

**ANÁLISE DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES USANDO  
UM SISTEMA HÍBRIDO NEURO-FUZZY**

**ROBERTO PORTELA DE CASTRO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E  
CONSTRUÇÃO CIVIL**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**ANÁLISE DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES USANDO  
UM SISTEMA HÍBRIDO NEURO-FUZZY**

**ROBERTO PORTELA DE CASTRO**

**ORIENTADORA: PROFA. MICHELE TEREZA MARQUES CARVALHO, Dra.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

BRASÍLIA-DF, ABRIL – 2021

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL**

**ANÁLISE DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES USANDO  
UM SISTEMA HÍBRIDO NEURO-FUZZY**

**ROBERTO PORTELA DE CASTRO**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E  
AMBIENTAL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Profa. Michele Tereza Marques Carvalho, DSc. (UnB)**  
**(Orientadora)**

---

**Prof. Antônio Carlos de Oliveira Miranda, DSc. (UnB)**  
**(Examinador Interno)**

---

**Prof. Giuseppe Miceli Junior, DSc. (IME)**  
**(Examinador Externo)**

**BRASÍLIA/DF, 09 de abril de 2021**

## FICHA CATALOGRÁFICA

CASTRO, ROBERTO PORTELA DE

Análise de risco de atraso em obras militares usando um Sistema Híbrido *neuro-fuzzy*  
[Distrito Federal] 2021.

xxii,213., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Estruturas e Construção Civil, 2021).  
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.  
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- |                                       |                             |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| 1. Inteligência Artificial            | 2. Risco de atraso em obras |
| 3. Sistema híbrido <i>neuro-fuzzy</i> | 4. ANFIS                    |
| 5. Redes Neurais Artificiais          | 6. Aprendizado de máquina   |
| 7. Programação em Python              |                             |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (Mestre)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO, R. P. (2021). Análise de risco de atraso em obras usando um Sistema Híbrido *neuro-fuzzy*, Publicação E.DM – 05A/21, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 189p.

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Roberto Portela de Castro

TÍTULO: Análise de risco de atraso em obras militares usando um Sistema Híbrido *neuro-fuzzy*.

GRAU: Mestre em Estruturas e Construção Civil

ANO: 2021

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Roberto Portela de Castro  
SQS 209, bloco J, apartamento 106 – Asa Sul  
CEP: 70.272-100 Brasília – DF – Brasil  
E-mail: castrorpc2001@gmail.com

“Com sabedoria se constrói a casa,e com discernimento se consolida.”

*Provérbios 24:3*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Senhor dos Exércitos, que me permitiu chegar ao final desta jornada, iluminando meu caminho, colocando pessoas boas para me ajudar.

Ao meu pai, que perdi no início desta jornada, agradeço por sempre me incentivar e apoiar em meus desafios. A minha mãe e meus irmãos (Viviane e Walber) agradeço pelas orações, pelas palavras de incentivo e colo reconfortante.

Agradeço a minha esposa, Tatiana, por fazer do meu sonho o seu e não poupar esforços para dar todo o suporte para que alcançasse o sucesso. As minhas filhas, Gabriela e Manuela, que muitas vezes perguntavam por que eu estudava tanto, reclamando minha ausência: “papai é só de vocês agora!!”.

A minha orientadora Professora Michele Carvalho, agradeço pela confiança, por acreditar no meu potencial e sempre exigir o máximo de mim, na certeza de que teríamos sucesso. Agradeço pelas palavras de apoio quando “eu apanhava do código” e tudo parecia que não daria certo. Terminamos o mestrado. MISSÃO CUMPRIDA!!! Que venha o Doutorado!!!!

Ao Professor Antônio Miranda, agradeço por me incentivar a não desistir do meu sonho. A Professora Raquel, em nome de quem agradeço a todos os demais integrantes do Projeto pelas palavras de apoio e por entenderem o quanto este sonho era importante para mim.

Aos professores do PECC: Eugênia Fonseca, Elton Bauer e Rodrigo de Melo, agradeço pelo muito que aprendi e por me inspirarem. De onde eu venho (Exército), “a palavra convence, mas o exemplo arrasta”. E foi assim que me senti nas aulas, vendo a paixão e dedicação com que eles lecionam. Também agradeço a Professora Danielle Montenegro da FACE/UNB, que me aceitou em sua disciplina, um estranho no ninho, mas que ao final, fez-me sentir em casa e com uma nova perspectiva sobre gerenciamento de risco corporativo.

Aos colegas de curso, agradeço pelo companheirismo ao longo das disciplinas. Agradecimento especial ao Yuri Fraga, colega de grupo de trabalho, e ao Tito Albernaz Grossi, companheiro de pesquisa em Python, os quais admiro muito como pessoas, pesquisadores/cientistas e estimo como amigos.

Ao General de Divisão Eschlietti, em nome de quem agradeço a todos os integrantes da Diretoria de Obras Militares pela confiança, pelo apoio e o reconhecimento da relevância deste trabalho. Espero que este trabalho possa melhorar os processos de trabalho do Sistema de Obras Militares.

## RESUMO

### ANÁLISE DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES USANDO UM SISTEMA HÍBRIDO NEURO-FUZZY

Os atrasos nos projetos estão entre os maiores desafios enfrentados pela indústria da construção civil. O ambiente complexo e dinâmico, onde os projetos se desenvolvem, geram riscos e incertezas. Na Administração Pública, o que inclui as obras militares, a análise de risco de atraso é um dos grandes desafios que impacta no sucesso de vários projetos de construção, repercutindo em metas estratégicas vitais para a sociedade. Os avanços tecnológicos advindos da indústria 4.0, têm levado o setor de construção civil a um crescimento explosivo na quantidade de dados gerados e armazenados ao longo do ciclo de vida da edificação. Essa massa de dados tem proporcionado oportunidades e desafios para o gerenciamento de risco de atraso em obras. Os desafios estão relacionados ao processamento de dados de forma associada com a experiência e o conhecimento dos profissionais. Neste sentido, a Inteligência Artificial oferece um conjunto de técnicas de aprendizado de máquina capazes de aprender por meio de uma base de dados e de informações linguísticas, é o caso dos sistemas híbridos *neuro-fuzzy*. Neste trabalho, foi proposto, desenvolvido, treinado e testado um modelo híbrido composto de um Sistema de Inferência Adaptativo *Neuro-Fuzzy* (ANFIS) associado a uma rede neural artificial (RNA) capaz de classificar o nível de risco de atraso de uma obra e estimar o atraso esperado com base em dados de obras anteriores e na opinião de especialistas. A metodologia de pesquisa foi baseada no *Design Science Research* (DSR), para produção de um artefato. Para definição das variáveis de entrada do modelo, foram realizadas revisões sistemáticas da literatura associadas a outras técnicas (Delphi, questionários e Diagrama de Pareto) para definição dos principais grupos e fatores de risco associados com atraso de obras militares. Para o modelo ANFIS a base de dados foi dividida em treinamento validação e teste, resultando em uma acurácia de 98.04% sob a base de teste. Já o modelo de RNA, usou a validação cruzada e obteve um  $R^2$  ajustado de 92.71%. Uma análise de sensibilidade permitiu identificar as variáveis mais representativas para formação do modelo. O estudo demonstra a grande potencialidade de predição de modelos de aprendizado de máquina na análise e risco de atraso em obras. Ao final, cabe ressaltar, a relevância deste trabalho sob a perspectiva do valor prático (para um caso específico) e do valor acadêmico (produção de conhecimento). No primeiro, destaca-se capacidade de generalização do artefato desenvolvido para outras classes de problemas, permitindo que o conhecimento gerado em uma situação específica possa ser aplicado a outras situações enfrentadas por diversas organizações públicas e privadas, com outras tipologias de riscos ou de projetos, até mesmo fora do Setor da Construção Civil. Já com relação ao valor acadêmico, este trabalho tem como diferencial, o desenvolvimento de um Sistema híbrido *neuro-fuzzy*, permitindo explorar as potencialidades dos subsistemas dentro de uma mesma solução, enquanto a maioria dos trabalhos pesquisados abordaram as técnicas de Aprendizado de Máquina de forma isolada. Outra contribuição científica é o desenvolvimento do artefato em Python, uma linguagem de programação aberta e gratuita, abordagem pouco comum entre os trabalhos pesquisados, sendo preferida a utilização de softwares proprietários.

**Palavras-chave:** inteligência artificial, análise de risco, atrasos em obras, sistemas híbridos *neuro-fuzzy*, ANFIS, redes neurais artificiais, aprendizado de máquina e programação em Python.

## ABSTRACT

### RISK ANALYSIS OF DELAY IN MILITARY WORKS USING A NEURO-FUZZY HYBRID SYSTEM.

Project delays are among the biggest challenges facing the construction industry. The complex and dynamic environment, where projects are developed, creates risks and uncertainties. In public administration, which includes military works, delay risk analysis is one of the major challenges that impacts on the success of several construction projects, with repercussions on vital strategic goals for society. The technological advances coming from industry 4.0, have led the civil construction sector to an explosive growth in the amount of data generated and stored throughout the life cycle of the building. This mass of data has provided opportunities and challenges for the management of risk of delay in works. The challenges are related to data processing in a way associated with the experience and knowledge of professionals. In this sense, Artificial Intelligence offers a set of machine learning techniques capable of learning through a database and linguistic information, such as the neuro-fuzzy hybrid systems. In this work, it was proposed, developed, trained and tested a hybrid model composed of an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) associated with an artificial neural network (ANN) capable of classifying the level of risk of delay in a work and estimating the expected delay based on data from previous works and the opinion of experts. The research methodology was based on Design Science Research (DSR), for the production of an artifact. To define the input variables of the model, systematic reviews of the literature associated with other techniques (Delphi, questionnaires and Pareto Diagram) were carried out to define the main groups and risk factors associated with delayed military works. For the ANFIS model, the database was divided into validation and test training, resulting in an accuracy of 98.04% on a test basis. The RNA model, on the other hand, used cross-validation and obtained an adjusted R<sup>2</sup> of 92.71%. A sensitivity analysis made it possible to identify the most representative variables for forming the model. The study demonstrates the great potential of predicting machine learning models in the analysis and risk of delay in works. In the end, it is worth mentioning the relevance of this work from the perspective of practical value (for a specific case) and academic value (knowledge production). In the first, the ability to generalize the artifact developed for other classes of problems stands out, allowing the knowledge generated in a specific situation to be applied to other situations faced by different public and private organizations, with other types of risks or projects, even outside the Civil Construction Sector. Regarding the academic value, this work has as a differential, the development of a neuro-fuzzy hybrid system, allowing to explore the potential of the subsystems within the same solution, while most of the researched works approached the Machine Learning techniques in an isolated way. Another scientific contribution is the development of the Python artifact, an open and free programming language, an unusual approach among the researched works, with the use of proprietary software being preferred.

**Keywords:** artificial intelligence, risk analysis, delays in works, neuro-fuzzy hybrid systems, ANFIS, artificial neural networks, machine learning and Python programming.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PROCESSO DE GESTÃO DE RISCOS (ABNT - ISO 31000).....	29
FIGURA 2 - COMPONENTES DE GERENCIAMENTO DE RISCOS CORPORATIVOS (COSO – ERM) ....	29
FIGURA 3 - PROCESSOS DE GERENCIAMENTO DE RISCOS DE PROJETOS (PMBOK) .....	30
FIGURA 4 - PROCESSO DE GERENCIAMENTO DE RISCO DO ORANGE BOOK.....	31
FIGURA 5 - PROCEDIMENTO DE GERENCIAMENTO DE RISCO (PRINCE2) .....	31
FIGURA 6 - SISTEMA HÍBRIDO SEQUENCIAL.....	37
FIGURA 7 - SISTEMA HÍBRIDO AUXILIAR .....	37
FIGURA 8 - SISTEMA HÍBRIDO INCORPORADO .....	37
FIGURA 9- METODOLOGIA DE PESQUISA DESTE TRABALHO .....	41
FIGURA 10 - PROCESSO PARA ESTUDOS SISTEMÁTICOS .....	42
FIGURA 11 - ETAPAS PARA DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO .....	46
FIGURA 12 - ARTEFATO (SISTEMA NEURO-FUZZY SEQUENCIAL).....	47
FIGURA 13 - DETALHAMENTO DO PRÉ-PROCESSAMENTO.....	50
FIGURA 14 - ENTRADAS E SAÍDAS DO MODELO ANFIS.....	52
FIGURA 15 - DIAGRAMA UML DO MODELO ANFIS.....	53
FIGURA 16 - ENTRADAS E SAÍDAS DO MODELO RNA.....	55
FIGURA 17 - DIAGRAMA UML DO MODELO RNA.....	56
FIGURA 18 - PROCESSO PARA SELEÇÃO DE GRUPO E DE FATORES DE RISCO PARA MODELO ANFIS .....	61
FIGURA 19 - DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE OBRAS POR QUANTIDADE.....	62
FIGURA 20 - DISTRIBUIÇÃO DOS TIPOS DE OBRAS POR VOLUME FINANCEIRO.....	63
FIGURA 21 -DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS AMOSTRAS SELECIONADAS NAS REGIÕES MILITARES .....	64
FIGURA 22- Z7 (CLASSES DE LOCALIZAÇÃO).....	68
FIGURA 23– PROCESSO PARA DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO.....	69
FIGURA 24 - DIVISÃO DA BASE DE DADOS E ESTRATÉGIA DE AVALIAÇÃO DO MODELO ANFIS	74
FIGURA 25- DIVISÃO DA BASE DE DADOS E ESTRATÉGIA DE AVALIAÇÃO DO MODELO RNA ....	75
FIGURA 26 - FLUXOGRAMA PARA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA RNA.....	77
FIGURA 27 - TEXTO DA MENSAGEM DE E-MAIL ENCAMINHANDO O QUESTIONÁRIO.....	145
FIGURA 28 - TEXTO DA MENSAGEM WHATSAPP ENCAMINHANDO O QUESTIONÁRIO .....	145
FIGURA 29 - QUESTIONÁRIO PARA IDENTIFICAÇÃO DE FATORES DE RISCO .....	145
FIGURA 30 - INTERRELAÇÃO ENTRE OS CONCEITOS DE AI .....	181
FIGURA 31- TIPOS DE APRENDIZADO EM APRENDIZADO DE MÁQUINA .....	183
FIGURA 32 - NEURÔNIO ARTIFICIAL.....	186
FIGURA 33 - REDES “FEEDFORWARD” DE CAMADA ÚNICA .....	186
FIGURA 34 - REDES FEEDFORWARD COM MÚLTIPLAS CAMADAS .....	187
FIGURA 35 - REDES RECORRENTES – FEEDBACK.....	187
FIGURA 36 - ARQUITETURA DOS PRINCIPAIS TIPOS DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS.....	188
FIGURA 37 - FUNÇÕES DE ATIVAÇÃO .....	190
FIGURA 38 - VALIDAÇÃO CRUZADA K - DOBRAS .....	193
FIGURA 39 - LÓGICA BOOLEANA X LÓGICA FUZZY .....	194
FIGURA 40 - EXEMPLOS DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA .....	196
FIGURA 41 - EXEMPLOS DE FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA .....	197
FIGURA 42 - ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE INFERÊNCIA FUZZY .....	200
FIGURA 43- SIF - TSUKAMOTO (TIPO 1), MAMDANI (TIPO 2) E TAKAGI-SUGENO (TIPO 3).....	202
FIGURA 44 - TÉCNICAS HÍBRIDAS FUZZY .....	204
FIGURA 45 - MODELO ANFIS (TIPO 3).....	205

## LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - FUNÇÕES DE PERTINÊNCIAS TRIANGULARES ASSOCIADAS AO NÍVEL DE RISCO ..51	
GRÁFICO 2 - ESTUDO QUANTITATIVO DOS ACHADOS NA RSL .....	82
GRÁFICO 3 - QUANTIDADE DE GRUPOS DE FATORES DE RISCO ADOTADOS NOS TRABALHOS SELECIONADOS.....	83
GRÁFICO 4 - EVOLUÇÃO DA PERDA (ANFIS4).....	90
GRÁFICO 5- EVOLUÇÃO DA MÉTRICA (ANFIS4) .....	90
GRÁFICO 6 - EVOLUÇÃO DA PERDA (ANFIS5).....	90
GRÁFICO 7 - EVOLUÇÃO DA MÉTRICA (ANFIS5) .....	90
GRÁFICO 8 - ALVO X PREDIÇÃO (TREINAMENTO – ANFIS5) .....	91
GRÁFICO 9 - ALVO X PREDIÇÃO (TESTE – ANFIS5) .....	92
GRÁFICO 10 - PREDIÇÃO X ALVO.....	94
GRÁFICO 11 - PREDIÇÃO X ALVO.....	94
GRÁFICO 12 - GRÁFICO DE ACERTO (DADOS DE TREINAMENTO – RNA14).....	95
GRÁFICO 13 - GRÁFICO DE ACERTO (DADOS DE TESTE – RNA14).....	95
GRÁFICO 14 - FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA TRIANGULAR PARA PROBABILIDADE DE RISCO .....	198

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - COMPARAÇÃO ENTRE ANFIS E OUTROS ARTEFATOS (ABORDAGENS).....	22
QUADRO 2 - ESTUDOS SISTEMÁTICOS DA LITERATURA.....	43
QUADRO 3 - PARÂMETROS DE BUSCA DOS ESTUDOS SISTEMÁTICOS DA LITERATURA .....	44
QUADRO 4 - CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO PARA OS ESTUDOS SISTEMÁTICOS DA LITERATURA.....	45
QUADRO 5 - ENTRADAS, PROCESSAMENTOS E SAÍDAS DA ETAPA C.1 – IDENTIFICAÇÃO DAS CLASSES DE PROBLEMAS .....	46
QUADRO 6 - ENTRADAS, PROCESSAMENTOS E SAÍDAS DA ETAPA C.1 – IDENTIFICAÇÃO DE ARTEFATOS .....	47
QUADRO 7 - ENTRADAS, PROCESSAMENTOS E SAÍDAS DA ETAPA C.2 - DEFINIÇÃO DE GRUPOS E FATORES DE RISCO .....	49
QUADRO 8 - ENTRADAS, PROCESSAMENTOS E SAÍDAS DA ETAPA C.2 - SELEÇÃO DO ESPAÇO AMOSTRAL .....	49
QUADRO 9 - MATRIZ DE PROBABILIDADE X IMPACTO .....	51
QUADRO 10 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO ADOTADAS.....	58
QUADRO 11 - DISTRIBUIÇÃO DAS AMOSTRAS SEGUNDO A TIPOLOGIA DA EDIFICAÇÃO .....	64
QUADRO 12 - FICHA DISTRIBUÍDA AOS ESPECIALISTAS PARA COLETA DE DADOS DAS OBRAS	66
QUADRO 13 - EXTRATO DA FICHA DE INFORMAÇÃO AO FINAL DO PROCESSO DE ANÁLISE DE RISCO .....	66
QUADRO 14- HIPER-PARÂMETROS USADOS NO DESENVOLVIMENTO DO MODELO ANFIS.....	70
QUADRO 15- HIPER-PARÂMETROS DE ARQUITETURA E DE TREINAMENTO DA RNA.....	71
QUADRO 16- CLASSIFICAÇÃO DO COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO AJUSTADO (R2 AJUSTADO) .....	76
QUADRO 17 - GRUPOS DE FATORES DE RISCOS (1RSL E 2RSL).....	79
QUADRO 18 - GRUPO DE FATORES DE RISCOS (GFR).....	81
QUADRO 19 - FATORES DE RISCO DO GRUPO CONSTRUÇÃO.....	84
QUADRO 20 - FATORES DE RISCO DO GRUPO SOCIOAMBIENTAL.....	84
QUADRO 21 - FATORES DE RISCO DO GRUPO CONTRATANTE .....	84
QUADRO 22 - FATORES DE RISCO DO GRUPO PROJETO .....	85
QUADRO 23 - FATORES DE RISCO DO GRUPO COMPLIANCE.....	85
QUADRO 24 - FATORES DE RISCO DO GRUPO MERCADOLÓGICO .....	86
QUADRO 25 - FATORES DE RISCO DO GRUPO CONTRATADO .....	86
QUADRO 26 - AVALIAÇÃO DO TREINAMENTO (ANFIS5).....	91
QUADRO 27 - AVALIAÇÃO DO TESTE (ANFIS5).....	91
QUADRO 28- RESULTADOS DOS ESTUDOS SISTEMÁTICOS DA LITERATURA .....	124
QUADRO 29 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO (ABNT ISO 31010) .....	125
QUADRO 30 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO SEGUNDO O PROJECT BOOK OF KNOWLEDGE (PMBOK) .....	126
QUADRO 31 - TÉCNICAS DE ANÁLISE DE RISCO SEGUNDO PROJECT STANDARD FOR RISK MANAGEMENT.....	126
QUADRO 32 - TÉCNICAS DE GERENCIAMENTO DE RISCO (PRINCE2) .....	127
QUADRO 33 – ARTEFATOS ENCONTRADOS NA 3RSL COM FOCO NO GERENCIAMENTO DE CRONOGRAMA.....	128
QUADRO 34 - ARTEFATOS ENCONTRADOS NA 3RSL COM FOCO NO GERENCIAMENTO DE RISCO .....	130
QUADRO 35 - TÉCNICAS DE APRENDIZADO DE MÁQUINA OBTIDAS NA 7RSL .....	132
QUADRO 36- CLASSE DE PROBLEMAS IDENTIFICADOS NA RSL .....	134
QUADRO 37 – QUANTIFICAÇÃO DOS TRABALHOS DE ACORDO COM AS ABORDAGENS .....	135
QUADRO 38 - FICHA MODELO DE OPINIÃO DE ESPECIALISTAS - TÉCNICA DELPHI .....	137
QUADRO 39 - FICHA MODELO DE CONSOLIDAÇÃO DA OPINIÃO DOS ESPECIALISTAS - TÉCNICA DELPHI.....	137

QUADRO 40 - FICHA DO ESPECIALISTA 1 - TÉCNICA DELPHI.....	137
QUADRO 41 - FICHA DO ESPECIALISTA 2 - TÉCNICA DELPHI.....	138
QUADRO 42- FICHA DO ESPECIALISTA 3 - TÉCNICA DELPHI.....	138
QUADRO 43 - FICHA DO ESPECIALISTA 4 - TÉCNICA DELPHI.....	138
QUADRO 44 – FICHA DO ESPECIALISTA 5 – TÉCNICA DELPHI .....	138
QUADRO 45 – FICHA COM CONSOLIDAÇÃO FINAL DA OPINIÃO DOS ESPECIALISTAS – TÉCNICA DELPHI.....	139
QUADRO 46 – FATORES DE RISCOS OBTIDOS DA 1RSL E 2RSL.....	139
QUADRO 47 - ESTRUTURA ANALÍTICA DE ERROS (EAR) .....	142
QUADRO 48 - CONTRIBUIÇÃO OBTIDAS DOS QUESTIONÁRIOS.....	146
QUADRO 49 - VOTOS DOS FATORES DE RISCOS SELECIONADOS.....	146
QUADRO 50 - OPERAÇÕES DE CONJUNTOS .....	198
QUADRO 51: PRINCIPAIS ASPECTOS RELACIONADOS COM A DSR.....	209
QUADRO 52 - MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE ARTEFATOS.....	212

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PARÂMETROS DAS FUNÇÕES DE PERTINÊNCIA TRIANGULARES.....	52
TABELA 2 - EXTRATO DA ENTRADA DE DADOS PARA O ANFIS (NR).....	67
TABELA 3 - MODELOS ANFIS DESENVOLVIDOS – RESULTADOS DE TREINAMENTO E VALIDAÇÃO.....	87
TABELA 4 - MODELOS ANFIS DESENVOLVIDOS - RESULTADOS DE TESTE.....	88
TABELA 5 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE (PARADIGMA RNA1).....	92
TABELA 6 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE (PARADIGMA RNA7).....	93
TABELA 7 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE (PARADIGMA RNA14).....	93
TABELA 8 - ANÁLISE DE RISCO - DADOS OBTIDOS DAS FICHAS DE INFORMAÇÕES.....	149
TABELA 9 - ANÁLISE DE RISCO - DADOS OBTIDOS DAS FICHAS DE INFORMAÇÕES (CONTINUAÇÃO).....	155
TABELA 10 - DADOS DE ENTRADA DO MODELO ANFIS.....	161
TABELA 11 - DADO DE ENTRADA DA RNA.....	169

## SIGLAS E ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AM	Aprendizado de Máquina
ANFIS	<i>Adaptative Neuro Fuzzy Inference System</i>
COSO	<i>Committee of Sponsoring Organizations</i>
DOM	Diretoria de Obras Militares
DS	<i>Design Science</i>
DSR	<i>Design Science Research</i>
ERM	<i>Enterprise Risk Management</i>
FR	Fatores de risco
GFR	Grupo de Fatores de Riscos
IA	Inteligência Artificial
IDE	Ambiente de desenvolvimento integrado
OM	Organizações Militares
OPUS	Sistema Unificado de Processamento de Obras
PMBOK	<i>Project Management Body of Knowledge</i>
PMI	<i>Project Management Institute</i>
PRINCE	<i>Projects in Controlled Environments</i>
RNA	Redes Neurais Artificiais
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SOM	Sistema de Obras Militares

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>19</b>
1.1 JUSTIFICATIVA _____	21
1.2 OBJETIVOS _____	24
1.2.1 Objetivo geral _____	24
1.2.2 Objetivos específicos _____	24
1.3 CONDICIONANTES DA PESQUISA _____	24
1.4 RESTRIÇÕES DA PESQUISA _____	25
1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO _____	25
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>27</b>
2.1 ANÁLISE DE RISCOS DE ATRASO EM OBRAS _____	27
2.1.1 Atraso em obras _____	27
2.1.2 Riscos e Fatores de risco _____	28
2.1.3 Análise de risco _____	28
2.1.3.1 O Processo de Análise de Risco _____	29
2.1.3.2 Técnicas e ferramentas de análise de risco. _____	31
2.2 LÓGICA FUZZY _____	32
2.3 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS _____	34
2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS <i>NEURO-FUZZY</i> _____	36
2.4.1 Tipos de Modelos Híbridos _____	36
2.4.2 Sistemas <i>Neuro-fuzzy</i> _____	38
2.4.3 Sistemas ANFIS _____	38
<b>3. METODOLOGIA DE PESQUISA</b>	<b>40</b>
3.1 MÉTODO DSR ADOTADO _____	40
3.1.1 A - Definição do problema _____	40
3.1.2 B - Estudos sistemáticos da literatura _____	41
3.1.2.1 Escopo de pesquisa _____	42
3.1.2.2 Planejamento do Processo de busca _____	43
3.1.2.3 Planejamento do Processo de Seleção de estudos _____	44
3.1.3 C - Desenvolvimento do artefato _____	45
3.1.3.1 C.1 – Identificação das classes de problemas e artefatos existentes ____	46
3.1.3.1.1 Identificação das classes de problemas .....46	
3.1.3.1.2 Identificação dos artefatos existentes .....47	
3.1.3.2 C.2 – Planejamento do artefato _____	47
3.1.3.2.1 Definição dos Grupos e fatores de riscos .....48	

