no uso de técnicas de aprendizagem de máquina, como redes neurais artificiais e lógica *fuzzy* conforme mostra o estudo de Ebrat e Ghodsi (2014). Nesta pesquisa, os autores utilizaram o método *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) para a análise de riscos através da opinião de 100 especialistas. Contudo, o estudo não trata de projetos específicos, mas de uma lista abstrata de fatores de risco. Isso é uma lacuna nesse tipo de análise, pois o conceito de probabilidade e impacto estão atrelados a ocorrência de um determinado evento de risco em um projeto específico.

Mesmo assim, aplicar uma análise com uma rede *neuro-fuzzy* como o ANFIS em problemas de decisão multicritério é promissor, como mostra a pesquisa de Özkan e İnal (2014), ainda não existindo pesquisas desse tipo na análise de critérios de riscos para formação do risco do projeto. Desse modo, essa pesquisa busca modelar um ANFIS na análise de riscos em projetos. Explicitamente, o problema de pesquisa deste trabalho é: Como analisar os riscos de projetos através do método ANFIS?

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são divididos em um objetivo geral, que se propõe a resolver o problema de pesquisa, e cinco objetivos específicos, que são desdobramentos do objetivo geral.

1.2.1 Objetivo geral

- Modelar de um *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System* capaz de analisar os riscos de um conjunto de projetos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Descrever o gerenciamento de riscos de projetos;
- Descrever a configuração e aplicação do método ANFIS;
- Coletar informações sobre um conjunto de projetos;
- Comparar diferentes estruturas de ANFIS
- Apresentar o melhor modelo de ANFIS para a análise de riscos

1.3 JUSTIFICATIVA

A gestão de riscos é um elemento central na gestão de projetos. É o processo através do qual as organizações analisam metodicamente os riscos, avaliando o comprometimento de recursos com o empreendimento e o nível de retorno correspondente. Neste aspecto, espera-se que quanto maior a incerteza associada a um projeto, maiores sejam os benefícios obtidos (CHAPMAN; WARD, 2003). Esse não é um processo simples e linear, o que dificulta sua análise e gestão. Além do impacto econômico nas organizações, os efeitos das incertezas podem causar danos ambientais, sociais e individuais (TREASURY, 2004).

Apesar da gestão de riscos ser um processo complexo e difícil de ser analisado, o risco está presente em cada aspecto da vida, e deve ser gerenciado. Esse é o motivo da gestão de riscos ser universal, ainda que, na maioria dos casos, ela seja uma atividade não estruturada e se fundamente no senso comum, conhecimentos, experiência e instinto. Nesse contexto, o desafio de gerenciar os riscos envolve a estruturação, quantificação e análise da incerteza de forma estruturada. Isso porque a gestão de projetos, como toda a atividade humana, envolve riscos, pois, conforme asseveram Chapman e Ward (2003), não há um projeto de risco zero.

Desse modo, pode-se perceber a importância de gerenciar os riscos, potencializando as ocorrências dos efeitos positivos e reduzindo o impacto e probabilidade de

eventos negativos. Gerenciar essa incerteza é muito importante em todas as atividades, mas é especialmente relevante na gestão de projetos, devido ao caráter único, não-repetitivo e temporário dos projetos (PMI, 2013).

Além disso, o ambiente competitivo atual, com diversas informações confusas e de difícil compreensão, que podem induzir ao erro, dificulta a previsão de cenários futuros tornando os investimentos em projetos cada vez mais arriscados. Um levantamento realizado com mais de 5.400 projetos demonstrou que em média 45% dos projetos ficaram acima do orçamento e pelo menos 17% chegaram ao ponto de ameaçar a existência da organização que os gerenciava (BLOCH; BLUMBERG; LAARTZ, 2012).

Por isso, muitas pesquisas têm sido realizadas abordando o gerenciamento de riscos em projetos, abordando os conceitos e construtos fundamentais, bem como os processos de identificação dos riscos, o impacto econômico dos riscos, a análise qualitativa, a análise quantitativa, a alocação de riscos e, entre outros aspectos, o comportamento das organizações em relação ao risco (JIN; ZHANG, 2011; KHODAKARAMI; ABDI, 2014; LEHTIRANTA, 2014).

A análise de riscos em projetos é tradicionalmente realizada através de métodos estatísticos que, algumas vezes, não são apropriados para problemas com alto grau de subjetividade e julgamento humano. Isso ocorre, porque alguns problemas são baseados em estruturas conceituais que modelos clássicos não são capazes de tratar (KANGARI, 1988). Na gestão de risco em projetos, Cagno *et al.* (2007) cita, entre outras fontes de risco que influenciam projetos complexos, a falta ou baixa mensurabilidade e uma consequente baixa capacidade de avaliar e identificar performance do projeto.

Nesses casos, a análise de risco é profundamente baseada na opinião especializada e em experiência humana. Esse conhecimento é, muitas vezes, abstrato e impreciso, o que dificulta o uso de abordagens tradicionais. Entretanto, a lógica *fuzzy* pode lidar matematicamente com a forma imprecisa dos pensamentos humanos e pode estruturar a experiência humana por meio de variáveis linguísticas (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

Um mecanismo utilizado com sucesso em problemas de gestão é o ANFIS, que funciona como um sistema de inferência *fuzzy* com um algoritmo de aprendizagem (ÖZKAN; INAL, 2014). Assim, o ANFIS possibilita agregar a capacidade de tratar matematicamente o raciocínio difuso do ser humano com a capacidade de aprender padrões de julgamento. Essas características podem ser aplicadas a problemas de gerenciamento de risco onde a falta ou baixa mensurabilidade impedem, em muitos casos, a aplicação de abordagens tradicionais.

O ANFIS propicia um tratamento da incerteza com o uso de variáveis baseadas na linguagem humana, a estruturação do conhecimento e experiência (JANG, 1993). Seu uso pode extrair conhecimento implícito na experiência obtida através do conjunto de projetos de uma organização.

A aplicação da técnica na análise da relação probabilidade e incerteza para priorização de riscos em projetos pode ser visto em pesquisa recente em Ebrat e Ghodsi (2014). Entretanto, há a possibilidade de aplicar a técnica para avaliação do risco do projeto, considerando fatores de risco agrupados como critérios de julgamento que podem definir o risco do projeto por meio de opinião especializada (TAYLAN et al., 2014).

Essa pesquisa, objetiva modelar de um *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System* capaz de analisar os riscos de um conjunto de projetos. Na modelagem utiliza-se um o histórico de projetos passados e experiências adquiridas de uma organização para estruturar o conhecimento implícito nos julgamentos do especialista relacionando a probabilidade e impacto de fatores de risco a um índice geral de risco do projeto.

1.4 DELIMITAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho se limita à modelagem, seleção e análise de um ANFIS capaz de prever o risco geral do projeto de uma empresa. O estudo não realiza uma análise pormenorizada dos fatores de risco, mas trata os fatores de forma independente e genérica para com o objetivo de viabilizar a aplicação do modelo.

Os assuntos relacionados a respostas aos riscos e planejamento de riscos não são abordados, pois compõem outras fases do gerenciamento de riscos de projetos. Entretanto a identificação de riscos, as análises qualitativa e quantitativa fazem parte da aplicação do modelo.

É importante notar que não há a expectativa de que a aplicação do método não possa resolver todas as etapas do gerenciamento de riscos. Todavia, o modelo pode ser utilizado na solução de problemas relacionados a obtenção de um risco geral do projeto.

A aplicação da técnica ANFIS busca estruturar o conhecimento especializado na análise de riscos utilizando um mecanismo de aprendizagem e replicando a avaliação em novos projetos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está organizado em cinco capítulos e os capítulos subsequentes estão resumidamente descritos a seguir:

No capítulo 2 é apresentado o referencial teórico sobre gestão de riscos em projetos, seus desdobramentos e conceitos principais e a base teórica de sistemas *fuzzy* e do ANFIS, além de uma seção voltada a expor alguns trabalhos relacionados com a pesquisa.

São abordados, no capítulo 3, os fundamentos metodológicos, os procedimentos para coleta e análise de dados, e as etapas da pesquisa.

O capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa incluindo todas as etapas de modelagem, seleção e análise do ANFIS.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as considerações finais sobre o trabalho suas limitações e algumas propostas para realização de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nessa seção serão abordados: o gerenciamento de riscos em projetos, as principais técnicas de análise de riscos e os conceitos fundamentais dos conjuntos *fuzzy*, do ANFIS e alguns trabalhos relacionados com a pesquisa.

2.1 GERENCIAMENTO DE RISCOS EM PROJETOS

O gerenciamento de projetos é uma disciplina de gestão que se diferencia da administração de negócios tradicionais de uma organização. Isso porque os projetos não são repetitivos como as operações, mas possuem um início e um fim bem definidos. Logo, os projetos devem ser concluídos em um prazo específico, dentro dos seus respectivos orçamentos, com a qualidade esperada, proporcionando os benefícios e resultados planejados. Portanto, pode-se definir o projeto como um empreendimento temporário, com uma finalidade exclusiva e risco inerente (APM, 2012; CHAPMAN; WARD, 2003; PMI, 2013).

Dado que não existem projetos risco-zero, isto é, há sempre incertezas envolvidas em projetos, um tema importante em gerenciamento de projetos é o gerenciamento de riscos. Nas organizações, gerenciar risco é o processo através do qual se analisam metodicamente os riscos inerentes às respectivas atividades, objetivando atingirem uma vantagem sustentada em cada atividade individual e no conjunto das atividades. No contexto de projetos, o gerenciamento de riscos é um processo estruturado, o qual possibilita que eventos de risco possam ser gerenciados de forma proativa (AIRMIC; ALARM; IRM, 2002; APM, 2012; CHAPMAN; WARD, 2003).

Desse modo, o gerenciamento de riscos pode ser aplicado a todos os projetos, ainda que o nível de implementação possa variar de projeto para projeto. Em projetos com riscos muito altos o gerenciamento deve ser mais detalhado, já em projetos com baixos riscos associados, a implementação pode ser simplificada. Assim, a gestão de riscos concentra-se sobre a incerteza e busca prevenir que problemas em potencial atinjam negativamente o projeto. Além disso, a gestão dos riscos busca potencializar a ocorrência de eventos positivos para o projeto (KERZNER, 2013; OGC, 2009).

2.1.1 O conceito de risco

Uma questão central no gerenciamento de risco é o conceito de risco. Nesse aspecto, segundo Chapman e Ward (2003), tanto o *Project Management Institute* – PMI quanto a *Association for Project Management* – APM adotam uma visão ampla dos riscos. Para o PMI (2013), o risco do projeto é um evento ou condição incerta que, se ocorrer, tem um efeito positivo ou negativo em um ou mais objetivos do projeto. Da mesma forma, segundo a APM (2012), risco é um evento incerto ou conjunto de circunstâncias que se ocorressem teriam um efeito sobre a realização de um ou mais dos objetivos do projeto.

Outras instituições e autores têm tratado o conceito de risco de forma semelhante. Para o HM Treasury (2004), risco é definido como a incerteza do resultado em ações e eventos, seja essa incerteza positiva (oportunidade) ou negativa (ameaça). E nas definições da norma internacional ISO/IEC *Guide* 73, risco é a combinação da probabilidade de um evento e sua consequência (ISO; IEC, 2002). Já em um contexto específico de gestão de projetos, o *Office of Government Commerce* - OGC (2009) define risco como um evento incerto ou conjunto de eventos que, caso ocorra, terá um efeito sobre a realização dos objetivos do projeto.

Para o *Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission* – COSO (2007), não são os riscos, mas os eventos que podem gerar impactos negativos ou positivos capazes de afetar a realização dos objetivos. Ainda segundo o COSO (2007), os eventos que geram impacto negativo são chamados riscos e os que geram impactos positivos podem contrabalançar os impactos negativos e são referidos como oportunidades. O uso do termo “risco” com um caráter negativo é comum entre as partes interessadas de projetos como mostra Hartono *et al.* (2014) e este trabalho adota esse conceito.

Há uma discussão na literatura sobre a distinção entre risco e incerteza, com destaque para a distinção clássica proposta por Frank Knight (1921), o qual define a incerteza como imensurável, definindo o risco como uma possibilidade futura baseada em uma distribuição de probabilidade conhecida. Da mesma forma, para Loosemore *et al.* (2006), a diferença entre risco e incerteza é que a incerteza não pode ser precisamente quantificada.

Entretanto, Loosemore *et al.* (2006) definem riscos como um evento futuro potencial que é incerto em probabilidade e consequência e se ocorrer pode afetar a habilidade da companhia para atingir os objetivos do projeto. O autor considera que a distinção entre

risco e incerteza é de grau e não de substância, servindo mais para propósitos acadêmicos do que práticos.

Já Kerzner (2013) distingue a certeza, o risco e a incerteza, aplicando esses conceitos no contexto de tomada de decisão em projetos. Desse modo, segundo o mesmo autor, os processos de tomada de decisão ocorrem em três condições:

- **Em condições de certeza:** implica que se tem conhecimento acurado dos futuros estados da natureza e quais as recompensas associadas para cada estado futuro.
- **Em condições de risco:** não há certeza sobre ocorrências futuras, mas probabilidades podem ser atribuídas às ocorrências. Nesse tipo de tomada de decisão o risco é visto como os resultados, que podem ser descritos dentro dos limites de confiança estabelecidos em distribuições de probabilidade previstas ou a partir de dados experimentais.
- **Em condições de incerteza:** nesse caso, atribuições significativas de probabilidades específicas não são possíveis.

Entretanto, para Kerzner (2013), os processos de tomada de decisão não dependem apenas das condições de certeza, risco e incerteza. Mas também da tolerância a risco do tomador de decisões.

2.1.2 A tolerância aos riscos

A forma de lidar com o risco, é, em parte, baseada na tolerância ao risco do gestor ou empresa responsável. Assumir riscos é algo inescapável na gestão de projetos, todavia o nível de risco que se considera aceitável depende de como o gerente, as partes interessadas e a organização estão dispostos a lidar com a incerteza (KERZNER, 2013; OGC, 2009). Segundo o PMI (2013), as partes interessadas do projeto e as organizações, dependendo da atitude em relação aos riscos, podem estar dispostas a aceitar vários níveis de risco.

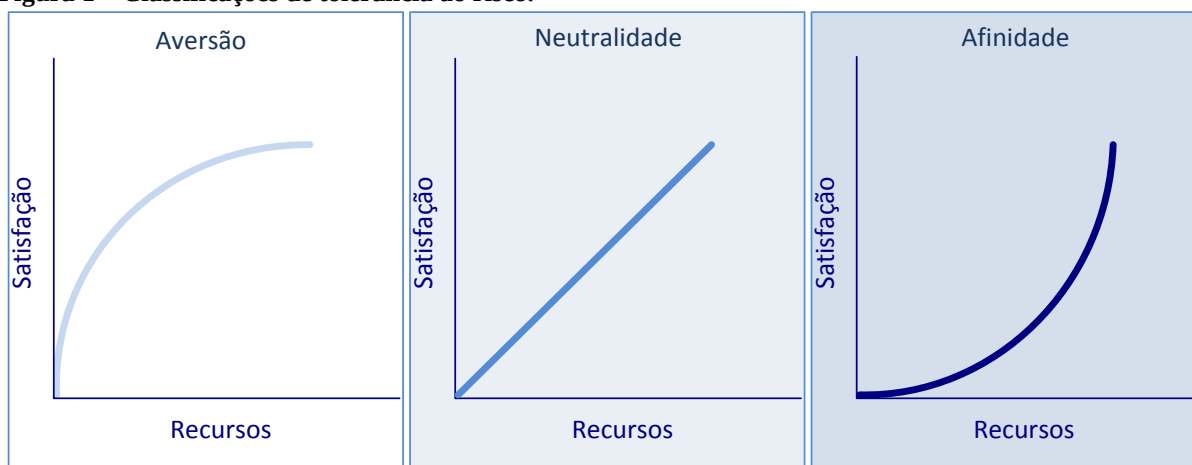
Essa aceitação ao risco, ainda segundo o PMI (2013), advém de uma série de fatores que podem ser classificados de forma ampla como se segue:

- **Apetite ao risco:** que representa o nível de incerteza que uma organização se dispõe a aceitar, diante uma expectativa de recompensa.
- **Tolerância a riscos:** nível de risco tolerado por uma organização ou indivíduo.

- **Limite de riscos:** delimita o nível máximo de risco que uma organização está disposta a aceitar, riscos acima desse limite não são tolerados. A OGC (2009) chama esse limite de linha de tolerância ao risco.

A tolerância ao risco dos decisores, segundo Kerzner (2013), é comumente classificada em três atitudes em relação ao risco: aversão, neutralidade e afinidade. Essas categorias estão representadas na Figura 1, onde o eixo vertical representa a quantidade de satisfação que o indivíduo tem na expectativa de receber uma recompensa ao assumir riscos, e o eixo horizontal é a quantidade de recursos em situação de risco.

Figura 1 – Classificações de tolerância ao risco.



Fonte: Adaptado de Kerzner (2013).

Essas atitudes em relação ao risco influenciam o modo como as pessoas ou organizações respondem às incertezas. Segundo o PMI (2013), essas atitudes são orientadas pela tolerância ao risco e por isso devem ser consideradas no processo de gerenciamento. Tanto a tolerância a riscos, quanto o conceito de riscos são definidores de como se entende o risco e como ele é gerenciado. A partir desse ponto, pode-se notar como o gerenciamento de riscos busca lidar com o risco de forma proativa e em conformidade com a tolerância aos riscos do projeto através dos processos de gerenciamento de riscos.

2.1.3 Os processos de gerenciamento de riscos

Definida conceituação de risco em projetos e os níveis de tolerância ao risco, o gerenciamento de riscos segue de forma proativa em busca de potencializar efeitos positivos e evitar a ocorrência de efeitos negativos que afetam os objetivos do projeto através de

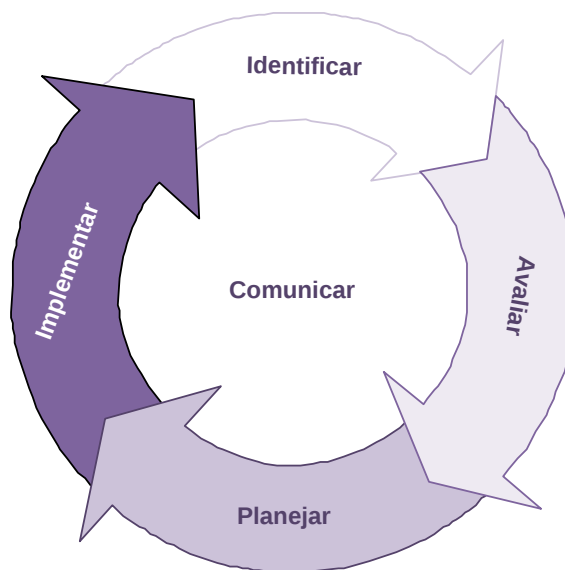
processos de gerenciamento de risco. Entre as propostas mais conhecidas está a do PMI (2013), que define o gerenciamento de risco como uma área de conhecimento em projetos.

Dessa forma, gerenciar riscos em projetos, para o PMI (2013), inclui os processos de planejamento, identificação, análise, planejamento de respostas e controle de riscos em um projeto e são descritos como se segue:

- **Planejar o gerenciamento dos riscos:** é um processo inicial de definição da forma de condução das atividades de gerenciamento dos riscos.
- **Identificar os riscos:** é a determinação dos riscos que podem afetar o projeto e de documentação das suas características.
- **Realizar a análise qualitativa dos riscos:** é a priorização de riscos para análise ou ação posterior através da avaliação e combinação de sua probabilidade de ocorrência e impacto.
- **Realizar a análise quantitativa dos riscos:** é o processo de analisar numericamente o efeito dos riscos identificados.
- **Planejar as respostas aos riscos:** processo de desenvolvimento de opções e ações para aumentar as oportunidades e reduzir as ameaças aos objetivos do projeto.
- **Controlar os riscos:** implementação de planos de respostas aos riscos, acompanhamento dos riscos identificados, monitoramento de riscos residuais, identificação de novos riscos e avaliação da eficácia do processo de gerenciamento dos riscos.

De maneira semelhante, os procedimentos de gerenciamento do risco, para a OGC (2009), compreendem cinco passos: identificar (contexto e riscos), analisar (estimativa e valoração), planejar, implementar e comunicar, relacionando-se conforme a Figura 2.

Figura 2 – Procedimento de gerenciamento de risco.



Fonte: Adaptado da OGC (2009).

Cada processo constata na figura é definido pela OGC (2009) da seguinte maneira:

- **Identificar o contexto:** é a obtenção de informações sobre o projeto, a fim de entender os objetivos específicos que estão em risco e formular a Estratégia de Gestão de Risco para o projeto.
- **Identificar riscos:** consiste em reconhecer as ameaças e oportunidades que podem afetar os objetivos do projeto.
- **Analisar os riscos:** é composto das atividades de estimar e de valorar o risco. Onde estimar é a atribuição de valores de probabilidade e impacto para as ameaças e as oportunidades identificadas no projeto. Enquanto avaliar consiste no tratamento agregado do efeito líquido de todas as ameaças e oportunidades identificadas em um projeto.
- **Planejar:** preparar respostas de gestão específicas para as ameaças e oportunidades identificadas.
- **Implementar:** é garantir que as respostas aos riscos planejadas sejam executadas, a sua eficácia monitorada e que as ações corretivas necessárias sejam tomadas.
- **Comunicar:** é um procedimento realizado continuamente, o qual deve garantir que a informação relacionada com as ameaças e oportunidades do projeto seja comunicada tanto no ambiente interno quanto no ambiente externo.

Diferentemente do PMI e da OGC, Loosemore *et al.*, (2006) propõe três estágios de processos de gerenciamento de riscos. O primeiro é a identificação de riscos, que é

o processo de identificar ameaças e oportunidades. O segundo, a análise de riscos que é o processo de medir a magnitude das ameaças e oportunidades identificadas. E, por fim, o controle de risco, que é o processo de controlar os riscos analisados para maximizar oportunidades em potencial e minimizar potenciais ameaças.

Pode-se notar que a análise de risco é um tema comum nos principais corpos de conhecimento em gestão de projetos. Essa análise pode ser dividida de diferentes formas, como qualitativa e quantitativa, estimativa e avaliação, ou mesmo ser tratada como um único processo. Nesse trabalho, considera-se a divisão do PMI (2013) e nas próximas seções abordam-se a identificação de riscos, a análise qualitativa e a análise quantitativa.

2.1.4 Identificação de riscos

Os métodos para identificar os riscos do projeto são muito numerosos. Entretanto, segundo Kerzner (2013), é comum identificar os riscos do projeto de forma objetiva ou subjetiva. As principais fontes de para uma identificação objetiva dos riscos são as experiências de projetos passados como arquivos de lições aprendidas, documentos e dados. Já a identificação subjetiva se baseia na experiência e conhecimento de especialistas.

Algumas técnicas de coleta de informações para auxiliar na identificação de riscos são o *brainstorming*, a técnica Delphi, entrevistas e a análise da causa principal. Além dessas técnicas, o PMI (2013) cita algumas ferramentas como análise de premissas, técnicas de diagramas, análise SWOT (*strengths, weaknesses, opportunities and threats*), a análise de lista de verificação, opinião especializada e revisões de documentação.

Segundo a OGC (2009), pode-se identificar o risco através de listas prontas de fatores de risco acessíveis ao público que categorizam riscos em tipos ou áreas que normalmente são relevantes para uma ampla gama de projetos. Todavia, um ponto importante do processo de identificação de riscos é promover, de forma clara e inequívoca, uma descrição útil e pormenorizada dos riscos para proporcionar a análise, o tratamento e o desenvolvimento de respostas eficazes.

Depois de identificados, os riscos devem ser analisados. Esses processos de análise dos riscos são de dois tipos: análise qualitativa e análise quantitativa.

2.1.5 Análise qualitativa

A análise qualitativa fornece uma estrutura sistêmica através da captura do conhecimento corporativo para uso em projetos atuais e futuros (CHAPMAN; WARD, 2003). Já para o PMI (2013), a análise qualitativa dos riscos é o processo de priorização de riscos, que é realizado através da avaliação e combinação de sua probabilidade de ocorrência e impacto.

Comumente, a análise de risco qualitativa utiliza escalas de risco para estimar a probabilidade e consequência da ocorrência de um evento (KERZNER, 2013). Assim, segundo a OGC (2009), a análise qualitativa de risco é um termo genérico para analisar os riscos de forma subjetiva, devido a impossibilidade de serem identificados de forma acurada.

Nesse contexto, na linguagem da ISO 31.000, análise de riscos é o processo de compreender a natureza do risco e determinar a magnitude de um risco ou combinação de riscos, expressa em termos da combinação das consequências e de suas probabilidades (ABNT, 2009). Pode-se dizer que o conceito de consequências, no contexto da ISO 31.000, equivale a ao termo “impacto” para o PMI, pois consequência é resultado de um evento que afeta os objetivos.

Desse modo, as classificações dos riscos são designadas com base na avaliação da sua probabilidade e impacto que é normalmente conduzida usando uma tabela de referência ou uma matriz de probabilidade e impacto por meio de opinião especializada. Essa matriz pode considerar os efeitos positivos ou negativos dos riscos como oportunidades e ameaças, conforme o exemplo da Figura 3.

Figura 3 – Matriz de probabilidade e impacto.

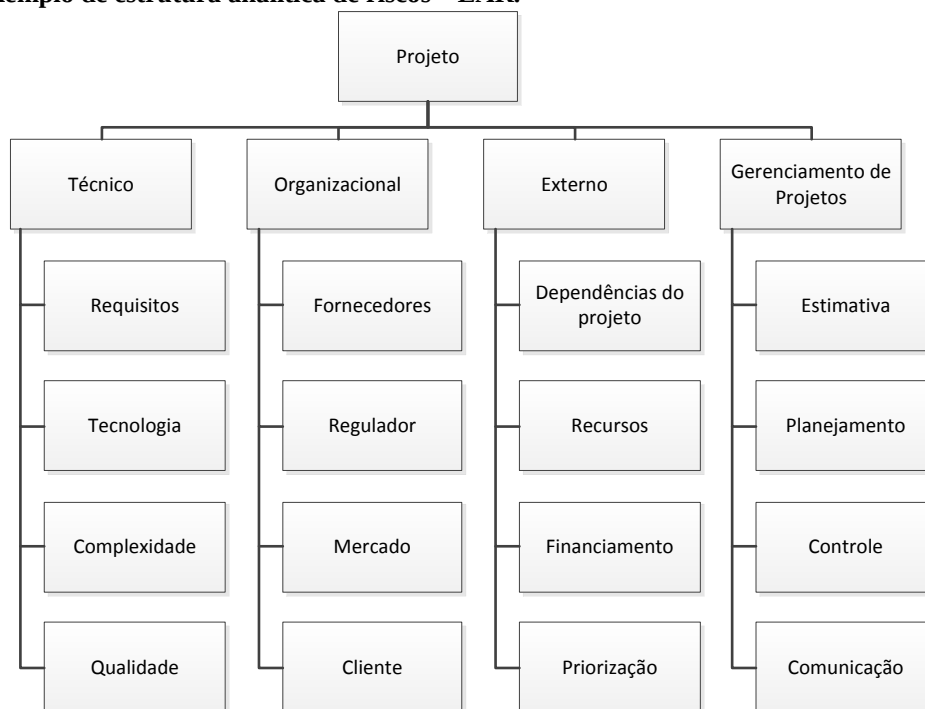
Probabilidade	Ameaças					Oportunidades				
0,90	0,72	0,36	0,18	0,09	0,05	0,05	0,09	0,18	0,36	0,72
0,70	0,56	0,28	0,14	0,07	0,04	0,04	0,07	0,14	0,28	0,56
0,50	0,40	0,20	0,10	0,05	0,03	0,03	0,05	0,10	0,20	0,40
0,30	0,24	0,12	0,06	0,03	0,02	0,02	0,03	0,06	0,12	0,24
0,10	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,08
	Muito Alto	Alto	Moderado	Baixo	Muito Baixo	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto

Fonte: Adaptado do PMI (2013).

A matriz de probabilidade e impacto ajuda a orientar as respostas aos riscos através da pontuação dos riscos, onde as ameaças são impactos negativos nos objetivos do projeto e as oportunidades são impactos positivos nesses objetivos. Na matriz, a área em cinza escuro é a zona de alto risco, ela indica riscos que podem exigir uma ação prioritária e estratégias agressivas de resposta. Já a área em cinza claro é zona de baixo risco, esses riscos podem não exigir uma ação proativa de gerenciamento. Esse raciocínio se aplica as ameaças e oportunidades, de modo que tanto efeitos positivos quanto negativos podem ser analisados (PMI, 2013).

Além da análise dos efeitos positivos e negativos e sua probabilidade de ocorrência, os riscos podem ser agrupados. As principais formas de agrupamento dos fatores de risco são: a categorização pela fase do projeto, por área do projeto afetada, por causas principais comuns ou por fontes de risco. Essas categorias geralmente são dispostas em uma estrutura hierárquica chamada estrutura analítica de riscos – EAR, exemplificada na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de estrutura analítica de riscos – EAR.



Fonte: Adaptado do PMI (2013)

O uso da matriz de probabilidade e impacto e da EAR possibilita uma análise estruturada dos riscos. A EAR organiza de maneira hierárquica e agrega fatores de risco em grupos e a matriz de probabilidade e impacto estrutura de forma sistemática as estimativas de probabilidade e impacto (CHAPMAN; WARD, 2003; ABNT, 2009; PMI, 2013). Essas ferramentas organizam os dados de entrada para o processo de análise quantitativa.

2.1.6 Análise quantitativa

A eficácia e eficiência na condução da análise quantitativa são influenciadas pela análise qualitativa, pois esta é uma extensão daquela. Assim os dados da análise qualitativa devem ser averiguados quanto à sua consistência para, posteriormente, serem utilizados na análise quantitativa (CHAPMAN; WARD, 2003; PMI, 2013).

Desse modo, a análise quantitativa é o processo de analisar o efeito dos riscos numericamente. E seu principal benefício é a produção de informações acerca dos riscos para respaldar a tomada de decisão, reduzindo assim o grau de incerteza dos projetos (PMI, 2013). Nesse processo, é analisado de forma agregada o efeito de todas as ameaças e oportunidades identificadas em um projeto (OGC, 2009).

Na análise quantitativa, deve-se usar opinião especializada para determinar tanto a necessidade quanto a viabilidade da análise dos riscos, considerando a disponibilidade de tempo e orçamento e as especificações qualitativas ou quantitativas dos riscos e impactos (PMI, 2013). Apenas após essas considerações devem ser aplicadas as diversas técnicas quantitativas.

Muitas metodologias são utilizadas na análise quantitativa de riscos. Entre essas, pode-se citar a matriz de resultado (*payoff matrix*), árvore de decisão, diagramas de influência, simulação Monte Carlo, entre outras (KERZNER, 2013). Segundo a OGC (2009), geralmente se utilizam técnicas de modelagem, aritméticas ou estatísticas nas análises quantitativas.

As metodologias quantitativas possuem a abordagem amplamente probabilística ou determinística. Por isso, alguns destes modelos possuem aplicabilidade limitada em projetos reais. Isso ocorre devido ao fato de que muitos dos problemas de tomada de decisão são ambíguos, baseados em estruturas conceituais que modelos clássicos não são capazes de tratar (KANGARI, 1988).

A análise de riscos em projetos é um processo complexo que lida diretamente com problemas onde o gerente tem uma compreensão imprecisa, principalmente devido a aspectos não conhecidos e vagos de interpretação da realidade do projeto. Esse tipo de problema não é claro. Pois, não é possível dizer com certeza se um determinado evento ocorrerá, e se ele terá um impacto positivo ou negativo nos objetivos do projeto.

Em termos lógicos, não se pode dizer que é “verdadeiro” nem que é “falso” que “ocorrerá um determinado evento”. E não é possível afirmar que é “verdadeiro” ou “falso” que o evento terá impacto positivo, ou se terá impacto negativo.

Isso ocorre, porque na análise de risco, como em outras atividades humanas, o cérebro interpreta informações imprecisas e incompletas do ambiente, captadas pelos órgãos sensoriais. E devido à imprecisão das informações, estas não podem ser tratadas como inteiramente verdadeiras nem como inteiramente falsas.

Por outro lado, os sistemas *fuzzy* são muito úteis para lidar com problemas complexos que não são bem definidos (EBRAT; GHODSI, 2014).

2.2 LÓGICA FUZZY

Diferente da lógica tradicional, a lógica *fuzzy* tem a capacidade de incorporar um raciocínio difuso a problemas até então intratáveis e complexos. Isso trouxe a possibilidade de lidar matematicamente com a forma imprecisa dos pensamentos humanos.

A lógica *fuzzy* busca modelar, através de funções matemáticas a natureza difusa dos pensamentos humanos, que tendem a ser abstratos e imprecisos. Segundo Zadeh (1965), classes ou conjuntos definidos de maneira imprecisa são uma parte importante dos pensamentos humanos, particularmente quando se trata de reconhecimento de padrões, comunicação e abstração.

Dada a importância do tema e com o objetivo de introduzir o assunto, sem a pretensão de esgotá-lo, nesta seção, são apresentados conceitos e definições básicas sobre conjuntos, operações, regras e sistemas inferência *fuzzy*.

2.2.1 Conjuntos *fuzzy*

A teoria de conjuntos tradicional é importantíssima e constitui uma ferramenta indispensável para a matemática em geral. Entretanto, ela não reflete a natureza de algumas formas de pensamento humano. Considere o conjunto dos números reais positivos menores que 1,6:

$$A = \{x \in \mathbb{R}_+^* | x < 1,6\}, \quad (1)$$

essa definição é precisa e indubitável, mas ela não reflete o conceito de, por exemplo, uma “pessoa baixa”. Isto é, um conjunto de pessoas baixas não é apenas um conjunto de pessoas com altura menor que 1,6 metros.

No exemplo citado, a natureza dicotômica dos conjuntos tradicionais faria com que o conjunto de pessoas baixas incluísse pessoas com 1,599 metros e excluísse pessoas com 1,60 metros. Isto é, Maria com altura $x=1,599$ metros, pertence ao conjunto de “pessoas baixas”; enquanto João com altura de 1,60 metros não pertence ao conjunto. Essa distinção é intuitivamente errada, pois uma diferença de um milímetro não define se uma pessoa é baixa ou não. O problema principal está na forma como se inclui ou exclui um elemento do conjunto.

Isso ocorre porque em um conjunto tradicional A pode-se dizer que um elemento x pertence ao conjunto A ou que o elemento x não pertence ao conjunto. Esta é uma

relação binária, isto é, “x pertencer a A” equivale a 1, e “x não pertencer a A”, a 0. Esse comportamento binário não ocorre na teoria de conjunto *fuzzy*.

Em um conjunto *fuzzy* a inclusão de um elemento em um conjunto é caracterizado por uma função de pertinência (MF) que atribui a cada objeto um grau de pertinência que varia entre 0 e 1 (ZADEH, 1965).

Segundo Jang, Sun e Mizutani (1997), a definição formal de um conjunto *fuzzy* é uma extensão da definição de um conjunto clássico: se X é uma coleção de objetos denotados genericamente por x, então um conjunto *fuzzy* A em X é definido como um conjunto de pares ordenados:

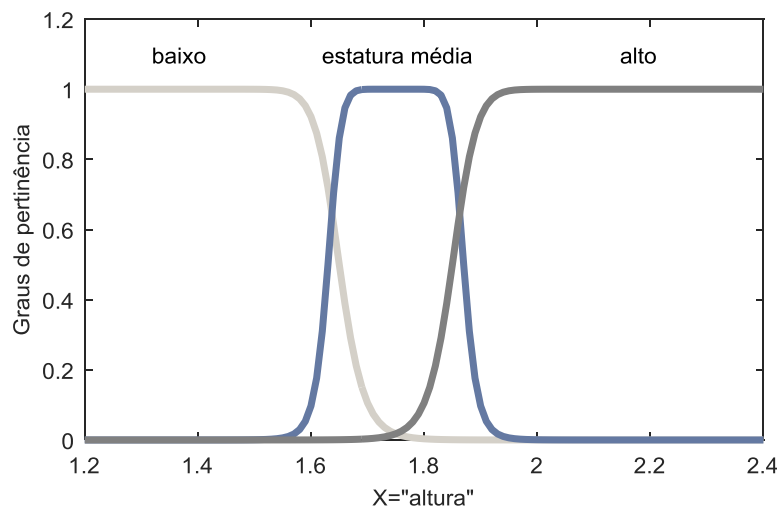
$$A = \{[x, \mu_A(x)] | x \in X\}, \quad (2)$$

onde $\mu_A(x)$ é chamada função de pertinência (MF) para o conjunto *fuzzy* A. A MF mapeia cada elemento de X com um grau de pertinência entre 0 e 1. Comumente, X é chamado de universo de discurso e pode consistir de objetos discretos ordenados e não-ordenados, ou de um espaço contínuo.

Na prática, quando o universo de discurso X é um espaço contínuo (a reta real ou um subconjunto dela), usualmente particiona-se X em vários conjuntos *fuzzy* definidos por MFs. Esses conjuntos *fuzzy* carregam nomes chamados de valores linguísticos (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

Por exemplo, seja X uma variável linguística “altura” que pode assumir os valores linguísticos “baixo”, “estatura média” e “alto”. Os conjuntos “baixo”, “estatura média” e “alto” são definidos respectivamente pelas MFs $\mu_{baixo}(x)$, $\mu_{estatura\ média}(x)$ e $\mu_{alto}(x)$ que cobrem todo universo do discurso X, conforme exemplificado no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Funções de pertinência de valores linguísticos



Fonte: Elaborado pelo autor.

As especificações das MFs são subjetivas e dependem de preferências pessoais. No exemplo do Gráfico 1, as MFs não são definidas por um método estatístico, mas pela decisão subjetiva do autor. Isso porque, uma MF depende de como um indivíduo percebe ou expressa conceitos abstratos, não possuindo nenhuma relação com aleatoriedade. Essa é a principal diferença entre o estudo dos conjuntos *fuzzy* e a teoria das probabilidades, que lida com o tratamento objetivo do fenômeno aleatório (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

Dado que os conjuntos *fuzzy* são unicamente definidos por sua função de pertinência, devemos definir mais especificamente essas funções.

2.2.2 Funções de pertinência

Ainda que nada impeça que universos de discursos sejam discretos, em sua grande maioria, os conjuntos *fuzzy* possuem como universo de discurso a reta real, ou um subconjunto desta. Desse modo, seria impraticável listar todos os pares ordenados que definiriam um dada MF. Por isso, as MFs são definidas, mais convenientemente, como uma função matemática.

Algumas características e definições importantes relacionadas, segundo Jang, Sun e Mizutani (1997), às MFs são os conceitos de suporte, *core*, normalidade, ponto de cruzamento, *fuzzy singleton*, convexidade, simetria e número *fuzzy*. Esses conceitos são definidos da seguinte forma:

- O **suporte** de um conjunto *fuzzy* A é o conjunto de todos os pontos x em X onde $\mu_A(x) > 0$:

$$\text{support}(A) = \{x | \mu_A(x) > 0\}. \quad (3)$$

- O **core** de um conjunto *fuzzy* A é o conjunto de todos os pontos x em X em que $\mu_A(x) = 1$:

$$\text{core}(A) = \{x | \mu_A(x) = 1\}. \quad (4)$$

- Um conjunto *fuzzy* A é dito **normal** se seu *core* não é vazio:

$$\exists x \in X | \mu_A(x) = 1\}. \quad (5)$$

- Um **ponto de cruzamento** de um conjunto *fuzzy* A é um ponto x em X , tal que, $\mu_A(x) = 0,5$:

$$\text{crossover}(A) = \{x | \mu_A(x) = 0,5\}. \quad (6)$$

- Um **fuzzy singleton** é um conjunto fuzzy unitário e normal.
- Um conjunto fuzzy A é **convexo** se, e somente se, para cada $x_1, x_2 \in X$ e qualquer $\lambda \in [0,1]$:

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min[\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)]. \quad (7)$$

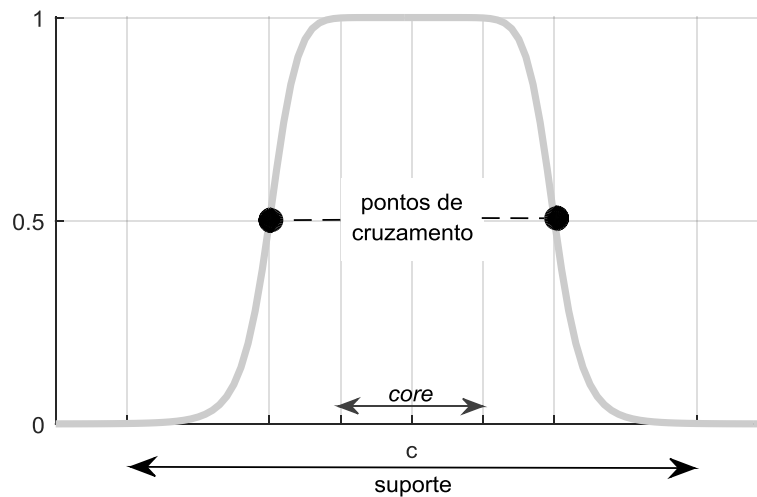
- Um conjunto fuzzy é **simétrico** se sua MF é simétrica ao redor de um ponto $x = c$:

$$\mu_A(c + x) = \mu_A(c - x) \quad \forall x \in X \quad (8)$$

- Um **número fuzzy** é um conjunto fuzzy na reta real ($\mathbb{R}$) que satisfaz as condições de normalidade e convexidade.

Os conceitos de suporte, *core*, normalidade, ponto de cruzamento, e simetria são exemplificados no Gráfico 2, que mostra uma MF normal e convexa na reta real, um número fuzzy.

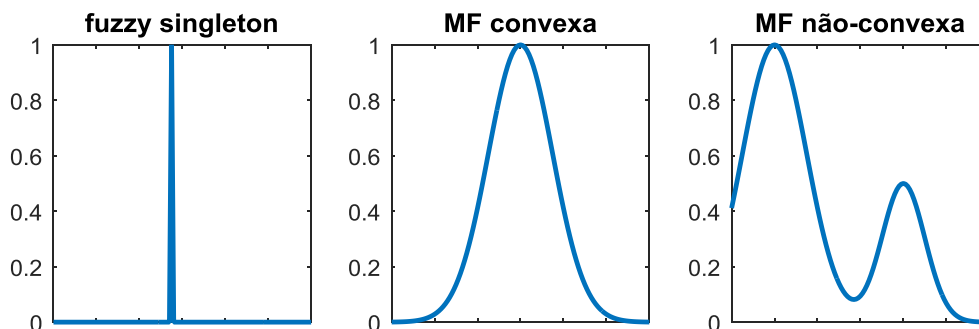
Gráfico 2 – Função de pertinência convexa, normal e simétrica



Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 3 mostra exemplos de um *fuzzy singleton* (a), uma MF convexa (b) e a uma MF não-convexa (c).

Gráfico 3 – Exemplos de funções de pertinência unitária, convexa e não-convexa.

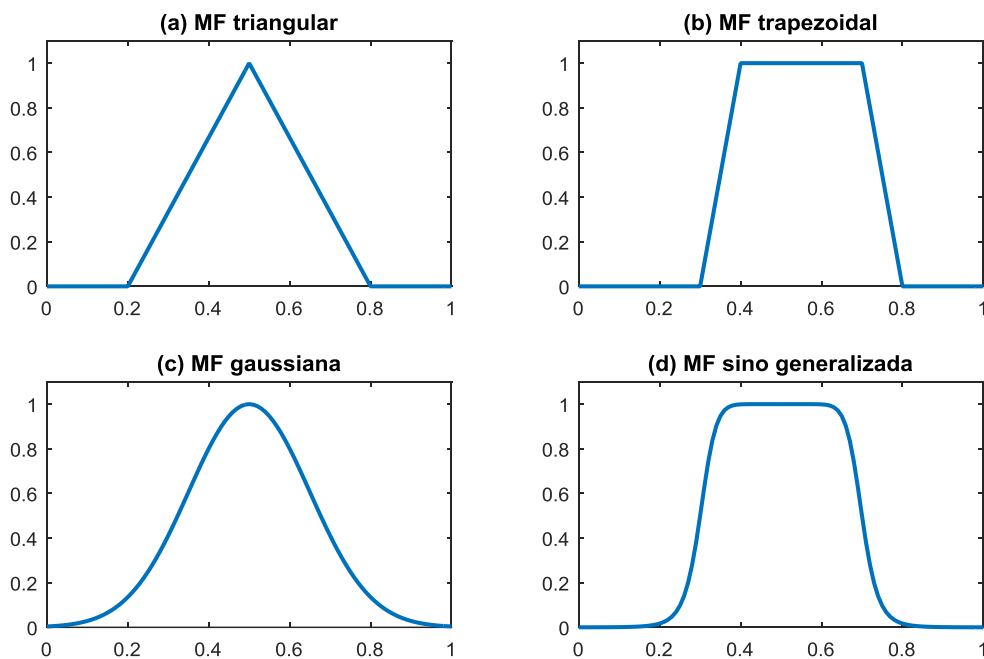


Fonte: Elaborado pelo autor.

Existem inúmeras classes de MFs, em sua maioria elas são definidas como funções matemáticas parametrizadas. Elas são definidas, mais comumente, em uma dimensão, mas nada impede que sejam definidas em duas ou mais dimensões. Neste trabalho, são utilizadas principalmente MF parametrizadas de uma dimensão.

O Gráfico 4 mostra as principais classes de MFs unidimensionais parametrizadas: (a) a função triangular, (b) a função trapezoidal, (c) a função gaussiana e a (d) função sino generalizada.

Gráfico 4 – Principais classes de MFs unidimensionais parametrizadas



Fonte: Adaptado de Jang, Sun e Mizutani (1997).

A MF triangular, exemplificada na Gráfico 4a, é definida por três parâmetros $\{a, b, c\}$ conforme demonstra a equação 9.

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a_i}{b_i-a_i}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c_i-x}{c_i-b_i}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (9)$$

Tal qual a MF triangular, a MF trapezoidal, conforme a equação 10 e elemento b do Gráfico 4, possui quatro parâmetros $\{a, b, c, d\}$.

$$\text{trapmf}(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a_i}{b_i-a_i}, & a \leq x \leq b \\ 0, & b \leq x \leq c \\ \frac{d_i-x}{d_i-c_i}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (10)$$

O elemento c do Gráfico 4 mostra um exemplo da função gaussiana, que possui apenas dois parâmetros $\{c, \sigma\}$, conforme equação 11.

$$\text{gaussmf}(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (11)$$

E a função sino generalizado, exemplificado no elemento d do Gráfico 4, é especificado por três parâmetros $\{a, b, c\}$:

$$\text{gbellmf}(x; a, b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{a}\right|^{2b}} \quad (12)$$

As funções triangular e trapezoidal possuem fórmulas simples e são computacionalmente eficientes. Isso faz com que elas sejam muito utilizadas, especialmente para aplicações em tempo real. Já a função gaussiana e a função sino generalizada não podem definir conjuntos *fuzzy* assimétricos, entretanto são muito utilizadas por serem funções suaves. Outras funções de pertinência utilizadas nesse trabalho são apresentadas no Anexo B – Outras Funções de Pertinência.

Existem várias classes de funções de pertinência, as quais definem conjuntos *fuzzy*. E, da mesma forma que os conjuntos tradicionais, os conjuntos *fuzzy* se relacionam por meio das operações *fuzzy*.

2.2.3 Operações *fuzzy*

As principais operações com conjuntos *fuzzy*, a exemplo das operações da teoria clássica de conjuntos, são a união, a interseção e o complemento. Essas operações possuem relação direta com os operadores lógicos *OR*, *AND* e *NOT*, respectivamente.

Na lógica *fuzzy* as operações com conjuntos são também operações lógicas. Desse modo, conforme Zadeh (1965), os a união ou disjunção de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* C , onde $C = A \cup B$ ou $C = A \text{ OR } B$. A MF do conjunto C é dada por:

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x). \quad (13)$$

No caso da intercessão, o mesmo autor define que a intercessão ou conjunção de dois conjuntos *fuzzy* A e B é um conjunto *fuzzy* C, onde $C = A \cap B$ ou $C = A \text{ AND } B$. Nesse caso, a MF do conjunto C é dada por:

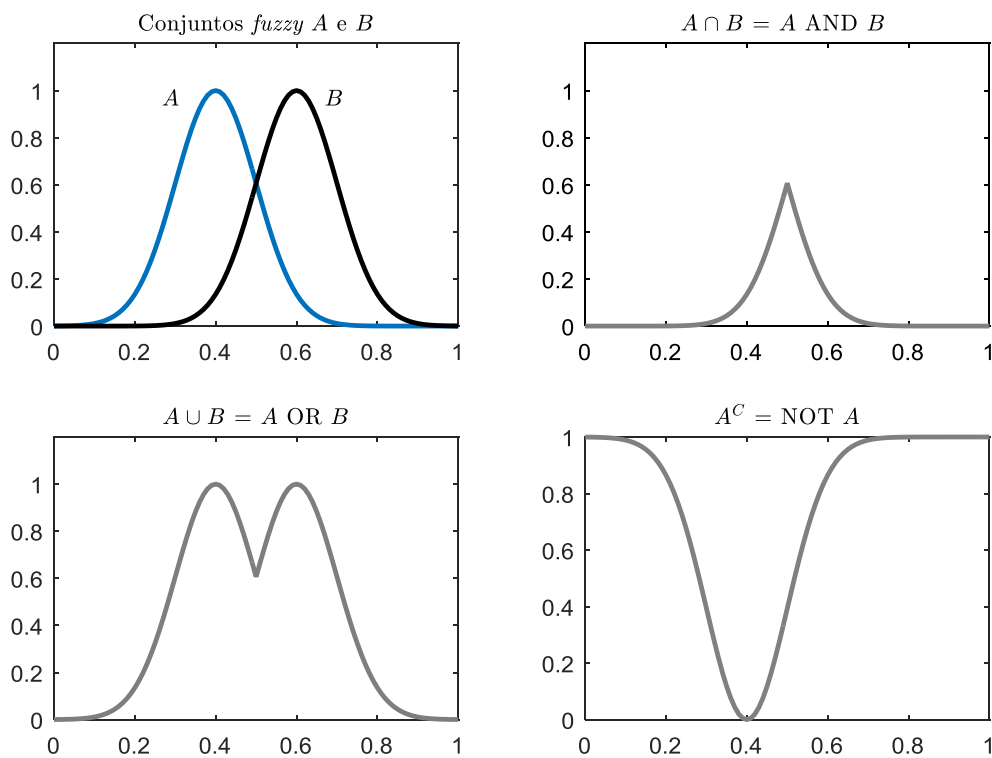
$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x). \quad (14)$$

Do mesmo modo, o complemento ou negação de um conjunto *fuzzy* A é denotado por $\bar{A}$ ($\neg A$, NOT A). A MF do conjunto *fuzzy* $\bar{A}$ é dada por:

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x). \quad (15)$$

As operações de intercessão, união e complementos de dois conjuntos são exemplificadas no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Exemplo das principais operações com conjuntos *fuzzy*



Fonte: Adaptado de Jang, Sun e Mizutani (1997).

As operações de união, intercessão e complementação de conjuntos *fuzzy* podem ser realizadas por outros operadores, desde que esses operadores atendam alguns requisitos (YONEYAMA; NASCIMENTO, 2000).