3.1.3.2.2	Seleção do espaço amostral .....	49
3.1.3.2.3	Pré-processamento .....	49
3.1.3.2.4	Modelo ANFIS.....	52
3.1.3.2.5	Modelo de RNA .....	55
3.1.3.2.6	Modelo de Análise de Risco .....	57
3.1.3.3	C.3 – Coleta e tratamento dos dados _____	59
3.1.3.3.1	Definição dos Grupos e fatores de risco .....	60
3.1.3.3.2	Seleção do espaço amostral .....	62
3.1.3.3.3	Dados para o ANFIS .....	64
3.1.3.3.4	Dados para a RNA .....	67
3.1.3.4	C.4– Desenvolvimento do artefato _____	68
3.1.3.4.1	Desenvolvimento do modelo ANFIS .....	69
3.1.3.4.2	Desenvolvimento do modelo RNA .....	71
3.1.3.5	C.5 – Teste e avaliação _____	73
3.1.3.5.1	Avaliação do modelo ANFIS.....	73
3.1.3.5.2	Avaliação do modelo de RNA .....	75
3.1.4	D – Explicitações das aprendizagens _____	77
3.1.5	E – Generalizações para uma classe de problema _____	78
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>79</b>
4.1	DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO _____	79
4.1.1	Identificação da Classe de Problemas e Artefatos existentes (C-1) _____	79
4.1.2	Coleta e tratamento de dados (C.3) _____	79
4.1.2.1	Seleção dos Grupos e Fatores de Risco (GFR)_____	79
4.1.2.2	Seleção dos Fatores de risco (FR) _____	83
4.1.2.3	Seleção de dados das obras _____	87
4.1.3	Desenvolvimento do artefato (C.4) _____	87
4.1.3.1	Modelo ANFIS _____	87
4.1.3.2	Modelo RNA _____	89
4.1.4	Avaliação do artefato (C.5) _____	90
4.1.4.1	Avaliação do Modelo ANFIS _____	90
4.1.4.2	Avaliação do Modelo RNA _____	92
4.2	EXPLICITAÇÃO DAS APRENDIZAGENS _____	95
4.3	GENERALIZAÇÃO DO MÉTODO _____	96
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>98</b>
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS _____	100

<b>6. REFERÊNCIAS</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE A</b>	<b>124</b>
1. IDENTIFICAÇÃO DA CLASSE DE PROBLEMAS E ARTEFATOS EXISTENTES (C.1)	124
2. REVISÕES SISTEMÁTICAS DA LITERATURA _____	124
2.1 Identificação dos Artefatos existentes _____	124
2.1.1 Pesquisa em Normas e padrões internacionais _____	125
2.1.2 3ª Revisão Sistemáticas da Literatura (3RSL) _____	127
2.1.3 7ª Revisão Sistemáticas da Literatura (7RSL) _____	132
2.2 Identificação da Classe de Problemas _____	133
3. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS (C.2) _____	136
3.1 Definição dos Grupos e dos Fatores de Risco _____	136
3.1.1 Seleção dos Grupos de fatores de risco (GFR) _____	136
3.1.2 Seleção dos Fatores de risco (FR) _____	139
3.1.2.1 Levantamento dos Fatores de risco (FR) _____	139
3.1.2.2 Seleção dos Fatores de risco (FR) _____	146
3.2 Dados para o ANFIS _____	149
3.2.1 Dados da análise de risco _____	149
3.2.2 Dados para o ANFIS _____	161
3.3 Dados para a RNA _____	169
<b>APÊNDICE B</b>	<b>181</b>
1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL _____	181
2. APRENDIZADO DE MÁQUINA _____	183
3. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS _____	185
3.1 Neurônio artificial _____	185
3.2 Arquitetura das RNA _____	186
3.3 Funções de Ativação _____	189
3.4 Aprendizado _____	191
3.5 Avaliação _____	191
3.6 Validação Cruzada _____	192
4. LÓGICA FUZZY _____	193
4.1 Conceito de Lógica <i>Fuzzy</i> _____	194
4.2 Conjuntos Fuzzy _____	194
4.3 Função de pertinência _____	195
4.4 Variáveis linguísticas e valores linguísticos _____	197
4.5 Operações Fuzzy _____	198

4.6	Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF)	199
4.6.1	Regras If-then	199
4.6.2	Arquitetura dos Sistema de Inferência Fuzzy	200
4.6.3	Tipos de Sistemas de Inferência Fuzzy	201
4.6.4	Sistema Takagi, Sugeno e Kang (TKS)	203
4.7	Técnicas híbridas Fuzzy	204
5.	ANFIS	204
<b>APÊNDICE C</b>		<b>208</b>
1.	<i>DESIGN SCIENCE (DS)</i>	208
2.	<i>DESIGN SCIENCE RESEARCH (DSR)</i>	209
2.1.	Ciclos de Pesquisa	210
2.2.	Classes de problemas	210
2.3.	Artefatos	211
3.	VALIDAÇÃO DA PESQUISA	211

## 1. INTRODUÇÃO

Os projetos da construção civil são desenvolvidos em ambientes complexos e dinâmicos, que geram incertezas e riscos, (MULHOLLAND; CHRISTIAN, 1999), devido ao acúmulo de muitos parâmetros inter-relacionados (TAYLAN; BAFAIL; ABDULAAL; KABLI, 2014). FURTADO MAUÉS; SANTANA; SANTOS; DAS NEVES *et al.* (2017) colaboram com este entendimento ao afirmar que a construção civil é considerada como uma das indústrias com menor desempenho em relação ao cumprimento de prazo contratual.

Neste ambiente, os atrasos nos projetos estão entre os desafios mais prementes enfrentados pelo setor (GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI; NASSAR, 2020). A importância global deste tema, em especial nos países em desenvolvimento, pode ser ressaltada pelos trabalhos de YAP; GOAY; WOON e SKITMORE (2020) e KADRY; OSMAN e GEORGY (2017), que citam ao todo 33 estudos em 22 países, distribuídos em quatro continentes (Europa, África, Oriente Médio, Ásia). Assim, gerenciar essa incerteza é fundamental aumentar as chances de sucesso do projeto (PMI, 2018). Para CHOUDHRY; ASLAM e ARAIN (2014), a análise é uma das principais etapas do gerenciamento de riscos que permite às partes interessadas estimar incertezas que possam ameaçar o desempenho do projeto em termos de prazo.

Segundo o PMI (2018), todos os projetos possuem risco, pois são empreendimentos únicos, que exigem um esforço não repetitivo e temporário, submetidos às premissas e restrições de prazo, custo e qualidade, tendo a responder às expectativas das partes interessadas. Esta individualidade que os projetos possuem demanda análises subjetivas que consideram a opinião de especialistas e a experiência de profissionais na análise de risco.

Para BUDAYAN; DIKMEN; TALAT BIRGONUL e GHAZIANI (2018), se o risco de atraso não for avaliado e refletido no cronograma do projeto, ele não poderá ser gerenciado e mitigado adequadamente, levando a consequências indesejáveis (BUDAYAN; DIKMEN; TALAT BIRGONUL; GHAZIANI, 2018), podendo, inclusive, comprometer a consecução do projeto.

Na Administração Pública, o que inclui as obras militares, a análise de risco de atraso é um dos grandes desafios que impacta no sucesso de vários projetos de construção, repercutindo em metas estratégicas vitais para a sociedade, ressaltando o valor prático deste trabalho.

Avanços tecnológicos, nos últimos anos, advindos da indústria 4.0, têm levado o setor de construção civil a um crescimento explosivo na quantidade de dados gerados e armazenados a partir de várias disciplinas ao longo do ciclo de vida da edificação. Essa massa de dados tem

proporcionado oportunidades e desafios. As oportunidades estão relacionadas ao uso das informações geradas a partir dos dados disponíveis na busca de soluções promissoras para o dilema de atraso no projeto (BILAL; OYEDELE; QADIR; MUNIR et al., 2016). Os desafios referem-se ao processamento de dados como forma de extrair conhecimento útil que possa ser aplicado ao gerenciamento de riscos.

Vários fatores colaboram para que o processamento de dados na análise de risco seja um desafio. Entre eles, ZADEH (1984) destaca os dados imprecisos, incompletos, não totalmente confiáveis ou mesmo tratados de maneira inadequada. Por sua vez, (KANGARI, 1988) salienta, que problemas com alto grau de subjetividade e julgamento humano, os métodos estatísticos não são apropriados. No mesmo sentido, PAWAN e LORTERAPONG (2015) consideram que a subjetividade e a imprecisão dos dados afetam inevitavelmente a precisão das estimativas, que por sua vez levam a materialização do risco. Já BUDAYAN; DIKMEN; TALAT BIRGONUL e GHAZIANI (2018) ressaltam a dificuldade em se obter dados históricos sobre os projetos para realizar análises estatísticas.

FARROW (2007) destaca que, para quantificação de atrasos, existem muitas técnicas disponíveis na literatura, todas com vantagens e desvantagens próprias. Neste sentido, FRANÇA (2016) resalta que muitos autores propõem modelos tradicionais com métodos estatísticos ou determinísticos, para gerenciamento de risco, mas que estas abordagens não são as mais eficientes para problemas baseados em estruturas conceituais, opinião de especialistas e experiência humana.

Para GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI e NASSAR (2020), o Aprendizado de Máquina (AM) oferece um conjunto ideal de técnicas capazes de lidar com sistemas tão complexos como a construção civil. Neste mesmo sentido, segundo EBRAT e GHODSI (2014), as técnicas de Inteligência Artificial (IA), como Redes Neurais Artificiais (RNA) e modelagem *fuzzy*, podem ter amplas aplicações no gerenciamento de riscos, em apoio à tomada de decisão (ÖZKAN; İNAL, 2014).

Entre as técnicas de AM, GOLMOHAMMADI (2011) destaca que pesquisas têm mostrado aplicações com sucesso de RNA em problemas de tomada de decisão multicritério no ambiente de gestão, quando dados históricos estão disponíveis. Segundo SILVA (2016), as RNA têm na previsão uma grande área de aplicação, que consiste em estimar valores futuros levando-se em consideração diversos dados de parâmetros obtidos previamente.

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

informações imprecisas de forma estruturada oriundas do pensamento/experiência humana por meio de variáveis linguísticas (JANG, J.-S.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E., 1997).

Segundo WALIA; SINGH e SHARMA (2015), existem várias áreas de aplicação nas quais a RNA e a Lógica Fuzzy foram implementadas com sucesso, seja individualmente ou complementando os pontos fortes da outra. Para C.LOGANATHAN e K.V.GIRIJA (2014), entre as abordagens *neuro-fuzzy*, existe o *Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)*, que mostrou resultados significativos em suas pesquisas na modelagem de funções não lineares, as mais adequadas para gerenciamento de risco.

Buscando agregar em uma única solução as vantagens das RNA e da Lógica *Fuzzy* e minimizando as desvantagens, o *ANFIS* tem sido utilizado com sucesso em problemas de Gestão (JANG, J.-S.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E., 1997). Para WALIA; SINGH e SHARMA (2015), o *ANFIS* é um sistema de inferência fuzzy implementado na estrutura de redes adaptativas, têm sido amplamente utilizadas para modelar o comportamento de especialistas.

Segundo ÖZKAN e İNAL (2014), o *ANFIS* é capaz de unir um sistema de inferência fuzzy com um algoritmo de aprendizagem. Neste mesmo sentido, de acordo com JANG (1993), o *ANFIS* propicia um tratamento da incerteza com o uso de variáveis baseadas na linguagem humana, capazes de estruturas o conhecimento e a experiência de especialistas.

Com base no acima exposto, este trabalho busca modelar um Sistema Híbrido *Neuro-fuzzy* sequencial composto por uma rede *ANFIS* para determinação do nível de risco de atraso em uma obra e uma RNA para estimar o atraso esperado. Explicitamente, o problema de pesquisa deste trabalho é: Como determinar o nível de risco de atraso em obras militares e qual o atraso esperado?

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Esta seção é fundamentada na *Design Science Research (DSR)*, que é a base da metodologia de pesquisa deste trabalho, apresentada no Capítulo 3. A seguir, serão abordados aspectos referentes à importância do problema, seu tipo de contribuição e sua relevância.

Segundo ALTURKI (2012), a importância do Problema é comprovada em duas situações: se é um problema ainda não solucionado em uma determinada Classe de Problemas; e se a pesquisa trará alguma contribuição para o campo de conhecimento a que se refere. Com base na Revisão Sistemática da Literatura (RSL) realizada foi possível constatar que o uso de *ANFIS* e de RNA para o problema de análise de risco (Classe de Problema) no atraso de projetos de construção, ainda foi pouco estudado, apresentando-se como uma lacuna no conhecimento. Além disso, EBRAT e GHODSI (2014) apresentam uma comparação entre o *ANFIS* e outros

artefatos para modelagem de fatores de riscos encontrados pelos autores na literatura (Quadro 1), de onde os autores concluem que o ANFIS é muito eficaz na modelagem de fatores de risco de projeto de construção em comparação com algumas outras abordagens de avaliação de risco.

Quadro 1 - Comparação entre ANFIS e outros artefatos (abordagens)

Fonte	Artefato	Crisp Data	Non-crisp Data (Ambiguity)	Handling Data Linearity	Handling Data Nonlinearity	Sensitivity Analysis
Yu et al., 2008	RNA	X		X	X	
Zayed et al., 2008	AHP	X				
Chen and Wang, 2009	FA-HP		X			
Wang et al., 2008	AHP-DEA	X		X		
Wang and Elhag, 2007	FGDM		X			
EBRAT; GHODSI, 2014	ANFIS	X	X	X	X	X

**Legenda:** Artificial Neural Network (RNA), Analytic Hierarchy Process (AHP), Fuzzy AHP (FA-HP), Data Envelopment Analysis and Analytic Hierarchy Process (AHP) – (AHP-DEA), Fuzzy Group Decision Making (FGDM), Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)

Fonte: (EBRAT; GHODSI, 2014), modificado.

Entre os tipos de contribuição esperados em uma *DSR*, citados por ALTURKI (2012), este trabalho enquadra-se no: desenvolvimento de uma solução para um problema específico de uma Classe de Problemas através da construção e avaliação de um artefato. GREGOR e JONES (2007) endossam este entendimento ao afirmar que a construção de um artefato suficientemente novo é vista como uma contribuição significativa por si só.

Para análise da relevância, este estudo baseou-se na pesquisa de RAUTIAINEN; SIPPOLA e MÄTTÖ (2017), que abordaram o tema no contexto de uma *Constructive Research Approach (CRA)*, um tipo de *DSR* segundo GREGOR e JONES (2007). No estudo, os autores sugerem analisar a relevância do *CRA* sob múltiplas perspectivas.

Neste trabalho a relevância da pesquisa foi avaliada sobre a perspectiva do valor prático (para o caso específico) e do valor acadêmico (produção de conhecimento). Sob estas duas perspectivas, o trabalho foi considerado de grande relevância.

No caso do valor prático, o trabalho responde a uma demanda do Sistema de Obras Militares – SOM. Para a Diretoria de Obras Militares – DOM, órgão máximo do SOM e responsável por todas as obras dentro de Organizações Militares – OM, a análise de risco de atraso em obras tem grande importância dentro do gerenciamento da obra. Além disso, segundo

a IN-01 MPOG/CGU (2016), os órgãos e entidades do Poder Executivo federal deverão adotar medidas para a sistematização de práticas relacionadas à gestão de riscos. A importância da análise de risco de atraso em obras militares pode ser comprovada pelo volume de trabalho. Em 2020, havia 535 obras em execução espalhadas por todo o país. Em 2019, foram realizadas 184 contratações de obras e foram concedidos 208 aditivos de prazo.

Alguns estudos de revisão da literatura evidenciam o valor acadêmico deste trabalho. É o caso de SHARMA e GOYAL (2019) que realizaram uma revisão abrangente da literatura desde a década de 80 até 2019 sobre a aplicação de "técnicas difusas" em projetos de construção para gerenciamento de riscos, tomada de decisão e melhoria do desempenho dos projetos de construção. Os autores concluíram que, somente no início do século XXI, com o progresso de técnicas avançadas de computação, a implementação de métodos difusos tem crescido na área gerenciamento de projetos de construção, como gerenciamento de risco, tomada de decisão e desempenho aprimoramento dos projetos de construção.

Por outro lado, GIANNAKOS e XENIDIS (2018) realizaram uma detalhada revisão da literatura sobre a implementação de RNA no gerenciamento de riscos de projetos de construção, da década de 90 até 2018, e concluíram que ainda era um campo científico dinâmico e promissor, dado o pequeno número de estudos científicos. Por fim, para estes autores, em suas pesquisas identificaram os principais programas utilizados em aplicações de rede neural para gestão de riscos em projetos de construção, com destaque para o Matlab®.

O artefato ANFIS objeto deste trabalho, foi programado na linguagem Python em ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) de código aberto e gratuito chamado de "*Scientific Python Development Environment*" - SPYDER. Desta forma, o trabalho agregou valor acadêmico ao explorar soluções de desenvolvimento computacionais em plataforma gratuita e que permitem o trabalho colaborativo.

O valor acadêmico, também se materializa com o fortalecimento da linha de Pesquisa de Gestão e Sustentabilidade do Ambiente Construído do Curso de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB), por meio da produção de conhecimento relacionado com inteligência, artificial, Aprendizado de Máquina, análise de risco e ANFIS, sendo uma continuidade dos seguintes trabalhos: CORDEIRO ARAUJO (2012), um estudo de caso sobre Gerenciamento de Riscos em Contratos de Obras Públicas; CALDEIRA (2015), uma pesquisa sobre Diretrizes para o Gerenciamento de Riscos em Contratos de Obras Públicas, com foco no caso da Contratação Integrada; BELTRÃO e CARVALHO (2019), que estudaram um Processo de Análise Hierárquica Fuzzy para Priorização de riscos de obras públicas; (OTERO, 2018b), que propôs uma Ferramenta de

Gestão de Riscos Baseada na Teoria dos Conjuntos Fuzzy para Suporte à Garantia do Desempenho de Edificações Habitacionais; ARAÚJO (2019), que estudou sobre a quantificação da Influência dos Parâmetros da Produtividade da Mão de Obra na Construção Civil por meio de Sistemas Fuzzy de Inferência; e BARROS (2019), que aplicou RNA no contexto de estimativa de custos de construção de rodovias.

## 1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram divididos em geral e específicos. O geral está relacionado com a solução do problema proposto. Já os específicos são desdobramentos do geral e colaboram para a sua consecução.

### 1.2.1 Objetivo geral

Desenvolvimento de artefato constituído por um Sistema Inteligente (SI) híbrido *Neuro-fuzzy* para análise de risco de atraso em obras militares.

O artefato deverá ser capaz de aprender com uma base de dados e considerar a experiência e o conhecimento de especialistas por meio de variáveis linguísticas. O SI deverá ser capaz de classificar uma obra de acordo com o nível de risco e determinar o atraso esperado. Desta forma, contribuindo para a priorização das obras em diferentes cenários de disponibilidade de recursos, auxiliando na escolha da estratégia de resposta e de monitoramento de riscos.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- a. Determinação dos grupos de fatores de riscos associados com atraso em obras militares.
- b. Determinação dos principais fatores de risco relacionados com atraso em obras militares.
- c. Desenvolvimento de um artefato por meio da configuração de um Sistema híbrido *Neuro-fuzzy*, composto por um modelo *ANFIS* para classificação do nível de risco de atraso em uma obra e de uma rede RNA para estimativa do atraso esperado de uma obra.

## 1.3 CONDICIONANTES DA PESQUISA

Nesta etapa do trabalho são abordados os requisitos de funcionalidade e desempenho esperados para o artefato (DRESCH, 2013), o que permite avaliar a relevância da pesquisa sobre o aspecto do valor prático do artefato em um caso real. Para tanto, foram realizadas reuniões com militares da Diretoria de Obras Militares com intuito de extrair as expectativas

destas partes interessadas com relação ao artefato. Os resultados destas reuniões foram os requisitos de funcionalidade e desempenho apresentados a seguir:

- a. O Sistema desenvolvido em Python para que seja integrado ao OPUS (Sistema Unificado de Processamento de Obras), Plataforma de gestão do patrimônio jurisdicionado ao Exército Brasileiro que suporta as funcionalidades de planejamento, programação, acompanhamento, fiscalização e controle ao longo de todo o ciclo de vida da edificação.
- b. O Sistema foi criado em ambiente de desenvolvimento integrado (IDE, do inglês *Integrated Development Environment*), com linguagem de programação Python (aberta e gratuita) de forma a permitir sua melhoria contínua sem depender de um fornecedor para suporte e atualizações.
- c. Para atender aos requisitos do SOM, o Sistema deve ser capaz de generalização, isto é, predição do nível de risco com acurácia superior a 85% para o modelo *ANFIS* e um Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) superior a 85% para o modelo da RNA na predição do atraso esperado em obras militares.

#### 1.4 RESTRIÇÕES DA PESQUISA

As restrições são fatores limitadores que afetam a execução do projeto (PMI, 2018). Sobre esta ótica serão apresentadas nesta seção as restrições consideradas no desenvolvimento deste trabalho.

Em função da limitação de informações na base de dados, este trabalho considera como atraso os prazos que ultrapassaram a duração inicialmente prevista em contrato, levando a formalização de Termos Aditivos.

Os dados utilizados nesta pesquisa compreendem registros de informações relacionadas com obras de edificações militares de construção concluídas entre 2009 e 2019. Na fase de Coleta e tratamento de dados (seção 3.1.3.3) C.3 – Coleta e tratamento dos dados foram aplicados filtros e agrupamentos de tipologia e local da obra.

Devido ao grande esforço necessário para o desenvolvimento do modelo *ANFIS*, e a existência de mais de oito funções de associação ou pertinência citadas na literatura, foram implementadas neste trabalho apenas duas: triangular e a gaussiana.

#### 1.5 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura deste trabalho é composta de quatro capítulos e três apêndices, conforme escopo descrito a seguir:

Capítulo 1 – INTRODUÇÃO: breve abordagem inicial sobre o tema, ressaltando a sua relevância, objetivos gerais e específicos. Em seguida, é tem-se conscientização do problema, buscando entendê-lo de uma forma mais ampla. Por fim, são apresentados os limites do trabalho.

Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA: apresenta o conteúdo da literatura referente ao tema em um modelo de afunilamento, indo de uma visão mais geral até uma mais específica, isto é, partindo de uma abordagem sobre Inteligência Artificial, passando pela Lógica *Fuzzy* e RNA até chegar a Sistemas híbridos *neuro-fuzzy*. Também é feita uma abordagem sobre a análise de risco de atraso em obras (cerne do problema deste trabalho).

Capítulo 3 – METODOLOGIA DE PESQUISA: descreve a metodologia de pesquisa adotada, que foi baseada no *Design Science Research*, incluindo: um fluxo de pesquisa para estudos sistemáticos da literatura, as etapas para o desenvolvimento do artefato (solução do problema) e definição do processo de validação da pesquisa.

Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES: nesta etapa da pesquisa são apresentados os resultados dos mapeamentos sistemáticos da literatura em forma de análises bibliométricas, sendo as discussões voltadas para identificação de áreas de concentração pesquisa e lacunas do conhecimento. Nesta etapa, também são apresentados os resultados obtidos em cada fase do processo de desenvolvimento do artefato, incluindo a explicitação das aprendizagens e a discussão sobre a possibilidade de generalização do método.

Capítulo 5 – CONCLUSÕES: faz uma retomada dos objetivos específicos e como estes foram alcançados ao longo do trabalho. Enumera as contribuições da pesquisa e faz sugestões para trabalhos futuros.

Após o capítulo 5, são registradas as referências bibliográficas deste trabalho. Os apêndices que vem a seguir têm como intuito nivelar conhecimentos relacionados com a pesquisa, permitindo um melhor entendimento do trabalho.

Apêndice A: desenvolvido em apoio aos resultados e discussões apresentadas no Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES. Apresenta os resultados obtidos durante o desenvolvimento do artefato (Seção 3.1.3).

Apêndice B: desenvolvido em apoio ao Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA, apresentando considerações sobre Inteligência Artificial, Aprendizado de Máquina, Redes Neurais Artificiais, Lógica Fuzzy e Sistema *ANFIS*.

Apêndice C: explora a *Design Science (DS)* e a *Design Science Research* de forma a permitir uma compreensão sobre sua organização e os principais conceitos relacionados.

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, a Revisão da Literatura foi desenvolvida fundamentada no *Design Science Research (DSR)* com a intenção de contextualizar o tema e permitir a obtenção de boa parte do conhecimento necessário para o desenvolvimento do artefato e consequente resolução do problema. Para tanto, foram realizadas seis Revisões Sistemáticas da Literatura (RSL), em conformidade com a Metodologia de Pesquisa (Capítulo 3). Cabe ressaltar que, a intenção não foi esgotar as pesquisas relacionadas aos temas, mas sim, apresentar as que mais contribuíram para construção do conhecimento abordado neste trabalho.

### 2.1 ANÁLISE DE RISCOS DE ATRASO EM OBRAS

Para constituição de um entendimento teórico sobre Análise de risco foram realizadas três RSL. A 1RSL e a 2RSL tiveram como objetivo explorar os grupos e fatores de risco de atraso. Já a 3RSL buscava conhecimento com relação à análise de risco. Além destes estudos, também foi realizada uma consulta a Normas e Padrões Internacionais. O arcabouço de conhecimento obtido é apresentado a seguir.

#### 2.1.1 Atraso em obras

Embora, o atraso seja uma terminologia comum no setor da Construção Civil, há a necessidade de definir claramente como o termo será abordado neste trabalho.

Para KIKWASI (2013), o atraso, na indústria da construção, é algo que acontece em um momento posterior ao: planejado; esperado; especificado em contrato; ou além da data que as partes pactuaram para a execução do projeto. Neste mesmo sentido, MOTALEB e KISHK (2010) acrescentam que a desaceleração da obra sem interrupção é uma característica do atraso, mas reforça a vinculação do atraso com a ultrapassagem do prazo acordado.

De acordo com GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI e NASSAR (2020), atrasos nos cronogramas dos projetos estão entre os desafios mais prementes enfrentados pelo setor de construção atribuído à complexidade do setor e à interdependência inerente de suas fontes de risco de atraso.