Um operador *fuzzy* de complementação (NOT) é uma função contínua $N: [0,1] \rightarrow [0,1]$ que atende os requisitos:

$$N(0) = 1 \text{ e } N(1) = 0 \quad (\text{contorno}) \quad (16)$$

$$N(a) \geq N(b) \text{ se } a \leq b \quad (\text{monotonicidade}) \quad (17)$$

A intercessão de dois conjuntos *fuzzy* é se dá, geralmente, através da função $T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, que agrega duas funções de pertinência, conforme a equação 18.

$$\mu_{A \cap B}(x) = T[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \tilde{*} \mu_B(x), \quad (18)$$

nessa notação $\tilde{*}$ é um operador binário para a função T . Diz-se que uma operação desse tipo é uma **norma-t** se esta satisfizer as seguintes propriedades:

$$T(0,0) = 0; T(a, 1) = T(1, a) = a \quad (\text{contorno}) \quad (19)$$

$$T(a, b) \leq T(c, d), \text{ se } (a \leq c) \text{ e } (b \leq d) \quad (\text{monotonicidade}) \quad (20)$$

$$T(a, b) = T(b, a) \quad (\text{comutatividade}) \quad (21)$$

$$T(a, T(b, c)) = T(T(a, b), c) \quad (\text{associatividade}). \quad (22)$$

Já no caso da união de conjuntos *fuzzy*, são os operadores co-norma triangular, também chamados de operadores **norma-s** que são usados. Esses operadores são definidos por uma função $S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1]$, e são simbolizados pelo operador binário $\tilde{+}$ para a função como se segue:

$$\mu_{A \cup B}(x) = S[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_A(x) \tilde{+} \mu_B(x), \quad (23)$$

Os operadores norma-s devem atender à seguintes condições:

$$S(1,1) = 1; S(0, a) = S(a, 0) = a \quad (\text{contorno}) \quad (24)$$

$$S(a, b) \leq S(c, d), \text{ se } (a \leq c) \text{ e } (b \leq d) \quad (\text{monotonicidade}) \quad (25)$$

$$S(a, b) = S(b, a) \quad (\text{comutatividade}) \quad (26)$$

$$S(a, S(b, c)) = S(S(a, b), c). \quad (\text{associatividade}). \quad (27)$$

Os operadores norma-t e norma-s são amplamente utilizados nas implicações *fuzzy*. As quais, junto com o raciocínio *fuzzy*, constituem conceitos básicos dos sistemas de inferência *fuzzy*.

2.2.4 Regras *fuzzy if-then*

Uma regra *fuzzy if-then* assume a forma “Se x é A , então y é B ”, onde A e B são valores linguísticos definidos por conjuntos *fuzzy* nos universos de discurso X e Y . Os valores linguísticos x e y pertencem respectivamente às variáveis linguísticas X e Y .

Comumente a proposição “ x é A ” é chamada de antecedente, enquanto a proposição “ y é B ” é chamada de conseqüente. Muitas vezes a regra condicional “Se x é A ,

então y é B ” é denotada, de forma abreviada, por $A \rightarrow B$. Essencialmente, essa expressão descreve a relação entre x e y .

Essa relação sugere que uma regra *fuzzy if-then* é definida como uma relação *fuzzy* binária R no espaço $X \times Y$, conforme (ZADEH, 1965, 1971). Segundo Jang, Sun e Mizutani (1997), existem duas forma de interpretar a expressão $A \rightarrow B$, na primeira, se a interpretação for “A junto com B”, temos:

$$R = A \rightarrow B = A \times B = \int_{X \times Y} \mu_A(x) \tilde{*} \mu_B(y) / (x, y), \quad (28)$$

onde $\tilde{*}$ é um operador norma-t.

Entretanto, se interpretar-se a expressão $A \rightarrow B$ como “A ocasiona B”, então podemos escrevê-la de quatro formas:

- Implicação material:

$$R = A \rightarrow B = \neg A \cup B \quad (29)$$

- Cálculo proposicional:

$$R = A \rightarrow B = \neg A \cup (A \cap B) \quad (30)$$

- Cálculo proposicional estendido:

$$R = A \rightarrow B = (\neg A \cap B) \cup B \quad (31)$$

- Generalização do modus ponens:

$$\mu_R(x, y) = \sup\{c | \mu_A(x) \tilde{*} c \leq \mu_B(y) \text{ e } 0 \leq c \leq 1\} \quad (32)$$

Essas quatro formas são equivalentes e são normalmente representadas por $A \rightarrow B \equiv \neg A \cup B$, onde A e B são proposições.

As duas interpretações da expressão $A \rightarrow B$, podem formar vários operadores norma-t e norma-s para calcular a relação *fuzzy* binária $R = A \rightarrow B$. Desse modo, R pode ser visto como um conjunto *fuzzy* definido por uma MF bidimensional:

$$\mu_R(x, y) = f(\mu_A(x), \mu_B(y)) = f(a, b) \quad (33)$$

com $\mu_A(x) = a$, $\mu_B(y) = b$, onde a função f é chamada de função de implicação *fuzzy*. Essa função transforma os graus de pertinência de x em A e y em B nos de (x, y) em $A \rightarrow B$.

As regras *fuzzy if-then*, e suas relações, junto com a regra composicional de inferência de Zadeh (1973), constituem a base da estrutura do raciocínio *fuzzy*.

2.2.5 Raciocínio fuzzy

O raciocínio fuzzy se baseia em uma importante regra de derivação do sistema de lógica formal, o *modus ponens*. Em latim, o nome mais exato dessa regra de derivação é *modus ponendo ponens*, que significa modo que se afirma afirmando (HAZEWINKEL, 2002).

O *modus ponens* é um silogismo hipotético construtivo do tipo: p implica q ; p é verdadeiro, logo q é verdadeiro (CLARK, 2004). Um silogismo hipotético pode ser expresso com o uso dos conectivos *se* e *então*. Considere a seguinte estrutura:

Premissa 1:	x é A
Premissa 2:	<i>Se x é A, então y é B</i>
Conclusão:	y é B

No raciocínio humano, entretanto, o *modus ponens* é realizado de maneira aproximada. Assim, na lógica fuzzy utiliza-se o *modus ponens* generalizado:

Premissa 1 (fato):	x é A'
Premissa 2 (regra):	<i>Se x é A, então y é B</i>
Conclusão:	y é B'

onde A' está próximo a A , B' está próximo a B e A , B , A' e B' são conjuntos fuzzy de seus respectivos universos de discurso.

Desse modo, o procedimento de inferência do raciocínio fuzzy pode ser definido da seguinte forma: sejam A , A' e B conjuntos fuzzy dos universos de discurso X , X e Y , respectivamente. Assuma que a implicação fuzzy $A \rightarrow B$ é expressa como uma relação fuzzy R em $X \times Y$. Então, o conjunto fuzzy B pode ser obtido por “ x é A ” e da regra fuzzy “*Se x é A , então y é B* ” definido por:

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \min[\mu_{A'}(x), \mu_R(x, y)] = \bigvee_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)]. \quad (34)$$

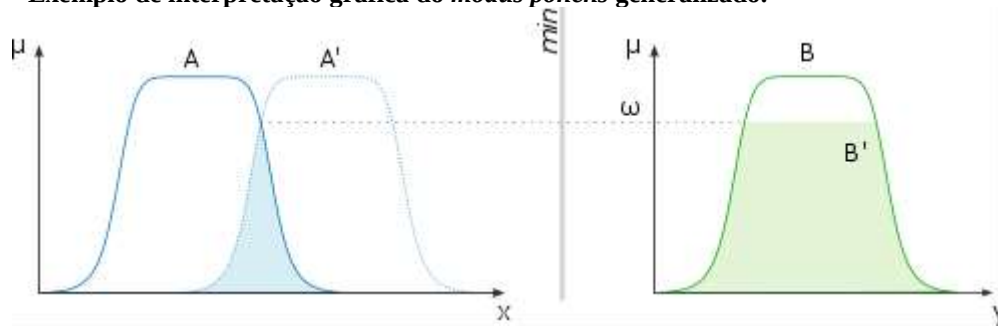
Ou, de forma equivalente, por:

$$B' = A' \circ R = A' \circ (A \rightarrow B). \quad (35)$$

Onde, o símbolo “ $\circ$ ” indica o operador de composição.

Um exemplo simples para ilustrar o procedimento de inferência para o *modus ponens* generalizado, utilizando a função de implicação fuzzy de Mamdani e Assilian (1975) ($f(a, b) = \min(a, b)$) e a composição max-min, encontra-se na Figura 5.

Figura 5 – Exemplo de interpretação gráfica do *modus ponens* generalizado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 5, pode-se notar a seguinte simplificação:

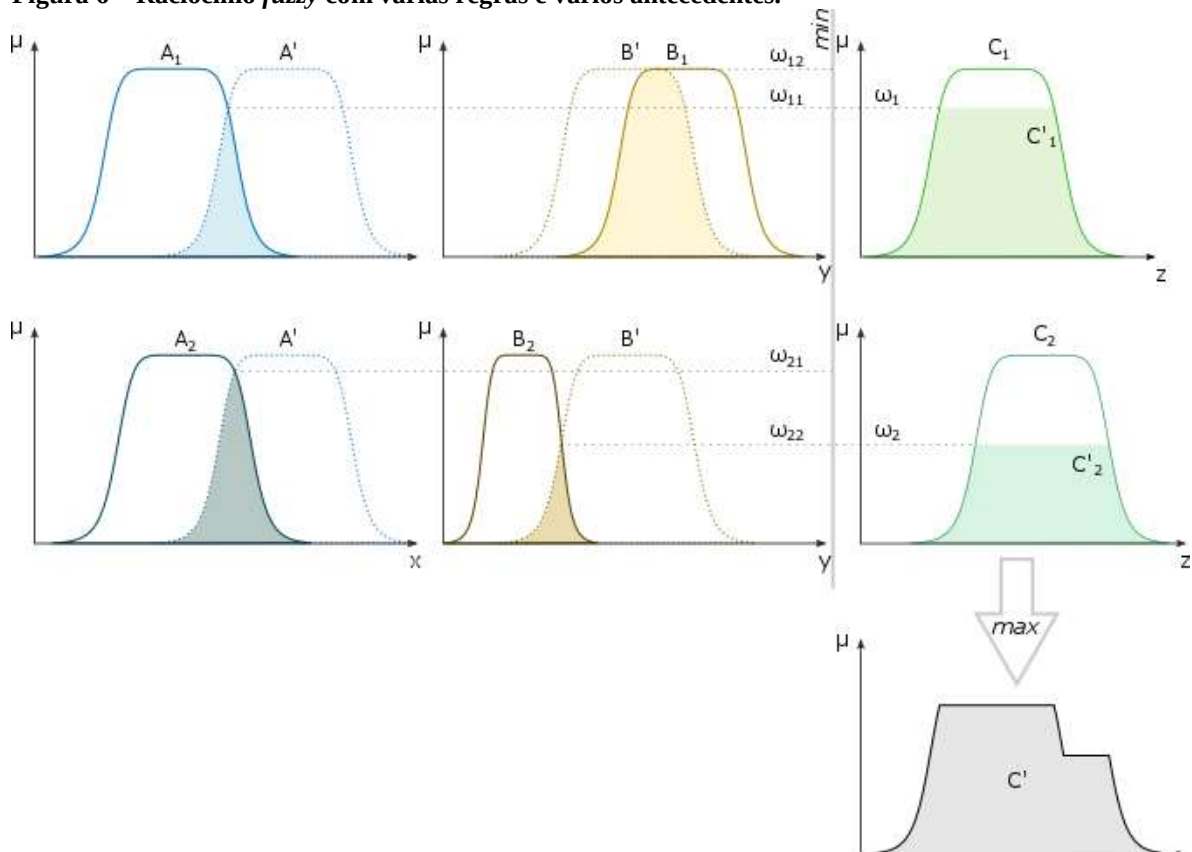
$$\mu_{B'}(y) = \{V_x[\mu_{A'}(x) \wedge \mu_A(x)]\} \wedge \mu_B(y) = \omega \wedge \mu_B(y), \quad (36)$$

onde ω denota o grau de compatibilidade entre A e A' . Quando a parte antecedente é formada por múltiplos antecedentes e estes são conectados por um operador *AND*, então este é chamado de grau de satisfação ou *firing strength* da regra *fuzzy*:

$$\omega_1 \wedge \omega_2 \wedge \dots \wedge \omega_n = \omega. \quad (37)$$

Outro exemplo com múltiplas regras e múltiplos antecedentes, utilizando a composição *max-min* e a função de implicação *fuzzy* de Mamdani e Assilian (1975), possui a interpretação gráfica da Figura 6.

Figura 6 – Raciocínio *fuzzy* com várias regras e vários antecedentes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa figura é a representação gráfica do *modus ponens* generalizado com duas regras de dois antecedentes, na seguinte forma:

Premissa 1 (fato): $x \text{ é } A' \text{ e } y \text{ é } B'$,
 Premissa 2 (regra): *Se $x \text{ é } A_1 \text{ e } y \text{ é } B_1$, então $z_1 \text{ é } C_1$,*
 Premissa 3 (regra): *Se $x \text{ é } A_2 \text{ e } y \text{ é } B_2$, então $z_2 \text{ é } C_2$,*
 Conclusão: $z \text{ é } C'$.

O processo de raciocínio do exemplo inclui o cálculo dos *firing strengths* demonstrado na Equação 37 e realizado com o operador *min* a união dos consequentes das duas regras com o uso do operador *max*. Desse modo, o processo de raciocínio *fuzzy* pode ser, conforme Jang, Sun e Mizutani (1997), resumido nos seguintes passos:

- 1- Grau de compatibilidade: comparar os fatos com os antecedentes das regras *fuzzy*;
- 2- *Firing strength*: combinar os graus de compatibilidade dos antecedentes por meio de um operador AND ou OR;
- 3- Consequente induzido: aplicar os *firing strengths* às MFs consequentes;
- 4- Saída global: agregar as MFs consequentes induzidas e obter uma saída global.

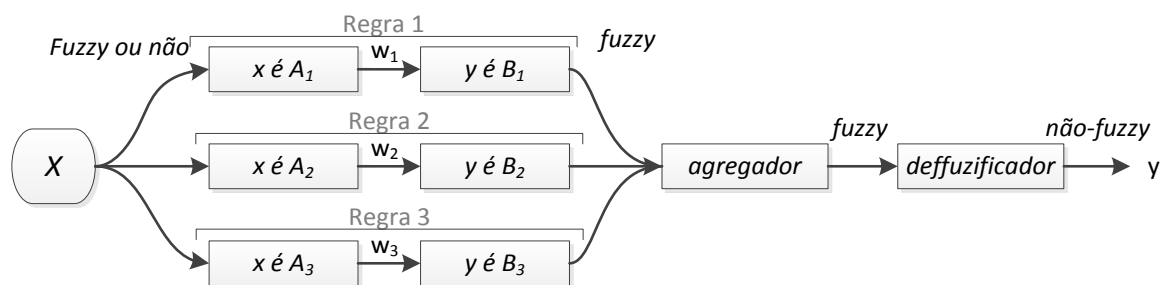
Esse processo de raciocínio ou inferência é fundamental para os sistemas de inferência *fuzzy*.

2.2.6 Sistemas de inferência *fuzzy*

Os sistemas de inferência *fuzzy* se fundamentam na teoria dos conjuntos *fuzzy*, nas regras *fuzzy if-then* e no processo de raciocínio *fuzzy*. Eles têm sido usados em várias áreas como classificação de dados, automação, reconhecimento de padrões, robótica, séries temporais e tomada de decisão.

A estrutura básica de um sistema de inferência *fuzzy* é composta por um banco de regras que contenha as regras *fuzzy if-then*, um banco de dados que defina as funções de pertinência (MFs) a serem utilizadas nas regras *fuzzy* e um mecanismo de raciocínio *fuzzy*. Ademais, se for necessário um valor exato (não-*fuzzy*), pode-se necessitar de um método de defuzzificação. A Figura 7 mostra um diagrama de um sistema de inferência *fuzzy*.

Figura 7 – Estrutura de um sistema de inferência *fuzzy* com três regras *fuzzy*



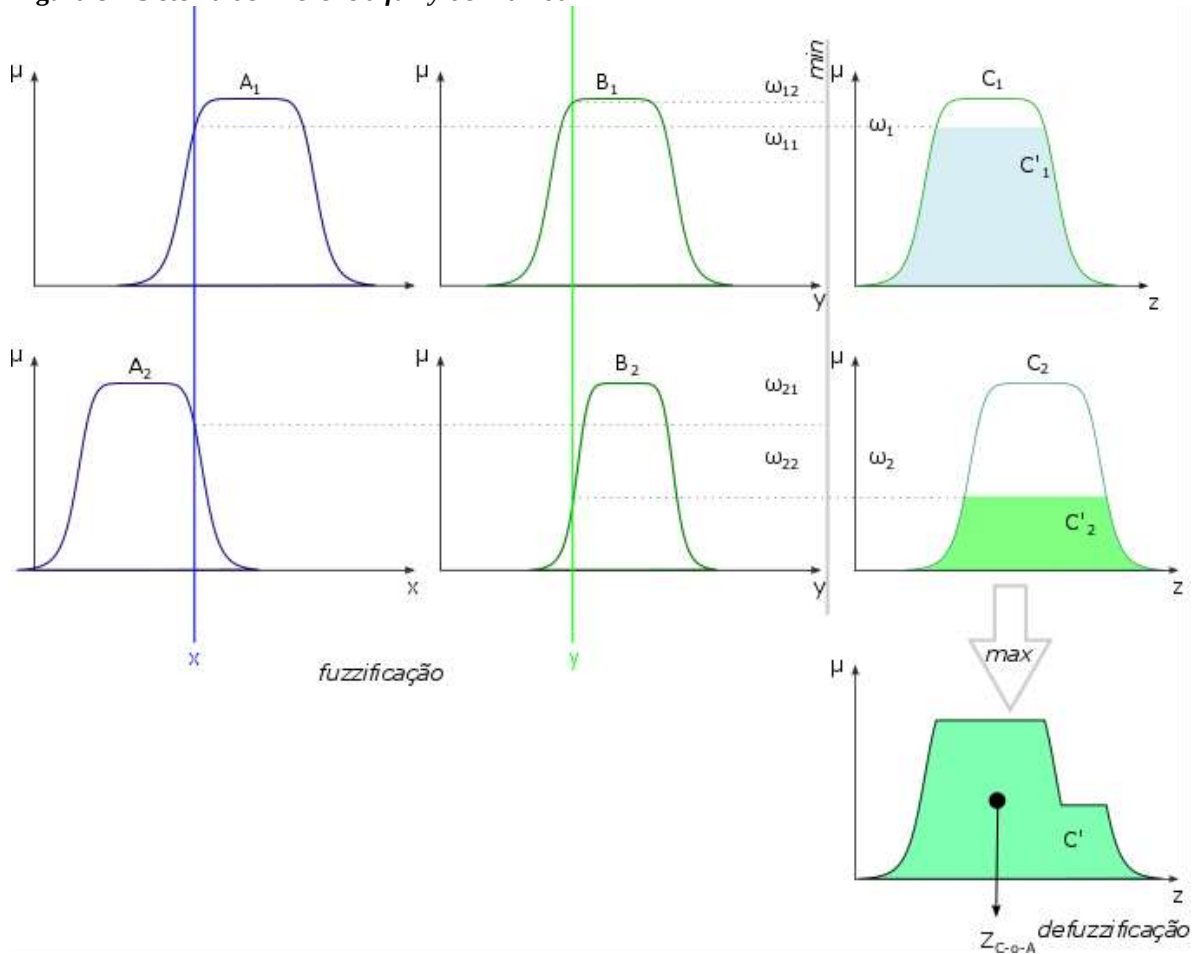
Fonte: Elaborado pelo autor.

Nessa figura a entrada do sistema, como indicado, pode ser um conjunto *fuzzy* ou número exato. No caso de uma entrada não-*fuzzy*, essa passará por uma operação de fuzzificação, que é o mapeamento do domínio não-*fuzzy* para o domínio *fuzzy*. Esse mapeamento ocorre, comumente, através das funções de pertinência que representam valores linguísticos de dada variável (SHAW; SIMOES, 1999).

As regras *if-then* e o mecanismo de raciocínio *fuzzy* produzem uma saída *fuzzy*. Esse conjunto *fuzzy* pode ser convertido, através de um mecanismo de defuzzificação, em um número exato que melhor o represente. Existem inúmeros métodos de defuzzificação, os mais utilizados, segundo Shaw e Simões (1999), são o Centro-da-Área (C-o-A), o Centro-do-Máximo (C-o-M) e a Média-do-Máximo (M-o-M).

Os métodos de fuzzificação e defuzzificação podem ser mais bem compreendidos através de um exemplo do sistema de inferência *fuzzy* proposto por Mamdani e Assilian (1975). A Figura 8 exemplifica o sistema de inferência *fuzzy* com duas entradas não-*fuzzy* x e y , as quais são fuzzificadas, a saída global do sistema é defuzzificada.

Figura 8 – Sistema de inferência *fuzzy* de Mamdani



Fonte: Elaborado pelo autor.

No sistema da Figura 8 utiliza-se a composição *max-min* e a função de implicação *fuzzy* de Mamdani e Assilian (1975). As entradas do sistema são os números reais x e y , esses são fuzzificados através das MF's da para antecedente das regras *fuzzy*, o processo de raciocínio *fuzzy* resulta no conjunto *fuzzy* C' . Posteriormente, através do processo de defuzzificação C-o-A (Cento da Área) é obtido o número real z_{C-o-A} .

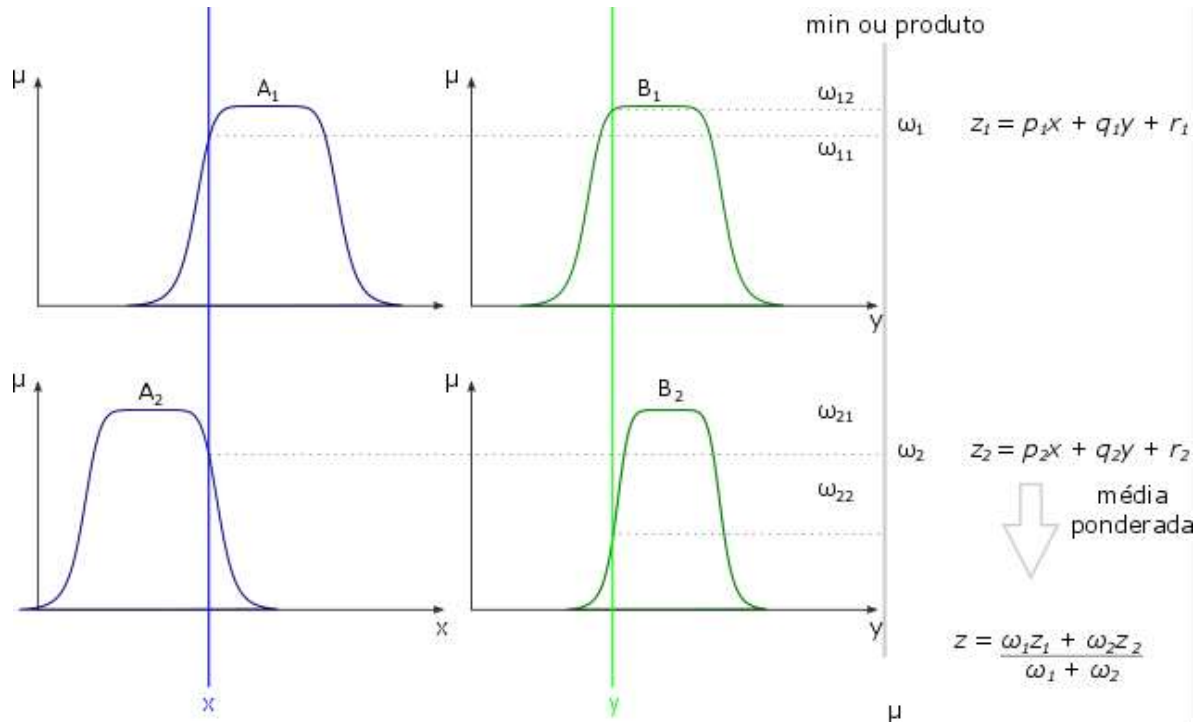
Outro sistema de inferência muito difundido é o modelo de Sugeno (SUGENO; KANG, 1988; TAKAGI; SUGENO, 1985). Este consiste em uma simplificação do modelo de Mamdani, e tem como principal diferença o consequente de cada regra *fuzzy*. Pois, no modelo de Sugeno, o consequente das regras é dado por uma função polinomial não-*fuzzy*, da seguinte forma:

$$\text{Se } x \text{ é } A_1 \text{ e } y \text{ é } B_1, \text{ então } z = f(x, y),$$

onde A e B são conjuntos fuzzy na parte antecedente da regra.

A estrutura de um sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno com duas entradas e duas regras é demonstrada na Figura 9.

Figura 9 – Sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se perceber na figura que as entradas são fuzzificadas através das MFs da parte antecedente da regra, gerando graus de compatibilidade. Esses graus são combinados através de um operador *AND*, que pode ser a função mínimo ou o produto. A combinação dos graus de compatibilidade formam os *firing strengths* que são pesos das funções polinomiais da parte consequente das regras. A saída do sistema é um valor não-*fuzzy* calculado através da média ponderada dos resultado das funções.

No sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno, as funções consequentes podem ser funções polinomiais de primeiro grau (funções lineares) ou funções de grau zero (constantes). Esse é o sistema de inferência do *adaptive neuro-fuzzy inference system*.

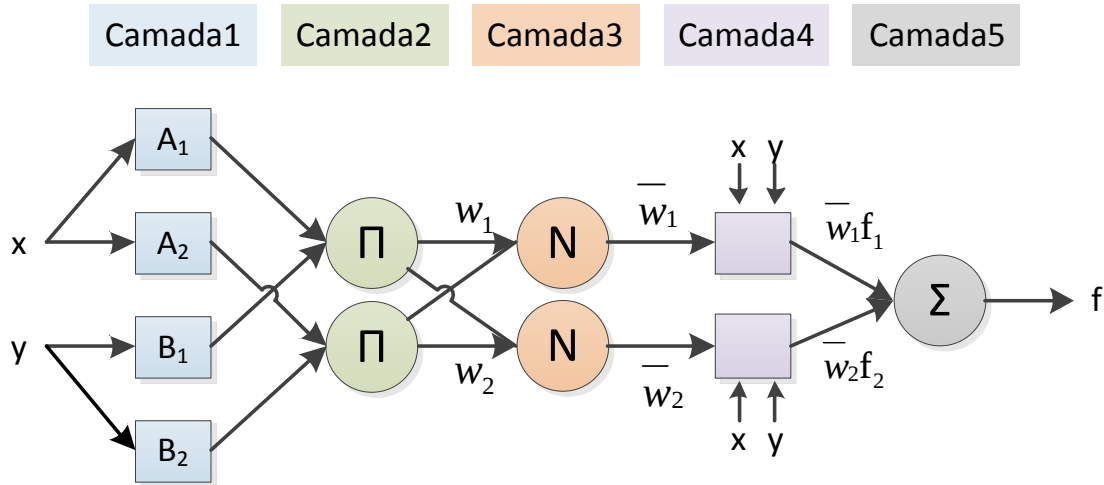
2.2.7 Adaptive neuro-fuzzy inference system

Um *adaptive neuro-fuzzy inference system* (ANFIS) é funcionalmente equivalente a um Sistema de Inferência de Sugeno. Ele pode ser usado para uma grande variedade de aplicações de modelagem de sistemas de tomada de decisão, processamento de sinal e controle (JANG, 1993).