Segundo BILGIN; DIKMEN e BIRGONUL (2018), as causas do atraso podem ser agrupadas de várias maneiras, usando diferentes aspectos, como sua origem, compensabilidade, conteúdo e criticidade. Para BORDOLI e BALDWIN (1998) o agrupamento permite uma melhor compreensão dos atrasos e facilitar o processo de análise de risco.

De acordo com ANSAH e SOROOSHIAN (2018), AGYEKUM-MENSAH e KNIGHT (2017) e ALAGHBARI; KADIR; SALIM e ERNAWATI (2007), os atrasos em termos contratuais podem ser tipificados de acordo com quem deu causa ao atraso: contratante e seus representantes (compensáveis); contratado, seus subcontratados ou fornecedores (não compensáveis e não desculpáveis); "Força Maior" ou ação fortuita da natureza (não compensáveis e desculpáveis), logo nenhuma das partes pactuantes é responsável pelo atraso; e combinação de mais de um tipo de atraso (concorrentes). Este trabalho focou nos atrasos capazes de gerar Termos Aditivos ao contrato de prazo e/ou de vigência contratual, isto é, os compensáveis, os não compensáveis e desculpáveis e os concorrentes.

### 2.1.2 Riscos e Fatores de risco

Antes de abordar a análise de riscos, é pertinente conceituar risco e fatores de risco. Segundo a ABNT (2018), o risco compreende o efeito da incerteza nos objetivos, sendo este efeito um desvio em relação ao esperado, que pode ser positivo, negativo ou ambos. No mesmo sentido, o *Practice standard for scheduling* (PMI, 2011) define risco como um evento ou codificação incerto que, se ocorrer, tem um efeito positivo (oportunidade) ou negativo (ameaça) em um ou mais objetivos.

Cabe ressaltar, que todas as normas e padrões internacionais pesquisados fazem uma ligação entre o risco e os objetivos do projeto, com exceção do PRINCE2 (AXELOS; OFFICE, 2017) que liga o risco ao resultado do projeto.

GUNDUZ; NIELSEN e OZDEMIR (2015) enfocaram, em seu trabalho, as causas de atraso em obras para estimar a probabilidade de atraso em projetos de construção na Turquia. Neste mesmo sentido, YASEEN; ALI; SALIH e AL-ANSARI (2020) citam os fatores como aspectos capazes de ocasionar o risco de atraso.

Este trabalho apoiou-se nos estudos de BALTA; BIRGONUL e DIKMEN (2018) e de AGYEKUM-MENSAH e KNIGHT (2017), que usaram a terminologia “fatores de risco” como sinônimo de “causas de risco”. Assim, as causas de atraso foram tratadas como fatores de risco de atraso. Além disso, seguindo BILGIN; DIKMEN e BIRGONUL (2018), os fatores de risco de atraso foram agrupados de acordo a origem.

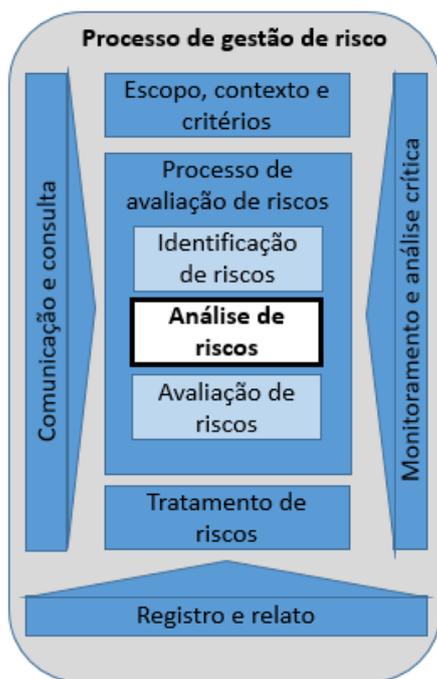
### 2.1.3 Análise de risco

Para CHOUDHRY; ASLAM e ARAIN (2014), a análise de risco é uma das principais práticas de gerenciamento que permite às partes interessadas estimar incertezas que possam ameaçar o desempenho do projeto em termos de prazo.

### 2.1.3.1 O Processo de Análise de Risco

Segundo ABNT (2018), norma NBR ISO 31000 de Gestão de riscos, a Análise de riscos (Figura 1) é a etapa do Processo de gestão de risco que tem como propósito compreender a natureza e as características do risco, o que inclui a definição do nível de risco.

Figura 1 - Processo de Gestão de riscos  
(ABNT - ISO 31000)



Fonte: Autor, adaptado de ABNT (2018)

Figura 2 - Componentes de Gerenciamento de Riscos  
Corporativos (COSO – ERM)



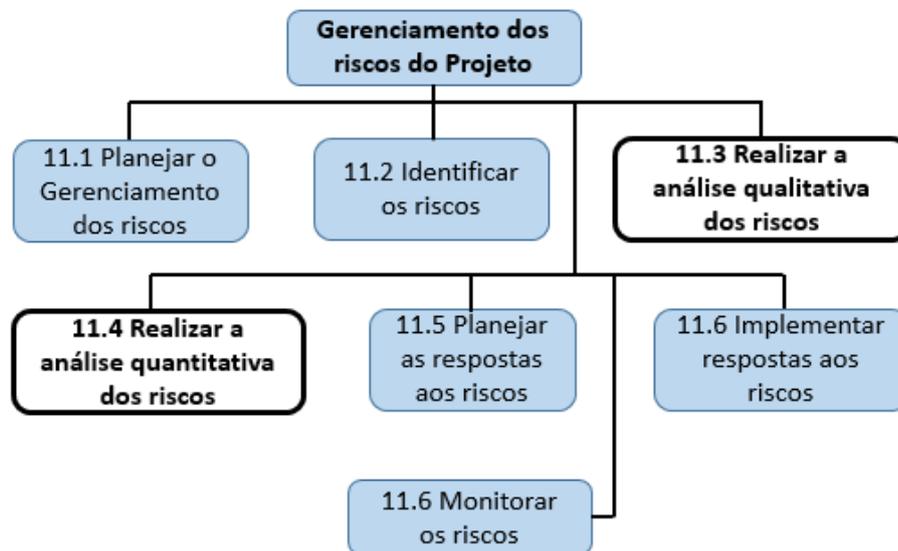
Fonte: Autor, adaptado de COSO (2004)

Ainda de acordo com a família de normas ISO 31000 (ABNT, 2018), a análise de risco consiste na determinação das consequências e das probabilidades para os riscos identificados na fase anterior. Em complemento, com base na ABNT ABNT (2012), norma NBR ISO 31010(ABNT, 2012), a combinação entre as consequências e probabilidades resulta no nível de risco.

O Padrão Internacional conhecido como COSO-ERM (2007), ilustrado na Figura 2, considera o que o gerenciamento de riscos corporativos não é um processo rigorosamente em série, no qual um componente afeta apenas o seguinte, mas um processo multidirecional e interativo. Segundo estes autores, na análise de risco, os riscos identificados na etapa anterior são avaliados com base na probabilidade e no impacto.

O *Project Management Institute* (PMI) em suas publicações: “*Guide to the Project Management Body of Knowledge - PMBOK*” PMI (2018)e “*The standard for risk management in portfólios, programs and projects*” PMI (2019), dividem a análise de riscos em dois processos, qualitativo e quantitativo (Figura 3). Outra publicação do PMI, o *Practice standard for scheduling* (PMI, 2011) ressalta que a análise de risco do cronograma é utilizada para estabelecer e validar contingências do cronograma (prazo e custo), identificar riscos prioritários e eventos direcionados a riscos e monitorar continuamente as alterações nos riscos relacionados ao projeto.

Figura 3 - Processos de Gerenciamento de riscos de projetos (PMBOK)



Fonte: Autor, adaptado do PMI (2018)

O modelo de gerenciamento de risco organizacional do *Orange Book – Management of Risk – Principles and Concepts* (TREASURY, 2020) (Figura 4), desenvolvido pelo Departamento do Tesouro da Inglaterra, reflete um gerenciamento contínuo como um processo circular sem fim. Entre as etapas do modelo, a identificação e avaliação são abordadas juntas. O objetivo da análise de risco, segundo o Orange Book, é apoiar uma consideração detalhada da natureza e do nível de risco.

O *Projects in Controlled Environments – PRICE2* (AXELOS; OFFICE, 2017) é um padrão para gerenciamento de projetos desenvolvido pelo governo do Reino Unido, que prevê um procedimento cíclico para o gerenciamento de risco. As etapas de identificação dos riscos e de avaliação são destacadas (Figura 5). Assim como a NBR ISO 31010 (ABNT, 2012), o PRICE2 (AXELOS; OFFICE, 2017) ressalta a combinação da probabilidade de ocorrência de

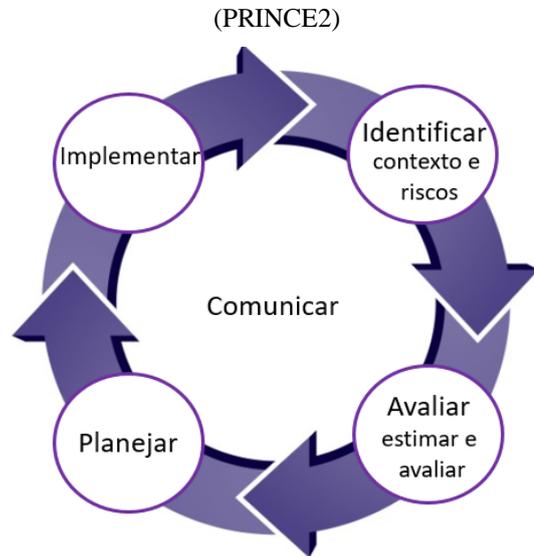
uma ameaça ou oportunidade percebida e a magnitude de seu impacto nos objetivos para cálculo do risco.

Figura 4 - Processo de Gerenciamento de risco do



Fonte: Autor, adaptado do TREASURY (2020)

Figura 5 - Procedimento de gerenciamento de risco



Fonte: Autor, adaptado do (AXELOS; OFFICE, 2017)

Neste projeto serão seguidas as definições e conceitos da ISO 31000 (ABNT, 2018) para análise de risco, por ser um padrão mundialmente aceito e referendado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas.

#### 2.1.3.2 Técnicas e ferramentas de análise de risco.

Frutos de consultas a normas e padrões internacionais foram identificados artefatos (técnicas e ferramentas) de análise de risco: nos Anexos A e B da ISO 31010 (ABNT, 2012); no Apêndice X6 do *The standard for risk management* (PMI, 2019); no PMBOK (PMI, 2018); e PRICE2 (AXELOS; OFFICE, 2017). Com relação à produção científica, entre os achados obtidos na 3RSL destacam-se AGYEKUM-MENSAH e KNIGHT (2017) que estudaram as causas do atraso na construção no século 21 até 2017 e identificaram na literatura, a utilização dos seguintes métodos: pesquisa, estudo de caso, revisão da literatura, questionário e entrevistas. Todos esses achados são apresentados no APÊNDICE A na Seção 1. IDENTIFICAÇÃO DA CLASSE DE PROBLEMAS E ARTEFATOS EXISTENTES (C.1).

## 2.2 LÓGICA FUZZY

Para abordar a Lógica Fuzzy são apresentados a seguir as pesquisas mais relevantes encontradas durante a 4 Revisão Sistemática da Literatura (4RSL), melhor explicada na Seção 3.1.2.1 - Escopo de pesquisa. Além disso, para melhor esclarecer esta área do conhecimento, o APÊNDICE B apresenta um resumo sobre os principais conceitos e aspectos importantes para este trabalho.

As Técnicas Fuzzy são úteis para resolver problemas complexos que ainda não foram bem definidos (EBRAT; GHODSI, 2014). Assim as técnicas Fuzzy vem preencher uma lacuna deixada pelas técnicas tradicionais, que, segundo SHARMA e GOYAL (2019) são baseadas em estimativas numéricas que exigem cálculos tediosos, conhecimento matemático especial e alta qualidade de dados. Este é o caso da construção civil, cujos projetos são conhecidos por sua singularidade, complexidade e incerteza (PAWAN; LORTERAPONG, 2015).

ZADEH (1965) introduziu o conceito de Conjuntos e Teoria Fuzzy, depois deles vários autores pesquisaram sobre os métodos de modelagem e análise de risco baseados na Teoria dos Conjuntos Fuzzy.

REZAKHANI (2012) ressalta a importância da análise de risco para o sucesso do projeto. Já SHARMA e GOYAL (2019) ressaltam o crescimento de pesquisas relacionadas à aplicação de técnicas *Fuzzy* em projetos de construção para gerenciamento de riscos, tomada de decisão e melhoria do desempenho dos projetos de construção. Neste contexto, os autores realizaram revisões abrangentes da literatura desde a década de 80 com foco no conceito básico da Teoria da Lógica Fuzzy e sua aplicação no gerenciamento de projetos de construção. Os principais trabalhos citados por REZAKHANI (2012) e SHARMA e GOYAL (2019), além de outros pesquisados por este autor, e que ajudaram na construção do conhecimento para este trabalho são referenciados a seguir.

Segundo SHARMA e GOYAL (2019), até o final da década de 90 a Teoria dos Conjuntos Fuzzy não era muito popular. No trabalho de KANGARI e RIGGS (1989) a Teoria Fuzzy foi aplicada na avaliação de risco para projetos de construção, usando variáveis linguísticas. REZAKHANI (2012) enfatiza que o método de aproximação linguística lida com questões de subjetividade nas avaliações de risco de construção, buscando relacionar expressões de linguagem natural com números de conjuntos difusos.

Na década seguinte (1990-2000), destaca-se o trabalho de WIRBA; TAH e HOWES (1996), por apresentarem um método de gerenciamento de risco usando a Teoria dos Conjuntos Fuzzy, que verificou a dependência entre os riscos associados ao projeto. A probabilidade de

ocorrência de cada risco foi então calculada usando variáveis linguísticas. Usando o método da média ponderada difusa, os coeficientes de interdependência foram calculados.

Entre 2000 e 2010, destacam-se os trabalhos de: TAH e CARR (2000); ZHANG; LI e TAM (2004); OLIVEROS, A. e FAYEK, A. (2005); e ZENG, JIAHAO; AN, MIN e SMITH, NIGEL JOHN (2007).

TAH e CARR (2000) estudaram a interdependências entre fatores de risco e risco e consequência, apresentando as relações na forma de diagramas de causalidade usando conjuntos difusos.

ZHANG; LI e TAM (2004) desenvolveram uma simulação de eventos discretos, para a estimativa da duração da atividade. Neste caso a Teoria dos Conjuntos Fuzzy foi usada para gerenciar dados ambíguos, imprecisos, incertos e subjetivos.

OLIVEROS, A. e FAYEK, A. (2005) propuseram um modelo para análise dos efeitos de atrasos na conclusão de um projeto. Para tanto, o modelo desenvolvido usando a teoria difusa relaciona o progresso das atividades e os atrasos.

ZENG, JIAHAO; AN, MIN e SMITH, NIGEL JOHN (2007) combinaram a técnica de AHP com a Teoria dos Conjuntos Fuzzy para avaliar o desempenho de custo e tempo no gerenciamento de projetos de construção. Enquanto a Teoria Fuzzy foi usada para abordar as incertezas nas avaliações de risco, o AHP foi usado para classificar os riscos, considerando as relações e as influências entre os fatores de risco na hierarquia.

Na última década, quatro trabalhos chamaram a atenção: SAN CRISTOBAL (2013); GUNDUZ; NIELSEN e OZDEMIR (2013); PAWAN e LORTERAPONG (2015); e ABDEL-KHALEK; AZIZ e KAMEL (2016).

SAN CRISTOBAL (2013) propôs o uso do método PROMETHEE em ambientes nebulosos, a fim de determinar o caminho crítico de uma rede, considerando não apenas o tempo, mas também os critérios de custo, qualidade e segurança.

GUNDUZ; NIELSEN e OZDEMIR (2013) apresentaram um modelo de avaliação difusa para estimar a probabilidade de atraso em projetos de construção na Turquia.

PAWAN e LORTERAPONG (2015) apresentam uma nova estrutura para avaliar a contingência de tempo necessária para atividades expostas a múltiplos riscos. A teoria dos conjuntos Fuzzy é empregada para modelar a imprecisão associada à possibilidade de ocorrência de riscos e ao impacto desses riscos nas durações das atividades.

ABDEL-KHALEK; AZIZ e KAMEL (2016) apresentaram um modelo para o mercado global de construção. O processo de hierarquia analítica (AHP) foi usado para avaliar os pesos

dos fatores de risco (probabilidade) e a abordagem da lógica difusa foi usada para avaliar o impacto dos fatores de risco (consequências do risco).

ISLAM; NEPAL; SKITMORE e ATTARZADEH (2017) e depois AFZAL; YUNFEI; NAZIR e MAHMOOD (2019), em seus trabalhos de compilação, ressaltaram o aumento do uso métodos de inteligência artificial, baseados em soluções híbridas, na gestão de risco de construção. Segundo SHARMA e GOYAL (2019), as técnicas Fuzzy incluem: Conjunto Fuzzy, Lógica Fuzzy e técnicas híbridas Fuzzy, como as redes *Neuro-fuzzy*.

É sobre esta aplicação híbrida de Redes *Neuro-fuzzy* que este trabalho é voltado. Na seção seguinte serão abordadas às Redes Neurais artificiais, técnica associada à Lógica *Fuzzy* para desenvolvimento de uma solução híbrida *neuro-fuzzy* objeto deste trabalho.

### 2.3 REDES NEURAIIS ARTIFICIAIS

Para abordar as Redes Neurais Artificiais (RNA) são apresentados a seguir as pesquisas mais relevantes encontradas durante a 5 Revisão Sistemática da Literatura (5RSL), melhor explicada na Seção 3.1.2.1 - Escopo de pesquisa. O APÊNDICE B apresenta um resumo sobre os principais conceitos e aspectos importantes relacionados com RNA.

Para ZHU e SHAN (2006), há um grande número de fatores de incerteza no ciclo de vida de um projeto de construção pública. Neste sentido, segundo GIANNAKOS e XENIDIS (2018), os desafios da análise de riscos estão relacionados com a natureza inerentemente complexa das interdependências de riscos em projetos de construção, juntamente com registros de dados incompletos durante o desenvolvimento dos projetos.

JIN; LI; ZHU; TONG et al. (2019) afirmam não ser intuitivo a adoção de expressões lineares para previsão de riscos devido à complexa relação entre os vários fatores de influência no projeto. No mesmo alinhamento, ELHAG e BOUSSABAIN (2002) destacam que vários estudos têm comprovado as vantagens das RNA sobre métodos estatísticos tradicionais, como análise de regressão múltipla, análise multivariada e análise discriminatória. Para WANG; LI e JIA (2013) e JIN; LI; ZHU; TONG et al. (2019), estas vantagens derivam das capacidades de: aprendizado; adaptação; mapeamento não linear, de generalização; e tolerância a erros.

Segundo HAYKIN (2009), as RNA têm esta denominação inspirada na rede neural biológica do cérebro humano, com relação à capacidade de aprendizagem e a estrutura da RNA, que emprega elementos, funções e processamentos que se assemelham aos neurônios e a sinapse neurológica.

Para LI (2014), o funcionamento de uma RNA baseia-se na coleta e normalização dos dados da amostra, na determinação e no treinamento da estrutura da rede, identificando a

relação entre entrada e saída. Após a definição do modelo de previsão pela RNA a amostra é testada e o modelo é validado.

De acordo com DERAKHSHANFAR (2017) e EL-HIRI; EN-NADI e CHAFI (2019), a aplicação de RNA elimina a necessidade de desenvolver um algoritmo específico para resolver cada problemas, pois será através das lições aprendidas e das informações históricas que a RNA aprenderá a ser eficiente e a servir de ferramenta para ajudar os tomadores de decisão. Isto é possível, pois ao contrário dos sistemas especialistas e dos métodos tradicionais de modelagem, nos quais o conhecimento é explicitado na forma de regras, as RNA geram suas próprias regras aprendendo com exemplos (GALLANT; GALLANT, 1993).

Para DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO (2010) as características mais relevantes envolvidas com a aplicação de RNA são: adaptação por experiência, capacidade de aprendizado, habilidade de generalização, organização de dados, tolerância a falhas, armazenamento distribuído e facilidade de prototipagem.

PRIETO; PRIETO; ORTIGOSA; ROS et al. (2016) listam problemas básicos com os quais as NRA são capazes de lidar são: a adaptação (ou aproximação de função), reconhecimento e associação de padrões e agrupamento e previsão, todos aplicáveis em diferentes campos, inclusive no gerenciamento. DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO (2010) complementam citando outras potenciais áreas de aplicação de RNA: controle de processos, agrupamento de dados (clusterização) e otimização de sistemas.

Em adição JIN e ZHANG (2011) ressaltam que devido a suas capacidades de aprendizagem e generalização, as técnicas de RNA foram aplicadas em vários domínios da construção. MARTÍNEZ e FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ (2015) destacam o uso de RNA no gerenciamento de projetos de construção, inclusive, para estimativa de tempo e gerenciamento de riscos. FRAGIADAKIS; TSOUKALAS e PAPAOGLOU (2014) citam as RNA como ferramenta poderosa, especialmente ao lidar com os problemas de classificação e previsão.

GIANNAKOS e XENIDIS (2018) realizaram uma revisão detalhada da literatura identifica os diferentes tipos e métodos de treinamento de redes neurais, bem como as respectivas ferramentas aplicáveis ao gerenciamento de riscos de projetos de construção. Com relação à aplicação de RNA na avaliação de risco de atraso em obras de edificação, LU (2002) realizou estudos sobre a simulação da duração de atividades. Já SANNI-ANIBIRE, M.; ZIN, R. e OLATUNJI, S. (2020) compararam quatro modelos de *Aprendizado de Máquina* (*K Nearest Neighbours- KNN, RNA, Support Vector Machines- SVM e Ensemble*) para análise de risco em projetos de edifícios alto e concluiu que o melhor foi o RNA com uma acurácia de 93,75%.

No gerenciamento de riscos de projetos de construção, o primeiro estudo usando rede neural foi o trabalho de MCKIM (1993), que usou a rede neural para identificar riscos. Também se ressalta o trabalho de SANCHEZ (2005) como uma importante aplicação de uma RNA para quantificar o risco total em termos econômicos. ZHU (2007) utilizou o algoritmo de rede neural de retro propagação (rede neural da BP) para avaliação de riscos nas empresas de gestão de rodovias na China.

GIANNAKOS e XENIDIS (2018) destacam que a capacidade de usar RNA individualmente ou em combinação com outras técnicas de Inteligência Artificial (IA), na indústria da construção e gerenciamento de projetos de construção, é reconhecida desde o início de 1990.

JANG; SUN e MIZUTANI (1997) ressaltam que problemas complexos do mundo real exigem sistemas inteligentes que combinam conhecimento, técnicas e metodologias de várias fontes. Ainda segundo o autor, esses sistemas inteligentes devem possuir capacidade de adaptar-se e aprender e fazem parte de uma abordagem inovadora, a *Soft Computing*. Neste mesmo sentido, AKINYOKUN; INYANG e AKPAN (2020), em seus estudos, destacam que as RNA possuem aplicação na classificação e previsão em inúmeros problemas da vida real, incluindo a avaliação de risco e tratamento.

Na seção seguinte, será feita uma ambientação, quanto ao ANFIS, solução híbrida que emprega a inferência fuzzy associada a uma RNA, que foi objeto deste trabalho.

## 2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS *NEURO-FUZZY*

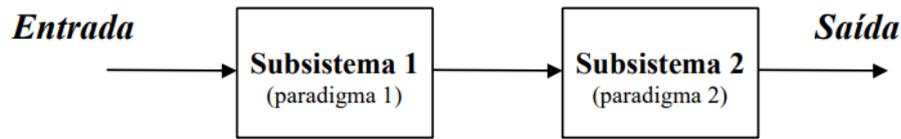
Akinyokun em seus estudos com Akpan, et al. (AKINYOKUN; INYANG; AKPAN, 2020) e com Inyang (AKINYOKUN; INYANG, 2013) consideraram imperativo combinar as RNA e as Técnicas Fuzzy. Segundo WALIA; SINGH e SHARMA (2015), existem várias áreas de aplicação nas quais a RNA e a Lógica Fuzzy foram implementadas com sucesso, seja individualmente ou complementando os pontos fortes da outra. Segundo GHORBANZADEH; BLASCHKE; GHOLAMNIA e ARYAL (2019), os sistemas *Neuro-fuzzy* combinam métodos baseados em dados (RNA) e em conhecimento (Lógica Fuzzy).

### 2.4.1 Tipos de Modelos Híbridos

Segundo AURÉLIO (1999), os modelos híbridos (Figura 6, Figura 7 e Figura 8) resultam da associação de dois ou mais técnicas de modelagem, sendo o principal objetivo explorar os pontos fortes de cada subsistema e atenuando ou mesmo eliminando os pontos

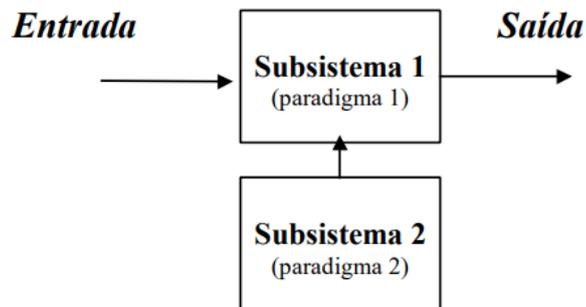
fracos. O autor apresenta, também, três formas básicas de acoplamento de modelos híbridos: Sequencial, Auxiliar e Incorporado.

Figura 6 - Sistema Híbrido Sequencial



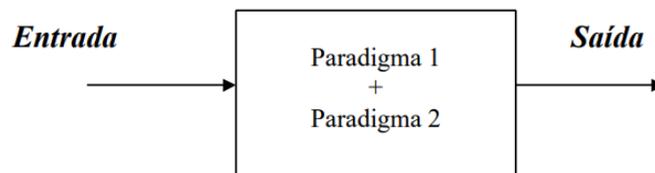
Fonte: AURÉLIO (1999)

Figura 7 - Sistema Híbrido Auxiliar



Fonte: AURÉLIO (1999)

Figura 8 - Sistema Híbrido Incorporado



Fonte: AURÉLIO (1999)

- a. No Modelo Híbrido Sequencial, um subsistema com Paradigma 1 atua como a entrada de outro subsistema com Paradigma 2. Assim, a saída de um é entrada do outro (Figura 6).
- b. No Modelo Híbrido Auxiliar, um subsistema constituído pela técnica do Paradigma 2 é chamado pelo subsistema implementado pelo paradigma 1, retornando ou realizando alguma tarefa auxiliar (Figura 7).
- c. No Modelo Híbrido Incorporado, os dois paradigmas não há uma separação visível entre os dois subsistemas. Pode-se dizer que o primeiro paradigma contém o segundo e vice-versa (Figura 8).

#### 2.4.2 Sistemas *Neuro-fuzzy*

Segundo, SINGH e LONE (2019), quando os problemas têm por base dados definidos com precisão, precisos e fáceis de entender, a aplicação da *Hard Computing* é a mais adequada, baseada em lógica binária, conjuntos clássicos, sistemas e software nítidos (precisos), análise numérica, etc. Ao contrário, no mundo real, onde se tem que lidar com incertezas, imprecisões e inconsistências, a *Soft Computing* fornece a melhor abordagem (RUTKOWSKA, 2012).

SINGH e LONE (2019) consideram entre os constituintes básicos do *Soft Computing*: as redes neurais, por sua capacidade de aprender a adaptar-se baseada na incerteza dos dados; e a teoria dos conjuntos Fuzzy, pela sua capacidade de representar o conhecimento. Neste mesmo sentido, LIU e LI (2004) consideram as redes/sistemas *neuro-fuzzy* os principais elementos do *Soft Computing* e as divide em: baseadas em operadores fuzzy; redes neurais fuzzificadas; e redes de inferência fuzzy, baseadas em regras do tipo Takagi-Sugeno (TAKAGI; SUGENO, 1985).

Para RUTKOWSKI (2004), os sistemas *neuro-fuzzy* combinam a descrição da linguagem natural dos sistemas fuzzy e as propriedades de aprendizagem das redes neurais. JANG; SUN e MIZUTANI (1997) complementam ao afirmarem que as redes neurais reconhecem padrões e se adaptam para lidar com as mudanças nos ambientes; e os sistemas de inferência fuzzy incorporam o conhecimento humano nas tomadas de decisão.

RUTKOWSKA (2012) destaca que existem sistemas *neuro-fuzzy* que usam aprendizagem híbrida para geração de regras e ajuste de parâmetros e sistemas *neuro-fuzzy* que não empregam nenhum algoritmo para geração de regras, portanto, a base de regras deve ser conhecida com antecedência e são capazes somente de fazer ajustes nos parâmetros dos conjuntos fuzzy antecedentes e consequentes. Um sistema desse tipo é o ANFIS.

Para C.LOGANATHAN e K.V.GIRIJA (2014), entre as abordagens *neuro-fuzzy*, o ANFIS mostrou resultados significativos na modelagem de funções não lineares, as mais adequadas o para gerenciamento de risco.

#### 2.4.3 Sistemas ANFIS

Como exemplo de sistema *neuro-fuzzy*, o ANFIS desenvolvido por JANG (1993) é constituído por algoritmo híbrido de aprendizagem para ajuste dos parâmetros antecedentes e consequentes do conjunto fuzzy. O autor define três tipos de modelos ANFIS de acordo com o SIF incorporado. Neste trabalho foi adotado o modelo do Tipo 3, que implementa as regras do tipo Takagi-Sugeno (RUTKOWSKA, 2012), ilustrado na Figura 45 no APÊNDICE B.

Para WALIA; SINGH e SHARMA (2015), o ANFIS é um sistema de inferência fuzzy implementado no framework de redes adaptativas de aprendizado supervisionado. (JANG; SUN, 1995) explicam que uma rede adaptativa consiste em nós e links direcionais e o comportamento geral de entrada-saída é determinado pelos valores de uma coleção de parâmetros modificáveis através dos quais os nós são conectados. Assim, o modelo se utiliza de métodos neurais para definir funções de pertinência entre a entrada e a saída com base no conhecimento humano e em dados numéricos (LI; PHILIP; HUANG, 2000).

O ANFIS permite que os sistemas difusos aprendam por meio de um algoritmo híbrido. Segundo REZAEI; HOSSEINI e MAZINANI (2014) os métodos dos mínimos quadrados e do método de gradiente descendente de retropropagação são combinados para treinar os parâmetros da função de associação do FIS para emular um determinado conjunto de dados de treinamento. WALIA; SINGH e SHARMA (2015) acrescentam que a rede aprende em dois momentos. Na fase de avanço do algoritmo, é aplicada a estimativa de mínimos quadrados para os parâmetros consequentes. Na fase de retrocesso, os parâmetros antecessores são atualizados pelo algoritmo de descida gradiente. REZAEI; HOSSEINI e MAZINANI (2014) salientam que o principal benefício dessa abordagem híbrida é que ela converge muito mais rápido do que o método de retropropagação usado em redes neurais. O APÊNDICE B aprofunda a teoria com relação ao ANFIS, detalhando a arquitetura e explicando os processos de treinamento e validação.

Com base na 6RSL, constatou-se que o ANFIS é o sistema *neuro-fuzzy* mais estudado, tendo sido objeto de pesquisa em aproximadamente 80% dos artigos resultantes da consulta. A 6RSL permitiu explorar as ferramentas utilizadas para desenvolvimento de modelos *neuro-fuzzy*. O software Matlab®, que possui um módulo específico para o ANFIS, foi a opção escolhida pela maioria dos pesquisadores, entre os quais, EBRAT e GHODSI (2014), que realizaram um estudo empírico sobre a avaliação de risco do projeto de construção.

### 3. METODOLOGIA DE PESQUISA

Este capítulo apresenta a metodologia de pesquisa científica utilizada neste trabalho, que se baseou no *Design Science Research (DSR)*, método que operacionaliza a pesquisa realizada sob a base epistemológica da *Design Science (DS)* (DRESCH, 2013). O APÊNDICE traz alguns aspectos relacionados com *DS* e *DSR*, que podem vir a serem úteis para o entendimento do método *DSR* adotado neste trabalho.

Para garantir que uma pesquisa seja reconhecida como sólida e potencialmente relevante, tanto pelo campo acadêmico quanto pela sociedade em geral, ela deve demonstrar que foi desenvolvida com rigor e que é passível de debate e verificação (LACERDA; DRESCH; PROENÇA; JÚNIOR, 2013). Desta fora, foi gasto um grande esforço na fase inicial deste trabalho com intuito de definir a abordagem epistemológica adotada, apresentada a seguir.

#### 3.1 MÉTODO DSR ADOTADO

A escolha do *DSR*, também conhecida como pesquisa prescritiva (WESZ; FORMOSO; TZORTZOPOULOS, 2018), deve-se ao fato deste trabalho abordar um problema real, tendo como foco o estudo do ambiente antrópico, termo das ciências naturais, que no contexto da *DS* é chamado de “ambiente artificial” e representa o universo criado pelo homem (SIMON, 1996).

Nesse sentido, a *DSR* se constitui em um processo rigoroso de projetar artefatos para resolver problemas, avaliar o que foi projetado ou o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos (CAGDAS; STUBKJÆR, 2011). Assim, fundamentado no trabalho destes autores supracitados, a Figura 9 ilustra o método de pesquisa a ser desenvolvido neste trabalho, tendo o cuidado de buscar adequá-lo as particularidades deste trabalho.

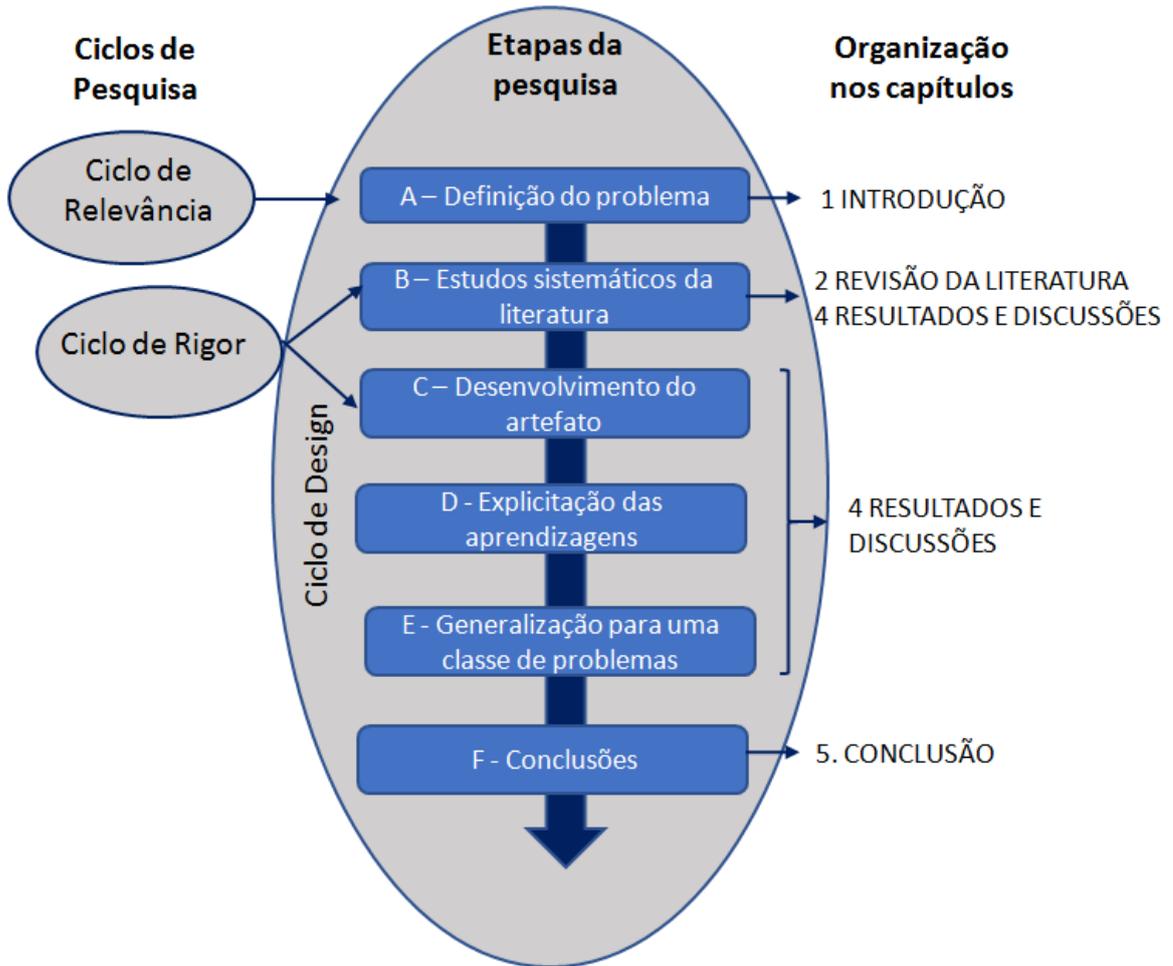
O método de pesquisa deste trabalho foi organizado de acordo com os três principais ciclos de pesquisa de (HEVNER, 2007): Relevância, Rigor, e Design (Figura 9). Nesta mesma figura, é feita uma correlação entre as Etapas de Pesquisa, segundo o Ciclo de Design e a Organização de capítulos deste trabalho. Para entender melhor a integração entre estes ciclos de pesquisa, observe APÊNDICE C. A seguir, as Etapas da pesquisa serão detalhadas.

##### 3.1.1 A - Definição do problema

Esta seção tem como foco a etapa “A – Definição do problema” (Figura 9) da metodologia de pesquisa adotada neste trabalho. Esta etapa foi abordada na Introdução (Capítulo 1) e inclui entre outros aspectos a identificação do problema e a conscientização (DRESCH, 2013). Na identificação buscou-se ressaltar a relevância do problema, justificando a

importância de estudá-lo. Já na conscientização, a intenção é entender o problema a partir de uma visão mais ampla e buscar definir as funcionalidades do artefato e a desempenho esperada.

Figura 9- Metodologia de Pesquisa deste trabalho

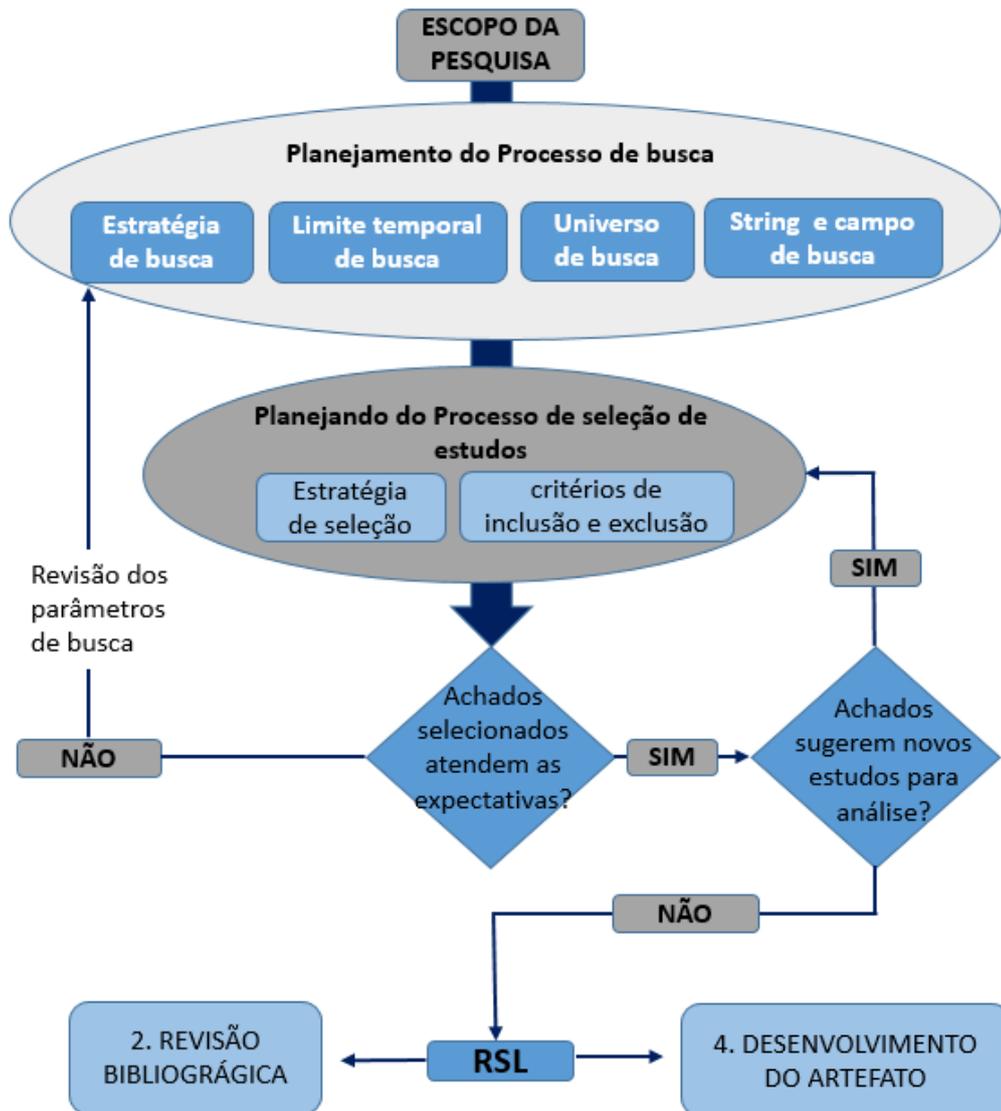


Fonte: autor

### 3.1.2 B - Estudos sistemáticos da literatura

Esta seção dedica-se a explicar a etapa “*B – Estudos sistemáticos da literatura*” (Figura 10) da metodologia de pesquisa adotada neste trabalho. A implementação dos Estudos *sistemáticos da literatura* foi feita com base em uma adaptação no processo elaborado por BAFANDEH MAYVAN; RASOOLZADEGAN e GHAVIDEL YAZDI (2017).

Figura 10 - Processo para estudos sistemáticos



Fonte: Autor, adaptado de BAFANDEH MAYVAN; RASOOLZADEGAN e GHAVIDEL YAZDI (2017)

Os estudos sistemáticos da literatura consistem em consultas às bases de conhecimentos e foram do tipo Revisão Sistemática da Literatura (RSL) ((KITCHENHAM; BUDGEN; PEARL BRERETON, 2011), (PETERSEN; VAKKALANKA; KUZNIARZ, 2015), e (LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.*, 2020)). A RSL tenta encontrar os estudos primários e, posteriormente, extrair dados deles para responder a uma pergunta de pesquisa específica (KITCHENHAM; BUDGEN; PEARL BRERETON, 2011).

### 3.1.2.1 Escopo de pesquisa

Nesta fase, a intenção foi definir o que se pretende pesquisar com os estudos sistemáticos. Os estudos realizados foram agrupados em duas vertentes. Na primeira, as RSL

tenham como intuito colaborar com a Revisão da Literatura (Capítulo 2) de forma a construir o conhecimento necessário sobre áreas relacionadas com este trabalho. Na outra vertente as RSL objetivavam colaborar com o desenvolvimento do artefato conforme (Figura 11), especificamente, na: C.1 - Identificação de Classe de Problemas e de Artefatos existentes; e na C.3 - Coleta e tratamento dos dados. Os temas pesquisados constam do Quadro 2 e foram organizados de acordo com o capítulo ao qual estão relacionados.

Quadro 2 - Estudos Sistemáticos da Literatura

NR PESQUISA	APLICAÇÃO NO TEXTO DA DISSERTAÇÃO
1RSL	2.1.2 Risco e Fatores de risco 4.1.3 Coleta e tratamento de dados
2RSL	2.1.1 Atraso em obras 2.1.2 Risco e Fatores de risco 4.1.3 Coleta e tratamento de dados
3RSL	2.1.3 Processos de Análise de risco 4.1.2 Identificação da Classe de Problema 4.1.2 Identificação dos artefatos existentes (técnicas de “Análise de Risco”)
4RSL	2.2 LÓGICA FUZZY
5RSL	2.3 REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS
6RSL	2.4 SISTEMAS HÍBRIDOS <i>NEURO-FUZZY</i>
7RSL	4.1.2 Identificação dos artefatos existentes (técnicas de “Aprendizado de Máquina”)
8RSL	4.1.2 Identificação dos artefatos existentes (ambiente de desenvolvimento)
9RSL	4.1.2 Identificação dos artefatos existentes (ambiente de desenvolvimento)

Fonte: Autor.

### 3.1.2.2 Planejamento do Processo de busca

O “*Planejamento do Processo de busca*” (Figura 10) consiste na definição de alguns parâmetros: estratégia, limite temporal, o universo, a “*string*” e os campos de busca.

A estratégia de busca adotada neste trabalho compreende pesquisas na base de dados SCOPUS da Elzevir. As pesquisas realizadas e os parâmetros adotados constam do Quadro 3, que possui os seguintes campos:

- a. Número da pesquisa: código sequencial alfanumérico para identificação da pesquisa/consulta.
- b. Limite temporal de busca: define o intervalo temporal de pesquisa.
- c. Universo de busca: delimita universos de busca para tipo de produção (artigos) e área do conhecimento (engenharia).
- d. “*String*”: palavras-chave e os conectores de busca.

e. Campos de busca: definem os campos onde a “string” será procurada. Foi adotado como legenda: título do artigo (TI); ou título do artigo, resumo e palavra-chave (TO).

Quadro 3 - Parâmetros de busca dos estudos sistemáticos da literatura

NR PESQUISA	LIMITE TEMPORAL DE BUSCA	UNIVERSO DE BUSCA	STRING / CAMPOS DE BUSCA
1RSL	Sem limite temporal	Artigos / engenharia	delay (TI) AND risk (TO) AND construction (TO)
2RSL			delay (TI) AND construction (TO)
3RSL			"risk analysis" (TO) OR "risk assessment" (TO) OR techniques (TO) AND delay (TI) AND construction (TO)
4RSL			risk (TI) OR delay (TI) AND "fuzzy" (TI) AND construction (TO)
5RSL			risk (TI) OR delay (TI) AND "artificial neural network" (TO) OR ANN (TO) AND construction (TO)
6RSL			risk (TI) OR delay (TI) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR ANFIS (TO)
7RSL			risk (TO) OR delay (TO) AND "machine learning" (TI) OR “artificial intelligence” (TI) AND construction (TO)
8RSL			Python (TO) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR “ANFIS” (TO)
9RSL			Matlab (TO) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR “ANFIS” (TO)

Tópico (TO): Título do artigo, palavra-chave e resumo

Título (TI): Título do artigo

Fonte: autor

### 3.1.2.3 Planejamento do Processo de Seleção de estudos

A próxima etapa é o “*Planejamento do Processo de seleção de estudos*” (Figura 10), que compreende a estratégia de seleção e os critérios de inclusão / exclusão. A Estratégia de seleção consiste na leitura do título, palavras-chave e resumo na busca por uma sinergia entre a produção textual e o escopo da pesquisa. Para que um achado seja selecionado, ele deve atender a ao menos dois critérios de inclusão e não pode ser enquadrado em nenhum critério de exclusão (Quadro 4).

Após a seleção dos achados, o passo seguinte é uma tomada de decisão: “*Os achados selecionados atendem as expectativas?*”. Neste momento os achados são avaliados quanto à quantidade de artigos selecionados e aderência ao escopo da pesquisa.

Se atenderem, o processo segue para uma nova análise, que compreende a leitura completa dos artigos para verificar se há alguma sugestão de artigo que não havia sido identificado em etapas anteriores. Estes novos achados são submetidos ao “*Processo de seleção de estudos*”.

Caso não atendam, o processo retoma à fase de “Planejamento do Processo de busca” com a revisão dos parâmetros de busca.

Quadro 4 - Critérios de inclusão e exclusão para os estudos sistemáticos da literatura

NR PESQUISA	STRING / CAMPOS DE BUSCA	DATA DA PESQUISA	CRITÉRIOS DE INCLUSÃO	CRITÉRIOS DE EXCLUSÃO
1RSL	delay (TI) AND risk (TO) AND construction (TO)	01 JAN 21	1) Obra de edificação. 2) Riscos em obra. 3) Análise de risco. 4) Atraso em obra.	1) Área de Logística. 2) Etapas de gestão de risco diferentes de análise. 3) Áreas de engenharia diferente da Civil. 4) Artigos que tenha sido citado menos de 10 vezes.
2RSL	delay (TI) AND construction (TO)	03 JAN 21		
3RSL	"risk analysis" (TO) OR "risk assessment" (TO) OR techniques (TO) AND delay (TI) AND construction (TO)	01 FEV 21		
4RSL	risk (TI) OR delay (TI) AND "fuzzy" (TI) AND construction (TO)	01 FEV 21		
5RSL	risk (TI) OR delay (TI) AND "artificial neural network" (TO) OR ANN (TO) AND construction (TO)	01 FEV 21		
6RSL	risk (TI) OR delay (TI) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR ANFIS (TO)	01 FEV 21		
7RSL	risk (TO) OR delay (TO) AND "machine learning" (TI) OR "artificial intelligence" (TI) AND construction (TO)	01 FEV 21		
8RSL	Python (TO) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR "ANFIS" (TO)	08 DEZ 20		
9RSL	Matlab (TO) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR "ANFIS" (TO)	08 DEZ 20		

**Legenda:** Tópico (TO): Título do artigo, palavra-chave e resumo  
Título (TI): Título do artigo  
(\*) O critério de exclusão número 4 foi aplicado somente a esta pesquisa.

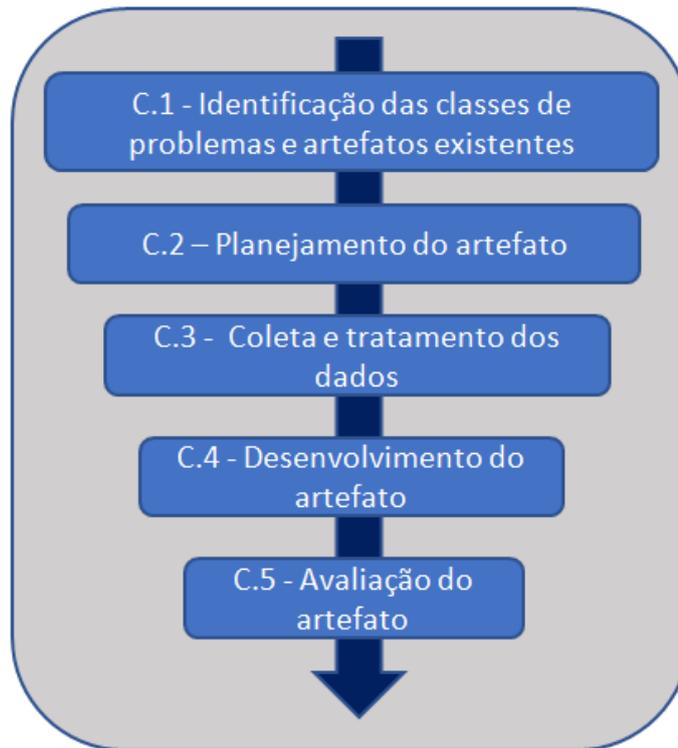
Fonte: autor

Após a seleção dos artigos é feita a RSL. Os resultados são apresentados no APÊNDICE A e apoiam a formação da base de conhecimento (Capítulo 2 – REVISÃO DA LITERATURA) e o desenvolvimento do artefato (Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES).

### 3.1.3 C - Desenvolvimento do artefato

Nesta Seção são apresentadas as etapas relacionadas com o “C - Desenvolvimento do artefato”, que seguem o fluxo apresentado na Figura 11 e explicadas a seguir.

Figura 11 - Etapas para desenvolvimento do artefato



Fonte: autor

### 3.1.3.1 C.1 – Identificação das classes de problemas e artefatos existentes

#### 3.1.3.1.1 Identificação das classes de problemas

Para a identificação das classes de problemas, foi realizada a 3 Revisão Sistemática da Literatura (3RSL), conforme parâmetros de busca constantes do Quadro 3, e critérios de inclusão e exclusão do Quadro 4. Além disso, também foi realizada consulta a normas e padrões internacionais. Os resultados da pesquisa constam no APÊNDICE A. Já a análise e discussões encontram-se no Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES. O Quadro 5 ilustra as entradas, processamentos e saídas desta etapa.

Quadro 5 - Entradas, processamentos e saídas da etapa C.1 – Identificação das classes de problemas

ETAPA	ENTRADA	PROCESSAMENTO	SAÍDA
C1	3RSL Normas e padrões internacionais	Identificação das classes de problemas e enquadramento deste estudo em uma delas	Classe de problema a qual o problema em estudo faz parte

Fonte: autor

### 3.1.3.1.2 Identificação dos artefatos existentes

Nesta fase buscou-se identificar artefatos relacionados com o problema. A 3RSL e as consultas a normas e padrões internacionais colaboraram com a busca por artefatos de análise de risco. Por outro lado, a 7RSL explorou as soluções de Aprendizado de Máquina capazes de solucionar problemas classificação e de predição. Em complemento a 8RSL e a 9RSL colaboraram com a escolha do ambiente de desenvolvimento das soluções de AM. Esta conduta foi adotada, pois o artefato desenvolvido neste trabalho possui componentes para análise de risco de atraso em obras por meio de soluções de Aprendizado de Máquina. Os resultados das RSL estão no APÊNDICE A.