A arquitetura da ANFIS, segundo Jang (1993), pode ser descrita de forma simplificada com um exemplo de duas entradas x e y e uma saída z , conforme a Figura 10, com duas regras *if-then*, como se segue:

- Regra 1: Se x é A_1 e y é B_1 , então $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$;
- Regra 2: Se x é A_2 e y é B_2 , então $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$.

Figura 10 – Exemplo de arquitetura ANFIS.



Fonte: adaptado de Jang (1993)

Na camada 1, todo nó i é um nó adaptativo com uma função:

$$\begin{aligned} O_{1,i} &= \mu_{A_i}(x), \quad \text{para } i = 1, 2 \text{ ou} \\ O_{1,i} &= \mu_{B_{i-2}}(y), \quad \text{para } i = 3, 4. \end{aligned} \quad (38)$$

onde x (ou y) é a entrada do nó i e A_i (ou B_{i-2}) é um valor linguístico associado. Em outras palavras, $O_{1,i}$ é o grau de pertinência da entrada x (ou y) em relação aos conjuntos *fuzzy* A ($=A_1, A_2, B_1$ ou B_2). E as funções dos nós $O_{1,i}$, denotadas por μ_A , são funções de pertinência (MF) ajustadas por meio de parâmetros, como, por exemplo, a função triangular, que é especificada por três parâmetros $\{a_i, b_i, c_i\}$ como se segue:

$$\mu_A(x) = \text{triangle}(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a_i}{b_i-a_i}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c_i-x}{c_i-b_i}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (39)$$

Em um ANFIS o conjunto de parâmetros $\{a_i, b_i, c_i\}$ nas MFs da rede são chamados parâmetros antecedentes. Esses parâmetros podem ser obtidos pelo mecanismo de treinamento do ANFIS ou podem ser definidos através da experiência de um especialista (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

A camada 2 é formada por nós fixos denotados por Π , que tem por saída o produto de todas as entradas, como se segue:

$$O_{2,i} = w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), \text{ para } i = 1, 2. \quad (40)$$

Cada saída desta camada representa um *firing strength* de uma regra. Nesses nós, pode ser utilizado qualquer operador norma-t que represente o operador *fuzzy AND*. Normalmente o operador norma-t utilizado é o produto, conforme demonstrado na equação acima.

Na camada 3, cada nó é um nó fixo chamado N , onde i -ésimo nó calcula a razão do i -ésimo *firing strength* sobre a soma de todos os *firing strengths*. A saída desta camada é chamada *firing strength* normalizados:

$$O_{3,i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_i w_i}, \text{ para } i = 1, 2. \quad (41)$$

A camada 4 possui nós adaptativos com uma função linear como se segue:

$$O_{4,i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)_i, \quad (42)$$

onde $\bar{w}_i$ é a saída da camada 3 e $\{p_i, q_i, r_i\}$ é o conjunto de parâmetros consequentes.

Na camada 5 há apenas um nó fixo chamado Σ , que calcula o resultado final de todas as entradas:

$$O_{5,1} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}. \quad (43)$$

A arquitetura do ANFIS é equivalente ao sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno com parâmetros que podem ser treinados por um mecanismo de aprendizagem. O conjunto total desses parâmetros é formado pelos parâmetros antecedentes e os parâmetros consequentes. O mecanismo de treinamento proposto por Jang (1993) é híbrido, pois utilizada o método dos mínimos quadrados e o método do gradiente descendente.

Os parâmetros antecedentes são parâmetros de funções de pertinência, que podem não ser funções lineares. Diferente das funções polinomiais de primeiro grau (funções

lineares) ou funções de grau zero (constantes) da parte consequente das regras *if-then* do modelo de Sugeno.

Desse modo, no ANFIS utiliza-se um treinamento híbrido, para os parâmetros consequentes utiliza-se o método dos mínimos quadrados, fixando-se os parâmetros antecedentes. Já para os parâmetros antecedentes utiliza-se o método do gradiente descendente, fixando-se os parâmetros consequentes (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

O ANFIS utiliza um sistema de aprendizagem de redes neurais em uma arquitetura de sistema de inferência *fuzzy*, possuindo um grande potencial para ser aplicado em problemas que combinem conhecimento qualitativo e robustez. O mecanismo de aprendizagem fornece subsídios para adaptar o sistema a processos nos quais não se possua conhecimento explícito.

Entretanto, existem limitações quanto à modificação da estrutura da rede e ao número de entradas no sistema, devido à explosão combinatória das regras. Isso implica que o ANFIS não pode ser utilizado para problemas com muitas variáveis nem com problemas que não possam ser tratados com uma estrutura de sistema de inferência *fuzzy*. Essas limitações não diminuem a capacidade de modelar a experiência de conhecimento humano em processos de tomada de decisão (SANCHEZ, 2009).

2.3 TRABALHOS RELACIONADOS

Pesquisas relevantes das áreas de gerenciamento de risco com aplicação de lógica *fuzzy*, ANFIS e outros métodos de aprendizagem são apresentadas nesta seção. Algumas considerações são tecidas e a proposta de análise do risco dos projetos com ANFIS é considerada.

2.3.1 Pesquisas sobre gerenciamento de risco em projetos

O gerenciamento de riscos em projetos vem sendo analisado em múltiplos aspectos. Uma pesquisa importante que avalia as publicações da área é a de Lehtiranta (2014). Nessa pesquisa são avaliados 105 artigos publicados entre os anos de 2000 a 2012 em quatro importantes periódicos da área. Os principais temas abordados são: a visão dos riscos (incertezas, ameaças e/ou oportunidades); a forma de abordar os riscos previstos e não previstos; a alocação de responsabilidades pelos riscos e o papel multiorganizacional no gerenciamento de riscos.

Nas pesquisas mais recentes de periódicos relevantes, voltadas ao desenvolvimento e aperfeiçoamento de técnicas voltadas a subsidiar o gerenciamento e análise de riscos em projetos, pode-se citar as de Marle, Vidal e Bocquet (2013); Khodakarami e Abdi (2014); Choudhry *et al.* (2014); Marcelino-Sádaba *et al.* (2014) e; Yang e Yeh (2014).

O trabalho de Marle, Vidal e Bocquet (2013) trata do processo de análise de risco em projetos complexos. O método proposto pelos autores foca na interdependência dos riscos e utiliza-se de algoritmos de clusterização buscando facilitar a coordenação entre os envolvidos na gestão de risco do projeto. Assim, propõe-se a identificação de eventuais cadeias de eventos risco e seus respectivos impactos no projeto. Uma premissa central do trabalho é que a forma como os riscos são agrupados modifica a maneira como são gerenciados.

A pesquisa de Khodakarami e Abdi (2014) propõe um modelo de avaliação quantitativa que integra o processo de inferência de redes bayesianas na análise de risco probabilístico tradicional. Esse trabalho se volta ao impacto do risco no custo do projeto,

considerando a probabilidade condicional entre os eventos de risco e gerando diferentes cenários para o orçamento do projeto por meio de simulações.

No artigo de Choudhry *et al.* (2014) são estudados os impactos de custo e cronograma de riscos de projetos de pontes. Os riscos que afetam o desempenho do projeto de construção de pontes foram identificados por meio de entrevistas realizadas com os engenheiros e gestores envolvidos com vários projetos, e métodos de simulação Monte Carlo foram utilizados para como complemento do estudo. Por fim, o estudo indica diretrizes para análise de risco em projetos de construção pesada, com inclusão de simulações Monte Carlo.

Marcelino-Sádaba *et al.* (2014) apresentam em seu trabalho uma metodologia de gerenciamento de riscos em projetos concebida para as pequenas empresas. A proposta se baseia em uma pesquisa realizada em setenta e duas empresas espanholas e inclui ferramentas simples, modelos e listas de verificação de risco, recomendando ações e indicadores de risco para auxiliar no gerenciamento. Essa metodologia foi validada através da aplicação em cinco diferentes tipos de projetos industriais e da indústria de serviços.

O estudo de Yang e Yeh (2014) aplica a técnica de simulação computacional Dinâmica de Sistemas ao processo de identificação de riscos do projeto. Esses autores propõem um processo de sete etapas para a resolução de problemas de gestão de risco ambiental. O modelo proposto permite múltiplas simulações, incluindo simulações após o fim do projeto, objetivando o melhoramento de projetos futuros. Os autores aplicam a metodologia em um estudo de caso para demonstrar sua aplicabilidade na análise de risco.

Entretanto, algumas dessas pesquisas propõem métodos de difícil aplicação em problemas reais. Isso porque, em muitos casos, a ambiguidade e subjetividade dos problemas de gerenciamento e análise de risco em projetos impedem a aplicação de técnicas tradicionais, por isso maior parte delas não consegue satisfazer as necessidades dos gerentes de projeto. Por isso, Tah e Carr (2000) propuseram a aplicação da lógica *fuzzy* na análise de risco em projetos.

2.3.2 Lógica *fuzzy* no gerenciamento de risco em projetos

Segundo Baloi e Price (2003), a teoria dos conjuntos *fuzzy* pode ser aplicada de maneira viável na modelagem, avaliação e gestão de fatores de risco que afetam o desempenho dos projetos. Desse modo, muitas pesquisas foram realizadas aplicando a lógica *fuzzy* no gerenciamento de risco. Essa sessão apresenta algumas dessas pesquisas.

Em sua pesquisa, Tah e Carr (2000), fazem uma representação hierárquica estrutura de divisão de risco por meio de uma EAR. Essa estrutura é usada para desenvolver um modelo formal de avaliação qualitativa de risco. São utilizados valores linguísticos para quantificar probabilidades e impactos de modo a alcançar quantificação consistente.

Na mesma pesquisa, as relações entre os fatores de risco, os riscos e as suas consequências são representados em diagramas de causa e efeito e conceitos de associação e composição *fuzzy* são utilizados para identificar relações entre fatores de risco e as consequências para as medidas de desempenho do projeto. E em pesquisa posterior, os mesmos autores apresentam um modelo formal com o objetivo de facilitar o manuseio prático e eficaz dos riscos, permitindo simultaneamente que os envolvidos no processo para desenvolver uma maior compreensão dos riscos dos projetos (CARR; TAH, 2001).

Kuchta (2001) apresenta uma forma de medir a criticidade das atividades do projeto e o risco do projeto por meio de técnicas *fuzzy* aplicadas ao método do caminho crítico. Nessa pesquisa, tanto a atitude tomador de decisão, quanto a estrutura de rede do projeto são consideradas. O objetivo é que o risco obtido possa servir como uma medida esforço de gerenciamento necessário ajudando na tomada de decisão de aceitar ou rejeitar um projeto.

No trabalho de Zeng *et al.* (2007), uma metodologia de avaliação de risco com utilização de análise multicritério e lógica *fuzzy* na análise de risco em projetos é apresentada. A metodologia é aplicada a um projeto de construção e os resultados indicam que os risco podem ser avaliados por meio da técnica de maneira eficiente.

Outra pesquisa propõe uma metodologia que pode ser usada para estimar o nível de risco em uma fase inicial de um projeto (DIKMEN; BIRGONUL; HAN, 2007). Essa é utilizada para avaliação qualitativa dos riscos e por meio de mecanismos *fuzzy*, na fase de planejamento do projeto e estima uma classificação de risco que tem impacto no custo do projeto.

Outra pesquisa apresenta um modelo para estimar contingência de custo para um projeto de construção baseado na análise de riscos por meio de sistemas de inferência *fuzzy*, que podem modelar a experiência e o julgamento de especialistas. Os resultado obtidos indicam que as previsões dadas pelo sistema obtiveram erros percentuais menores que 20% (IDRUS; FADHIL NURUDDIN; ROHMAN, 2011).

Kuo e Lu (2013) utilizam um método de tomada de decisão multicritério e lógica *fuzzy* para avaliar sistematicamente o risco de um projeto. A metodologia medir e investigar o impacto relativo sobre o desempenho do projeto de vinte fatores de risco

identificados agrupados em quatro dimensões de risco. O índice de risco para o projeto é obtido por meio da avaliação conjunta da probabilidade e do impacto dos fatores de risco identificados.

Lee e Lin (2010) apresentam regras de inferência *fuzzy* para analisar a taxa de risco agregada em situações de incerteza. O método proposto utiliza diretamente os números *fuzzy*, dispensando os valores linguísticos. Desse modo, o trabalho busca simplificar e dar velocidade a análise.

Wang e Elhag (2007) propõem uma abordagem de tomada de decisão multicritério *fuzzy* para avaliação de riscos em projetos de construção de pontes. A abordagem permite que os tomadores de decisão avaliem os fatores de risco em termos de probabilidade e impacto utilizando valores linguísticos. Os autores aplicam o método em um caso e concluem que o modelo oferece uma forma flexível, prático e eficaz de analisar os riscos.

Chen e Wang (2009) Propõem uma metodologia de análise com base em uma estrutura hierárquica concebida para avaliar os efeitos de todos dos fatores de risco por meio de um índice de risco. Os fatores de risco são avaliados utilizando abordagens de lógica fuzzy, e método AHP. O índice de risco possibilita a aplicação na avaliação as fontes de risco e na priorização de projetos.

Na pesquisa de Taylan *et al.* (2014) é apresentado um modelo híbrido de *fuzzy* AHP e *fuzzy* TOPSIS na análise de riscos aplicada ao problema de seleção de projetos. São analisados 30 projetos através de variáveis linguísticas aplicadas a cinco critérios. Especialistas fazem a análise qualitativa que são tratadas quantitativamente através de números *fuzzy*. O método possibilita a avaliação de riscos globais de projetos em que as descrições e julgamentos dos critérios são imprecisos, vagos e incertos.

Os modelos *fuzzy* podem ser utilizados para estruturar o conhecimento humano com uso da linguagem por meio da modelagem direta do sistema sem a necessidade de um histórico de dados. Entretanto muitos dos problemas do mundo real são de difícil modelagem, mesmo com conhecimento especializado por envolverem processos falíveis e complexos. Por outro lado, técnicas de aprendizagem podem ser utilizadas em processos que não são conhecidos, mas possuem dados para a modelagem (COSTANTINO; DI GRAVIO; NONINO, 2015; EBRAT; GHODSI, 2014).

2.3.3 ANFIS e outros métodos de aprendizagem

Alguns métodos de aprendizagem, como as redes neurais, vem sendo utilizadas na gestão de projetos para aprender padrões de julgamento de dados históricos projetos e para servir de mecanismo de suporte a decisões complexas em projetos de desenvolvimento de novos produtos (FLINTSCH; ZANIEWSKI; DELTON, 1996; THIEME; SONG; CALANTONE, 2000).

Em comparação com métodos paramétricos de regressão aplicados a problemas de classificação e seleção de projetos, as redes neurais, que são métodos não paramétricos, têm se mostrado superiores (OLANREWAJU; JIMOH; KHOLOPANE, 2011). Na literatura de Gestão de Projetos, seu uso vem crescendo e têm se mostrado promissor. Costantino *et al.* (2015) cita três razões para a utilização desses métodos na gestão de projetos:

- Facilidade: a rede neural extrai conhecimento implícito da experiência obtida sem envolver os gestores em julgamento falíveis e complexos.
- Aplicabilidade ampla: capacidade de ajuste a diferentes fatores
- Aprendizagem dinâmica: os modelos permitem revisão da avaliação de um projeto durante sua duração.

As pesquisas com redes neurais no gerenciamento de projetos procuram relações entre os dados para resolverem problemas de gestão. Em algumas abordagens redes neurais são utilizadas para identificar os fatores de gerenciamento que afetam o desempenho econômico em um projeto (CHUA et al., 1997a). Em outras, para identificar os principais atributos de gerenciamento associados com a execução bem sucedida do orçamento do projeto (CHUA et al., 1997b).

Outra pesquisa utilizada uma rede neural para previsão do custo total de projetos de construção (EMSLEY et al., 2002). Já Jin e Zhang (2011) modelam uma rede neural para auxiliar o processo de tomada de decisão de alocação de risco nas parcerias público-privada baseada sobre economia dos custos de transação. Murat Gunaydin e Zeynep Dogan (2004) utilizam a metodologia de redes neurais no suporte a tomada de decisão aplicada a problemas de estimativa de custos em fases iniciais da gestão de projetos.

No gerenciamento de risco, um dos primeiros estudos com aplicação de uma rede neural modelada para identificação de risco foi a pesquisa de Mckim (1993). Wenxi (2007) utilizou uma rede neural com algoritmo de aprendizado *back-propagation* para analisar riscos em corporações que administram estradas na China. Em outra pesquisa, Wenxi

e Danyang (2009) propõem um modelo de avaliação de risco para avaliação de projetos de estradas baseado em uma rede neural com algoritmo *back-propagation* e lógica *fuzzy*.

Pesquisas têm mostrado a aplicação com sucesso de redes neurais em problemas de tomada de decisão no ambiente de gestão, principalmente em problemas de tomadas de decisão multicritério (GOLMOHAMMADI, 2011). Entretanto, o ANFIS tem apresentado melhores resultados, principalmente em casos em que a ambiguidade e a incerteza impeçam abordagens estruturadas (ÖZKAN; INAL, 2014).

Desse modo, Ebrat e Ghodsi (2014) aplicam o ANFIS na análise de risco em projetos. Nesse trabalho, os fatores de risco são identificados e analisados quanto a sua probabilidade de ocorrência e o impacto nos objetivos do projeto. A avaliação é realizada por meio de variáveis linguísticas em questionários aplicados a especialistas. Foi analisada a relação em probabilidade, impacto e risco para estimar o risco dos fatores identificados. A ANFIS modelada foi comparada com um modelo de regressão linear e apresentou melhores resultados.

2.3.4 Considerações sobre a literatura pesquisada e o presente trabalho

As pesquisas sobre o gerenciamento de risco em projetos abordam diversos temas, desde aspectos conceituais, até metodologias de análise. As pesquisas buscam mitigar o impacto do risco nos objetivos do projeto. Muitas delas busca avaliar esse impacto no orçamento e no cronograma, utilizando listas de verificação e indicadores de risco. Entretanto um aspecto que afeta todas as tentativas estruturadas de avaliação é a ambiguidade, a incerteza e a subjetividade nesse tipo de análise (TAH; CARR, 2000).

Na aplicação da lógica *fuzzy* no gerenciamento de projetos, geralmente são utilizados valores linguísticos e números *fuzzy* para modelar o conhecimento de especialistas através de avaliações dos fatores de risco agrupados. Muitas dessas pesquisas utilizam modelos estruturados de tomada de decisão multicritério ou sistemas de inferência para estimar o risco global do projeto. Esses modelos são aplicados a problemas de seleção e classificação de risco. Todavia, surgem dificuldades quando os processos de estruturação dos modelos se tornam muito complexos (COSTANTINO; DI GRAVIO; NONINO, 2015).

Em problemas em que dados históricos estão disponíveis, os processos de tomada de decisão podem ser modelados através de mecanismos de aprendizagem de redes neurais. Nesse contexto, as redes neurais são utilizadas com sucesso em diversos problemas

de gestão, dados suporte a tomada de decisão aplicada a análise de risco. Ainda assim, o ANFIS tem apresentado melhores resultados por agregar as vantagens da lógica *fuzzy* às virtudes das redes neurais em problemas de tomada de decisão multicritério (ÖZKAN; INAL, 2014).

Desse modo, o presente trabalho alinha-se às pesquisas que propõe soluções que aplicam a lógica *fuzzy* nas análises e também as que aplicam redes neurais. Pois, a exemplo da pesquisa de Ebrat e Ghodsi (2014), um ANFIS é aplicado na análise de risco. Porém, a análise não se limita a fatores de risco, mas busca determinar um índice de risco geral do projeto por meio do julgamento de critérios que agregam fatores de risco.

O modelo ANFIS para análise de risco inclui o conhecimento dos especialistas modelado na pesquisa de Ebrat e Ghodsi (2014) e por meio de uma matriz de probabilidade e impacto que utiliza valores linguísticos e da estruturação e agregação dos fatores de risco em critérios por meio de uma Estrutura Analítica de Risco. Um conjunto histórico é utilizado e o julgamento do especialista é modelado um ANFIS capaz de prever o índice de risco de projetos.

O modelo pode ser aplicados para análise preliminar de risco, em problemas de seleção e priorização, no dimensionamento da equipe de gerenciamento e para prever o impacto do risco no custo do projeto.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo apresenta a metodologia a ser utilizada na pesquisa e alguns procedimentos técnicos. São abordados a classificação, os procedimentos de coleta e análise de dados e as etapas da pesquisa.

3.1 CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa científica tem um caráter formal e sistemático de desenvolvido através do método científico. Seu objetivo fundamental é descobrir respostas para problemas mediante o emprego de procedimentos científicos (GIL, 1999). Usualmente a pesquisa científica se classifica quanto a sua natureza, tipo de abordagem do problema de pesquisa, quanto aos seus objetivos e quanto aos procedimentos técnicos.

Em relação à natureza da pesquisa, esta pode ser básica, quando em sua natureza a pesquisa busca compreender novos fenômenos e seus fundamentos. Ou aplicada, utilizando-se dos conhecimentos produzidos pela pesquisa básica para resolver problemas com aplicações concretas. Portanto, esta pesquisa pode ser classificada como aplicada por tratar de um problema concreto por meio de conhecimentos de pesquisas básicas.

Quanto ao tipo de abordagem, a pesquisa pode ser qualitativa ou quantitativa. Conforme mostra Allwood (2012), a distinção entre pesquisa qualitativa e quantitativa não é clara, pois não há uma separação de suas partes constitutivas de uma forma inequívoca. Entretanto, esta pesquisa é predominantemente quantitativa por tratar informações e opiniões em números para em seguida analisá-los e classificá-los, enquanto a pesquisa qualitativa se caracteriza por se apoiar na interpretação do pesquisador para analisar os fenômenos observados (SILVA; MENEZES, 2005).

Em relação aos objetivos, a pesquisa pode ser classificada como descritiva por descrever as características de determinado fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Diferentemente da pesquisa exploratória, que proporciona maior familiaridade com o problema para torná-lo explícito, e da pesquisa explicativa, que identifica fatores que contribuem ou identificam a ocorrência dos fenômenos estudados (GIL, 1999).

Quanto aos procedimentos técnicos adotados, conforme classificação de Gil (1999), esta pesquisa pode ser classificada como bibliográfica, documental e de levantamento. Bibliográfica por partir de material já publicado em livros e artigos, documental devido ao uso de material sem tratamento analítico, e de levantamento porque envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA PESQUISADA

A pesquisa se desenvolveu com o histórico de projetos de uma empresa de construção industrial do estado da Paraíba. A escolha dessa empresa ocorreu principalmente devido à facilidade de acesso do pesquisador, à disponibilidade da empresa para cooperar com a pesquisa e a consistência dos arquivos da empresa com dados e informações de um histórico de projetos.

A empresa é uma construtora voltada a obras industriais, bases de máquinas, galpões, pisos de alta resistência, estruturas em concreto armado, estruturas em aço, pavimentação, saneamento, terraplenagem e obras de manutenção.

Quanto a sua personalidade jurídica a empresa é uma sociedade empresária por quotas de responsabilidade limitada, portanto uma empresa privada de capital fechado. Apesar da alta rotatividade, característica dos contratos por obra certa, a organização possui em média 100 empregados.

O especialista em gestão de projetos da empresa é um engenheiro civil, que é o responsável técnico da empresa e possui larga experiência no gerenciamento de projetos. Esse engenheiro chefia o departamento técnico da empresa, que é formado por um corpo de 6 engenheiro e 4 técnicos. As atividades de gestão de projetos, incluído o gerenciamento de aquisições, custos, cronogramas, compatibilização de projetos, negociação com contratantes, controle de qualidade, contratação de subempreiteiros, planejamento, execução e controle dos projetos, entre outras, são realizadas por esse departamento.

É mantido na empresa um banco de dados com todo o histórico de projetos realizado e em execução. Os dados incluem plantas, orçamentos, projetos complementares, contratos, medições, documentos diversos e diários de obra. Esses dados foram utilizados pelo especialista no procedimento de análise dos projetos

3.3 PROCEDIMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

Os procedimentos de coleta dos dados ocorreram após a definição de um conjunto de projeto e das variáveis para análise do risco. Nessa fase foram consideradas a facilidade de acesso aos dados e disponibilidade de tempo de decisores para as análises e

estimativas necessárias. Desse modo, foram selecionado 61 projetos que representassem a maior parte das atividades da empresa.

Realizou-se um levantamento de um conjunto de dados com informações históricas de projetos da empresa. Os projetos foram analisados pelo especialista e foi definida uma estrutura analítica de riscos – EAR, onde os grupos tempo, custo, segurança e qualidade agregam vários fatores de risco. Posteriormente, foram estimados probabilidade e impacto para cada um dos grupos de risco da EAR e foi definido o risco de cada projeto através de um número inteiro entre 1 e 10.

O principal instrumento utilizado na pesquisa foi um formulário contendo número do projeto, uma breve descrição, matrizes de probabilidade e impacto para cada grupo de fatores de risco e um campo para estimar o risco do projeto. A

Figura 11 é o formulário respondido para o projeto 1, ao todo foram analisados 61 projetos.