Além da 3RSL, foi realizada uma pesquisa em normativos e padrões internacionais para identificação das técnicas/ferramentas (artefatos) de análise de risco. A intenção, não foi realizar uma pesquisa exaustiva, mas focar nas normas e padrões mais conhecidos na área de gerenciamento de risco. Sendo assim, foram selecionados: Norma ABNT ISO 31010 - Gestão de Risco – Técnicas para o processo de avaliação de risco; *Project Book of Knowledge*– PMBOK - PMI; e o *Project Standard for Risk Management*– PMI. O Quadro 6 ilustra as entradas, processamentos e saídas desta etapa.

Quadro 6 - Entradas, processamentos e saídas da etapa C.1 – Identificação de artefatos

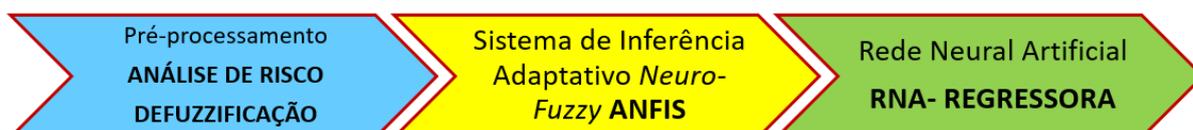
ETAPA	ENTRADA	PROCESSAMENTO	SAÍDA
C1	3RSL, 7RSL, 8RSL, 9RSL e Normas e padrões internacionais	Escolha das soluções de análise de risco e de Inteligência Artificial para desenvolvimento do artefato.	Técnicas de análise de risco, de Aprendizado de Máquina e as soluções de desenvolvimento a serem utilizadas neste trabalho.

Fonte: autor

### 3.1.3.2 C.2 – Planejamento do artefato

O artefato a ser desenvolvido é constituído por um Sistema Híbrido *Neuro-Fuzzy* Sequencial, conforme Seção 2.4.1 - Tipos de Modelos Híbridos / Figura 6. O artefato desenvolvido é composto por três subsistemas: Pré-processamento; Sistema ANFIS; RNA – regressora (Figura 12), que serão detalhados a seguir.

Figura 12 - Artefato (Sistema *Neuro-fuzzy* sequencial)



Fonte: autor

O Sistema foi desenvolvido na linguagem de programação Python, sendo usado como ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), o *Scientific Python Development Environment (Spyder)*. A escolha pelo Python teve dois motivos alinhados com a justificativa da relevância da pesquisa. O primeiro, quanto ao valor prático, baseou-se nos requisitos de funcionalidade e desempenho estabelecidos em Condicionantes da Pesquisa (Seção 1.3). Para tanto, o Python é uma linguagem de programação dinâmica de alta desempenho, com código aberto, que permite a integração com outros sistemas e com diversas bibliotecas gratuitas disponíveis. Quanto ao valor acadêmico, os resultados da 8RSL e 9 RSL (APÊNDICE A) demonstraram que o mundo acadêmico tem optado pelo uso de softwares, em especial o Matlab®, para modelagem de sistemas ANFIS, o que reforça a contribuição científica de um trabalho desenvolvido em linguagem de programação livre e de código aberto (Python). Com relação à escolha do Spyder como IDE, o motivo foi uma opção pessoal deste autor por considerar ideal para programadores iniciantes, e rodar em ambiente off-line, o que torna o desenvolvimento do Sistema mais rápido.

Para facilitar a compreensão de como foi planejado o artefato, a Figura 15 para o ANFIS e a Figura 17 para a RNA ilustram, em diagramas de Linguagem de modelagem unificada (UML) do tipo Diagrama de Sequência, os modelos ANFIS e RNA, respectivamente. Segundo AXELSSON (2002), os diagramas UML são frequentemente usadas para software. No mesmo sentido, SAMUEL; MALL e BOTHRA (2008) A UML é amplamente aceita e usada pela indústria para modelagem e projeto de sistemas de software.

#### 3.1.3.2.1 Definição dos Grupos e fatores de riscos

Antes de apresentar o planejamento do artefato, faz-se necessário abordar o planejamento para obtenção dos “insumos” do modelo, o que compreende a definição dos GFR, dos FR e a seleção do espaço amostral, o que será feito neste item e no seguinte. O artefato desenvolvido para solução do problema modelo (Figura 12) tem em sua concepção inicial a necessidade de definição dos grupos de fatores de risco (GFR) que mais impactam o atraso em obras militares. Assim, os fatores de risco são organizados dentro de grupos de acordo com sua origem. Este agrupamento facilita a contribuição dos especialistas para a constituição dos dados de entrada na etapa de pré-processamento do artefato e conseqüentemente no modelo ANFIS. A metodologia utilizada para definição dos GFR é apresentada da Seção 3.1.3.3 - C.3 – Coleta e tratamento dos dados. O Quadro 7 ilustra as entradas, processamentos e saídas desta etapa.

Quadro 7 - Entradas, processamentos e saídas da etapa C.2 - Definição de Grupos e Fatores de risco

ETAPA	ENTRADA	PROCESSAMENTO	SAÍDA
C2	1ªRSL e 2ªRSL	<b>Identificação dos GFR</b>	35 Artigos selecionados 37 GFR selecionados
	37 GFR selecionados	<b>Priorização dos GFR</b> por meio da Técnica Delphi	7 GFR priorizados
	35 Artigos selecionados 7 GFR priorizados	Identificação dos FR associados com os 7 GFR priorizados nos 35 artigos selecionados	261 FR identificados
	261 FR identificados	<b>Coleta de contribuições de novos FR</b> junto a empresas com experiência em obras militares e de profissionais que atuam como fiscais de obras militares	13 novos FR identificados
	274 FR identificados	<b>Seleção dos principais FR</b> por 10 especialistas. Diagrama de Pareto (30% dos FR mais votados pelos especialistas)	82 FR priorizados

Fonte: autor

### 3.1.3.2.2 Seleção do espaço amostral

Além da definição dos GFR que serão considerados para constituição da base de dados de entrada, faz-se necessária a definição do espaço amostral, isto é, quais projetos farão parte do escopo da pesquisa. A metodologia utilizada para definição da base amostral é apresentada da Seção 3.1.3.3 - C.3 – Coleta e tratamento dos dados. O Quadro 8 ilustra as entradas, processamentos e saídas desta etapa.

Quadro 8 - Entradas, processamentos e saídas da etapa C.2 - Seleção do espaço amostral

ETAPA	ENTRADA	PROCESSAMENTO	SAÍDA
C2	Base de dados e critérios de seleção (obras militares concluídas entre Jan 2009 e Dez 2019)	<b>Definição do espaço amostral</b> por meio de busca na base de dados atentando aos critérios de seleção	252 obras selecionadas
	Base de dados	<b>Coleta de dados de obra</b> (consulta na Base de dados)	Informações da obra

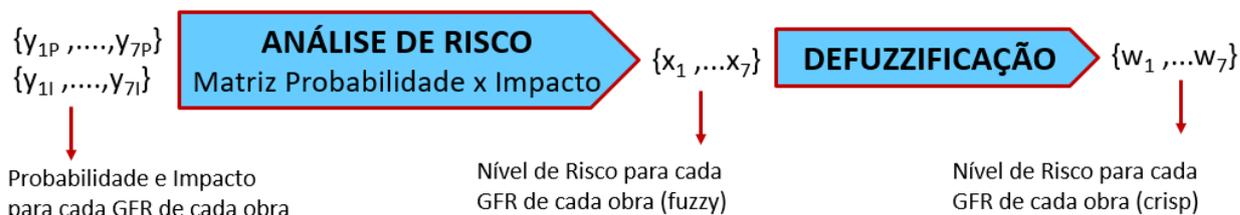
Fonte: autor

### 3.1.3.2.3 Pré-processamento

O pré-processamento consiste em uma fase preliminar ao modelo ANFIS. Nela, o conhecimento/experiência dos especialistas declarados de forma linguística é transformado para obtenção dos dados de entrada do modelo ANFIS. Para converter esse conhecimento é

dados de entrada para o ANFIS é necessário um pré-processamento, que compreende uma Análise de risco e uma Defuzzificação (Figura 13).

Figura 13 - Detalhamento do pré-processamento



Fonte: autor

### a) Análise de Risco

A análise de risco (Figura 13) visa obter o Nível de Risco (NR) de cada GFR em cada obra (amostra). Para tanto, tem como variáveis de entrada para cada projeto da base de dados:  $\{y_{1P}, \dots, y_{7P}\}$ , que representam as probabilidades de cada GFR; e  $\{y_{1I}, \dots, y_{7I}\}$ , que traduz os impactos de cada GFR. Essas variáveis foram definidas pelos especialistas na escala de Likert de 1 a 5, isto é, onde (1) representa: Muito baixo (a), (2): Baixo (a) 3: Médio (a), (4): Alto (a) e (5): Muito alto (a). Já a variável de saída é  $\{x_1, \dots, x_7\}$ , que representa o nível de risco (NR) de cada GFR para cada projeto da base de dados amostral, expressa como variável fuzzy.

Cabe ressaltar, que o universo de amostras (registros) compreende projetos concluídos. Segundo GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI e NASSAR (2020), a frequência relativa acumulada converge para a probabilidade do evento, quando o número de tentativas é grande. Assim, foi adotada a frequência relativa acumulada dos fatores de riscos para determinar a probabilidade de cada GFR em cada projeto.

Com relação ao impacto dos fatores de risco, não foi possível verificar a real contribuição de cada GFR com o atraso não recuperável pactuado no Termo Aditivo ao Contrato. Assim, as opiniões dos especialistas foram utilizadas na forma de dados linguísticos para estabelecer o impacto de cada GFR em cada projeto.

De posse dos valores fuzzy de cada GFR para cada obra do espaço amostral,  $\{y_{1P}, \dots, y_{7P}\}$  e  $\{y_{1I}, \dots, y_{7I}\}$ , o passo seguinte foi a definição do nível de risco (NR) de cada GFR para cada registro amostral ( $\{x_1, \dots, x_7\}$ ). Para tanto, foi utilizada uma Matriz de discretização do tipo Probabilidade x Impacto (Quadro 9), associada com uma escala Likert de quatro pontos (baixo, médio, alto e muito alto), a mesma utilizada por EBRAT e GHODSI (2014).

Quadro 9 - Matriz de Probabilidade x Impacto

Matriz de Risco		IMPACTO/CONSEQUÊNCIA				
		Muito Pequeno - MP	Pequeno - P	Médio - M	Alto - A	Muito Alto - MA
PROBABILIDADE	Muito Pequena - MP	Pequeno - P	Pequeno - P	Médio - M	Alto - A	Alto - A
	Pequena - P	Pequeno - P	Pequeno - P	Médio - M	Alto - A	Muito Alto - MA
	Média - M	Pequeno - P	Médio - M	Alto - A	Muito Alto - MA	Muito Alto - MA
	Alta - A	Médio - M	Alto - A	Alto - A	Muito Alto - MA	Muito Alto - MA
	Muito Alta - MA	Alto - A	Alto - A	Muito Alto - MA	Muito Alto - MA	Muito Alto - MA

Fonte: EBRAT e GHODSI (2014)

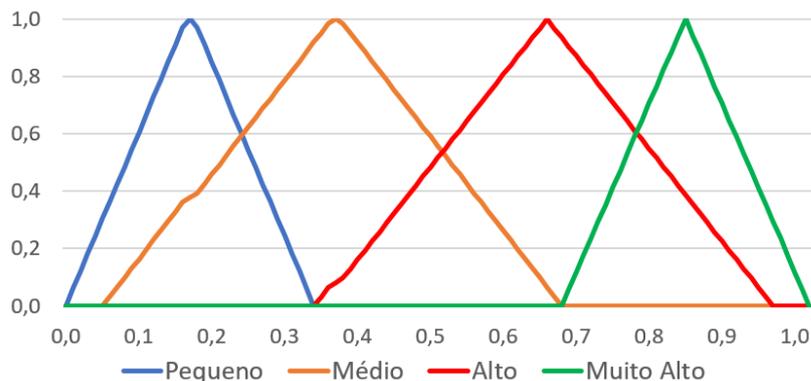
## b) Defuzzificação

A etapa de Defuzzificação ilustrada pela Figura 13 tornou-se necessária, pois o modelo ANFIS não aceita variáveis de entrada do tipo *fuzzy*, somente *crisp*. Segundo SHAW e SIMÕES (1999), o objetivo da Defuzzificação é obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores fuzzy inferidos da variável linguística.

Como saída da Análise de risco (etapa anterior), o NR de cada GFR amostral,  $\{x_1, \dots, x_7\}$ , de cada obra do espaço amostral, foi expresso com variável fuzzy. Assim, pode-se, enfim, realizar a Defuzzificação para transformação destas variáveis de “*fuzzy*” ( $\{x_1, \dots, x_7\}$ ) para “*crisp*” ( $\{w_1, \dots, w_7\}$ ), o que é ilustrado na Figura 13.

Inicialmente, cada valor linguístico expressado pelos especialistas é associado a funções de pertinência. Neste trabalho foi adotada a função triangular que, segundo TAYLAN; BAFAIL; ABDULAAL e KABLI (2014) é a mais utilizada junto com a trapezoidal. Neste mesmo sentido, SHAW e SIMÕES (1999) sugerem que se utilize sempre que possível as funções triangulares para a defuzzificação. O Gráfico 1 ilustra as funções de pertinência triangulares adotadas para definição do Nível de risco de cada GFR em cada obra.

Gráfico 1 - Funções de pertinências triangulares associadas ao Nível de Risco



Fonte: autor

Ainda de acordo SHAW e SIMÕES (1999), os métodos de Defuzzificação mais utilizados são o “*Center-of-Area*” (C-o-A), o “*Center-of-Maximum*” (C-o-M), e o “*Mean-of-Maximum*” (M-o-M), que resultam em valores não-fuzzy representados pelo “*Best Non-fuzzy Performance*” (BNP).

O método de Defuzzificação utilizado neste trabalho foi o “*Center-of-Area*” (C-o-A), que tem esta denominação, pois divide igualmente a área sob a curva da função de pertinência (Gráfico 1). Segundo ZHAO e GOVIND (1991), o C-o-A é adequado quando se tem uma função de pertinência simétrica, que é o caso da função de pertinência triangular adotada neste trabalho. O C-o-A é representado pela Equação (1):

$$BNP = \frac{(c - a) + (b - a)}{3} + a \quad \text{Equação (1)}$$

Os parâmetros {a, b, c} da Equação (1) são os que definem cada função de pertinência triangular. Neste trabalho, foram adotados os parâmetros de EBRAT e GHODSI (2014) apresentados na Tabela 1. Os valores de BNP obtidos para cada GFR risco representam os NR (dados de entrada) para o modelo ANFIS.

Tabela 1 - Parâmetros das funções de pertinência triangulares

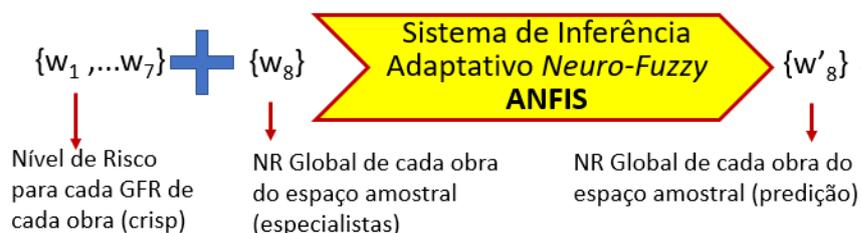
Valores linguísticos	a	b	c	BNP
Pequeno - P	0.000	0.165	0.330	0.165
Médio - M	0.050	0.355	0.660	0.355
Alto - A	0.330	0.640	0.950	0.640
Muito Alto - MA	0.660	0.830	1.000	0.830

Fonte: Autor, adaptado de EBRAT e GHODSI (2014)

### 3.1.3.2.4 Modelo ANFIS

O ANFIS desenvolvido neste trabalho faz parte do Sistema híbrido *neuro-fuzzy* (Figura 12) e teve como base o Sistema de Inferência Takagi, Sugeno e Kang (TKS), descrito no APÊNDICE B. Neste modelo ANFIS, cada amostra/registro corresponde a uma obra da base de dados disponível.

Figura 14 - Entradas e saídas do modelo ANFIS



Fonte: Autor

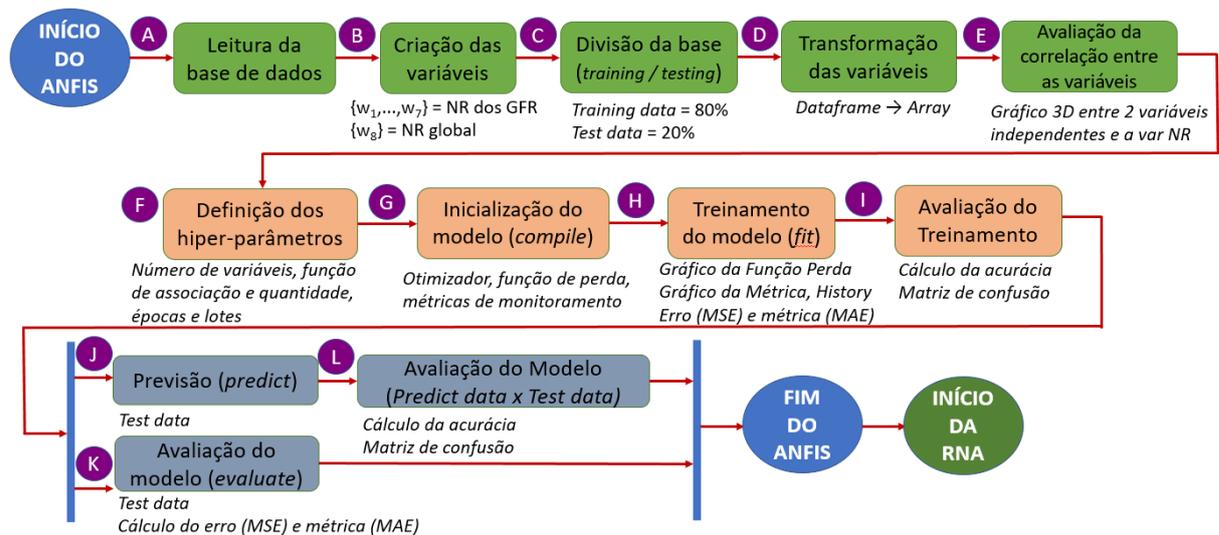
O sistema ANFIS, ilustrado na Figura 14, é composto por sete variáveis independentes e uma dependente. As variáveis independentes  $\{w_1, \dots, w_7\}$  representam o nível de risco (NR) dos GFR. Já a variável dependente,  $\{w_8\}$ , representa o NR Geral de uma obra.

O objetivo do modelo ANFIS é aprender como a partir de  $\{w_1, \dots, w_7\}$  é possível chegar a  $\{w_8\}$ . Assim,  $\{w'_8\}$ , a predição obtida pelo modelo, deve ser a mais próxima de  $\{w_8\}$ .

A Seção 5 do APÊNDICE B realiza uma completa abordagem sobre a arquitetura do Modelo ANFIS adotada, a metodologia de treinamento e de validação.

No planejamento do ANFIS foram consideradas três etapas (na Figura 15): leitura e tratamento de dados (tarefas em verde), inicialização e treinamento do modelo (tarefas em laranja) e avaliação do modelo (tarefas em cinza).

Figura 15 - Diagrama UML do modelo ANFIS



Fonte: autor

Detalhando o modelo ANFIS da Figura 15, têm-se:

- A leitura da base de dados (A) transfere os dados da planilha Excel® para um *dataframe*.
- A criação das variáveis (B) consiste na divisão dos dados em dois *dataframe*: variáveis independentes  $\{w_1, \dots, w_7\} = \text{NR dos GFR}$ ; e variáveis dependentes  $\{w_8\}$ .
- A divisão da base de dados entre dados de treinamento/teste (C) é feita na proporção de 80/20 de forma aleatória a cada nova divisão.
- A transformação dos dados ( $\{w_1, \dots, w_7\}$ ;  $\{w_8\}$ ) de *dataframe* para *array* (D) foi necessária por questões de programação, a fim de facilitar a operações com os dados.

- e. Na etapa (E) é feita uma análise de correlação entre as variáveis independentes e a variável de saída (NR). Para tanto as variáveis independentes são agrupadas duas a duas, sendo criado um gráfico de superfície 3D para identificar o comportamento destas três variáveis.
- f. Na inicialização dos hiper-parâmetros (F) são definidos: épocas (número de interações sobre todas as amostras); lotes (quantidade de dados agrupados em cada interação), eles são dados de entrada para o treinamento do modelo.
- g. Na Inicialização do modelo (G), são definidas a estrutura do modelo e a configuração para treinamento, isto é, definição: da função de perda (como será medido o desempenho nos dados de treinamento); otimizador (mecanismo pelo qual o modelo fará os ajustes dos pesos com base nas previsões e na função perda); métricas (parâmetros que permite o monitorar a precisão do modelo durante o treinamento).
- h. No treinamento do modelo (H), são definidos: os dados de entrada ( $\{w_1, \dots, w_7\} = \text{NR dos GFR}$  e  $\{w_8\} = \text{NR Geral}$ ); época; lote; e os dados de validação. O treinamento consiste na definição de pesos, que proporciona o melhor ajuste para os dados de teste. Ao final do treinamento é informado o valor da função de perda (BALTA; BIRGONUL; DIKMEN) e o valor da métrica (MAE).
- i. Para acompanhar o progresso do treinamento (H) foram usados; a função *history*; o gráfico da função perda; e o gráfico de métricas. O comportamento destes dados ao longo do treinamento permite identificar problemas de *overfitting* e de *underfitting*.
- j. Após o treinamento do modelo, o mesmo será avaliado (I) com base: na acurácia e na Matriz de confusão. Essas informações serão comparadas com as calculadas em “L”.
- k. Quando o modelo obtiver resultados satisfatórios na fase de treinamento, terá início a fase de avaliação feita de duas formas diferentes:
  - 1) Com a Predição (J), que gera as previsões de saída com base nos dados de teste. O conjunto de dados de predição e os dados alvo da base de teste serão usados para avaliar a capacidade de generalização do modelo (L), por meio do cálculo da acurácia e da Matriz de confusão.
  - 2) A avaliação do modelo (K), por meio da função *evaluate*, que retorna o valor de perda e o valor da métrica do modelo para os dados de teste. Os valores obtidos serão comparados com os de treinamento (I) para identificar eventuais problemas de *overfitting* e de *underfitting*.

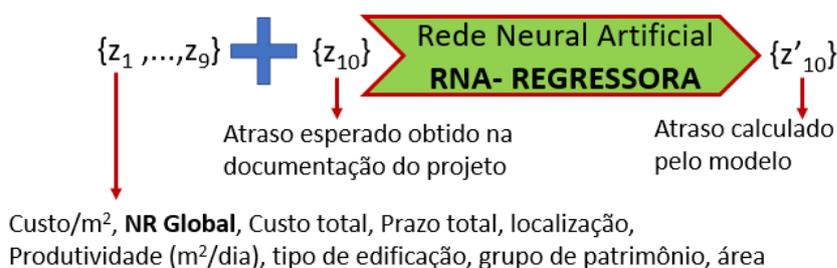
### 3.1.3.2.5 Modelo de RNA

A RNA desenvolvida neste trabalho (Figura 12) é constituída de uma rede multicamadas. O tipo de aprendizado desta rede é conhecido como aprendizado supervisionado, baseada no sistema "*backpropagation*" do erro. Esta rede possui: a camada de entrada que recebe os valores das variáveis de entrada, a camada de saída, que representa a predição do modelo resposta da rede, no caso, o atraso esperado para uma obra; e camadas entre as duas anteriores, chamadas de "ocultas", que são responsáveis pelo ajuste do modelo. A escolha da quantidade de neurônios em cada camada e da quantidade de camadas são algumas das variáveis de ajuste do modelo. Mais explicações sobre as variáveis de entrada serão mostradas na Seção 3.1.3.3 - C.3 – Coleta e tratamento dos dados.

O sistema RNA, ilustrado na Figura 16, é composto por nove variáveis independentes e uma dependente. As variáveis independentes são  $\{z_1, \dots, z_9\}$ , sendo:  $z_1$  (custo/m<sup>2</sup>);  $z_2$  (NR global);  $z_3$  (custo total);  $z_4$  (prazo total);  $z_5$  (localização);  $z_6$  (produtividade – m<sup>2</sup>/dia);  $z_7$  (tipo de edificação);  $z_8$  (área);  $z_9$  (grupo). Já a variável de saída, representada por  $\{z_{10}\}$ , representa o atraso observado.

O objetivo do modelo RNA é aprender como a partir de  $\{z_1, \dots, z_9\}$  é possível chegar a  $\{z_{10}\}$ . Assim,  $\{z'_{10}\}$ , a predição obtida pelo modelo, deve ser a mais próxima de  $\{z_{10}\}$ .

Figura 16 - Entradas e saídas do modelo RNA

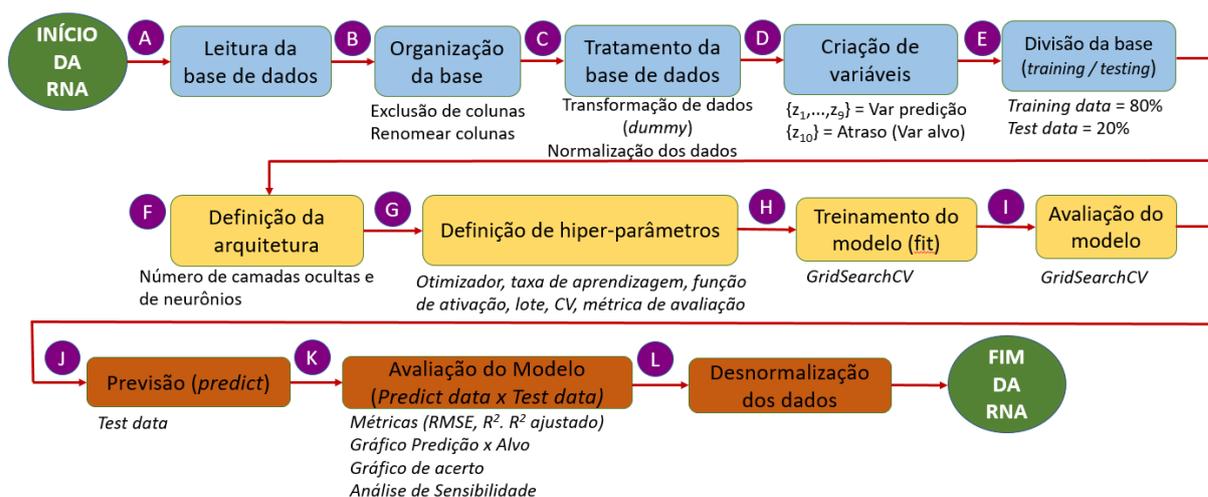


Fonte: Autor

A Seção 3 do APÊNDICE B realiza uma completa abordagem sobre a arquitetura da RNA adotada, as funções de ativação testadas, o processo de aprendizagem e a metodologia de treinamento e de validação.