Figura 11 – Exemplo de formulário

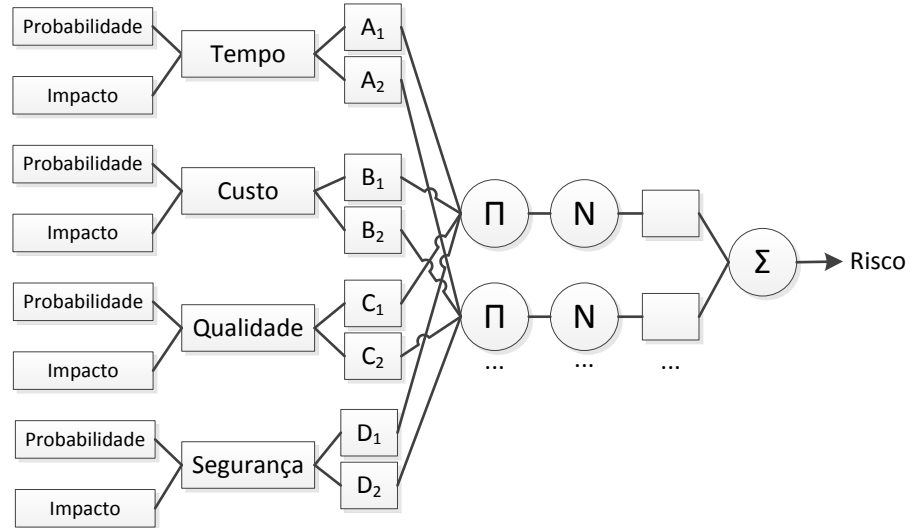
PROJETO 1														
Projeto de ampliação de planta industrial em PB														
Risco estimado (1-10): 4														
Matrizes de probabilidade e impacto														
		Tempo	Impacto						Custo	Impacto				
			Muito pequeno	Pequeno	Médio	Alto	Catastrófico			Muito pequeno	Pequeno	Médio	Alto	Catastrófico
Probabilidade	Muito Improvável								Muito Improvável					
	Improvável								Improvável			X		
	Neutro								Neutro					
	Provável								Provável					
	Muito Provável								Muito Provável					
		Segurança	Impacto						Qualidade	Impacto				
			Muito pequeno	Pequeno	Médio	Alto	Catastrófico			Muito pequeno	Pequeno	Médio	Alto	Catastrófico
Probabilidade	Muito Improvável								Muito Improvável	X				
	Improvável								Improvável					
	Neutro								Neutro					
	Provável								Provável					
	Muito Provável								Muito Provável					

Fonte: Elaborado pelo autor.

As matrizes de probabilidade e impacto de permitem estimar os riscos dos grupos de forma agregada por meio da EAR a exemplo dos procedimentos de Taylan *et al.* (2014). Essas matrizes foram propostas por Ebrat e Ghodsi (2014). Através do sistema de inferência *fuzzy* dos mesmos autores obtém-se quanto entradas do ANFIS, enquanto o risco estimado do projeto é a saída do modelo.

A Figura 12 representa a estrutura de análise de risco proposta com um exemplo de estrutura ANFIS com duas funções de pertinência. Cada entrada da estrutura é o risco de fatores de risco agrupados obtido por meio da matriz de probabilidade e impacto e o valor previsto é o índice de risco do projeto.

Figura 12 – Estrutura de um ANFIS para o exemplo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram configurados 32 modelos diferentes de ANFIS em busca do melhor ajuste aos dados. Esses modelos foram comparados e utilizou-se a validação cruzada 10-*fold* para selecionar o melhor modelo, nessa fase foram utilizados aproximadamente 84% dos dados para treinamento de validação.

O modelo selecionado foi avaliado quanto a sua capacidade de generalização com os dados restantes. Na escolha dos dados de teste buscou-se a maior representatividade possível em um pequeno conjunto de dados, com projetos relevantes que representam todas as classes de risco.

Em todos os procedimentos de cálculo, modelagem, validação e análise, utilizou-se o programa Matlab®, principalmente o *Fuzzy Tollbox* na modelagem (MATHWORKS, 2014).

3.3.1 Procedimento de seleção e avaliação do modelo ANFIS

É importante distinguir os processos de seleção e avaliação utilizados. Segundo Hastie *et al.* (2009), o processo de selecionar um modelo de aprendizagem consiste em estimar o desempenho de diferentes modelos, a fim para escolher o melhor. Já avaliação ocorre após se ter escolhido um modelo, estimando-se a sua capacidade de previsão (ou de generalização) em novos dados.

Nesse trabalho utilizou-se o procedimento de validação cruzada *10-fold* para seleção do melhor modelo utilizando 84% dos dados. Os dados remanescentes foram utilizados no processo de avaliação, para estimar a capacidade de generalização do modelo selecionado.

A validação cruzada é um método estatístico que possibilita a avaliar e comparar modelos de aprendizagem. Nesse trabalho utiliza a validação cruzada *k-fold* para comparar e selecionar o melhor modelo. Foi utilizada a validação cruzada *10-fold* porque esse método tende a fornecer estimativas menos enviesadas da precisão do modelo (KOHAVI, 1995).

Nesse tipo de validação o conjunto de dados é dividido em 10 subconjuntos de tamanhos aproximadamente iguais e são executadas 10 interações de treinamento e validação. Em cada interação, 10-1 subconjuntos são utilizados para treinar o modelo e o subconjunto restante é utilizado na validação, ocorrem nova iterações até que todos os subconjuntos sejam utilizados para validar o modelo (REFAEILZADEH; TANG; LIU, 2009). A

Figura 13 ilustra o procedimento da validação *10-fold*.

Figura 13 – Iterações da validação cruzada *10-fold*.

		Subconjunto de treinamento		Subconjunto de validação	
1ª Iteração	2ª Iteração	3ª Iteração	...	10ª Iteração	
1	1	1	...	1	
2	2	2		2	
3	3	3		3	
4	4	4		4	
5	5	5		5	
6	6	6		6	
7	7	7		7	
8	8	8		8	
9	9	9		9	
10	10	10		10	

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os procedimento da validação cruzada *10-fold* tendem a fornecer estimativas menos enviesadas. Esses procedimentos adotados para a seleção do modelo e os resultados de validação foram comparados com os obtido na avaliação do modelo. A avaliação do modelo ocorreu com um subconjunto de 10 pares de entrada e saída não utilizados na validação. As principais medidas estatísticas utilizadas são apresentadas na próxima seção.

3.3.2 Medidas de estatísticas utilizadas

As principais medidas estatísticas utilizadas nesse trabalho foram o erro absoluto médio (MAE), o erro quadrático médio (MSE) e o coeficiente de determinação (R^2). O cálculo de cada uma dessas medidas é apresentado a seguir.

Considere que N é o tamanho do conjunto, y_i é o risco estimado pelo especialista para o i -ésimo projeto e $\hat{y}_i$ é o risco previsto pelo modelo para o mesmo projeto. Desse modo, o erro absoluto médio (*mean absolute error* - MAE) é calculado através da seguinte equação:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\hat{y}_i - y_i|. \quad (44)$$

Já o erro quadrático médio (*Mean squared error* - MSE) é calculado da seguinte forma:

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - y_i)^2. \quad (45)$$

Tanto o MSE quanto o MAE são medidas frequentemente usadas na verificação da acurácia de modelos (HYNDMAN; KOEHLER, 2006). O MAE mantém a mesma escala da variável, enquanto o MSE é mais sensível a valores extremos por elevar ao quadrado os erros. Em ambos os casos, as medidas são sempre positivas e valores menores indicam um melhor desempenho do modelo.

Outro método para expressar o nível de precisão de previsão é o coeficiente de determinação. Este é uma medida de proporção que indica o quanto a variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade de outra (HAIR et al., 2009). O cálculo do coeficiente utiliza a média dos riscos estimados pelo especialista ($\bar{y}$) e ocorre conforma seguinte equação:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}. \quad (46)$$

O coeficiente de determinação varia entre 0 e 1 e indica o quanto o modelo consegue explicar os valores observados percentualmente. Valores próximos a 1 indicam alto poder de explicação.

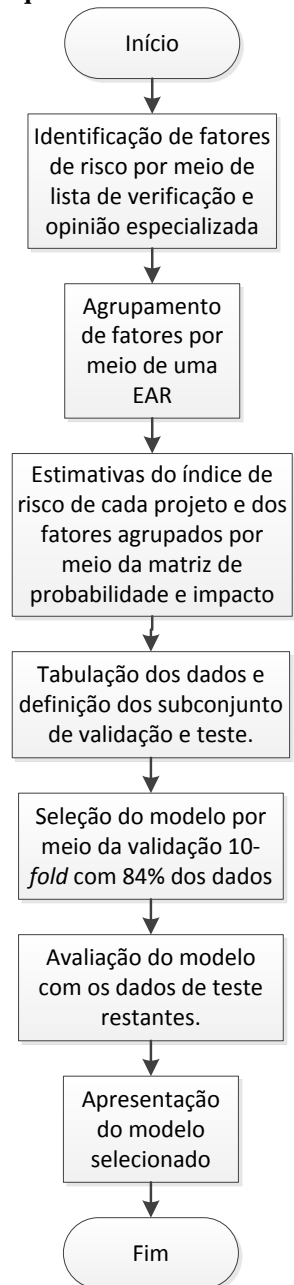
Outra medida muito utilizada é a acurácia. Ela é uma medida que representa o percentual de sucesso de previsão em problemas de classificação (COSTANTINO; DI GRAVIO; NONINO, 2015). A acurácia é calculada pela divisão do número de previsões corretas dividido pelo número total de projetos avaliados.

Essas medidas possibilitam quantificar a extensão para o qual o valor predito de resposta para uma determinada observação é perto do valor da verdadeira resposta para essa observação, quantificando assim a qualidade do ajuste do modelo de previsão (JAMES et al., 2013).

3.4 ETAPAS DA PESQUISA

As etapas da pesquisa são melhor visualizadas de forma sequencial através do fluxograma da Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma de etapas da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4 RESULTADOS

As próximas seções descrevem a forma de identificação e agregação dos fatores de risco, a estimação das variáveis em termos de probabilidade e impacto, o cálculo do risco relacionado a cada variável, a modelagem, a seleção e avaliação do modelo ANFIS.

4.1 FATORES E GRUPOS DE RISCO

A definição de grupos e fatores de risco para o conjunto de projetos foi realizada através de técnicas de coleta de informações que auxiliam a identificação de riscos. Os métodos de identificação objetiva, conforme classificação de Kerzner (2013), foram: análise de lista de verificação e revisão de documentação. A identificação de forma subjetiva ocorreu através da opinião especializada.

Para formação da lista de verificação dos fatores de risco foi realizada uma revisão de literatura com o objetivo de levantar os principais fatores de risco em projetos de construção civil. O resultado da pesquisa levou a formação de uma lista de verificação encontrada no Anexo A – Fatores de risco.

A análise da lista de verificação foi realizada pelo Engenheiro Chefe da empresa que revisou a documentação do conjunto de projetos. Os fatores foram agrupados em grupos de risco e foram incluídos novos fatores de risco, conforme a opinião deste especialista. É importante destacar que a identificação de forma subjetiva dos risco através da opinião especializada e o agrupamento dos fatores de risco é um método reconhecido na literatura da área (KERZNER, 2013; PMI, 2013; TAYLAN et al., 2014).

A análise subjetiva do especialista foi estruturada e o resultado desta etapa encontra-se na Estrutura Analítica de Riscos – EAR da Figura 15. Os grupos de risco escolhidos foram o tempo, o custo, a segurança e a qualidade. Esses grupos foram selecionados devido a sua capacidade de agregar os fatores de risco do conjunto de projetos.

Pode-se dizer que os grupos de risco possuem um conteúdo que define como o risco do projeto é percebido, estes podem incluir conceitos abstratos e subjetivos que são melhor tratados através da lógica *fuzzy*. Desse modo, podem-se avaliar esses grupos como variáveis de risco e, como tal, são uma combinação da probabilidade e do impacto (PMI, 2013; TAYLAN et al., 2014).

Assim, os grupos de risco agregam os fatores de risco constituem em variáveis que definem o risco do projeto, conforme pode ser observado na Estrutura Analítica de Riscos – EAR da Figura 15.

Figura 15 – Estrutura analítica de riscos do conjunto de projetos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os fatores de risco relacionados ao tempo tem como característica principal o impacto no cronograma do projeto. Isso não implica que o fator afete apenas o tempo do projeto, mas que afeta principalmente o tempo na perspectiva da empresa. O mesmo pode ser dito em relação aos demais grupos. Desse modo, os fatores relacionados ao tempo escolhidos para compor o grupo foram descritos da seguinte forma:

- **Agendamento inadequado:** ocorre devido a má elaboração do cronograma do projeto, em relação a estimativas de tempo dos pacotes de trabalho ou atividade;
- **Burocracia na emissão de licenças:** decurso de prazo para a emissão de licenças relacionado a excessiva burocracia do poder público ou das exigências contratuais dos fornecedores;
- **Condições meteorológicas:** fator imprevisível de condições meteorológicas desfavoráveis, principalmente em obras a céu aberto na ocorrência de chuva;
- **Atrasos de terceiros:** atrasos relacionados a subempreiteiros e fornecedores, a exemplo de atraso na entrega de material, atraso na conclusão de projetos complementares etc.;
- **Erros e retrabalho:** ocorrência de erros e necessidade de refazer determinada tarefa ou pacote de trabalho, com principal impacto no tempo do projeto.

O grupo custo engloba principalmente fatores com impacto no orçamento do projeto ou em algum aspecto financeiro. A correta desses fatores é importante para a manutenção da coerência das estimativas. Assim, os fatores de risco relacionados ao custo do projeto foram selecionados e descritos da seguinte maneira:

- **Risco econômico:** influência sistêmicas do cenário econômico como inflação, variação cambial, índice de custos na construção civil etc.;
- **Risco político:** mudanças significativas no cenário político com impacto nos objetivos do projeto como mudanças na administração de obras públicas, alteração de normativos etc.;
- **Flutuação dos preços:** aumento de preços de insumos em níveis imprevisíveis devido a causas externas ou dificuldade de fornecimento;
- **Inconsistências no orçamento do projeto:** inconsistência no orçamento do projeto relacionado as composições de preços, preços desatualizados, pacotes de trabalho não previstos etc.;
- **Mudanças no escopo do projeto:** aumento das atividades e dos custos devido a modificação no escopo do projeto;

- **Estabilidade financeira do contratante:** capacidade de pagamento do contratante para atender financeiramente o contrato realizando pagamentos em dia;
- **Condições Contratuais:** condições contratuais com impacto financeiro como multas, retenção de valores, seguros etc.

Os aspectos relacionados à saúde e segurança no trabalho são concentrados no grupo segurança. Esse grupo reúne os principais fatores de risco relacionados à segurança na perspectiva dos decisores da empresa. Os fatores de risco foram descritos como se segue:

- **Mal uso de equipamento de proteção individual:** mau uso ou negligência no uso de equipamentos de proteção individual;
- **Desconsideração de avisos de segurança:** desconsiderar avisos de segurança no local de trabalho, principalmente em plantas industriais;
- **Risco no uso de máquinas pesadas:** uso inadequado ou inseguro de máquinas pesadas, ausência de manutenção, falta de treinamento adequado do operador, etc.;
- **Risco na escavação e movimentação de terra:** trabalho com escavação mecânica ou manual ou de movimentação de terra, principalmente os que envolvam proteção de taludes;
- **Não realização dos exames médicos necessários:** não verificação da capacidade física do trabalhador para realização das atividades do projeto.
- **Fadiga:** exaustão da equipe devido ao excesso de trabalho pesado ou horas extra.

No grupo qualidade considera-se a conformidade com as especificações. Esse grupo engloba os seguintes fatores de risco e suas respectivas descrições:

- **Complexidade do projeto:** nível de dificuldade de execução do projeto, como interações delicadas entre projetos, exigências com elevado grau de exatidão, etc.
- **Informações incompletas:** falta de informação sobre aspectos relevantes do projeto, desenhos técnicos com informação defeituosa, etc.

- **Falta de conhecimento técnico da equipe:** necessidade de utilização de técnicas construtivas desconhecidas pela equipe de execução.
- **Projetos defeituosos:** projetos hidráulicos, elétricos, plantas baixas, plantas de locação, etc. com defeitos ou com informações erradas.
- **Escassez de trabalhadores qualificados:** falta de mão de obra qualificada na região do projeto.
- **Habilidades técnicas do subempreiteiro:** deficiência na qualidade da execução devido a falta de habilidade técnica do subempreiteiro.
- **Falha na compatibilização de projetos:** ocorrência interferência não compatibilizada nos projetos executivos.

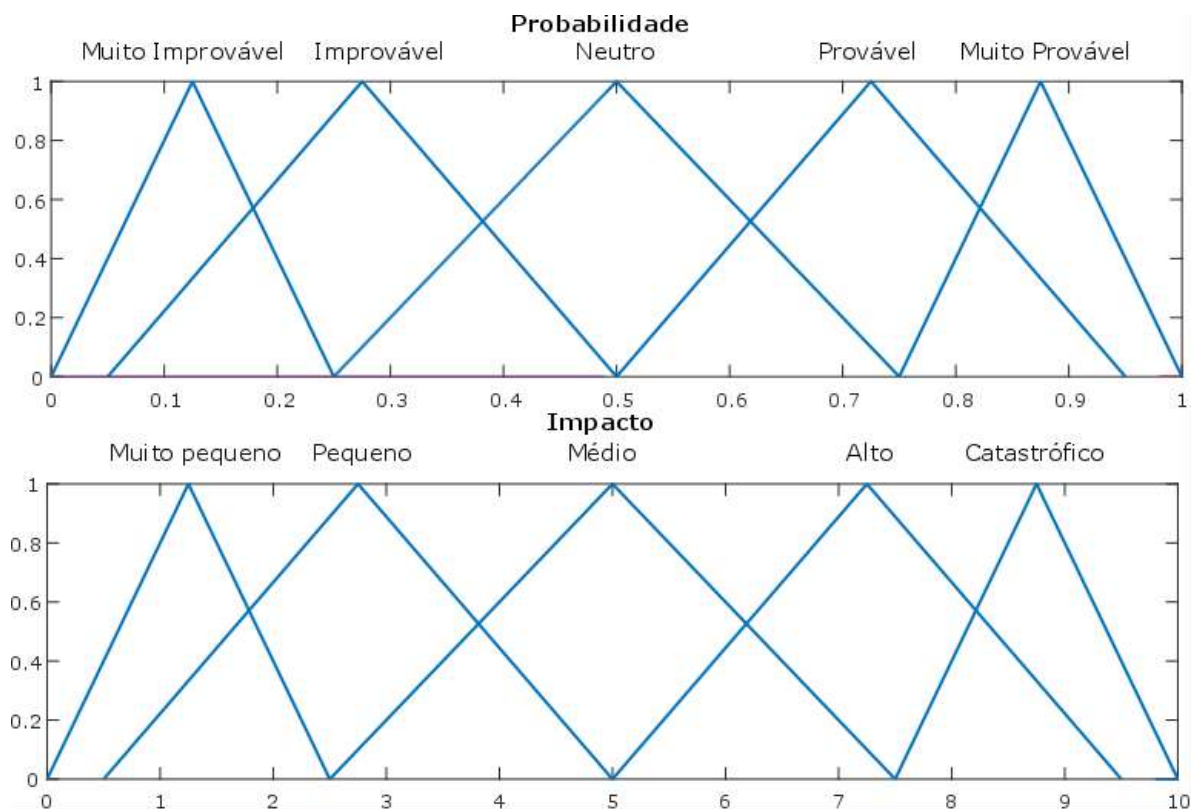
A definição e padronização dos grupos e o tratamento destes como variáveis relevantes para formação do risco do projeto fornecem os elementos necessários para análise qualitativa na fase de estimação dos riscos.

4.2 MATRIZ DE PROBABILIDADE E IMPACTO

Na estimação e cálculo do risco para cada uma das variáveis por meio da probabilidade e do impacto de cada grupo de fatores de risco dos projetos, utilizou-se o sistema de inferência *fuzzy* e a matriz de probabilidade e impacto propostos por Ebrat e Ghodsi (2014). E foram levantadas estimativas de probabilidade e impacto para cada grupo através de valores linguísticos da matriz.

Os valores linguísticos utilizados se relacionam a funções de pertinência triangulares. Essas funções e seus respectivos valores linguísticos definidos para a probabilidade e impacto podem ser observadas no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Funções de pertinência para as variáveis probabilidade e impacto.



Fonte: Adaptado de Ebrat e Ghodsi (2014).

Cada valor linguístico está associado a uma função de pertinência triangular com três parâmetros $\{a, b, c\}$. Essas funções foram defuzzificadas através do método Centro-da-Área (C-o-A) para se obter um valor não-*fuzzy* através da equação que se segue.

$$BNP = \frac{(c-a)+(b-a)}{3} + a \quad (47)$$

Os resultados da defuzzificação são valores não-*fuzzy* que representam o *Best Non-fuzzy Performance* – BNP (ZHAO; GOVIND, 1991). Os valores dos parâmetros das funções triangulares relacionados aos seus respectivos valores linguísticos para cada variável, bem como os resultados da defuzzificação, o BNP, estão dispostos na tabela abaixo.

Tabela 1 – Defuzzificação das MF triangulares para as variáveis Probabilidade e Impacto.

		Parâmetros da MF triangular			BNP
Valores linguísticos		a	b	c	
Probabilidade	Muito Improvável	0,000	0,125	0,250	0,125
	Improvável	0,050	0,275	0,500	0,275
	Neutro	0,250	0,500	0,750	0,500
	Provável	0,500	0,725	0,950	0,725
	Muito Provável	0,750	0,875	1,000	0,875
Impacto	Muito Pequeno	0,000	1,250	2,500	1,250
	Pequeno	0,500	2,750	5,000	2,750
	Médio	2,500	5,000	7,500	5,000
	Alto	5,000	7,250	9,500	7,250
	Catastrófico	7,500	8,750	10,000	8,750

Fonte: Adaptado de Ebrat e Ghodsi (2014).

Desse modo, para cada grupo foi estimada a probabilidade e o impacto através dos valores linguísticos definidos. Para obtenção desses dados foi utilizada uma matriz de probabilidade e impacto, conforme pode ser observado na Figura 16.

Figura 16 – Matriz de probabilidade e impacto utilizada para as estimativas.

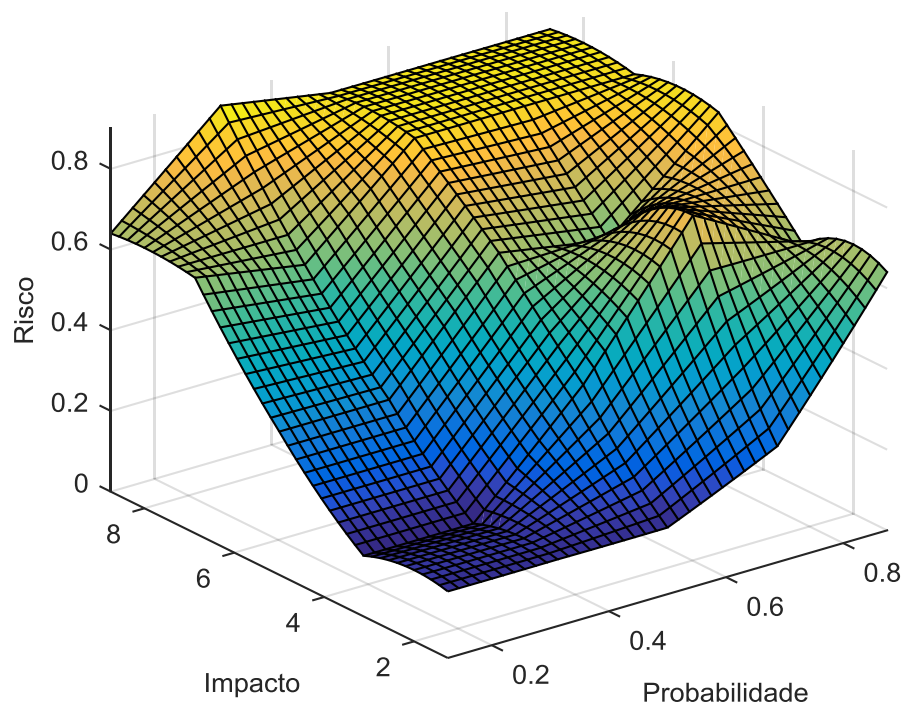
Grupo de Risco		Impacto				
		Muito pequeno	Pequeno	Médio	Alto	Catastrófico
Probabilidade	Muito Improvável					
	Improvável					
	Neutro					
	Provável					
	Muito Provável					

Fonte: Elaborado pelo autor.

Esse sistema de inferência *fuzzy* foi modelado através dos dados da pesquisa de Ebrat e Ghodsi (2014) com 162 especialistas da área da construção civil, gerando 100 questionários válidos. Os dados dessa pesquisa foram utilizados para modelar o sistema de

inferência *fuzzy* de Sugeno e a relação entre probabilidade, impacto e risco pode ser observada na superfície do Gráfico 7.

Gráfico 7 – Superfície de probabilidade, impacto e risco.



Fonte: Adaptado de Ebrat e Ghodsi (2014).

Desse modo, os dados obtidos através da matriz de probabilidade e impacto da Figura 16, foram defuzzificados para obtenção dos respectivos *Best Non-fuzzy Performance* – BNP e os riscos foram calculados através do sistema de inferência de Sugeno de primeira ordem de Ebrat e Ghodsi (2014).

Os dados relativos às estimativas de probabilidade e impacto defuzzificadas e os resultados do risco calculado para cada uma das variáveis o encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Dados e resultados da probabilidade, impacto e risco dos grupos.