De forma análoga ao modelo ANFIS, o modelo RNA também foi planejado em três etapas (Figura 17): leitura e tratamento de dados (tarefas em azul), inicialização e treinamento do modelo (tarefas amarelas) e avaliação do modelo (tarefas laranja).

Figura 17 - Diagrama UML do modelo RNA



Fonte: autor

Para a RNA representada na Figura 17, têm-se:

- a. A leitura da base de dados (A) transfere os dados da planilha Excel® para um *dataframe*.
- b. O Sistema OPUS exporta a base de dados para o Excel, que precisa ser organizada (B). Dados que não fazem parte do modelo devem ser excluídos. Os nomes das colunas de dados devem ser alterados para se adequar a terminologia adotada neste trabalho.
- c. A base de dados possui três variáveis categóricas: Localização, Grupo e Tipo de Benfeitoria. No entanto, o modelo de RNA aceita somente variáveis numéricas. Desta forma, as variáveis foram transformadas em *dummy* (C), isto é, variáveis binárias (0 ou 1) criadas para representar uma variável com duas ou mais categorias.
  - 1) A variável localização busca captar o efeito regional de onde a obra foi executada e possui quatro categorias: CMS-CMSE, CMNE, CMA-CMN e CMO-CMP (Figura 22).
  - 2) Com a Variáveis Grupo pretende-se avaliar a influência da obra: ser em uma Organização Militar (OM) já existente; fazer parte da implantação de uma nova OM; ou tratar-se de uma obra residencial.
  - 3) O intuito com a variável tipo de benfeitoria é avaliar a influência do padrão construtivo associado com obras operacionais e assistências (voltadas para família militar).
- d. Ainda na etapa de tratamento dos dados foi feita a normalização (C). Isto foi necessário, pois as variáveis (área, valor final, duração, produtividade, valor unitário) possuem unidades e escalas diferentes.
- e. A criação das variáveis (D) consiste na divisão dos dados em dois *dataframe*: variáveis independentes  $\{z_1, \dots, z_9\}$ ; e variável dependente  $\{z_{10}\}$ , que representa o atraso esperado.

- Entre as variáveis independentes, o nível de risco (NR) é do tipo código alocado, Localização, Grupo e Tipo de Benfeitoria são *dummy*, e as demais são quantitativas.
- f. A divisão da base de dados entre dados de treinamento/teste (E) é feita na proporção de 80/20 de forma aleatória a cada nova divisão.
  - g. Na definição da arquitetura (F) são estabelecidas a quantidade de camadas ocultas e o número de neurônios por camada. Com relação a quantidade de camadas, com base na 5RSL (Quadro 2), os modelos com 1, 2 ou 3 camadas foram os mais adotados. Já com relação ao número de neurônios, PELLI NETO (2003) apresenta uma forma empírica, onde: Número de neurônios = 2 x número de entradas na rede +1.
  - h. Com relação aos hiper-parâmetros (G), foram estabelecidos: otimizador, taxa de aprendizagem, função de ativação, lote (*batch size*), k-fold (validação cruzada), e a métrica de avaliação (Coeficiente de determinação -  $R^2$ ).
  - i. O treinamento do modelo (H) foi feito de forma coordenada com a avaliação do modelo (I), utilizando a função *GridSearchCV* da biblioteca em Python *scikit-learn*. Esta função realiza o treinamento com validação cruzada. Além disso, testa todas as configurações possíveis com base nas opções de hiper-parâmetros definidas, retornando o modelo que obteve o melhor resultado de acordo com a métrica escolhida ( $R^2$ ). Cabe ressaltar que a validação cruzada dificulta o surgimento de problemas de *overfitting* e de *underfitting*.
  - j. Com o melhor modelo selecionado, é feita a predição com os dados de teste (J). Esta etapa visa avaliar a capacidade de generalização do modelo, que é feita por meio da avaliação do modelo (K).
  - k. A avaliação do modelo (K) é feita com base nas métricas (MAE,  $R^2$ ,  $R^2$  ajustado), na observação dos Gráficos Predição x Alvo e de acerto, e na Análise de Sensibilidade.
  - l. A etapa final é a Desnormalização dos dados, que visa retornar a base de dados as escalas iniciais, de forma a se obter o resultado real.

#### 3.1.3.2.6 Modelo de Análise de Risco

Para escolher as técnicas/ferramentas de análise de risco a serem adotadas neste trabalho, foi realizado um estudo de aderência entre os estas técnicas/ferramentas obtidas na 3RSL e em consulta a normas e padrões internacionais (Seção 2 - APÊNDICE A). O estudo também considerou os dados de entrada disponíveis e o tipo de saída esperado. O Quadro 10 apresenta as técnicas/ferramentas de análise de risco e as etapas do processo de análise de risco onde foram adotadas neste trabalho.

Quadro 10 - Técnicas de análise de risco adotadas

ETAPAS DO PROCESSO DE AVALIAÇÃO DE RISCOS ADOTADAS NESTE TRABALHO		TÉCNICAS/FERRAMENTAS
IDENTIFICAÇÃO	Grupos de fatores de risco	Revisão Sistemática da Literatura (RSL) e Delphi
	Fatores de risco	RSL, Entrevista estruturada e Diagrama de Pareto
ESTIMATIVA DA PROBABILIDADE (frequência)		Pesquisa à base de dados
ESTIMATIVA DA CONSEQUÊNCIA (impacto)		Questionário
DEFINIÇÃO DO NÍVEL DE RISCO		Escala Likert e Matriz Probabilidade / Impacto

Fonte: autor

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) consiste num processo estruturado de revisão de documentação (PMI, 2019), que foi adotada para obter, de fontes científicas, uma referência inicial de grupos e fatores de riscos em obras.

A Técnica Delphi, segundo a NBR ISO 31010 (ABNT, 2012), tem forte aplicação na identificação de riscos, vide Quadro 29 no APÊNDICE A. Segundo PMI (2019), a Delphi consiste em um processo estruturado e convergente para obter um consenso entre especialistas. KONGCHASING e SUA-IAM (2020) aplicaram a técnica para identificar as principais causas de atrasos na construção na Tailândia. No presente trabalho, a Técnica Delphi foi utilizada para que a opinião (conhecimento e experiência) de especialistas possa ser agregada a definição dos principais grupos de fatores de risco relacionados com obras militares, que serão as variáveis de entrada do modelo ANFIS.

Segundo a NBR ISO 31010 (ABNT, 2012), em uma entrevista estruturada, os entrevistados respondem individualmente a um conjunto de questões pré-elaboradas, que o incentivam a ver uma situação a partir de uma perspectiva diferente e, assim, identificar os riscos a partir desta perspectiva. As entrevistas permitem colher a opinião de diferentes *stakeholders* da indústria da construção: engenheiros de planejamento de construção (BRAIMAH, 2014); empreiteiros, empresas de arquitetura / engenharia e proprietários (ASSAF; AL-KHALIL; AL-HAZMI, 1995); proprietários e incorporadores (KOUSHKI; AL-RASHID; KARTAM, 2005); e empreiteiros, consultores e proprietários (ABD EL-RAZEK; BASSIONI; MOBARAK, 2008).

EKANAYAKE e PERERA (2016) utilizaram de forma conjunta a RSL e entrevistas para identificar técnicas de análise de atraso que são mais comumente usadas em projetos no Sri Lanka. Da mesma forma, ABD EL-RAZEK; BASSIONI e MOBARAK (2008) utilizaram estas técnicas para identificar as principais causas de atrasos em projetos de construção no Egito.

Neste trabalho, o método da entrevista estruturada foi utilizado para agregar a listagem inicial de fatores de riscos obtidas na RSL, fatores identificados por dois outros *stakeholders*: fiscais de obras do Exército e empresas contratadas que executam obras.

A análise de Pareto foi criada em 1987 pelo economista italiano Vilfred Pareto. Segundo o PRINCE2 (AXELOS; OFFICE, 2017), essa técnica classifica ou ordena os riscos, podendo ser usada para concentrar o esforço de gerenciamento nos riscos que têm o potencial de causar o maior impacto nos objetivos do projeto. Para VILES; RUDELI e SANTILLI (2019), o maior benefício de um gráfico de Pareto é sua capacidade de destacar as causas importantes em um cenário onde há um grande número de causas a serem consideradas. Seguindo este viés, AIBINU, A. A. e ODEYINKA, H. A. (2006) uso o método de Pareto para análise de fatores de risco de atrasos em construções na Nigéria. Neste trabalho, a análise de Pareto foi utilizada para priorizar os fatores de risco de cada grupo de fatores.

Um questionário distribuído aos especialistas foi utilizado para obtenção de dados referentes ao impacto de cada grupo de risco e ao nível de risco geral para cada amostra de dados (obras). Segundo PMI (2019), as técnicas de questionário incentivam o pensamento amplo para identificação de riscos. Neste trabalho, seguindo a ontologia proposta por BILGIN; DIKMEN e BIRGONUL (2018), o impacto do atraso foi considerado com base na ultrapassagem do tempo.

Para gradação da probabilidade e do impacto foi utilizada a escala de Likert de 1 a 5, onde (1) representa: Muito baixo(a), (2): Baixo(a) 3: Médio(a), (4): Alto(a) e (5): Muito alto(a). SANNI-ANIBIRE, M.; ZIN, R. e OLATUNJI, S. (2020) e GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI e NASSAR (2020) usaram a escala Likert associada com técnicas de Aprendizado de Máquina, em estudos de análise de risco de atraso em obras de construção.

Neste trabalho, seguindo a NBR ISO 31010(ABNT, 2012), os níveis de probabilidade e impacto obtidos com base na escala de Likert de 1 a 5 foram combinados através de uma Matriz de discretização do tipo Probabilidade/Impacto (PMI, 2019) ou Matriz de Probabilidade/Consequência(ABNT, 2012) para obtenção do nível de risco. ABU SALEM e SULEIMAN (2020),MAHAMID; AL-GHONAMY e AICHOUNI (2015),SANNI-ANIBIRE, M.; ZIN, R. e OLATUNJI, S. (2020) e GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI e NASSAR (2020) utilizaram esta técnica associada a escala de Likert em seus trabalhos.

### 3.1.3.3 C.3 – Coleta e tratamento dos dados

O sistema híbrido desenvolvido neste trabalho (Figura 12) é composto por um modelo ANFIS e por uma RNA, logo têm-se dados de entrada para cada um dos modelos.

No entanto, antes de detalhar o processo de coleta e tratamento dos dados, há a necessidade de se definir os grupos (GFR) e os fatores de risco de atraso (FR) em obras militares que serão considerados para estimar o nível de risco (NR) de atraso em obras, por meio do ANFIS. Além disso, há a necessidade de se definir o espaço amostral que irá alimentar o sistema proposto neste trabalho.

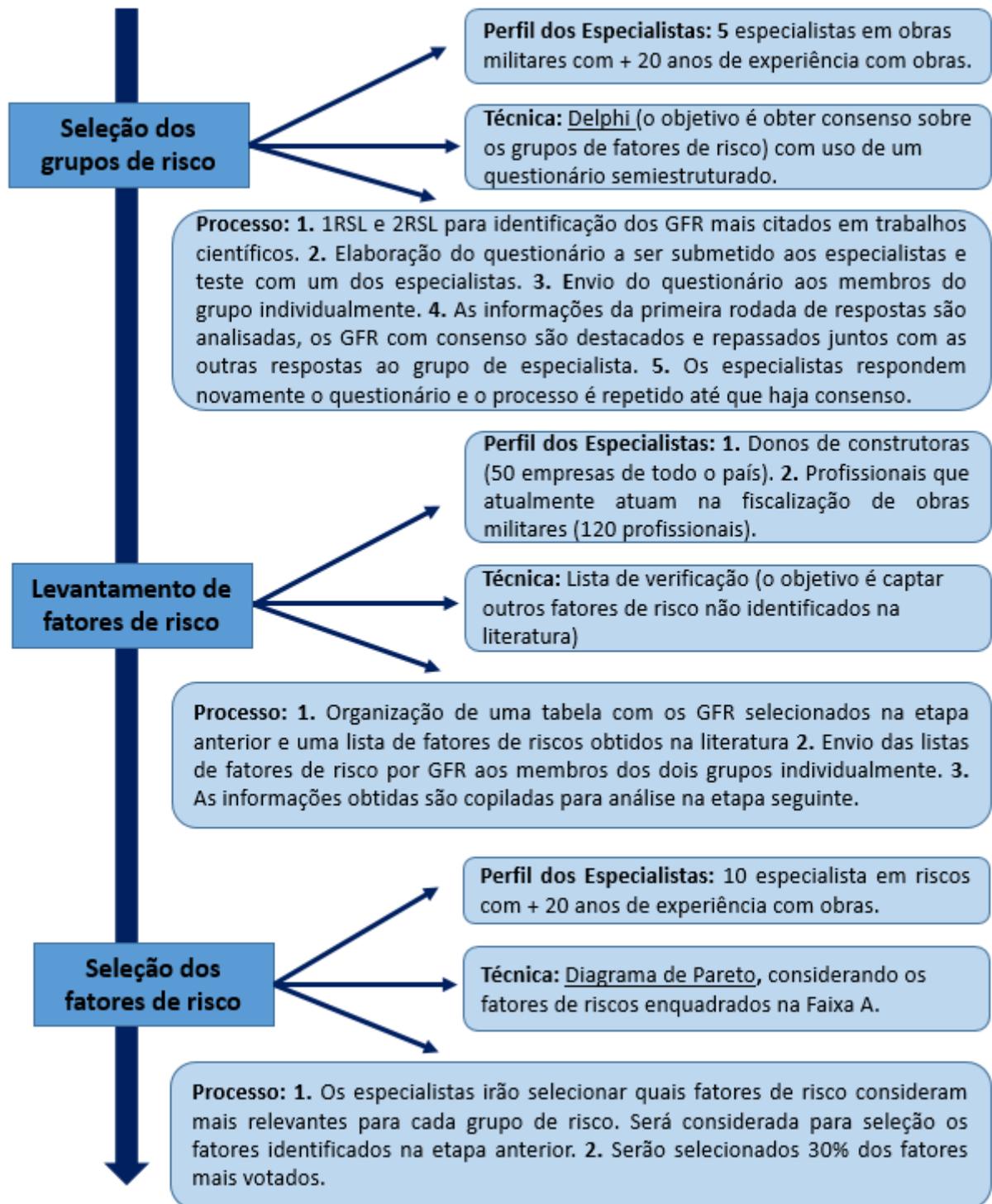
#### 3.1.3.3.1 Definição dos Grupos e fatores de risco

Para a definição dos grupos e fatores de risco que mais impactam em obras militares, foi definida uma Estrutura Analítica de Riscos – EAR (PMI, 2019) constituída por dois níveis (Grupos risco de atraso em obras militares e Fatores de risco que compõe cada Grupo), solução adotada na maioria dos trabalhos pesquisados. Os passos seguintes foram a seleção dos principais grupos de fatores de risco (GFR), o levantamento e a seleção dos fatores de risco mais significativos em cada GFR. A Figura 18 descreve este processo, detalhado a seguir.

a. Para a seleção dos GFR, foram realizadas duas Revisões Sistemática da Literatura (RSL), a 1RSL e a 2RSL (Quadro 2, Quadro 3 e Quadro 4), com intuito de obter da produção científica as diferentes organizações de grupos de riscos utilizadas pelos pesquisadores. Nestes estudos sistemáticos, após a seleção dos textos mais alinhados com esta pesquisa, identificou-se os GFR adotados em cada trabalho. O resultado está no APÊNDICE A e as análises e discussões no Capítulo 4.

b. Em seguida, foi aplicada a técnica Delphi, na busca de um consenso entre 5 especialistas com mais de 20 anos de experiência em obras, sobre os grupos mais representativos em obras militares. Para validar o questionário semiestruturado a ser submetido aos especialistas, o mesmo foi testado com um dos experts com intuito de verificar a clareza e a adequação das respostas ao padrão esperado. O passo seguinte, foi enviar o questionário aos outros 4 especialistas individualmente. Após a resposta dos especialistas, a primeira rodada da técnica Delphi foi concluída. As informações da primeira rodada de respostas foram analisadas, os GFR que tiveram consenso foram destacados. O material foi devolvido ao grupo de especialistas. Os especialistas respondem novamente o questionário e o processo é repetido até que haja consenso. As estradas e saídas intermediárias desta etapa são apresentadas na Seção 3.1.1 do APÊNDICE A.

Figura 18 - Processo para seleção de grupo e de fatores de risco para modelo ANFIS



Fonte: autor

c. Para o levantamento dos fatores de risco (FR), foi feita uma consulta aos artigos selecionados nas 1RSL e 2RSL, para identificar os fatores de risco relacionados com os GFR selecionados na etapa anterior. Com intenção de buscar fatores de risco específicos de obras

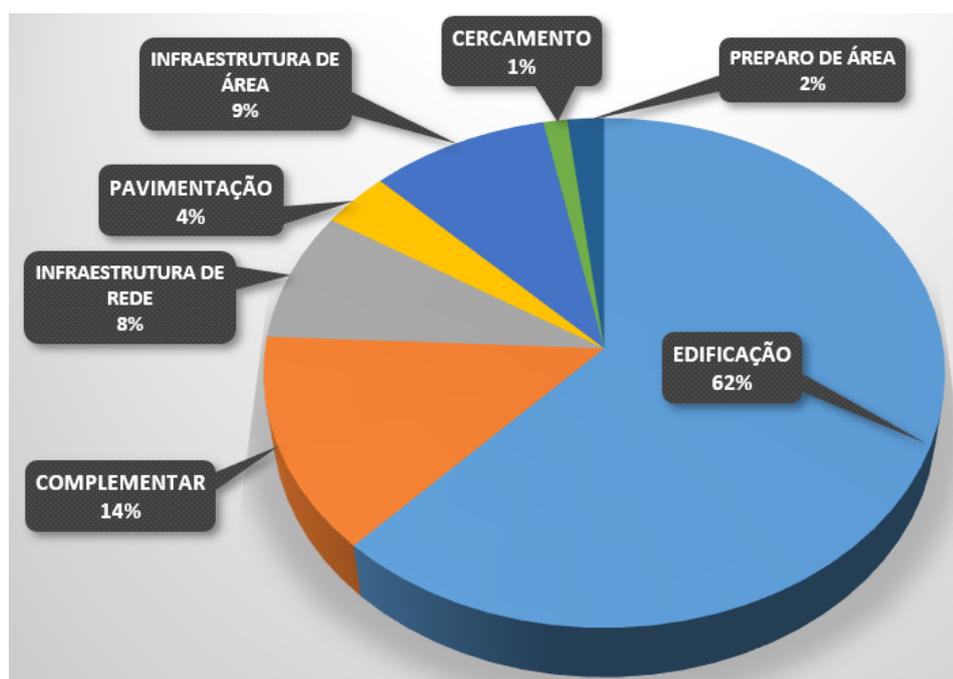
militares, foram desenvolvidos dois questionários. Os questionários foram desenvolvidos pela ferramenta Formulários do Google, sendo o link enviado para: 50 empresas, que trabalham/trabalharam em obras militares por meio de e-mail; e para 120 profissionais que atuam como fiscais de obras militares, por meio de DIEx - documento eletrônico das organizações militares. Na apresentação dos questionários foram explicados: o objetivo e a importância da pesquisa; e como deveria ser a colaboração. A taxa de retorno foi de 43% entre os profissionais que atuam como fiscais de obras militares e de 8% entre empresas com experiência em obras militares. Os resultados intermediários e finais desta etapa estão na Seção 3.1.2.1 do APÊNDICE A e as análises e discussões no Capítulo 4.

d. A seleção dos fatores de risco ocorreu com a colaboração de 10 especialistas com mais de 20 anos de experiência. Os especialistas selecionaram quais fatores de risco consideram mais relevantes em cada GFR. Com base na Teoria do Diagrama de Pareto, foram selecionados 30% dos fatores mais votados. Os resultados intermediários e finais (fatores de riscos selecionados) estão na Seção 3.1.2.2 do APÊNDICE A e as análises e discussões no Capítulo 4.

#### 3.1.3.3.2 Seleção do espaço amostral

A seleção do espaço amostral constitui-se na obtenção do conjunto de dados que irá compor a base de dados deste trabalho. Para tanto foram selecionadas no OPUS as obras de construção, que tiveram ou não aditivo de prazo, concluídas entre 01 Jan 2009 e 31 Dez 2019. Esta consulta retornou 730 registros de obras.

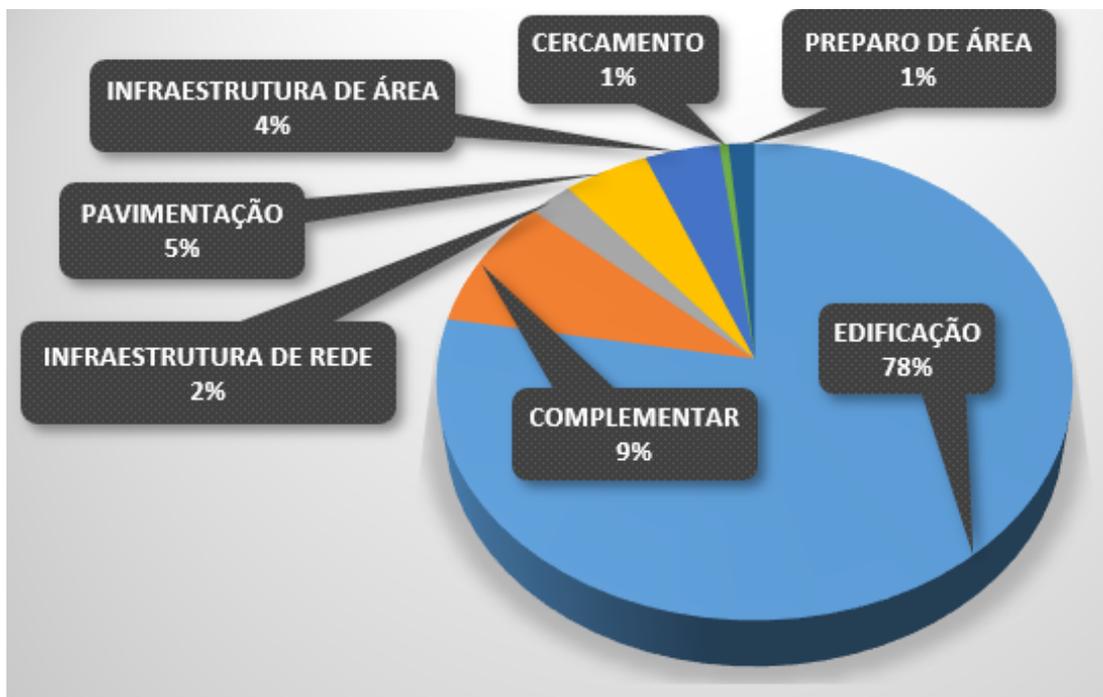
Figura 19 - Distribuição dos tipos de obras por quantidade



Fonte: autor

Ao analisar as 730 obras selecionadas, observou-se que existiam obras de edificação, infraestrutura, pavimentação, cercamento, instalações especiais. Devido a heterogeneidade dos dados, optou-se por trabalhar com as obras de edificação, que correspondem a aproximadamente 62% do volume de obras (Figura 19) e 78% do volume financeiro (Figura 20), o que mantém o valor prático do trabalho (importância para o Exército), mesmo com a redução do espaço amostral.

Figura 20 - Distribuição dos tipos de obras por volume financeiro



Fonte: autor

Ao aprofundar a análise sobre o grupo de obras de edificação, observou-se que havia entre as amostras, algumas edificações muito específicas (guarita, ginásio, estande de tiro, paiol, oficina, posto de abastecimento lavagem e lubrificação, barracão, torre, galpão e garagem) com padrões arquitetônicos e construtivos muito particulares. Assim de forma a garantir uma homogeneidade no espaço amostral, estas tipologias de edificações foram excluídas. Além disso, foram detectadas inconsistências na base de dados com relação à classificação e área da edificação. Após o tratamento de dados, restaram 252 amostras, que foram agrupadas no Quadro 11 de acordo com a tipologia.

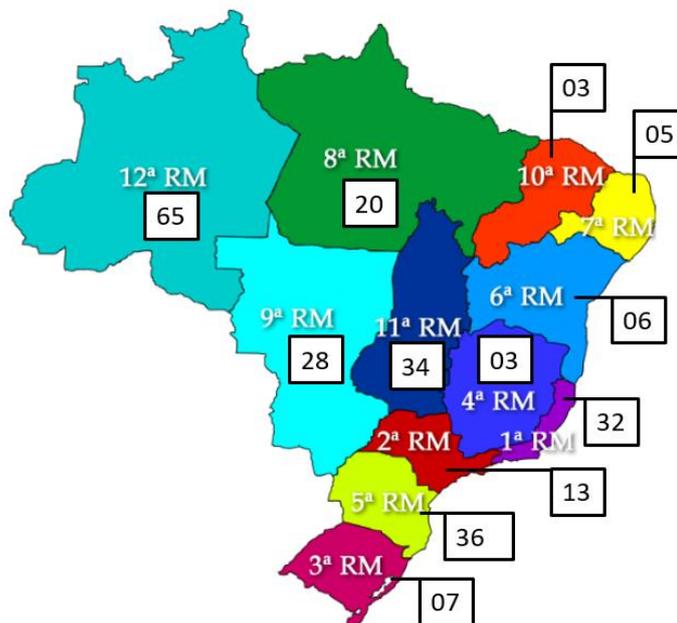
Quadro 11 - Distribuição das amostras segundo a tipologia da edificação

EDIFICAÇÃO			
Pavilhão Almoarifado	3	Espaço Cerimonial	2
Corpo da Guarda	14	Pavilhão Rancho	1
Pavilhão Multiuso	16	Pavilhão Alojamento	14
Comando e Administração	28	Reserva de Armamento	2
CASA	57	Pavilhão de Saúde	8
Pavilhão de Subunidade	26	Depósito	10
Bloco de Apartamentos	60	Hotel de Trânsito	1
Pavilhão de Instrução	9	Banda de Música	1

Fonte: autor

O grupo final de obras selecionados também manteve uma abrangência nacional (Figura 21), isto é, há amostras selecionadas em todas das Regiões Militares (RM), garantido que os resultados obtidos com o modelo podem ser generalizados para todo o país.

Figura 21 -Distribuição espacial das amostras selecionadas nas Regiões Militares



Fonte: autor

### 3.1.3.3.3 Dados para o ANFIS

O modelo ANFIS possui como entrada de dados uma matriz de 252x8, onde cada linha representa uma obra. As sete primeiras colunas,  $\{w_1, \dots, w_7\}$ , são as variáveis independentes e representam os NR de cada GFR. Já  $\{w_8\}$  é a variável dependente e representa o NR Global da Obra. Cabe ressaltar, que  $\{w_8\}$  é a variável de predição do modelo ANFIS.

Os dados de entrada do modelo ANFIS são as saídas da etapa de Pré-processamento (Figura 13) e as opiniões de especialistas. O primeiro Figura 12 - Artefato (Sistema Neuro-fuzzy sequencial) fornece  $\{w_1, \dots, w_7\}$ , que representam o nível de risco (NR) de cada GFR para cada obra. Já as opiniões dos especialistas fornecem  $\{w_8\}$ , que representa o nível de risco (NR) geral para cada obra base de dados amostral. Assim, descrever os processos para obtenção dos dados de entrada do modelo ANFIS, significa detalhar o Pré-processamento, isto é, a Análise de risco e a Defuzzificação.

#### **a. Análise de risco**

Uma vez definido o espaço amostral (Seção 3.1.3.3.2) com 252 obras, o passo seguinte constitui-se de completar as Fichas de informações (Quadro 12), que resultará na matriz de entrada de dados do modelo ANFIS. Para tanto, 12 Fichas de informações foram enviadas a 12 especialistas, que atualmente chefiam unidades do Sistema de Obras Militares nas Regiões Militares. Na Ficha de cada um havia uma relação das obras que foram concluídas dentro de sua área de atuação entre 2009 e 2019. As Fichas consolidadas constam da Seção 3.2 do APÊNDICE A. Cada linha da ficha corresponde a uma obra e foi preenchida por um único especialista, que atribuiu um valor linguístico para probabilidade (Prob) e impacto (Impac) de cada GFR conforme rótulos a seguir:

- a. Probabilidade do atraso de cada GFR de cada obra: muito pequena – MP, pequena - P, média - M, alta- A e muito alta – MA. Representadas por  $\{y_{1P}, \dots, y_{7P}\}$  na Figura 13.
- b. A magnitude do impacto de cada GFR de cada obra: muito pequeno - MP, pequeno - P, médio - M, alto - A e muito alto – MA. Representadas por  $\{y_{1I}, \dots, y_{7I}\}$  na Figura 13.

Os especialistas também tiveram que opinar com relação ao nível de risco (NR) Geral de cada obra,  $\{w_8\}$ , usando uma na escala Likert de 1-4: pequeno – P; médio – M; alto – A; e muito alto - MA. O NR Geral de cada obra é representado por  $\{w_8\}$  na Figura 14. O NR Geral é a variável dependente do modelo, a qual o modelo ANFIS deverá ser capaz de predizer após o processo de aprendizagem. O NR Geral classifica as obras de acordo com o risco de atraso. em uma escala de Likert de 1-4.

Para auxiliar os especialistas na atribuição dos valores linguísticos, vários documentos relacionados à obra foram investigados, incluindo: contrato, projeto (design e especificações), diário de obra, planilha de medições, linhas de base do cronograma e solicitações de Termos Aditivos pactuados ou não.

Quadro 12 - Ficha distribuída aos especialistas para coleta de dados das obras

Item	Mercadológico			Construção			Compliance			Projeto		
	Prob Y1P	Impac Y1I	NR X1	Prob Y2P	Impac Y2I	NR X2	Prob Y3P	Impac Y3I	NR X3	Prob Y4P	Impac Y4I	NR X4
Item	Contratado			Contratante			Socioambiental			NR Geral W8		
	Prob Y5P	Impac Y5I	NR X5	Prob Y6P	Impac Y6I	NR X6	Prob Y7P	Impac Y7I	NR X7			

Fonte: autor

O Quadro 13 ilustra uma Ficha de Informação preenchida ao final da Análise de risco. Para tanto, após a definição pelos especialistas dos valores linguísticos de probabilidade (Prob) e impacto (Impac) para cada GFR de cada obra (Quadro 13), os valores linguísticos para os NR de cada GFR de cada obra (Quadro 13) foram obtidos pela Matriz de Probabilidade/Impacto (Quadro 9). Cabe ressaltar que somente as colunas de NR de cada GFR para cada obra,  $\{x_1, \dots, x_7\}$ , serão utilizadas no processo de Defuzzificação a seguir.

Quadro 13 - Extrato da Ficha de informação ao final do processo de Análise de risco

Item	Mercadológico			Construção			Compliance			Projeto		
	Prob Y1P	Impac Y1I	NR X1	Prob Y2P	Impac Y2I	NR X2	Prob Y3P	Impac Y3I	NR X3	Prob Y4P	Impac Y4I	NR X4
1	P	P	P	P	M	M	P	P	P	MP	P	P
2	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
Item	Contratado			Contratante			Socioambiental			NR Geral W8		
	Prob Y5P	Impac Y5I	NR X5	Prob Y6P	Impac Y6I	NR X6	Prob Y7P	Impac Y7I	NR X7			
1	M	M	A	MP	A	A	MP	M	M	2		
2	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	1		

Fonte: autor

## b. Defuzzificação

Na Defuzzificação, Figura 13, os NR de cada GFR  $\{x_1, \dots, x_7\}$  para cada obra, expressos como variável fuzzy (linguísticos) são transformados em variáveis crisp (número), representados por  $\{w_1, \dots, w_7\}$ . Para tanto, foi adotado o método de Defuzzificação “Center-of-Area” (C-o-A), onde o BNP expresso pela Equação (1), representa o valor transformado. A Tabela 1 apresenta valores de BNP para cada rótulo de NR (Pequeno, Médio, Alto e Muito

Alto). A Tabela 2 ilustra o processo de Defuzzificação, apresentado para cada GFR o valor fuzzy (obtido pela matriz de probabilidade impacto) e o crisp (obtido após a transformação).

Tabela 2 - Extrato da entrada de dados para o ANFIS (NR)

Item	Mercadológico	Construção	Compliance	Projeto
	NR ( $w_1$ )	NR ( $w_2$ )	NR ( $w_3$ )	NR ( $w_4$ )
1	P → 0.165	M → 0.355	P → 0.165	P → 0.165
2	P → 0.165	M → 0.355	M → 0.355	P → 0.165
Item	Contratado	Contratante	Socioambiental	NR Geral ( $w_8$ )
	NR ( $w_5$ )	NR ( $w_6$ )	NR ( $w_7$ )	
1	A → 0.64	A → 0.64	M → 0.355	2
2	M → 0.355	P → 0.165	P → 0.165	1

Fonte: autor

#### 3.1.3.3.4 Dados para a RNA

O modelo RNA possui como entrada de dados uma matriz de 252x10, onde cada linha representa uma obra. As nove primeiras colunas,  $\{z_1, \dots, z_9\}$ , são as variáveis independentes, sendo:  $z_1$  (NR Geral);  $z_2$  (área -  $m^2$ );  $z_3$  (custo total);  $z_4$  (custo/ $m^2$ );  $z_5$  (prazo total);  $z_6$  (produtividade -  $m^2/dia$ );  $z_7$  (localização);  $z_8$  (grupo);  $z_9$  (tipo de benfeitoria). Já  $\{z_{10}\}$  é a variável dependente, que representa o atraso observado. Cabe ressaltar, que  $\{z_{10}\}$  é a variável de predição do modelo RNA.

A base de dados de entrada foi constituída a partir do OPUS, com exceção do  $z_1$ , que representa o nível de risco geral (NR) obtido com base na opinião de especialistas, isto é,  $\{w_8\}$ . Já  $z_4$ (custo/ $m^2$ ) e  $z_6$  (produtividade -  $m^2/dia$ ) foram calculados com base nos dados do OPUS. Sendo:

$$z_4 = z_3 / z_2 \quad \text{Equação (2)}$$

$$z_6 = z_2 / z_5 \quad \text{Equação (3)}$$

Com relação a  $z_7$  (localização) foram definidas 4 classes com base nos Comando Militar de Área conforme Figura 22. A intenção foi refletir aspectos semelhantes com relação à Indústria da Construção Civil. As classes foram: CMA-CMN; CMNE; CMO-CMP; e CMS-CMSE-CML, que representam os Comandos Militares de Área (Figura 22).

Para evitar problemas de micronumerosidade, não se recomenda trabalhar com classes de variáveis com menos de 10% do total de amostras. Como o total de amostras foi de 252, não é desejável classes com menos de 25 amostras. Observando-se o Quadro 11, existem várias

classes com menos de 25 registros. Para evitar este problema,  $z_7$  foi redefinido em obras operacionais e assistenciais, buscando refletir uma divisão no padrão construtivo. Nas assistenciais estão: moradias, hotéis de trânsito e pavilhões de saúde. As operacionais são as demais.

Figura 22-  $z_7$  (classes de localização)



Fonte: autor

Para trabalhar com variáveis de custo ( $z_3$  e  $z_4$ ), estando os registros espalhados ao longo de uma década, houve a necessidade de trazer os valores de custo a valor presente com base no INCC. Neste processo, a atualização dos custos tomou como base a data da emissão da ordem de serviço. Já a data de base foi janeiro de 2020.

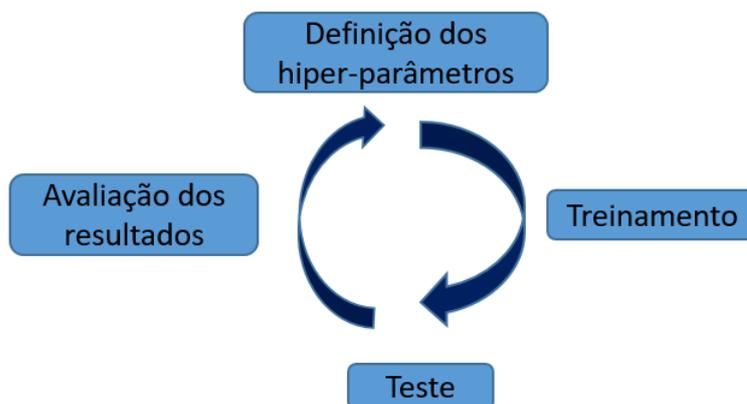
#### 3.1.3.4 C.4– Desenvolvimento do artefato

Segundo DRESCH (2013), esta fase é o cerne de todo o processo, é nela que o artefato será desenvolvido e ocorrerá a geração de conhecimento. O desenvolvimento do artefato ocorreu dentro de um processo cíclico (Figura 23), tanto para o modelo ANFIS, como para a RNA.

O desenvolvimento do modelo compreende a seleção do melhor modelo e sua validação. Para tanto as amostras foram divididas em treinamento (80%) e teste (20%). Segundo (HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J., 2009), o processo de selecionar um modelo de aprendizagem consistem em estimar o desempenho de diferentes modelos em uma base de treinamento, a fim para escolher o melhor. Já validação ocorre, após se ter escolhido um

modelo, estimando-se a sua capacidade de previsão (ou de generalização) em novos dados (base de teste).

Figura 23– Processo para desenvolvimento do artefato



Fonte: autor

Durante o processo de treinamento, segundo N. KETKAR (2017), erros de *overfitting* e de *underfitting* são comuns em problema de Aprendizado de Máquina. De acordo com SINGH e LONE (2019), o *underfitting* e *overfitting* acontecem quando a base de dados está desbalanceada em relação ao rótulos de classificação. ZHANG; ZHANG e JIANG (2019) esclarecem que o *underfitting* significa que o treinamento é insuficiente e a precisão do aprendizado é baixa, enquanto o problema de *overfitting* significa que os mapeamentos aprendidos só funcionam bem para os dados de treinamento e não podem funcionar bem para os dados de teste, portanto, a flexibilidade e adaptabilidade são fracas. Z. NAGY (2018) explica que o *overfitting* pode ser identificado quando o erro no treinamento é muito pequeno, mas o mesmo não se observa nos dados de teste.

#### 3.1.3.4.1 Desenvolvimento do modelo ANFIS

No desenvolvimento deste trabalho, foi adotado o Sistema de Inferência Fuzzy (SIF) do tipo TAKAGI e SUGENO (1985) de primeira ordem. A Seção 4 do APÊNDICE B detalha um pouco mais sobre SIF, em especial o Takagi e Sugeno, e sobre o ANFIS.

O ANFIS deste trabalho é classificado, de acordo com MÜLLER e GUIDO (2016), como um sistema de aprendizagem de máquina supervisionado do tipo classificação. Segundo HASTIE; TIBSHIRANI e FRIEDMAN (2009), na aprendizagem supervisionada, o processo é orientado pela variável resultado esperado ou rótulo, fornecida pela base de dados.

Segundo CHOLLET (2017), o desenvolvimento de um modelo se resume a dividir os dados disponíveis em três conjuntos: treinamento, validação e teste. No treinamento, o objetivo é realizar o processo de aprendizagem, referido por JANG e SUN (1995) como regra de aprendizagem ou algoritmo de aprendizagem (retropropagação), e que consiste na definição da configuração de parâmetros que resulte em erro mínimo. No aprendizado de máquina, observa-se a adoção dos seguintes erros: “*Mean absolute relative error*”(MARE) por SHAHSAVAND; MAREFAT e PARCHAMIJALAL (2018); “*Root mean square error*” (RMSE), “*Mean absolute error*” (MAE), e “*Root mean relative error*” (RMRE) por DELNAZ; RAKHSHANDEHROO e NIKOO (2018).A validação ocorre de forma paralela com o treinamento ao final de cada época. Ela permite avaliar, durante o treinamento, a capacidade de generalização do modelo, isto é, a capacidade de predição do modelo com dados diferentes dos de treinamento, mas que tenham as mesmas características.

O mecanismo de treinamento proposto por JANG (1993) é híbrido, pois utiliza o método dos mínimos quadrados e o método do gradiente descendente. O primeiro otimiza os parâmetros consequentes, que compõem as funções polinomiais de primeiro grau (funções lineares) ou as funções de grau zero (constantes) da Camada 4 do modelo ANFIS. Já o método de descida do gradiente é utilizado para ajustar os parâmetros antecedentes, que referem-se as funções de pertinência da Camada 1 do modelo ANFIS(JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

No desenvolvimento do modelo ANFIS, foram estudadas seis configurações de modelo, obtidas pela combinação de três funções de pertinência e duas opções de quantidade de funções de pertinência. O Quadro 14 apresenta os hiper-parâmetros abordados neste trabalho.

Quadro 14– Hiper-parâmetros usados no desenvolvimento do modelo ANFIS

HIPER-PARÂMETROS
Função de Pertinência: <b>Triangular, Gaussiana e Sino</b>
Quantidade de funções de pertinência = <b>2 e 3</b>
Épocas = <b>15</b>
Número de variáveis = <b>7 (grupos de risco)</b>
Optimizador = <b>Adam</b>
Função de perda = <b><i>mean squared error</i> (BALTA; BIRGONUL; DIKMEN)</b>
Métrica = <b><i>mean absolute error</i> (MAE)</b>
Batch size (tamanho do lote) = <b>1</b>

Fonte: autor

Para avaliar o modelo, após o treinamento, buscando o melhor ajuste para os hiper-parâmetros (época e tamanho do lote), foram utilizados gráficos da Função Perda (“*Mean Squared Error*” – MSE) e da Métrica (“*Mean Absolute Error*” – MAE) ao longo de cada época para dados de treinamento e de validação.

#### 3.1.3.4.2 Desenvolvimento do modelo RNA

O desenvolvimento da RNA seguiu CHOLLET (2017), adotando os processos de: treinamento, validação e teste. Ainda segundo o autor, desenvolver o modelo significa ajustar sua configuração, definindo os hiper-parâmetros.

Os hiper-parâmetros utilizados no desenvolvimento da RNA são de dois tipos: arquitetura e treinamento. Os primeiros permitem definir a estrutura da rede e são número de camadas ocultas; número de neurônios das camadas. Já os de treinamento são: função de ativação; tamanho do lote; taxa de treinamento; estado randômico; otimizador; *k-fold*. O Quadro 15 apresenta os hiper-parâmetros que fizeram parte deste estudo e a seguir são apresentadas as premissas que nortearam a definição de cada um deles:

Quadro 15- Hiper-parâmetros de arquitetura e de treinamento da RNA

<b>HIPER-PARAMETROS DA ARQUITETURA</b>
Número de camas ocultas: 1 / 2 / 3
Número de neurônios por camada: 25
<b>HIPER-PARAMETROS DO TREINAMENTO</b>
Taxa de aprendizagem: 0.025 / 0.0025 / 0.00025
Estado randômico: 6 / 2 / 5 / 9 / 11 / 10
Função de ativação: relu / softmax / sigmoid / tanh
Otimizador: ADAM / SGD
Tamanho do lote: 1 / 5 / 10
Validação Cruzada: 3 / 5 / 10
Taxa de aprendizagem: 0.025 / 0.0025 / 0.00025
Estado randômico: 6 / 2 / 5 / 9 / 11 / 10

Fonte: autor

- a. Número de camadas ocultas: segundo CHOLLET (2017), quando há poucos dados de treinamento disponíveis, é preferível usar uma pequena rede com poucas camadas ocultas, para evitar um *overfitting* severo. Como a base de dados possui somente 252 amostras, foram testados modelos com 1, 2 ou 3 camadas ocultas.

b. A quantidade de neurônios da camada de entrada é igual ao número de variáveis de entrada. A camada de saída deve ter um neurônio, que é a saída de um sistema predição. Com relação as camadas ocultas, não há consenso na literatura. Será adotado a fórmula empírica apresentada por PELLI NETO (2003), onde:

$$\text{Número de neurônios} = 2 \times \text{número de entradas na rede} + 1. \quad \text{Equação (4)}$$

c. A taxa de aprendizagem é um parâmetro constante no intervalo [0,1] que interfere no processo de convergência do modelo. Uma taxa de aprendizado muito baixa torna o aprendizado da rede muito lento, ao passo que uma taxa de aprendizado muito alta provoca oscilações no treinamento e impede a convergência do processo de aprendizado (descida do gradiente). Assim, o ideal é uma taxa pequena, desde que não aumente excessivamente o tempo de processamento.

d. A definição do estado randômico se faz necessária para evitar que a aleatoriedade de inicialização dos pesos possa levar uma mesma rede a resultados diferentes em cada treinamento. Para garantir a busca do melhor modelo, foram testados vários valores de estado randômico (2, 5, 6, 9, 10 e 11).

e. A função de ativação é responsável pela a ativação ou não do neurônio ao longo do processo de treinamento. No desenvolvimento do modelo foram testadas as principais funções de ativação encontradas na literatura para problemas desta mesma classe: *relu*, *softmax*, *sigmoid*, *tanh*.

f. Otimizadores são algoritmos ou métodos usados para alterar os atributos de sua rede neural, como pesos e taxa de aprendizado, a fim de reduzir as perdas. Os otimizadores mais usados são Adam e SGD.

g. "*Batch size*" ou Tamanho do lote, define a quantidade de amostras que serão agrupadas em cada treinamento. Em razão do pequeno espaço amostral (252) deve-se trabalhar com lotes pequenos. A adoção de lotes maiores somente se o tempo de treinamento estiver demasiadamente longo ou se a quantidade de amostras for muito grande. Assim foram testados valores de "*Batch size*" igual a 1, 5 e 10.

h. O método de Validação Cruzada (VC) foi adotado sendo conhecido por ser um método confiável que minimiza o viés e a variação associados à divisão aleatória realizada no método de validação (KOHAVI, 1995) e (ARLOT; CELISSE, 2009). Para definição do método VC deve ser atribuído a quantidade de subdivisões do espaço amostral *k-fold*. Neste trabalho

foram testados modelos com *k-fold* igual a 1, 3 e 5. A Seção 3.6 do APÊNDICE B explica mais detalhadamente o método de validação cruzada.

Ao todo o treinamento foi realizado em 1.296 configurações de RNA, obtidas através da combinação dos hiper-parâmetros definidos no Quadro 15. Para automatizar estes testes, o código de programação em Python desenvolvido para a RNA utilizou-se da função “*GridSearchCV*” disponibilizada pela biblioteca “*scikit-learn*”, para combinar e comparar diferentes hiper-parâmetros, retornando o melhor cenário. A função “*GridSearchCV*” também foi responsável por implementar a Validação cruzada no modelo.

### 3.1.3.5 C.5 – Teste e avaliação

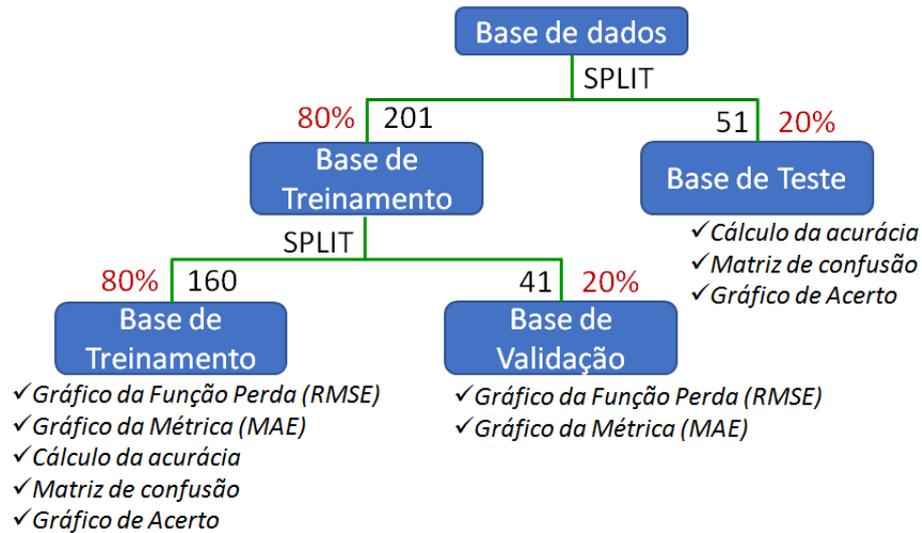
Na última fase, o artefato será avaliado, internamente, para verificar a confiabilidade do algoritmo, e, externamente, com relação à capacidade de generalização dos resultados. Para tanto, o tipo de avaliação do desempenho preditivo do modelo foi o “Teste” (APÊNDICE C - Quadro 52 - Métodos de avaliação de artefatos).

#### 3.1.3.5.1 Avaliação do modelo ANFIS

Segundo GÉRON (2019), a melhor forma de avaliar a capacidade de generalização do modelo ANFIS é dividir a base de dados em dois conjuntos: dados de treinamento (aprendizagem) e de teste (generalização). Desta forma, o modelo é treinado usando o conjunto de treinamento e testado usando o conjunto de teste. A proporção percentual entre dados de treinamento/teste observada na literatura fica entre 60/40 e 80/20. EBTEHAJ; BONAKDARI e ES-HAGHI (2019) usaram 70/30 ao estudarem o transporte de sedimento em canais de água pluviais. Já RASTEGARMANESH; MOOSAVI e KALHOR (2020) usaram aproximadamente 80/20 ao estudar sobre *Rockburst* em projetos subterrâneos. SINGH e LONE (2020), diz que é comum em problemas de Aprendizado de máquina dividir a base de treinamento em treinamento e validação. Com este procedimento a validação ocorre antes de realizar o teste, o que permite um melhor ajuste dos hiper-parâmetros. Do exposto, neste trabalho a base de dados foi dividida em: treinamento, validação e teste, conforme Figura 24.

A avaliação da capacidade de generalização é feita com base no desempenho do modelo. De acordo com SANANI-ANIBIRE; ZIN e OLATUNJI (2020), o desempenho dos algoritmos de ML depende do ajuste dos hiper-parâmetros de otimização (aprendizagem). Para medir o desempenho de um modelo de classificação, SINGH e LONE (2020) sugerem como medidas métricas: a acurácia, a precisão, sensibilidade, pontuação F1 e matriz de confusão.

Figura 24 - Divisão da base de dados e estratégia de avaliação do modelo ANFIS



Fonte: autor

O modelo ANFIS deste trabalho é do tipo classificação, onde o objetivo é estabelecer o NR Geral da Obra. Para medir o desempenho de um modelo de classificação, SINGH e LONE (2020) sugerem como medidas métricas: a acurácia, a precisão, sensibilidade, pontuação F1 e matriz de confusão. Assim, na avaliação, o desempenho do modelo foi medido utilizando como métricas a acurácia e a matriz de confusão.

Além do acurácia e da matriz de confusão a avaliação do modelo também foi feita com base no gráfico de Acertos, conforme (ABNT, 2011) e nos gráficos da Função Perda (“*Mean Squared Error*” – MSE) e da Métrica (“*Mean Absolute Error*” – MAE) ao longo de cada época para dados de treinamento e de validação. A Figura 24 ilustra em que base de dados foram aplicadas cada técnica de avaliação do modelo.

De acordo com A. MORETTIN (2010), a acurácia mede a proximidade de cada observação do valor alvo que se procura atingir. Trata-se de uma medida que representa o percentual de sucesso de previsão (COSTANTINO; DI GRAVIO; NONINO, 2015). Em complemento, segundo SINGH e LONE (2020), a acurácia mede a precisão geral do modelo em forma de percentual, variando de 0% a 100%, o que permite comparar modelos e estabelecer níveis de aceitabilidade de desempenho para eles.

Com relação a matriz de confusão, segundo SINGH e LONE (2020), a mesma permite avaliar quantitativamente o desempenho do modelo para cada rótulo de classificação, isto é, quantifica as vezes em que o modelo previu os resultados corretos e quais foram os resultados da previsões erradas.

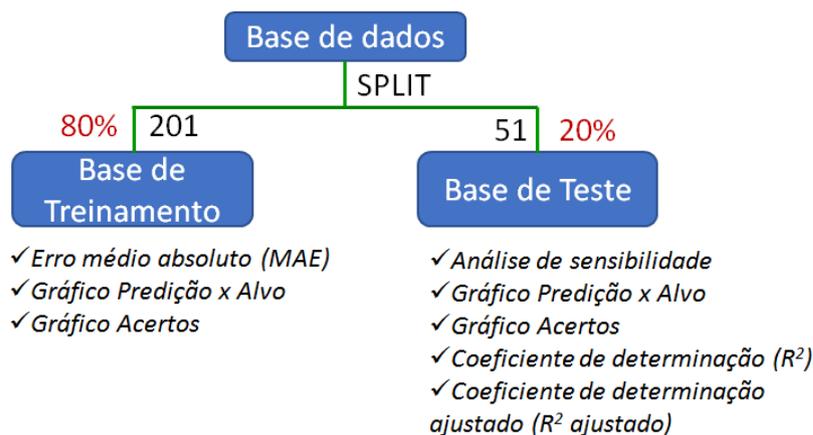
Uma acurácia grande no treinamento e pequena no teste é indicativo de *overfitting*, isto é, o modelo está muito ajustado aos dados de teste e não é capaz de predizer com a mesma eficiência em dados diferentes do treinamento (teste). O *overfitting* também pode indicar que as bases de teste e de treinamento, apesar de diferentes, não são semelhantes, em especial, com relação ao histograma dos rótulos do NR global.