(continua)

Projeto	Tempo			Custo			Segurança			Qualidade		
	Prob.	Imp.	risco	Prob.	Imp.	risco	Prob.	Imp.	risco	Prob.	Imp.	risco
1	0,725	8,750	0,830	0,275	5,000	0,355	0,275	7,250	0,640	0,125	1,250	0,165
2	0,125	1,250	0,165	0,275	7,250	0,640	0,275	7,250	0,640	0,275	8,750	0,830
3	0,275	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830	0,275	5,000	0,355	0,500	8,750	0,830
4	0,725	7,250	0,830	0,125	7,250	0,640	0,275	1,250	0,165	0,725	5,000	0,640
5	0,275	5,000	0,355	0,275	5,000	0,355	0,275	1,250	0,165	0,275	5,000	0,355
6	0,725	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,725	7,250	0,830	0,725	5,000	0,640
7	0,725	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,725	7,250	0,830	0,725	5,000	0,640
8	0,875	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,725	8,750	0,830	0,725	7,250	0,830
9	0,275	2,750	0,165	0,125	2,750	0,165	0,500	5,000	0,640	0,500	2,750	0,355
10	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165	0,500	5,000	0,640	0,500	5,000	0,640
11	0,500	7,250	0,830	0,275	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	7,250	0,640
12	0,500	2,750	0,355	0,275	5,000	0,355	0,275	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830
13	0,500	7,250	0,830	0,275	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	7,250	0,640
14	0,500	7,250	0,830	0,500	8,750	0,830	0,725	7,250	0,830	0,500	8,750	0,830
15	0,725	7,250	0,830	0,500	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830
16	0,725	5,000	0,640	0,275	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,275	8,750	0,830
17	0,500	2,750	0,355	0,500	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,725	8,750	0,830
18	0,725	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830	0,725	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830
19	0,725	1,250	0,355	0,125	5,000	0,355	0,725	5,000	0,640	0,500	2,750	0,355
20	0,500	2,750	0,355	0,500	7,250	0,830	0,125	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830
21	0,875	8,750	0,830	0,725	7,250	0,830	0,125	7,250	0,640	0,500	7,250	0,830
22	0,875	8,750	0,830	0,275	7,250	0,640	0,500	7,250	0,830	0,500	8,750	0,830
23	0,725	8,750	0,830	0,125	7,250	0,640	0,275	7,250	0,640	0,275	7,250	0,640
24	0,125	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830	0,275	2,750	0,165	0,125	2,750	0,165
25	0,725	8,750	0,830	0,275	7,250	0,640	0,500	7,250	0,830	0,500	8,750	0,830
26	0,875	7,250	0,830	0,500	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,725	7,250	0,830
27	0,500	5,000	0,640	0,500	7,250	0,830	0,500	7,250	0,830	0,500	5,000	0,640
28	0,125	1,250	0,165	0,125	1,250	0,165	0,125	1,250	0,165	0,500	7,250	0,830
29	0,875	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830	0,500	8,750	0,830
30	0,275	7,250	0,640	0,125	5,000	0,355	0,275	7,250	0,640	0,500	8,750	0,830
31	0,500	5,000	0,640	0,275	7,250	0,640	0,500	5,000	0,640	0,500	5,000	0,640
32	0,500	5,000	0,640	0,500	8,750	0,830	0,275	5,000	0,355	0,125	5,000	0,355
33	0,125	1,250	0,165	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165
34	0,275	2,750	0,165	0,500	8,750	0,830	0,275	5,000	0,355	0,500	5,000	0,640
35	0,125	1,250	0,165	0,500	5,000	0,640	0,125	1,250	0,165	0,125	1,250	0,165
36	0,500	5,000	0,640	0,275	7,250	0,640	0,275	1,250	0,165	0,500	2,750	0,355
37	0,275	1,250	0,165	0,275	7,250	0,640	0,275	2,750	0,165	0,125	1,250	0,165
38	0,275	2,750	0,165	0,500	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	5,000	0,355
39	0,275	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165
40	0,275	2,750	0,165	0,125	5,000	0,355	0,125	1,250	0,165	0,125	2,750	0,165
41	0,275	2,750	0,165	0,500	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165

Tabela 2 – Dados e resultados da probabilidade, impacto e risco dos grupos.

(conclusão)												
Projeto	Tempo			Custo			Segurança			Qualidade		
	Prob.	Imp.	risco	Prob.	Imp.	risco	Prob.	Imp.	risco	Prob.	Imp.	risco
42	0,125	2,750	0,165	0,275	7,250	0,640	0,275	5,000	0,355	0,125	2,750	0,165
43	0,275	5,000	0,355	0,275	7,250	0,640	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165
44	0,275	5,000	0,355	0,500	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165
45	0,125	1,250	0,165	0,500	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,125	2,750	0,165
46	0,275	5,000	0,355	0,500	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830
47	0,725	5,000	0,640	0,275	8,750	0,830	0,500	5,000	0,640	0,275	5,000	0,355
48	0,500	2,750	0,355	0,500	8,750	0,830	0,500	7,250	0,830	0,725	8,750	0,830
49	0,275	2,750	0,165	0,500	7,250	0,830	0,125	2,750	0,165	0,275	2,750	0,165
50	0,125	2,750	0,165	0,275	5,000	0,355	0,125	1,250	0,165	0,125	1,250	0,165
51	0,275	2,750	0,165	0,500	8,750	0,830	0,275	5,000	0,355	0,125	5,000	0,355
52	0,125	1,250	0,165	0,125	2,750	0,165	0,125	1,250	0,165	0,125	1,250	0,165
53	0,500	5,000	0,640	0,500	8,750	0,830	0,275	2,750	0,165	0,275	5,000	0,355
54	0,125	2,750	0,165	0,275	7,250	0,640	0,275	2,750	0,165	0,275	5,000	0,355
55	0,125	5,000	0,355	0,275	5,000	0,355	0,275	2,750	0,165	0,275	5,000	0,355
56	0,125	2,750	0,165	0,125	5,000	0,355	0,125	1,250	0,165	0,125	2,750	0,165
57	0,125	1,250	0,165	0,125	2,750	0,165	0,125	1,250	0,165	0,125	1,250	0,165
58	0,125	1,250	0,165	0,125	5,000	0,355	0,125	1,250	0,165	0,125	5,000	0,355
59	0,125	1,250	0,165	0,125	5,000	0,355	0,125	1,250	0,165	0,125	2,750	0,165
60	0,500	5,000	0,640	0,125	7,250	0,640	0,125	1,250	0,165	0,125	5,000	0,355
61	0,500	2,750	0,355	0,500	7,250	0,830	0,125	1,250	0,165	0,125	2,750	0,165

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dados apresentados nessa tabela mostram o risco calculado para cada variável de entrada (tempo, custo, segurança e qualidade) através das estimativas probabilidade e impacto. Esses valores de risco são utilizados como entradas na ANFIS de previsão do risco do projeto como pode ser visto na Tabela 3.

4.3 MODELAGEM DO ANFIS

Depois de calcular os riscos relacionados a cada grupo do conjunto de projetos e estimar o risco de cada projeto, obteve-se valores numéricos de entrada para o risco relacionado às variáveis tempo, custo, segurança e qualidade. O risco do projeto foi estimado pelos decisores da empresa, ele está relacionado com a atitude da empresa em relação ao risco.

Os valores foram tabulados e constituem o conjunto de dados a serem utilizados no treinamento, validação e teste do modelo. Os dados de entrada são compostos por valores numéricos relativos aos riscos calculados para as variáveis tempo, custo, segurança e qualidade. Já os dados de saída são formados pelos valores estimados de risco dos projetos. Os pares de dados de entrada e de saída podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Parte dos pares de dados de entrada e saída

						(continua)
Projeto	Subconjuntos	Tempo	Custo	Segurança	Qualidade	Risco do projeto
1	7	0,83000000	0,35499999	0,63999998	0,16499998	4
2	4	0,16499998	0,63999998	0,63999998	0,83000000	6
3	1	0,16499999	0,83000000	0,35499999	0,83000000	7
4	5	0,83000000	0,63999999	0,16499998	0,63999999	6
5	2	0,35499999	0,35499999	0,16499998	0,35499999	2
6	5	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,63999999	9
7	1	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,63999999	9
8	8	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,83000000	10
9	2	0,16499999	0,16499999	0,64000000	0,35499999	3
10	0	0,35499999	0,35499999	0,64000000	0,64000000	5
11	3	0,83000000	0,83000000	0,16499999	0,63999998	7
12	2	0,35499999	0,35499999	0,16499999	0,83000000	5
13	9	0,83000000	0,83000000	0,16499999	0,63999998	7
14	4	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,83000000	10
15	7	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,83000000	10
16	0	0,63999999	0,83000000	0,83000000	0,83000000	9
17	10	0,35499999	0,83000000	0,83000000	0,83000000	8
18	10	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,83000000	10
19	0	0,83000000	0,63999999	0,16499998	0,16499998	4
20	2	0,35499999	0,83000000	0,16499999	0,83000000	6
21	4	0,83000000	0,83000000	0,63999999	0,83000000	9
22	0	0,83000000	0,63999998	0,83000000	0,83000000	8
23	0	0,83000000	0,63999999	0,63999998	0,63999998	7

Tabela 3 – Parte dos pares de dados de entrada e saída

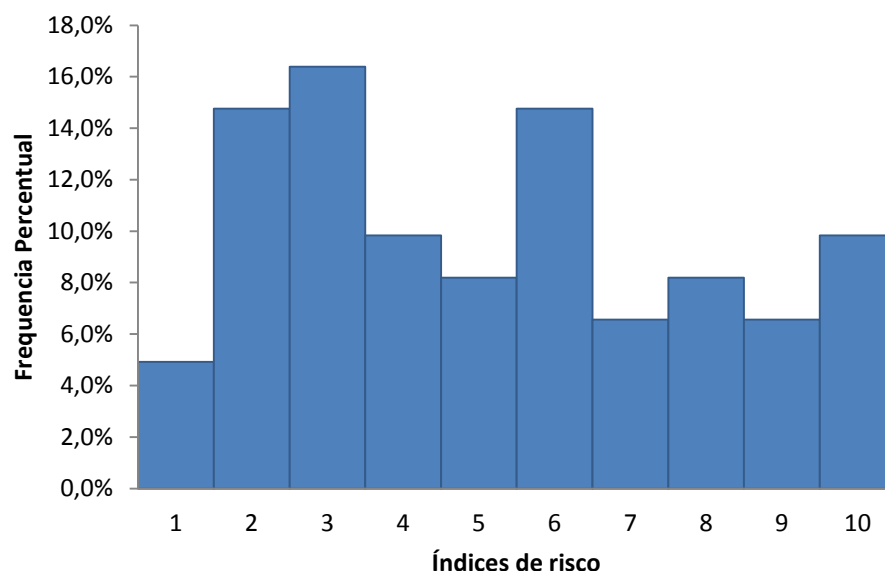
						(conclusão)
Projeto	Subconjuntos	Tempo	Custo	Segurança	Qualidade	Risco do projeto
24	9	0,16499999	0,83000000	0,16499999	0,16499999	3
25	6	0,83000000	0,63999998	0,83000000	0,83000000	8
26	0	0,82999999	0,83000000	0,83000000	0,83000000	10
27	7	0,64000000	0,83000000	0,83000000	0,64000000	8
28	3	0,16499998	0,16499998	0,16499998	0,83000000	3
29	3	0,83000000	0,83000000	0,83000000	0,83000000	10
30	7	0,63999998	0,35500000	0,63999998	0,83000000	6
31	8	0,64000000	0,63999998	0,64000000	0,64000000	6
32	9	0,64000000	0,83000000	0,35499999	0,35500000	6
33	6	0,16499998	0,16499999	0,16499999	0,16499999	1
34	6	0,16499999	0,83000000	0,35499999	0,64000000	6
35	10	0,16499998	0,64000000	0,16499998	0,16499998	2
36	3	0,64000000	0,63999999	0,16499998	0,35500000	4
37	6	0,16499998	0,63999998	0,16499999	0,16499998	2
38	7	0,16499999	0,83000000	0,16499999	0,35499999	5
39	1	0,16499999	0,83000000	0,16499999	0,16499999	3
40	9	0,16499999	0,35500000	0,16499998	0,16499999	2
41	8	0,16499999	0,83000000	0,16499999	0,16499999	3
42	0	0,16499999	0,63999998	0,35499999	0,16499999	3
43	5	0,35499999	0,63999998	0,16499999	0,16499999	3
44	8	0,35499999	0,83000000	0,16499999	0,16499999	4
45	6	0,16499998	0,83000000	0,16499999	0,16499999	3
46	0	0,35499999	0,83000000	0,16499999	0,83000000	6
47	3	0,63999999	0,83000000	0,64000000	0,35499999	6
48	5	0,35499999	0,83000000	0,83000000	0,83000000	8
49	7	0,16499999	0,83000000	0,16499999	0,16499999	3
50	5	0,16499999	0,35499999	0,16499998	0,16499998	2
51	8	0,16499999	0,83000000	0,35499999	0,35500000	5
52	0	0,16499998	0,16499999	0,16499998	0,16499998	1
53	1	0,64000000	0,83000000	0,16499999	0,35499999	5
54	4	0,16499999	0,63999998	0,16499999	0,35499999	3
55	1	0,35500000	0,35499999	0,16499999	0,35499999	2
56	2	0,16499999	0,35500000	0,16499998	0,16499999	2
57	8	0,16499998	0,16499999	0,16499998	0,16499998	1
58	0	0,16499998	0,35500000	0,16499998	0,35500000	2
59	8	0,16499998	0,35500000	0,16499998	0,16499999	2
60	6	0,64000000	0,63999999	0,16499998	0,35500000	4
61	4	0,35499999	0,83000000	0,16499998	0,16499999	4

Fonte: Dados da pesquisa.

Na Tabela 3, a primeira coluna indica um índice de identificação do projeto e a segunda coluna contém a indicação do particionamento dos subconjuntos da validação

cruzada 10-*fold* e do subconjunto de testes. O subconjunto de testes é o indicado com o número 0 e foi selecionado aleatoriamente um elemento de cada índice de risco dos projetos, a frequência percentual dos índices de risco no conjunto de projetos pode ser observado no histograma do Gráfico 8. O objetivo é ter um conjunto o mais representativo possível apesar da escassez de dados.

Gráfico 8 – Histograma de frequência percentual dos índices gerais de risco.



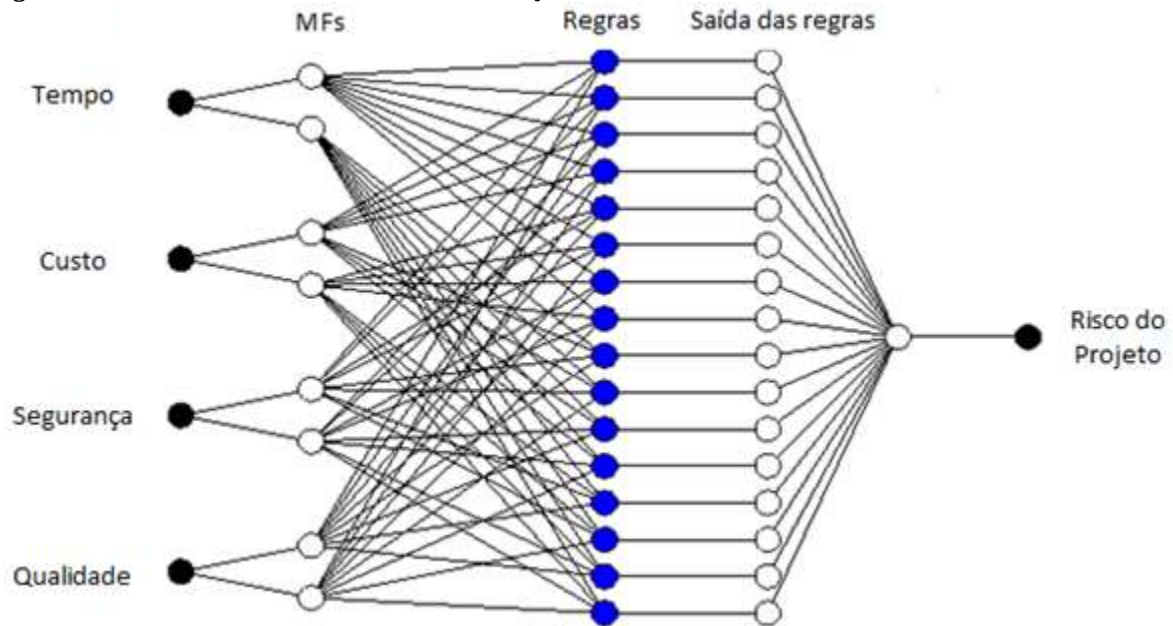
Fonte: Elaborado pelo autor.

Já os subconjuntos de validação cruzada são indicados pelos número de 1 a 10 e foram selecionados aleatoriamente através do comando *crossvalind* do MATLAB®, desse modo os dados de treino e validação foram divididos aleatoriamente em dez conjuntos mutuamente exclusivos. A escolha da validação cruzada 10-*fold* se deu devido à capacidade deste tipo de validação de fornecer estimativas menos enviesadas (KOHAVI, 1995; REFAELZADEH; TANG; LIU, 2009).

4.3.1 Configuração do ANFIS

A ANFIS foi configurada para a validação com o sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno de primeira ordem e de ordem zero com duas e três funções de pertinência. A estrutura obtida para duas funções de pertinência por variável pode ser observada na Figura 17.

Figura 17 – Estrutura da ANFIS com Duas Funções de Pertinência.

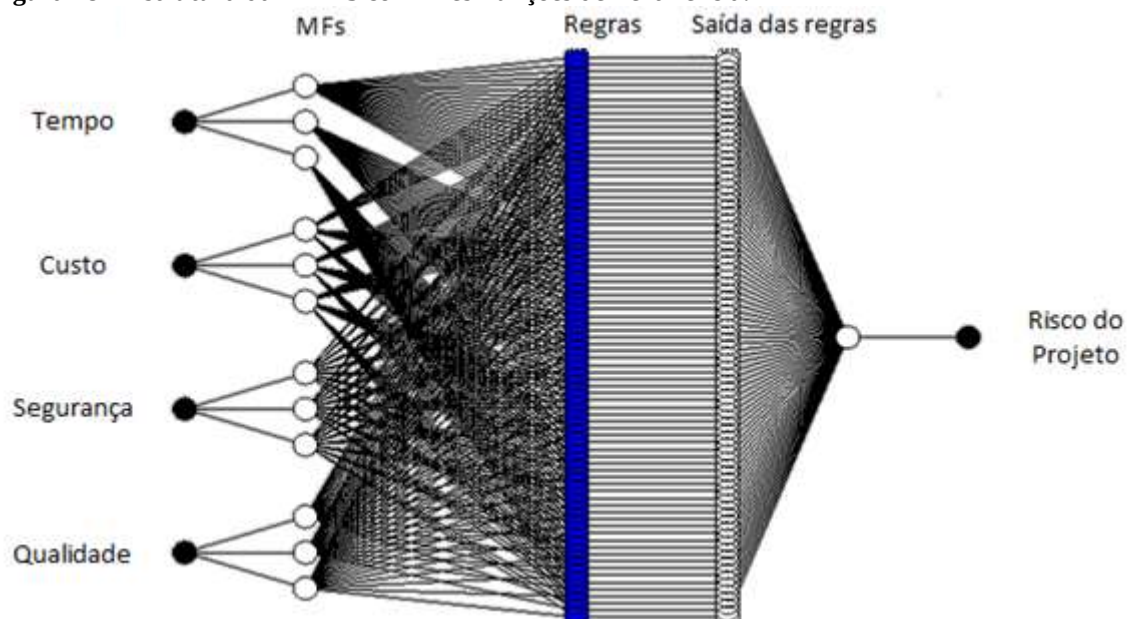


Fonte: Adaptado do *Neuro-Fuzzy Designer* do MATLAB®.

A estrutura da Figura 17 mostra que há para quatro entradas com duas funções de pertinência definidas para cada entrada. Há um total de 16 regras *fuzzy if-then* utilizando o produto como operador *AND*.

Já com o uso de três funções de pertinência por variável, obteve-se a estrutura da Figura 18. Nessa configuração há um total de 81 regras *fuzzy if-then* utilizando o produto como operador *AND*. O incremento no número de regras é considerável e aumenta severamente a complexidade do modelo.

Figura 18 – Estrutura da ANFIS com Três Funções de Pertinência.



Fonte: Adaptado do *Neuro-Fuzzy Designer* do MATLAB®.

As estruturas definidas foram avaliadas com oito funções de pertinência: a função triangular (*trimf*), a função trapezoidal (*trapmf*), a função gaussiana (*gaussmf*), a função sino generalizada (*gbellmf*). Além dessas, foram utilizadas: a combinação de duas funções gaussianas (*gauss2mf*), produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*), diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*) e a função em forma de Pi (*pimf*). Essas funções são apresentadas no Anexo B – Outras Funções de Pertinência.

A combinação dos sistemas de Sugeno de primeira ordem (linear) e de ordem zero (constante), das estruturas com duas e três funções de pertinência e oito tipos de funções de pertinência resulta em 32 configurações diferentes para o ANFIS. As configurações do ANFIS foram validadas para seleção do melhor modelo e, posteriormente o modelo selecionado foi avaliada quanto a sua capacidade de generalização.

4.3.2 Validação cruzada

Para cada uma das 32 configurações foram realizados cálculos de validação cruzada 10-*folds*, conforme os subconjuntos de validação de 1 a 10 da Tabela 3. Para a estimação dos parâmetros na fase de treinamento utilizou-se o método híbrido, o qual utiliza, segundo Jang, Sun Mizutani (1997), o método dos mínimos quadrados para os parâmetros consequentes e o método do gradiente descendente para os parâmetros antecedentes em cada ciclo.

O treinamento foi realizado com 100 ciclos e para cada um dos treinamentos das configurações na validação cruzada. Desse modo, são realizados 10 treinamentos com 9 subconjuntos e 10 testes para cada uma das 32 configurações do ANFIS. Com os resultados dos testes da validação, calculou-se o erro quadrático médio (MSE) e o coeficiente de determinação (R^2).

Ao todo foram realizados 320 treinamentos e testes. As medidas estatísticas foram calculadas e os resultados obtidos encontram-se no Tabela 4. Os melhores resultados foram obtidos com estruturas mais simples: Sistema de inferência de ordem zero, com duas funções de pertinência.

Tabela 4 – Medidas estatísticas da Validação Cruzada 10-fold.

Configuração do ANFIS	Sistema de Inferência	Número de MFs	Tipo de MF	MSE	R ²
1	Sugeno de ordem zero	2	trapmf	2,975	0,677884
2			gbellmf	2,521	0,778679
3			trimf	14,831	0,413496
4			gaussmf	5,749	0,613831
5			gauss2mf	9,323	0,508561
6			psigmf	1,248	0,868778
7			dsigmf	1,248	0,868778
8			pimf	2,975	0,677884
9		3	trapmf	7,787	0,507448
10			gbellmf	7,011	0,538616
11			trimf	4,376	0,664265
12			gaussmf	6,280	0,544098
13			gauss2mf	9,256	0,455358
14			psigmf	8,733	0,463556
15			dsigmf	8,733	0,463556
16			pimf	9,315	0,445999
17	Sugeno de primeira ordem	2	trapmf	2,236	0,779442
18			gbellmf	1,584	0,826285
19			trimf	2,227	0,776556
20			gaussmf	1,591	0,826734
21			gauss2mf	2,579	0,742431
22			psigmf	3,480	0,685507
23			dsigmf	3,349	0,694031
24			pimf	2,236	0,779442
25		3	trapmf	6,948	0,488686
26			gbellmf	6,249	0,517159
27			trimf	5,239	0,575072
28			gaussmf	4,293	0,658853
29			gauss2mf	6,233	0,528505
30			psigmf	5,804	0,552506
31			dsigmf	5,804	0,552507
32			pimf	6,980	0,497606

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as configurações com sistemas de ordem zero, com duas funções de pertinência, os melhores resultados de MSE foram obtidos com as MFs produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) e diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*), esses modelos obtiveram também o melhor coeficiente de determinação (R²) indicando melhor qualidade do ajuste desses modelos.

Os resultados de MSE e R^2 foram muito próximos, mesmo assim o modelo com a MF produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) obteve um MAE menor que o modelo com MF diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*), a diferença foi de $1,96 \times 10^{-8}$.

Por fim, a comparação de 32 modelos de ANFIS resulta na escolha de uma estrutura com sistema de inferência fuzzy de sugeno de ordem zero com duas funções de pertinência produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) por esse ser o modelo com os melhores resultados de MSE, MAE e R^2 na validação cruzada 10-fold.

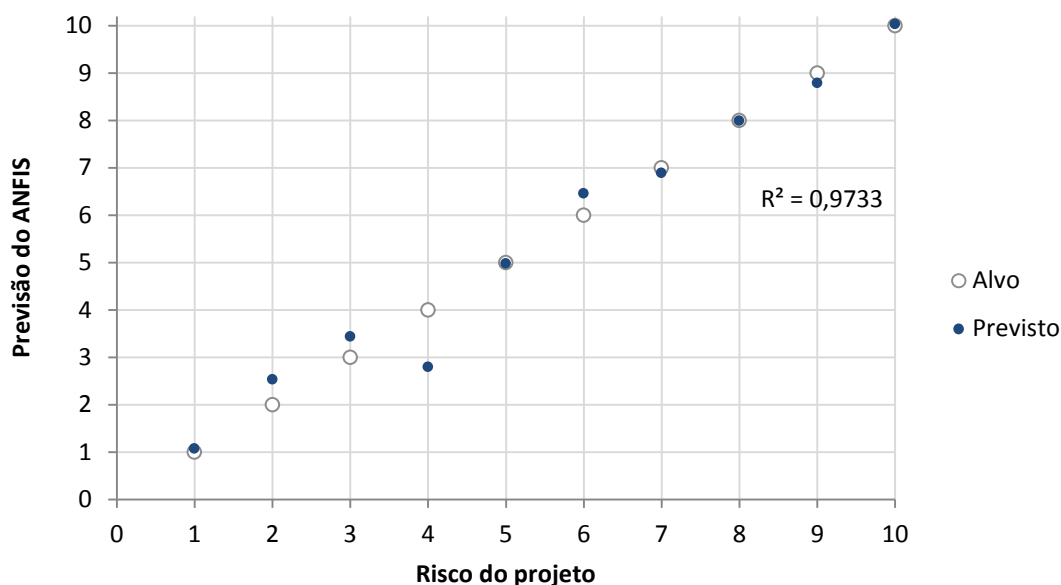
4.3.3 Teste e avaliação

O modelo selecionado, um ANFIS com sistema de inferência *fuzzy* de Sugeno de ordem zero com duas MFS produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*), foi novamente treinado com todos os dados utilizados na validação cruzada (subconjuntos de 1 a 10) e posteriormente avaliado quanto a sua capacidade de generalização por meio do subconjunto de dados de teste (indicado com o número 0 na Tabela 3).

O resultado do teste mostra um MSE de 0,2207, que é pequeno. O MAE é mais expressivo por manter a mesma escala da variável e indica um erro médio de 0,3084. Já o coeficiente de determinação (R^2), que mostra o poder de explicação do modelo, foi calculado em 0,9733, em termos percentuais isso indica que a previsão explica 97% dos valores observados.

O Gráfico 9 apresenta o ajuste e a dispersão dos valores previstos pelo modelo em comparação ao risco do projeto para as dez classes do subconjunto de teste. O ajuste perfeito seria a previsão igual ao risco do projeto, esse é o “Alvo” do gráfico.

Gráfico 9 – Valores previstos pelo ANFIS vs risco dos projetos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Dado que a avaliação do especialista foi realizada com número inteiros, pode-se considerar como sucesso a previsão que possua um erro absoluto inferior a 0,5. Desse modo, para o conjunto de teste obteve-se apenas duas observações com erro maior que 0,5: o projeto 19 com erro de -1,21 e o projeto 58 com um erro de 0,53.

É possível esperar que o modelo seja capaz de uma generalização que obtenha um sucesso nas previsões (acurácia) de cerca de 80% das análises de risco de futuros projetos. Assim, o modelo pode responder adequadamente por meio de padrões de julgamento aprendidos na fase de treinamento.

4.3.4 Modelo ANFIS selecionado

O modelo ANFIS para análise de risco selecionado possui duas funções de pertinência produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) para cada uma das quatro variáveis de entrada na parte antecedente das 16 regras *fuzzy if-then* com constates na parte consequente das regras.

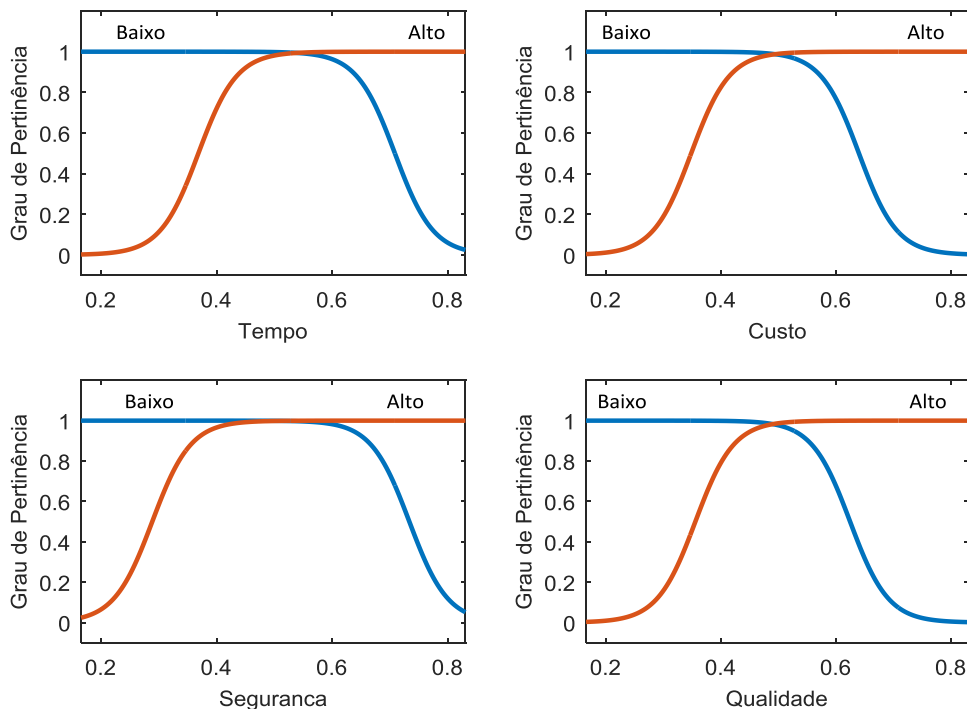
Atribuiu-se os valores linguísticos “Baixo” e “Alto” às funções de pertinências das variáveis Tempo, Custo, Segurança e Qualidade. Desse modo, as 16 regras são formadas por combinações das funções de pertinência na parte antecedente e uma função constante na parte consequente como pode ser visto no Quadro 1.

Quadro 1 – Regras fuzzy if-then do ANFIS

1	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₁)
2	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₂)
3	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₃)
4	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₄)
5	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Alto) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₅)
6	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Alto) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₆)
7	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Alto) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₇)
8	Se (Tempo é Baixo) e (Custo é Alto) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₈)
9	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₉)
10	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₁₀)
11	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₁₁)
12	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Baixo) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₁₂)
13	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Alto) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₁₃)
14	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Alto) e (Segurança é Baixo) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₁₄)
15	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Alto) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Baixo), então (Risco é F ₁₅)
16	Se (Tempo é Alto) e (Custo é Alto) e (Segurança é Alto) e (Qualidade é Alto), então (Risco é F ₁₆)

Fonte: Elaborado pelo autor.

As funções de pertinência da parte antecedente das regras fuzzy do Quadro 1 foram definidas pelos parâmetros obtidos no treinamento do modelo através do método do gradiente descendente. Ao todos são oito funções unidimensionais parametrizadas produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) definidas por quatro parâmetros cada. Os resultados podem ser observados na Gráfico 10.

Gráfico 10 – Funções de pertinência *psigmf* do ANFIS selecionado.

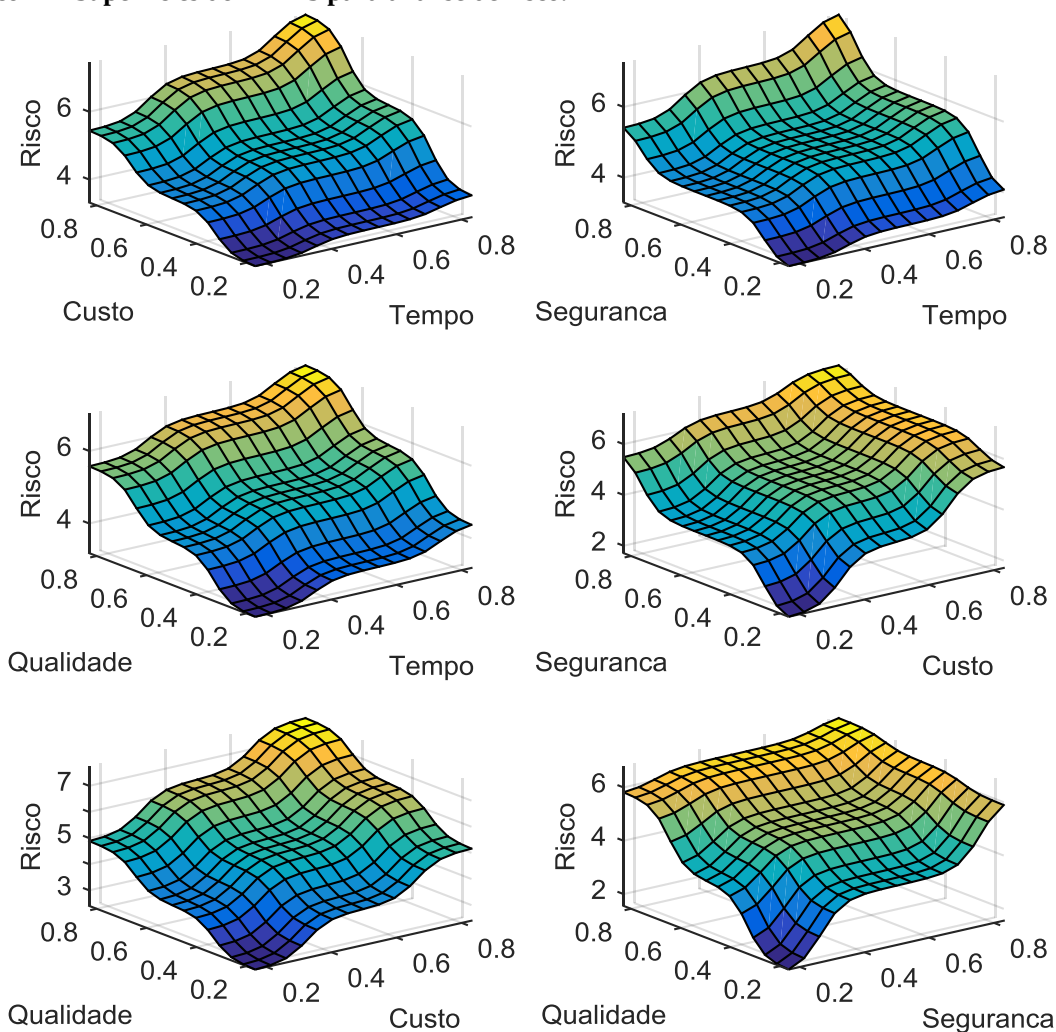
Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas funções definem graus de pertinência do risco para cada uma das variáveis de entrada e buscam aproximar o julgamento de especialista em cada um dos quatro grupos de risco da Estrutura Analítica de Riscos.

No modelo ANFIS os graus de pertinência formam os *firing strengths* das regras os quais são normalizados e multiplicados com as funções consequentes. O modelo ANFIS selecionado é um modelo de Sugeno de ordem zero, portanto as funções consequentes são constantes obtidas na fase de treinamento através do método dos mínimos quadrados.

Após a multiplicação dos *firing strengths* normalizados com as constantes para cada uma das 16 regras, os valores são somados e o resultado é o risco do projeto. Esse processo busca aproximar o julgamento do especialista na análise de risco dos projetos, principalmente na relação entre os valores de risco das variáveis de entrada (tempo, custo, segurança e qualidade) e o risco final do projeto. As relações entre as variáveis de entrada e o risco do projeto podem ser observadas por meio das superfícies do Gráfico 11.

Gráfico 11– Superfícies do ANFIS para análise de risco.



Fonte: Adaptado do Neuro-Fuzzy Designer do MATLAB®.

O modelo mostra uma relação entre as variáveis que parece consistente, observa-se uma relação crescente entre as variáveis de entrada e a variável de saída, os níveis de impacto dos riscos estimados para os grupos de risco e o risco do projeto são distintos e apresentam um comportamento não linear.

4.3.5 Saídas do Modelo

A apresentação de todo o conjunto de dados indicando os dados de treinamento, os dados de teste, a previsão do modelo e o erro absoluto pode ser vista na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados de saída do modelo ANFIS

								(continua)
Projeto	Subconjuntos	Tempo	Custo	Segurança	Qualidade	Risco do projeto	Risco Previsto	Erro absoluto
1	treino	0,83	0,355	0,64	0,165	4	3,986689	0,013311
2	treino	0,165	0,64	0,64	0,83	6	5,99959	0,00041
3	treino	0,165	0,83	0,355	0,83	7	6,697934	0,302066
4	treino	0,83	0,64	0,165	0,64	6	5,945186	0,054814
5	treino	0,355	0,355	0,165	0,355	2	2,390534	0,390534
6	treino	0,83	0,83	0,83	0,64	9	8,95697	0,04303
7	treino	0,83	0,83	0,83	0,64	9	8,95697	0,04303
8	treino	0,83	0,83	0,83	0,83	10	10,02791	0,027907
9	treino	0,165	0,165	0,64	0,355	3	2,989181	0,010819
10	teste	0,355	0,355	0,64	0,64	5	4,980015	0,019985
11	treino	0,83	0,83	0,165	0,64	7	6,962306	0,037694
12	treino	0,355	0,355	0,165	0,83	5	4,923345	0,076655
13	treino	0,83	0,83	0,165	0,64	7	6,962306	0,037694
14	treino	0,83	0,83	0,83	0,83	10	10,02791	0,027907
15	treino	0,83	0,83	0,83	0,83	10	10,02791	0,027907
16	teste	0,64	0,83	0,83	0,83	9	8,787708	0,212292
17	treino	0,355	0,83	0,83	0,83	8	8,111746	0,111746
18	treino	0,83	0,83	0,83	0,83	10	10,02791	0,027907
19	teste	0,83	0,64	0,165	0,165	4	2,792093	1,207907
20	treino	0,355	0,83	0,165	0,83	6	6,459639	0,459639
21	treino	0,83	0,83	0,64	0,83	9	8,727225	0,272775
22	teste	0,83	0,64	0,83	0,83	8	7,992929	0,007071
23	teste	0,83	0,64	0,64	0,64	7	6,891574	0,108426
24	treino	0,165	0,83	0,165	0,165	3	3,065959	0,065959
25	treino	0,83	0,64	0,83	0,83	8	7,992929	0,007071
26	teste	0,83	0,83	0,83	0,83	10	10,02791	0,027907
27	treino	0,64	0,83	0,83	0,64	8	7,934565	0,065435
28	treino	0,165	0,165	0,165	0,83	3	2,904972	0,095028

Tabela 5 – Dados de saída do modelo ANFIS

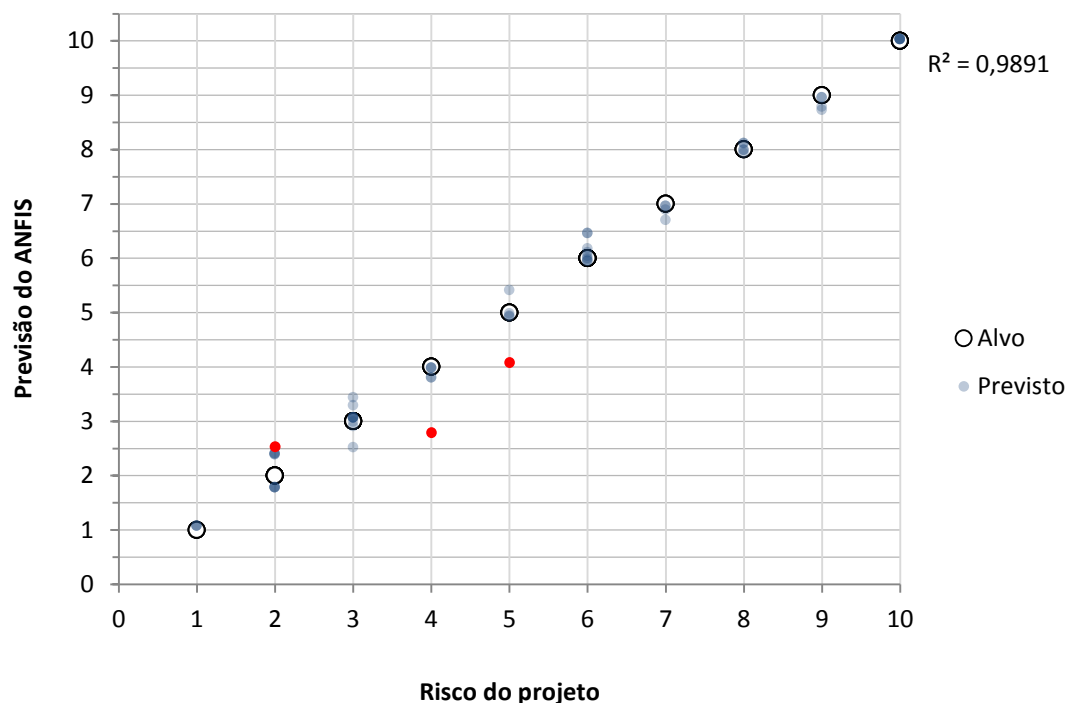
(conclusão)								
Projeto	Subconjuntos	Tempo	Custo	Segurança	Qualidade	Risco do projeto	Risco Previsto	Erro absoluto
29	treino	0,83	0,83	0,83	0,83	10	10,02791	0,027907
30	treino	0,64	0,355	0,64	0,83	6	5,948238	0,051762
31	treino	0,64	0,64	0,64	0,64	6	6,173477	0,173477
32	treino	0,64	0,83	0,355	0,355	6	6,039084	0,039084
33	treino	0,165	0,165	0,165	0,165	1	1,073095	0,073095
34	treino	0,165	0,83	0,355	0,64	6	5,973689	0,026311
35	treino	0,165	0,64	0,165	0,165	2	2,407917	0,407917
36	treino	0,64	0,64	0,165	0,355	4	3,802656	0,197344
37	treino	0,165	0,64	0,165	0,165	2	2,407917	0,407917
38	treino	0,165	0,83	0,165	0,355	5	4,08137	0,91863
39	treino	0,165	0,83	0,165	0,165	3	3,065959	0,065959
40	treino	0,165	0,355	0,165	0,165	2	1,780792	0,219208
41	treino	0,165	0,83	0,165	0,165	3	3,065959	0,065959
42	teste	0,165	0,64	0,355	0,165	3	3,434797	0,434797
43	treino	0,355	0,64	0,165	0,165	3	2,52051	0,47949
44	treino	0,355	0,83	0,165	0,165	4	3,976353	0,023647
45	treino	0,165	0,83	0,165	0,165	3	3,065959	0,065959
46	teste	0,355	0,83	0,165	0,83	6	6,459639	0,459639
47	treino	0,64	0,83	0,64	0,355	6	6,10418	0,10418
48	treino	0,355	0,83	0,83	0,83	8	8,111746	0,111746
49	treino	0,165	0,83	0,165	0,165	3	3,065959	0,065959
50	treino	0,165	0,355	0,165	0,165	2	1,780792	0,219208
51	treino	0,165	0,83	0,355	0,355	5	4,941871	0,058129
52	teste	0,165	0,165	0,165	0,165	1	1,073095	0,073095
53	treino	0,64	0,83	0,165	0,355	5	5,411872	0,411872
54	treino	0,165	0,64	0,165	0,355	3	3,288716	0,288716
55	treino	0,355	0,355	0,165	0,355	2	2,390534	0,390534
56	treino	0,165	0,355	0,165	0,165	2	1,780792	0,219208
57	treino	0,165	0,165	0,165	0,165	1	1,073095	0,073095
58	teste	0,165	0,355	0,165	0,355	2	2,533306	0,533306
59	treino	0,165	0,355	0,165	0,165	2	1,780792	0,219208
60	treino	0,64	0,64	0,165	0,355	4	3,802656	0,197344
61	treino	0,355	0,83	0,165	0,165	4	3,976353	0,023647

Fonte: Dados da pesquisa.

Os resultados do treino são acuraria de 98,04%, MSE de 0,0539, MAE de 0,1534 e R^2 de 0,9928. No subconjunto de treino ocorre apenas um erro de classificação do modelo no projeto 38.

Já os dados tomados em conjunto apresentam resultados de 95,08% de acurácia, MSE de 0,0813, MAE de 0,1789 e R^2 de 0,9891.

Gráfico 12 -Valores previstos pelo ANFIS vs risco dos projetos para todo conjunto de dados



Fonte: Elaborado pelo autor.

No Gráfico 12 os projetos 19, 38 e 58 estão em vermelho, essas são as ocorrências de falha na classificação. Esses projetos obtiveram um erro absoluto maior que 0,5.

De modo geral o modelo obtém resultados muito bons e os erros de classificação seriam aproximação de mais ou menos 1 no índice de risco dos projetos. A aproximação do julgamento do especialista obtém sucesso em mais de 95% dos casos. Se essa acurácia for aceita pela empresa o modelo pode ser usado para auxiliar o gerenciamento de risco dos projetos.

Além disso, o erro máximo obtido indica que o modelo é capaz de aproximar todos os julgamentos de especialista em todos os projetos do conjunto de dados. A se uma aproximação de mais ou menos 1 for aceita pela empresa então o modelo pode ser utilizado para produzir estimativas aproximadas do índice de risco dos projetos.

4.4 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS RESULTADOS

A modelagem do ANFIS proporciona uma aproximação do julgamento de especialista capaz de obter sucesso na classificação de risco de 80% de futuros projetos. O resultado do coeficiente de determinação é de 0,9733 indicando o alto poder de explicação do modelo. O erro absoluto médio esperado de 0,3084 demonstra que o erro médio esperado é menor 0,5, isso sugere que os erros seriam, em sua grande maioria, desprezíveis para o modelo. Os resultado do teste são melhores que os resultados obtidos na validação do modelo, talvez pela maior quantidade de informação no conjunto de dados de treinamento do modelo testado.

Em geral, para um problema que envolve o julgamento subjetivo os resultados são bastante satisfatórios, mas existem limitações na generalização do uso do modelo. Os fatores de risco considerados nas estimativas refletem o julgamento utilizado nos projetos da organização estudada, a matriz de probabilidade e impacto utilizada é apropriada para análise de riscos de construção civil e deve-se considerar que o modelo reflete a atitude de uma empresa em relação aos riscos, o que limita a aplicação do modelo no âmbito da empresa. Espera-se que 80% dos projetos da empresa sejam corretamente analisados através do ANFIS modelado.

Entretanto os procedimentos adotados nessa modelagem podem ser replicados e esse tipo de análise pode abranger outras organizações. Além disso, o uso de outra matriz de probabilidade e impacto ou outra forma de estimativa com valores linguísticos pode aumentar a abrangência de aplicação do ANFIS.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo são apresentadas as conclusões decorrentes da pesquisa, algumas propostas para trabalhos futuros que constituem oportunidades para realização de novas pesquisas e algumas limitações deste trabalho.

5.1.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo modelar um *Adaptive Neuro-fuzzy Inference System* capaz de analisar os riscos de um conjunto de projetos. Na pesquisa foi analisado um conjunto de 61 projetos de uma empresa de Construção Civil. Os riscos dos projetos foram analisados através de uma Estrutura Analítica de Riscos – EAR e foram definidos quatro grupos de fatores de riscos (tempo, custo, segurança e qualidade) que contribuem para a formação do risco do projeto.

Os riscos relacionados a cada um dos grupos foram estimados por meio de uma matriz de probabilidade e impacto e o risco do projeto foi definido como um inteiro entre 1 e 10. Os dados foram tabulados e divididos em subconjuntos de validação e teste. Ao todo, 32 configurações de ANFIS foram comparadas através de validação cruzada *10-fold*, o modelo com os melhores resultados foi selecionado e testado com dados não utilizados na validação. Os resultados apontam para um sucesso nas análises de cerca de 80% com um R^2 de 0,97.

A aplicação do ANFIS na análise de risco em projetos mostrou-se satisfatória. O modelo é capaz de aproximar o julgamento humano e modelar matematicamente conceitos e pensamento abstratos que fazem parte do gerenciamento de riscos. A modelagem de um conjunto de projetos de uma empresa pode explicitar a forma que a empresa lida com o risco dos projetos em relação aos fatores de risco agrupados. Além disso, é possível utilizar o modelo para aplicar o padrão de julgamento aprendido em novos projetos com menos esforço especializado.

Os resultados alcançados são satisfatórios e contribuem com o esforço realizado por diversos pesquisadores propondo modelos de análise de risco em projetos que se aproximem cada vez mais do julgamento humano. O objetivo da pesquisa foi alcançado o modelo ANFIS possibilita a análise de projetos por meio de estimativas realizadas através da linguagem humana e o tratamento matemático dos dados para obtenção de estimativas numéricas.

Diante dos resultados obtidos podemos concluir que o gerenciamento de risco pode ser realizado por meio da modelagem da experiência e julgamentos humanos e sem a presença de especialistas, desde que esses sejam estruturados de forma matemática. O ANFIS é um mecanismo promissor para esse tipo de abordagem e pode ser utilizado para a análise de risco de projetos.

A modelagem do ANFIS para análise de risco pode ajudar a gerência da empresa a entender e replicar práticas antes conhecidas apenas tacitamente pelos especialistas contratados. Desse modo, esse tipo de abordagem, dentro das suas limitações, pode ocasionar economia com mão de obra especializada e alto desempenho nas análises de risco.

Outro benefício gerencial a se destacar é a possibilidade de aprender e aplicar padrões históricos do comportamento da organização na análise de risco. Isso garante um julgamento mais consistente e com menos variação, transferindo a experiência aprendida com especialista para a organização através do método.

A aplicação do ANFIS pode impactar, por meio de análises de risco prévias, o planejamento do projeto, isso porque o risco do projeto pode ser obtido de forma mais rápida com o modelo e assim fornecer informações iniciais sobre a necessidade de planejamento na gerência de riscos.

Pode-se aplicar o ANFIS modelado em problemas de seleção de projetos baseado no risco do projeto, em análises financeiras de projetos que envolvam risco, na definição do tamanho de equipes de gerenciamento de riscos e até no esforço empreendido na resposta aos riscos do projeto.

Por fim, pode-se dizer que o ANFIS é uma rede *neuro-fuzzy* capaz de modelar e resolver problemas de análise de risco em projetos de forma satisfatória.

5.1.2 Trabalhos Futuros

Algumas oportunidades de pesquisa que decorrem deste trabalho são:

- Aplicação da análise de risco ANFIS em outras empresas de diferentes áreas de atuação.
- Realização de comparações com outros modelos de aprendizado com mesmo conjunto de dados.

- Aplicação do ANFIS em problemas de seleção de projetos através da modelagem do julgamento de especialistas

5.1.3 Limitações

Uma limitação do trabalho está relacionada à representatividade dos dados, mesmo restringindo o universo de aplicação da análise a uma organização não é possível garantir a representatividade dos dados utilizados no teste realizado.

Outra limitação a ser considerada está relacionada com o uso da matriz de probabilidade e impacto utilizada, que possibilita apenas estimativas negativas para os riscos e exclui da análise as eventuais oportunidades identificadas.

Pode-se também considerar que a ausência de comparações com outras técnicas de aprendizagem seja uma limitação, apesar de ter sido realizada uma comparação de 32 configurações distintas de ANFIS.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 31000**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AIRMIC; ALARM; IRM. **Norma de gestão de riscos**. [s.l.: s.n.].

ALI, T. H.; STEWART, R. A.; QURESHI, S. **Evaluating risk management practices in the pakistani construction industry: The current state of play** (S. M. Syed M. Ahmed, Salman Azhar, Ed.) Proceedings of the Fourth International Conference on Construction in the 21st Century : Accelerating Innovation in Engineering, Management and Technology. **Anais...**Gold Coast, Australia: Florida International University, 2007

ALLWOOD, C. M. The distinction between qualitative and quantitative research methods is problematic. **Quality & Quantity**, v. 46, n. 5, p. 1417–1429, ago. 2012.

APM. **APM Body of Knowledge**. [s.l.] Association for Project Management, 2012.

BALOI, D.; PRICE, A. D. F. Modelling global risk factors affecting construction cost performance. **International Journal of Project Management**, v. 21, n. 4, p. 261–269, maio 2003.

BLOCH, M.; BLUMBERG, S.; LAARTZ, J. Delivering large-scale IT projects on time, on budget, and on value. **McKinsey Quarterly**, 2012.

BUNNI, N. G. **Risk and Insurance in Construction**. [s.l.] Taylor & Francis, 2003.

CAGNO, E.; CARON, F.; MANCINI, M. A Multi-Dimensional Analysis of Major Risks in Complex Projects. **Risk Management**, v. 9, n. 1, p. 1–18, fev. 2007.

CARR, V.; TAH, J. H. . A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system. **Advances in Engineering Software**, v. 32, n. 10-11, p. 847–857, out. 2001.

CHAPMAN, C.; WARD, S. **Project Risk Management: Processes, Techniques and Insights**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons Inc., 2003. v. 49

CHEN, P.; WANG, J. **Application of a Fuzzy AHP Method to Risk Assessment of International Construction Projects** 2009 International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence. **Anais...**IEEE, jun. 2009Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5190498>>

CHOUDHRY, R. M. et al. Cost and Schedule Risk Analysis of Bridge Construction in Pakistan: Establishing Risk Guidelines. **Journal of Construction ...**, v. 140, n. 7, 2014.

CHUA, D. K. H. et al. Model for Construction Budget Performance—Neural Network Approach. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 123, n. 3, p. 214–222, set. 1997a.

- CHUA, D. K. H. et al. Neural networks for construction project success. **Expert Systems with Applications**, v. 13, n. 4, p. 317–328, nov. 1997b.
- CLARK, D. G. H. **Logic**. 4. ed. Unicoi, Tennessee: The Trinity Foundation, 2004.
- COSO. **Gerenciamento de Riscos Corporativos - Estrutura Integrada**. [s.l.: s.n.].
- COSTANTINO, F.; DI GRAVIO, G.; NONINO, F. Project selection in project portfolio management: An artificial neural network model based on critical success factors. **International Journal of Project Management**, v. 33, n. 8, p. 1744–1754, nov. 2015.
- DEY, P. K. Decision support system for risk management: a case study. **Management Decision**, v. 39, n. 8, p. 634–649, out. 2001.
- DIKMEN, I.; BIRGONUL, M. T.; HAN, S. Using fuzzy risk assessment to rate cost overrun risk in international construction projects. **International Journal of Project Management**, v. 25, n. 5, p. 494–505, jul. 2007.
- EBRAT, M.; GHODSI, R. Construction project risk assessment by using adaptive-network-based fuzzy inference system: An empirical study. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 18, n. 5, p. 1213–1227, jun. 2014.
- EMSLEY, M. W. et al. Data modelling and the application of a neural network approach to the prediction of total construction costs. **Construction Management and Economics**, v. 20, n. 6, p. 465–472, set. 2002.
- FLINTSCH, G.; ZANIEWSKI, J.; DELTON, J. Artificial Neural Network for Selecting Pavement Rehabilitation Projects. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 1524, p. 185–193, jan. 1996.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GOLMOHAMMADI, D. Neural network application for fuzzy multi-criteria decision making problems. **International Journal of Production Economics**, v. 131, n. 2, p. 490–504, jun. 2011.
- HAIR, J. F. et al. **Análise multivariada de dados**. 6^a. ed. [s.l.] Bookman, 2009.
- HARTONO, B. et al. Project risk: Theoretical concepts and stakeholders' perspectives. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 3, p. 400–411, abr. 2014.
- HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The Elements of Statistical Learning**. New York, NY: Springer New York, 2009.
- HAZEWINKEL, M. (ED.). **Encyclopaedia of Mathematics**. [s.l.] Kluwer Academic Publishers, 2002.
- HM TREASURY. **The Orange Book: management of risk—principles and concepts**. Crown ed. Norwich: Controller of Her Majesty's Stationery Office, 2004.
- HSUEH, S.-L. et al. On-line multi-criterion risk assessment model for construction joint

ventures in China. **Automation in Construction**, v. 16, n. 5, p. 607–619, ago. 2007.

HYNDMAN, R. J.; KOEHLER, A. B. Another look at measures of forecast accuracy. **International Journal of Forecasting**, v. 22, n. 4, p. 679–688, 2006.

IDRUS, A.; FADHIL NURUDDIN, M.; ROHMAN, M. A. Development of project cost contingency estimation model using risk analysis and fuzzy expert system. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 3, p. 1501–1508, mar. 2011.

ISO; IEC. **Guide 73: Risk management—Vocabulary—Guidelines for use in standards**. [s.l.: s.n.]. v. 3

IYER, K. C.; JHA, K. N. Factors affecting cost performance: evidence from Indian construction projects. **International Journal of Project Management**, v. 23, n. 4, p. 283–295, maio 2005.

JAMES, G. et al. **An introduction to statistical learning**. [s.l.] Springer, 2013.

JANG, J. ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions**, v. 23, n. 3, 1993.

JANG, J.; SUN, C.; MIZUTANI, E. Neuro-fuzzy and soft computing. 1997. **PTR Prentice Hall**, 1997.

JIN, X.-H.; ZHANG, G. Modelling optimal risk allocation in PPP projects using artificial neural networks. **International Journal of Project Management**, v. 29, n. 5, p. 591–603, jul. 2011.

KERZNER, H. R. **Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling**. 11. ed. [s.l.] John Wiley & Sons Inc., 2013.

KHODAKARAMI, V.; ABDI, A. Project cost risk analysis: A Bayesian networks approach for modeling dependencies between cost items. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 7, p. 1233–1245, out. 2014.

KNIGHT, F. H. **Risk, Uncertainty and Profit**. [s.l.] Dover Publications, 1921.

KOHAVI, R. **A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection** Ijcai. **Anais...**1995

KUCHTA, D. Use of fuzzy numbers in project risk (criticality) assessment. **International Journal of Project Management**, v. 19, n. 5, p. 305–310, jul. 2001.

KUO, Y.-C.; LU, S.-T. Using fuzzy multiple criteria decision making approach to enhance risk assessment for metropolitan construction projects. **International Journal of Project Management**, v. 31, n. 4, p. 602–614, maio 2013.

LEE, H.-M.; LIN, L. A New Fuzzy Risk Assessment Approach. In: **Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. p. 98–105.

LEHTIRANTA, L. Risk perceptions and approaches in multi-organizations: A research review 2000–2012. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 4, p. 640–653, maio 2014.

LOOSEMORE, M. et al. **Risk Management in Projects**. 2. ed. [s.l.] Taylor & Francis, 2006.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, n. 1, p. 1–13, 1975.

MARCELINO-SÁDABA, S. et al. Project risk management methodology for small firms. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 2, p. 327–340, fev. 2014.

MARLE, F.; VIDAL, L.-A.; BOCQUET, J.-C. Interactions-based risk clustering methodologies and algorithms for complex project management. **International Journal of Production Economics**, v. 142, n. 2, p. 225–234, abr. 2013.

MATHWORKS. **Fuzzy Logic Toolbox™ User 's Guide**. Natick, MA: The MathWorks Inc., 2014.

MCKIM, R. A. Neural networks and identification and estimation of risk. **AACE International Transactions**, p. P–5, 1993.

MURAT GÜNAYDIN, H.; ZEYNEP DOĞAN, S. A neural network approach for early cost estimation of structural systems of buildings. **International Journal of Project Management**, v. 22, n. 7, p. 595–602, out. 2004.

NIETO-MOROTE, A.; RUZ-VILA, F. A fuzzy approach to construction project risk assessment. **International Journal of Project Management**, v. 29, n. 2, p. 220–231, fev. 2011.

OGC - OFFICE OF GOVERNMENT COMMERCE. **Managing successful projects with PRINCE2**. 6. ed. United Kingdom: TSO, 2009.

OLANREWAJU, O. A.; JIMOH, A. A.; KHOLOPANE, P. A. **Comparison between regression analysis and artificial neural network in project selection** 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management. **Anais...IEEE**, dez. 2011 Disponível em:
<<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6118014>>

ÖZKAN, G.; INAL, M. Comparison of neural network application for fuzzy and ANFIS approaches for multi-criteria decision making problems. **Applied Soft Computing**, v. 24, p. 232–238, 2014.

PIÑA, A. J. B.; MÁRQUEZ, J. M. **Fuzzy Logic Tools. Reference manual v1. 0**. [s.l.] A. Javier Barrag{á}n Pi{ñ}a, 2012. v. 13

PMI. **Um Guia do Conhecimento em Gerenciamento de Projetos (Guia PMBOK)**. 5. ed. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc., 2013.

REFAEILZADEH, P.; TANG, L.; LIU, H. Cross-validation. In: **Encyclopedia of database**

systems. [s.l.] Springer, 2009. p. 532–538.

SANCHEZ, E. C. M. **Controle por aprendizado acelerado e neuro-fuzzy de sistemas servo-hidráulicos de alta frequência**. Rio de Janeiro: PUC-Rio, 2009.

SHAW, I. S.; SIMOES, M. G. **Controle e Modelagem Fuzzy**. [s.l: s.n.].

SHEN, L. Y.; WU, G. W. C.; NG, C. S. K. Risk Assessment for Construction Joint Ventures in China. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 127, n. 1, p. 76–81, fev. 2001.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. **UFSC, Florianópolis, 4a. edição**, 2005.

SUGENO, M.; KANG, G. T. Structure identification of fuzzy model. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 28, n. 1, p. 15–33, 1988.

TAH, J. H. M.; CARR, V. A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic. **Construction Management and Economics**, v. 18, n. 4, p. 491–500, jun. 2000.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. SMC-15, n. 1, p. 116–132, jan. 1985.

TAYLAN, O. et al. Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. **Applied Soft Computing**, v. 17, p. 105–116, 2014.

THIEME, R. J.; SONG, M.; CALANTONE, R. J. Artificial Neural Network Decision Support Systems for New Product Development Project Selection. **Journal of Marketing Research**, v. 37, n. 4, p. 499–507, nov. 2000.

WANG, J.; YUAN, H. Factors affecting contractors' risk attitudes in construction projects: Case study from China. **International Journal of Project Management**, v. 29, n. 2, p. 209–219, fev. 2011.

WANG, Y.-M.; ELHAG, T. M. S. A fuzzy group decision making approach for bridge risk assessment. **Computers & Industrial Engineering**, v. 53, n. 1, p. 137–148, ago. 2007.

WENXI, Z. **Applying an Improved BP Network to Risk Assessment of Performance for Expressway Management Corporations** 2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing. **Anais...IEEE**, set. 2007Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4340910>>

WENXI, Z.; DANYANG, C. **Expressway Management Risk Evaluation Based on Fuzzy Neural Networks** 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. **Anais...IEEE**, 2009Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5287782>>

YANG, C.-C.; YEH, C.-H. Application of system dynamics in environmental risk management of project management for external stakeholders. **Systemic Practice and Action**

Research, v. 27, n. 3, p. 211–225, 2014.

YONEYAMA, T.; NASCIMENTO, C. L. **Inteligência artificial em controle e automação**. [s.l.: s.n.].

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, 1965.

ZADEH, L. A. Similarity relations and fuzzy orderings. **Information Sciences**, v. 3, n. 2, p. 177–200, abr. 1971.

ZADEH, L. A. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. SMC-3, n. 1, p. 28–44, 1973.

ZAVADSKAS, E. K.; TURSKIS, Z.; TAMOŠAITIENE, J. Risk assessment of construction projects. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 16, n. 1, p. 33–46, 26 jan. 2010.

ZAYED, T.; AMER, M.; PAN, J. Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. **International Journal of Project Management**, v. 26, n. 4, p. 408–419, maio 2008.

ZENG, J.; AN, M.; SMITH, N. J. Application of a fuzzy based decision making methodology to construction project risk assessment. **International Journal of Project Management**, v. 25, n. 6, p. 589–600, ago. 2007.

ZHAO, R.; GOVIND, R. Algebraic characteristics of extended fuzzy numbers. **Information Sciences**, v. 54, n. 1, p. 103–130, 1991.

ZHENG, D. X. M.; NG, S. T. Stochastic Time–Cost Optimization Model Incorporating Fuzzy Sets Theory and Nonreplaceable Front. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 131, n. 2, p. 176–186, fev. 2005.

ZOU, P. X. W.; ZHANG, G.; WANG, J. Understanding the key risks in construction projects in China. **International Journal of Project Management**, v. 25, n. 6, p. 601–614, ago. 2007.

ZWIKAEI, O. et al. The moderating effect of risk on the relationship between planning and success. **International Journal of Project Management**, v. 32, n. 3, p. 435–441, 2014.

ANEXO A – FATORES DE RISCO

Tabela 6 – Fatores de risco

(continua)

Referência	Fatores de Risco
(TAH; CARR, 2000)	Econômico
	Físico
	Político
	Técnico
	Força de Trabalho
	Equipamentos
	Subempreiteiro
	Materiais
	Local do projeto
	Planta
	Financeiro
	Contrato
	Cliente
	Administrativo
	Ambiental
(CARR; TAH, 2001)	Fadiga
	Segurança
	Adequação
	Demolição
	Disponibilidade
	Qualidade
	Condições meteorológicas
	Temperatura
	Condições do solo
	Investigação do local
(DEY, 2001)	Mudanças no escopo do projeto
	Seleção de tecnologia
	Seleção do método de implementação
	Equipamentos
	Materiais
	Mudanças nas decisões e na engenharia
	Flutuação dos preços
	Finanças
	Mudança na regulamentação local
	Mudanças nas políticas governamentais
	Avaliação errada
	Proprietários dos projetos, fornecedores, comerciantes e competência dos consultores
	Condições ambientais e meteorológicas
(SHEN; WU; NG, 2001)	Aumento dos custos provenientes de mudanças nas políticas
	Estudos ruins de viabilidade do projeto
	Atraso do projeto
	Previsão de demanda inexata
	Seleção inadequada do local do projeto
	Seleção incorreta do tipo de projeto
	Seleção inadequada dos parceiros do projeto
	Burocracia na emissão de licenças
	Mudança nas plantas
	Aumento dos custos provenientes de re-escolhas

Tabela 5 – Fatores de risco

(continua)

Referência	Fatores de Risco
(BUNNI, 2003)	Escolha dos proprietários Seleção do local do projeto Falta de inspeção e vistoria Estimativa financeira insuficiente Condições contratuais Escolha inadequada do projeto em relação a outros projetos e à sociedade A falta de conhecimento técnico moderno Falha nas predições Falta de comunicação correta Fraco desempenho de equipamentos mecânicos e elétricos Escolhas do contratante A utilização de métodos que têm sido examinados antes Desconsideração de avisos de segurança Local do projeto Fraude, roubo Pessoal
(BALOI; PRICE, 2003)	Ambiguidade no escopo do projeto Complexidade do projeto Tamanho e tipo de projeto Política dos contratantes Situação do mercado Número de motores Condições geográficas Condições inesperadas no local do projeto Condições climáticas Flutuação dos preços Inflação Moeda Taxa de juros Fatores regionais e externos
(IVER; JHA, 2005)	Escassez de recursos humanos Definição inicial do projeto inexata Conflito entre os gestores do projeto Discordância entre projetistas e clientes Discordância entre o gerenciamento de projetos e meios externos como empreiteiros Incompreensão de procedimentos de operação Conflito entre os membros do projeto Condições meteorológicas regionais desfavoráveis Oposições políticas e ajuste econômico Singularidade das atividades do projeto Tendência a culpar os outros
(ZOU; ZHANG; WANG, 2007)	Programação de projetos exata Dificuldades no orçamento do projeto Instabilidade dos clientes Instabilidade nas plantas Agendamento inadequado Informações insuficientes sobre o local do projeto Estimativas de custos incorretas ou incompletas Fraqueza na gestão de empreiteiros Deficiência na habilidades dos trabalhadores Inacessibilidade aos gestores e especialistas Ausência de seguro para os principais instalações e equipamentos Ausência de seguro para o pessoal Operações inseguras Falta de instalações no local

Tabela 5 – Fatores de risco

(continua)

Referência	Fatores de Risco
(ZOU; ZHANG; WANG, 2007)	- Processo legal por demolição ilegítima de resíduos de construção - Poluição da água, do ar e sonora por causa das atividades do projeto - Falta de competência dos gestores empreiteiros - Falta de competência dos fornecedores para entrega pontual dos materiais - Burocracia governamental - Procedimentos de licença governamental - Aumento do custo dos materiais
(ZHENG; NG, 2005)	- Tendências e motivação - Treino e gestão - Comunicações - Layout e área de projeto - Restrições no local do projeto - Planejamento de trabalho - Materiais adequados - Acessibilidade dos materiais - Equipamentos adequados - Acessibilidade dos equipamentos
(DIKMEN; BIRGONUL; HAN, 2007)	- Ambiguidades nos métodos de construção - Complexidades - Inacessibilidade dos recursos - Planejamento fraco - Ambiguidades no escopo do projeto - Erros na planta - Falta de financiamento - Atraso nos pagamentos - Tendências dos clientes - Clientes inexperientes - Experiência em projetos similares
(HSUEH et al., 2007)	- Comunicações com parceiros - Registros dos parceiros - Contratos - Duração do projeto - Liquidez necessária - Complexidade - Tipo de projeto - Subempreiteiro - Habilidades técnicas - Acessibilidade de máquinas e equipamentos - Posição do local do projeto - Pessoal - Mudanças nas políticas governamentais - Flutuações nas taxas de juros - Instalações gerais - Flutuação nos preços dos materiais - Competições - Demanda
(ALI; STEWART; QURESHI, 2007)	- Habilidades técnicas do empreiteiro - Instabilidade política - Qualidade - Estudos de viabilidade inadequados - Estabilidade financeira do contratante - Suborno - Tempo de finalização do projeto - Flutuações do mercado e da inflação - Avaliação errada

Tabela 5 – Fatores de risco

(continua)

Referência	Fatores de Risco
(ZAYED; AMER; PAN, 2008)	Problemas na transferência de tecnologia e implementação
	Retenção de vantagem tecnológica
	Possibilidade de disputas contratuais
	Problemas na resolução de litígios devido às leis do país
	Escassez de trabalhadores qualificados
	Disponibilidade de equipamentos especiais
	Atrasos no fornecimento de material
	Atraso na criação e aprovação regulatória
	Projetos defeituosos, erros e retrabalho
	Alteração na sequência de trabalho
	Dificuldades para atender a oferta de programas de construção
	Imprevisíveis condições adversas de solo
	Má qualidade dos materiais
	Má qualidade de execução
	Gerente de construção
	Atrasos de terceiros
	Segurança
	Atrasos devido ao clima e a causas naturais
(ZAVADSKAS; TURSKIS; TAMOŠAITIENE, 2010)	Dano físico
	Político
	Econômico
	Social
	Condições meteorológicas
	Tempo
	Custo
	Qualidade
	Técnico
	Construção
	Recursos
	Membros do projeto
	Local do projeto
(WANG; YUAN, 2011)	Documentos e informação
	Consequências da tomada de decisões
	Experiência em engenharia
	Completude das informações do projeto
	Sensibilidade de informações externas
	Motivação da decisão
	Conhecimento profissional
	Escopo de conhecimento
	Ousadia
	Força de arbitrar
	Força econômica da empresa
	Experiência social
	Valores
	Disposição para revisão técnica
	Disposição para atingir os objetivos da decisão
(NIETO-MOROTE; RUZ-VILA, 2011)	Cenário econômico externo
	Falta de processo correto
	Falta de recursos
	Inexperiência dos membros do projeto
	Falta de abordagem motivacional
	Erros de projeto
	Alterações de projeto
	Defeitos de fabricação

Tabela 5 – Fatores de risco

(conclusão)

(NIETO- MOROTE; RUZ- VILA, 2011)	Baixa eficiência
	Falta de experiência
	Acidentes
	Problemas técnicos
	Atraso no fornecimento das necessidades
	Falta de qualidade
(EBRAT; GHODSI, 2014)	Competência técnica e conhecimento
	Comunicações
	Seleção dos membros da equipe do projeto
	Suporte de auxílio administrativo
	Gestão da Qualidade
	Duração do projeto
	Densidade do projeto
	Tipo de natureza do projeto
	Complexidade do projeto
	Contratos e condições
	Agendamento
	Métodos de construção
	Estudos de viabilidade
	Poder econômico da empresa
	Estabilidade econômica do contratante
	Exatidão das previsões e análises financeiras
	Equipamentos e materiais
	Estrutura executiva e de pessoal
	Defeitos estruturais e falhas operacionais
	Lei, política e governo
	Ambiente e cultura
	Proprietários, contratantes, parceiros e fornecedores
	Mercado
	Segurança

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXO B – OUTRAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA

Além das funções triangulares (*trimf*), trapezoidal (*trapmf*), gaussiana (*gaussmf*) e sino generalizada (*gbellmf*) apresentadas na secção 2.2.2, foram utilizadas as funções: a combinação de duas funções gaussianas (*gauss2mf*), produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*), diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*) e a função em forma de Pi (*pimf*). As fórmulas, os parâmetros dessas funções são apresentados abaixo, conforme Piña e Márquez (2012).

A função de pertinência definida pela combinação de duas funções gaussianas (*gauss2mf*) possui quatro parâmetros e é definida da seguinte forma:

$$gauss2mf(x; c_1, \sigma_1, c_2, \sigma_2) = \begin{cases} gaussmf_1(x; c_1, \sigma_1) & se\ x < c_1 \leq c_2 \\ gaussmf_2(x; c_2, \sigma_2) & se\ x < c_2, c_1 \leq c_2 \\ 1 & se\ c_1 \leq x \leq c_2 \\ gaussmf_1(x; c_1, \sigma_1)gaussmf_2(x; c_2, \sigma_2) & se\ c_1 > c_2 \end{cases} \quad (48)$$

As funções de pertinência produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) e diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*) são definidas através da função sigmoidal, essa função possui a seguinte equação:

$$sig(x; a, c) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-c)}} \quad (49)$$

Assim, a função de pertinência produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*) possui quatro parâmetros e é dada por:

$$psigmf(x; a_1, c_1, a_2, c_2) = sig_1(x; a_1, c_1)sig_2(x; a_2, c_2) \quad (50)$$

Já a função de pertinência diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*) é dada por:

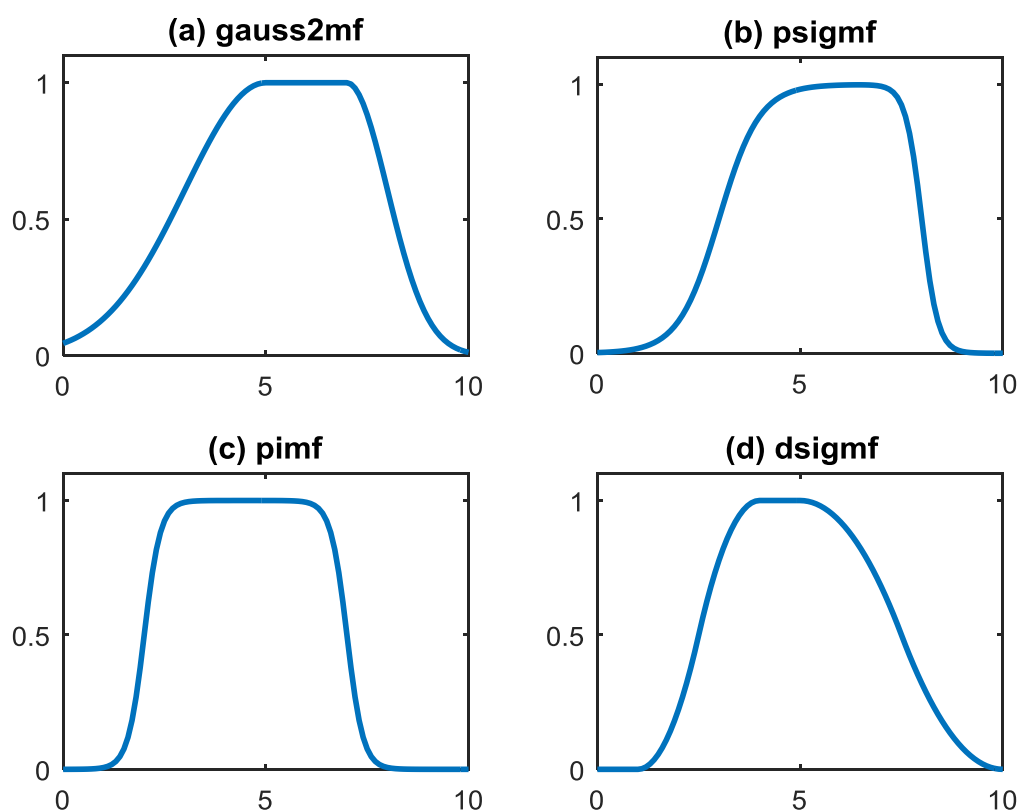
$$dsigmf(x; a_1, c_1, a_2, c_2) = sig_1(x; a_1, c_1) - sig_2(x; a_2, c_2) \quad (51)$$

A função em forma de PI (*pimf*) é definida através de quatro parâmetros conforme a seguinte equação:

$$pimf(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & se\ x \leq a \\ 2 \left(\frac{x-a}{b-a} \right)^2 & se\ a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2 \left(\frac{x-b}{b-a} \right)^2 & se\ \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1 & se\ b \leq x \leq c \\ 1 - 2 \left(\frac{x-c}{d-c} \right)^2 & se\ c \leq x \leq \frac{c+d}{2} \\ 2 \left(\frac{x-d}{d-c} \right)^2 & se\ \frac{c+d}{2} \leq x \leq d \\ 0 & se\ x \geq d \end{cases} \quad (52)$$

O Gráfico 13 mostra os gráficos das funções de pertinência (a) combinação de duas funções gaussianas (*gauss2mf*), (b) produto de duas funções sigmoidais (*psigmf*), (c) função em forma de PI (*pimf*) e (d) diferença de duas funções sigmoidais (*dsigmf*).

Gráfico 13 – MFs unidimensionais parametrizadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essas funções podem se adaptar conforme seus parâmetros. E em um ANFIS esses parâmetros são ajustados através do método do gradiente descendente.