Com base nos gráficos de Função Perda e de Métrica é possível definir a quantidade de épocas a partir da qual a queda na função perda e no valor da métrica passam a não ser significativos para o desempenho do modelo. Já o gráfico de Acertos, permite identificar espacialmente como está precisão do modelo, quanto maior a sobre posição de pontos de predição e de alvo (base de dados) melhor será o modelo.

### 3.1.3.5.2 Avaliação do modelo de RNA

Na avaliação do modelo da RNA foi usado a validação cruzada (*k-fold*) desta forma a base de dados foi dividida apenas em treinamento e teste. Segundo ARLOT e CELISSE (2009), na validação cruzada (*k-fold*), os dados de treinamento são divididos repetidamente e vários modelos são treinados, sendo k, geralmente 5 ou 10, explicita o número de partes (dobras) em que a base é dividida. A Seção 3.6 do APÊNDICE B, detalha o tema. A Figura 25 ilustra a divisão da base de dados em treinamento e teste adotada para a RNA.

Figura 25- Divisão da base de dados e estratégia de avaliação do modelo RNA



Fonte: autor

Como o modelo de RNA é do tipo regressão tendo como saída uma variável contínua, para sua avaliação, durante a 3RSL (Quadro 2) foram identificados como métricas: o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ); Coeficiente de Correlação (R), “*Root Mean Squared Error*”

(RMSE); “Mean Absolute Error” (MAE); “Normalized Root Mean Square Error” (NRMSE); e “Mean Absolute Percentage Error” (MAPE). Dentre estes destacaram-se o RMSE e o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ) como os mais utilizados. DERAKHSHANFAR; ELMUALIM; OCHOA; MAYER et al. (2019) aplicaram o RMSE em seus estudos de gerenciamento de risco de projetos com base nas lições aprendidas usando RNA. Já KIM e LEE (2019) usou o  $R^2$  em suas pesquisas sobre a influência de maturidades de engenharia detalhada na engenharia *offshore*.

O  $R^2$  representa a capacidade do modelo de explicar as varrições dos dados. No entanto, a quantidade de dados efetivamente utilizados para a formação do modelo influencia e deve ser considerada. Para contornar este obstáculo, utiliza-se o  $R^2$  ajustado, que é a porcentagem de variação na resposta que é explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores do modelo em relação ao número de observações. O Quadro 16 apresenta uma classificação para a capacidade do modelo de explicar de acordo com o  $R^2$  ajustado.

Quadro 16- Classificação do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado)

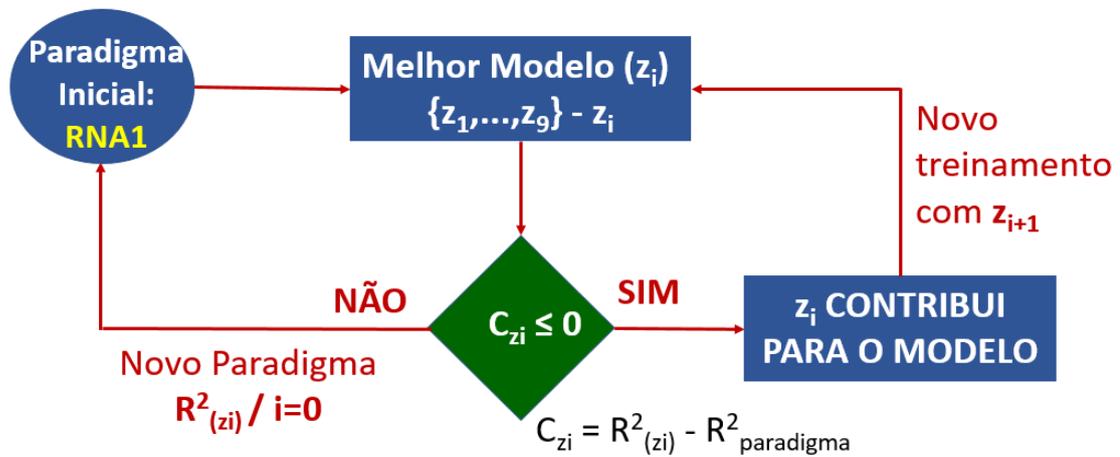
Intervalo de Valores	$R^2$ ajustado
$R^2$ ajustado = 0	Nula
$0 < R^2$ ajustado $\leq 0.09$	Fraca
$0.09 < R^2$ ajustado $\leq 0.49$	Média
$0.49 < R^2$ ajustado $\leq 0.81$	Forte
$0.81 < R^2$ ajustado $\leq 0.9801$	Fortíssima
$0.9801 < R^2$ ajustado $\leq 1$	Perfeita

Fonte: (DANTAS, 1998)

Para COUTINHO; DUARTE; NEVES; COUTINHO NETO et al. (2012), o  $R^2$  não é suficiente para avaliar a qualidade numérica de um modelo, sugerindo a análise de sensibilidade como estratégia complementar. OLIVEIRA (2011) explica que a análise de sensibilidade consisti em provocar pequenas perturbações na entrada do sistema e averiguar a contribuição de cada uma na saída (sobre as métricas). Assim, é possível avaliar a importância de cada variável sobre o resultado final de outra, decidindo sobre a permanência dela ou não no modelo final. Neste mesmo sentido, (HOREL; GIESECKE, 2020) destaca a necessidade e propõem um teste para avaliar a significância estatística das variáveis de entrada em um modelo de RNA de regressão de uma camada oculta.

Neste trabalho, foi proposta uma análise de sensibilidade com base em (OLIVEIRA, 2011), o fluxograma da Figura 26 ilustra o processo.

Figura 26 - Fluxograma para Análise de Sensibilidade da RNA



Fonte: autor

O Paradigma inicial é o modelo RNA1 (melhor modelo obtido na fase de treinamento). A partir do RNA1, foram feitas simulações excluindo uma variável  $z_i$  de cada vez e confrontando o  $R^2_{(z_i)}$  com o  $R^2_{paradigma}$ . Foi estabelecido um índice ( $C_{z_i}$ ) que define a contribuição de cada variável ( $z_i$ ) de entrada na saída da RNA, sendo:

$$C_{z_i} = R^2_{(z_i)} - R^2_{paradigma} \quad \text{Equação (5)}$$

Se  $C_{z_i}$  for maior do que zero, a ausência da variável  $z_i$  melhorou o resultado do modelo, logo  $z_i$  não contribui para o modelo e deve ser excluída. No caso de  $C_{z_i}$  retornar um valor negativo, a ausência da variável  $z_i$  prejudicou o resultado final do modelo, logo  $z_i$  contribui para o modelo e não deve ser excluída. Neste momento o paradigma é alterado, o melhor modelo deixa de ser RNA1 e passa a ser RNA $_{z_i}$ . O processo é repetido para o novo Paradigma até que não haja mais melhoras no modelo.

Neste trabalho, os modelos foram avaliados com base em: MAE;  $R^2$ ;  $R^2$  ajustado; análise de sensibilidade. Além disso, para uma avaliação visual do desempenho do modelo, foram gerados gráficos de Predição x Alvo e de Acertos, conforme (ABNT, 2011). A Figura 25 ilustra em que base de dados foram aplicadas cada técnica de avaliação do modelo.

### 3.1.4 D – Explicitações das aprendizagens

Este item corresponde a letra “D” da metodologia de pesquisa deste trabalho (Figura 9), sendo seu objetivo assegurar que a pesquisa realizada possa servir de referência e de subsídio

para a geração de conhecimento, tanto no campo prático, quanto no campo teórico. Para tanto, além do apresentado no Capítulo 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES, são explicitados os fatores que contribuíram positivamente para o sucesso da sua pesquisa e os que revelaram-se com barreiras à consecução dos objetivos.

### 3.1.5 E – Generalizações para uma classe de problema

Este item corresponde a letra “E” da metodologia de pesquisa deste trabalho (Figura 9), e ressalta a importância de que o artefato desenvolvido, possa ser generalizado para um Classe de Problemas. Esta generalização permite que haja o avanço do conhecimento em *Design Science*. Esta generalização permitirá que o conhecimento gerado em uma situação específica possa, posteriormente, ser aplicado à outras situações similares e que são enfrentadas por diversas organizações.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO

Este item aborda os resultados obtidos em cada etapa do desenvolvimento do artefato, que corresponde compreende a letra “C” da metodologia de pesquisa deste trabalho (Figura 9 do Capítulo 3 – METODOLOGIA DE PESQUISA).

#### 4.1.1 Identificação da Classe de Problemas e Artefatos existentes (C-1)

Para Identificação da Classe de Problemas e Artefatos seguiu-se o preconizado na metodologia de pesquisa (Seção 3.1.3.1) em conformidade com o processo para realização de estudos sistemáticos da literatura (Seção 3.1.2 / Figura 10) e pesquisas em normas e padrões internacionais. Os resultados estão na Seção 1 do APÊNDICE A. Com base neles e a luz dos objetivos deste trabalho, identificou-se que este trabalho está relacionado com a CLASSE DE ANÁLISE DE RISCO DE ATRASO, com abordagem na CLASSIFICAÇÃO DO NÍVEL DE RISCO E NA ESTIMATIVA DO ATRASO ESPERADO EM OBRAS.

#### 4.1.2 Coleta e tratamento de dados (C.3)

Conforme a metodologia de pesquisa apresentada na Seção 3.1.3.3, têm-se: dados referentes a seleção dos grupos e fatores de risco (entrada do ANFIS); e dados obtidos do Sistema OPUS (entradas para a RNA).

##### 4.1.2.1 Seleção dos Grupos e Fatores de Risco (GFR)

No processo de Seleção dos Grupos de Fatores (GFR), na 1RSL e a 2 RSL foram selecionados 35 artigos que resultaram em uma listagem inicial de 27 GFR (Quadro 17).

Quadro 17 - Grupos de fatores de riscos (1RSL e 2RSL)

PESQUISADORES	GRUPOS DE RISCOS
(MUNEESSWARAN; MANOHARAN; AWOYERA; ADESINA, 2020)	Execução, projeto, gerenciamento, financeiro, político e segurança.
(DERAKHSHANFAR; OCHOA; KIRYTOPOULOS; MAYER et al., 2020)	Cliente ou proprietário, contratante, consultor, externo, trabalho, material, equipamento e projeto.
(ABU SALEM; SULEIMAN, 2020)	Financeiro, Consultor, Gerencial, Lógica e ambiente.

(GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI; NASSAR, 2020),(RACHID; TOUFIK; MOHAMMED, 2019), (GUNDUZ; NIELSEN; OZDEMIR, 2015; GÜNDÜZ; NIELSEN; ÖZDEMIR, 2013), (AZIZ, 2013), (ASSAF; AL-HEJJI, 2006)	Proprietário, consultor, contratante, design, trabalho, material, equipamento, projeto e externo.
(YAP; GOAY; WOON; SKITMORE, 2020)	Cliente, contratante, consultor, trabalho, equipamento, material e outros.
(SANNI-ANIBIRE, M.; ZIN, R.; OLATUNJI, S., 2020)	Material, mão de obra, equipamento, contratante, governo, financeiro, ambiental, mudança, planejamento e controle.
(YASEEN, Z.; ALI, Z.; SALIH, S.; AL-ANSARI, N., 2020), (KUMARASWAMY; CHAN, 1998), (CHAN; KUMARASWAMY, 1995)	Proprietário, projetista, contratante, projeto, material, equipamento, trabalho, externo.
(SINGH; BALA; DIXIT; VARSHNEY, 2018)	Trabalho, material, design, equipamento, projeto, contratante, desenvolvedor, consultor e externo.
(WANG; FORD; CHONG; ZHANG, 2018) e (LO; FUNG; TUNG, 2006)	Cliente, engenharia, contratante, comportamento humano, projeto, externo e recurso.
(SAMBASIVAN; DEEPAK; SALIM; PONNIAH, 2017) e (KHOSHGOFTAR; BAKAR; OSMAN, 2010)	Cliente, contratante, consultor, material, trabalho, contrato, relações contratuais e externo.
(MPOFU; OCHIENG; MOOBELA; PRETORIUS, 2017)	Cliente, projetistas, gerentes de projeto, contratados, trabalho, financeiro, contrato, comunicação e informação, canteiro e ambiente, governo e autoridades locais, outros.
(ADAM; JOSEPHSON; LINDAHL, 2017)	Comunicação, financeiro, gerenciamento, material, organizacional, projeto, psicológico, clima.
(BEKR, 2015)	Cliente, contratante, consultor e externo.
(AKOGBE; FENG; ZHOU, 2013)	Cliente, contratante, consultor, arquiteto.
(KAZAZ; ULUBEYLI; TUNCBILEKLI, 2012)	Ambiental, financeiro, trabalho, gerencial, proprietário, projeto e recursos.
(RAMANATHAN; SAMBU; IDRUS, 2012)	Cliente, contratante, financeiro, projeto, consultor, design, coordenação, materiais, equipamento, trabalho/mão de obra, ambiente, contrato, externo, mudanças, governo e cronograma e controle.
(AL-KHARASHI; SKITMORE, 2009)	Cliente, contratante, consultor, material, trabalho e contrato.
(ABD EL-RAZEK; BASSIONI; MOBARAK, 2008)	Proprietário, contratante e consultor.
(YANG; OU, 2008)	Contrato, gerenciamento, humano, não humano, design e financeiro.
(ALAGHBARI; KADIR; SALIM; ERNAWATI, 2007)	Proprietário, contratante, consultor e externo.
(WANG; SHEN; HAO, 2006)	Cliente, contratante, subcontratado, governo, e outros
(FARIDI; EL-SAYEGH, 2006)	Contratante, consultor/projetista, proprietário, financeiro, planejamento e cronograma, contrato, governo e condições imprevistas.

(AIBINU, A.; ODEYINKA, H., 2006)	Cliente, levantamento de quantidade, arquiteto, engenheiro estrutural, contratante, subcontratado, suprimento e externo.
CHAN e KUMARASWAMY (1995)	Contratante, projetistas, trabalho, externo, projeto, equipamento, cliente e material.

Fonte: autor

Após a aplicação da terceira rodada da Técnica Delphi, o consenso obtido entre os especialistas é apresentado no Quadro 45 da Seção 3.1.1 do APÊNDICE A e rerepresentados na coluna da esquerda do Quadro 18. A fim de evitar uma grande quantidade de GFR, a coluna da direita do Quadro 18 foi proposta aos especialistas, havendo o concorde de todos.

Quadro 18 - Grupo de Fatores de riscos (GFR)

<b>CONSENSO ENTRE OS ESPECIALISTAS</b>	<b>GRUPOS DE RISCO</b>
Operacional/Trabalho/Execução	<b>CONSTRUÇÃO</b>
Contrato/Legal/Político-Regulatório	<b>COMPLIANCE</b>
Design/Método construtivo/Soluções de projeto	<b>PROJETO</b>
Gerenciamento/Projeto/Comercial/Recursos/Terceirização/Tecnológico	<b>CONTRATADO</b>
Contratante/Fiscalização/Patrocinador//Consultor/Cliente/Proprietário	<b>CONTRATANTE</b>
Localização geográfica/Social/ Ambiental /Natural	<b>SOCIOAMBIENTAL</b>
Econômico/Financeiro	<b>MERCADOLÓGICO</b>

Fonte: autor

A seguir, serão apresentadas as discussões oriundas do processo de construção do conhecimento realizado nesta etapa.

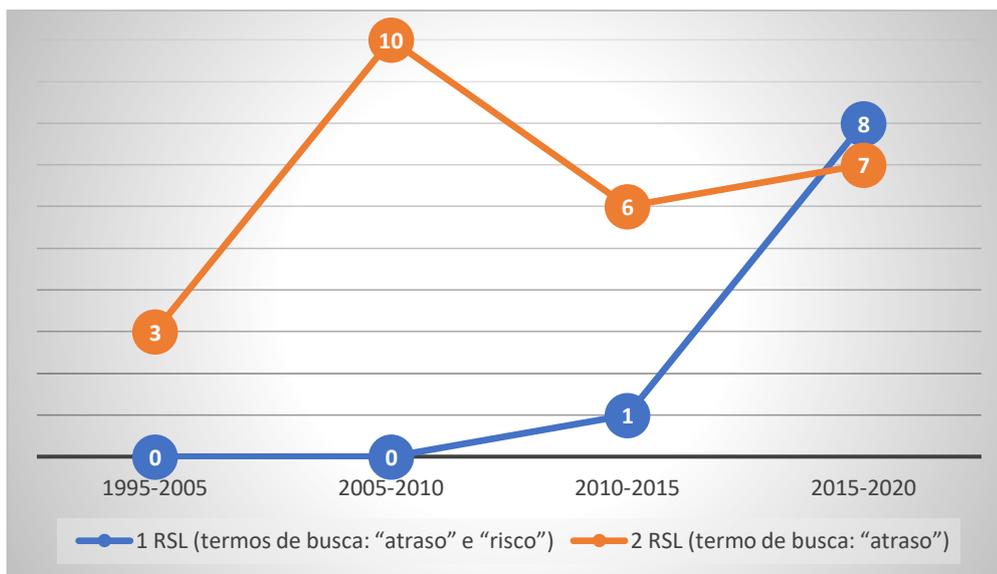
a. Tendência de pesquisa sobre atraso

Antes de abordar os resultados obtidos com a 1RSL e a 2RSL, cabe ressaltar uma análise gráfica (Gráfico 2) feita a partir da quantidade de artigos selecionados nos dois estudos sistemáticos. Na 1ª RSL, que continha os termos de busca “atraso” e “risco”, foram selecionados 9 artigos. Já na 2ª RSL, que continha somente o termo “atraso”, foram 26 os selecionados.

Ao observar a linha da 1RSL, cujos termos de busca incluem atraso e risco, as publicações começam a ocorrer a partir de 2010, muito provavelmente impulsionado com a publicação da primeira norma ISO de Gestão de Riscos em 2009, a ISO 31000. Já com relação a 2RSL, cujos termos de busca incluem atraso, a quantidade de publicações começa a cair a

partir de 2010, o que pode ser justificado pelo fortalecimento, nome mesmo período, da área de pesquisa de atraso de obras associada com risco. Além disso, da leitura dos resumos da 2RSL, observa-se que o foco destes trabalhos está no risco de atraso em obras associado com o cronograma.

Gráfico 2 - Estudo quantitativo dos achados na RSL



Fonte: autor

b. Estudos de referência

Observando os resultados obtidos pelas 1RSL e 2RSL (Quadro 17), foram 35 pesquisas selecionadas e um total de 257 grupos de fatores de riscos identificados. Pelo Quadro 17 também é possível identificar trabalhos que usaram a mesma classificação de GFR, o que demonstra a relevância dos trabalhos de: ASSAF e AL-HEJJI (2006), que foi referência em 5 outros trabalhos; CHAN e KUMARASWAMY (1995) em dois; LO; FUNG e TUNG (2006) em um; e KHOSHGOFTAR; BAKAR e OSMAN (2010) em um.

c. Importância global da Análise de atraso

Pelas 1RSL e 2RSL, também foi possível observar que muitas pesquisas tem como foco o atraso em obras de um país específico. Foram identificados estudos em 20 países: Índia, Burkina Faso, Paquistão, Paquistão, Uganda, Austrália, Jordânia, Malásia, Argélia, Arábia Saudita, Reino Unido, Emirados Árabes Unidos, Egito, Nigéria, Hong Kong, Turquia, Irã, Tanzânia, Vietnã e Brasil. A maioria países em desenvolvimento, espalhados em 6 continentes

(África, Ásia, Oriente Médio, Europa, Oceania e América do Sul), o que ressalta a importância global do tema.

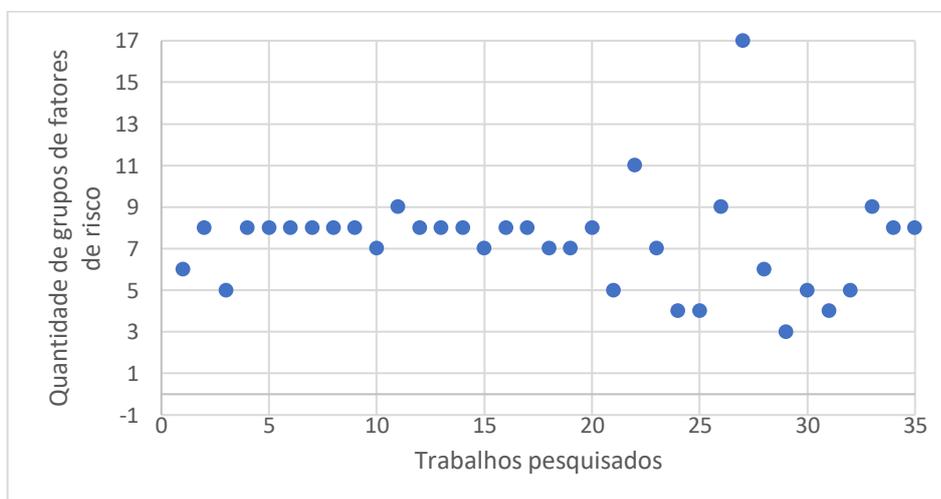
d. Estrutura Analítica de Riscos (EAR)

Outro aspecto interessante observado foi a organização da Estrutura Analítica de Riscos (EAR). A maioria dos pesquisados adotaram uma estrutura com dois níveis: grupos e fatores de risco. A exceção observada foi DERAKHSHANFAR; OCHOA; KIRYTOPOULOS; MAYER *et al.* (2020), que organizaram em três níveis: stakeholders, recursos e processos; grupos; e fatores de risco.

e. Quantidade de Grupos de fatores de risco

Pelo Gráfico 3, percebe-se que não há um consenso sobre a quantidade de grupos de fatores adotada pelos pesquisadores. No entanto, observa-se que em média foram definidos 7 grupos. O presente trabalho segue este comportamento e adotou 7 grupos de fatores de risco (Quadro 18) como variáveis de entrada do modelo ANFIS.

Gráfico 3 - Quantidade de grupos de fatores de risco adotados nos trabalhos selecionados



Fonte: autor

4.1.2.2 Seleção dos Fatores de risco (FR)

Para o levantamento dos Fatores de risco (FR), foi feita uma listagem preliminar com os FR identificados nos 35 artigos selecionados na 1RSL e na 2 RSL, que resultou em 261FR. A consulta aos grupos de profissionais (empresários e fiscais de obras) resultou em 13 novos FR identificados nos questionários foram incluídos na listagem final, totalizando 274 FR. Esta

nova listagem foi apresentada ao grupo de especialistas para escolha dos mais importantes para cada grupo de risco. Com base na Teoria do Diagrama de Pareto, foram selecionados os 30% dos fatores mais votados, chegando-se a 82 FR. Cabe ressaltar, que segundo SANNI-ANIBIRE, M.; ZIN, R. e OLATUNJI, S. (2020), não há consenso sobre o número de fatores de risco de atraso na construção. A seleção final dos FR é apresentada nos Quadros: 19, 20, 21, 22, 23, 24 e 25.

Quadro 19 - Fatores de risco do Grupo Construção

<b>Construção / Operacional - CONSTRUÇÃO</b>	
<b>CN1</b>	Fatos supervenientes relacionados com as ligações provisórias de água, luz, esgoto, etc.
<b>CN2</b>	Fatos supervenientes relacionados com as condições geológicas (resistência do solo e nível freático)
<b>CN3</b>	Acidentes de trabalho durante a obra
<b>CN4</b>	Imprevistos na mobilização e instalação do canteiro após a ordem de serviço
<b>CN5</b>	Retrabalho devido a erros durante a execução dos serviços
<b>CN6</b>	Problemas com vizinhos
<b>CN7</b>	Restrição de tráfego no acesso ao local da obra (grandes centros urbanos)
<b>CN8</b>	Ineficiência de concessionárias no fornecimento de serviços públicos (água, energia, telefones, etc.)
<b>CN9</b>	Tipo, natureza e complexidade do projeto
<b>CN10</b>	Descumprimento de aspectos de saúde e segurança do trabalho pela contratada

Fonte: autor

Quadro 20 - Fatores de risco do Grupo Socioambiental

<b>Localização geográfica / Social / Ambiental / Natural - SOCIOAMBIENTAL</b>	
<b>SA1</b>	Condições climáticas desfavoráveis
<b>SA2</b>	Escassez de mão de obra qualificada e/ou não qualificada
<b>SA3</b>	Baixa produtividade do trabalhador
<b>SA4</b>	Conflitos pessoais no trabalho
<b>SA5</b>	Greves de trabalhadores
<b>SA6</b>	Distância aos Centros Logísticos e urbanos

Fonte: autor

Quadro 21 - Fatores de risco do Grupo Contratante

<b>Contratante / Fiscalização / Contrato / Consultor / Cliente - CONTRATANTE</b>	
<b>CF1</b>	Falta ou inadequada comunicação entre as partes interessadas
<b>CF2</b>	Inflexibilidade (rigidez) da Fiscalização

<b>CF3</b>	Atrasos na realização de inspeções e testes de comissionamento
<b>CF4</b>	Experiência inadequada da equipe de Fiscalização
<b>CF5</b>	Falta de dedicação e comprometimento da equipe de Fiscalização
<b>CF6</b>	Equipe de Fiscalização com sobrecarga de trabalho
<b>CF7</b>	Fatores que prejudiquem a liberação do local da obra para o contratado
<b>CF8</b>	Pedidos de alteração no projeto pela OM beneficiada
<b>CF9</b>	Ingerência da OM beneficiada sobre a contratada
<b>CF10</b>	Erros, discrepâncias ou falta de clareza nos documentos do contrato
<b>CF11</b>	Sanções por atraso ineficazes previstas em contrato
<b>CF12</b>	Demora na análise pela Fiscalização de demandas da contratada (análise de medições, solicitação de alterações no projeto, Termos Aditivos, aprovação de materiais, etc.)

Fonte: autor

Quadro 22 - Fatores de risco do Grupo Projeto

<b>Projeto / Design - PROJETO</b>	
<b>PD1</b>	Falhas no orçamento (levantamento de quantitativos, precificação)
<b>PD2</b>	Soluções de projeto inadequadas (Método Construtivo)
<b>PD3</b>	Falhas no levantamento de dados (condições locais e outros)
<b>PD4</b>	Projeto / Design - Projeto
<b>PD5</b>	Experiência da equipe de Projetistas
<b>PD6</b>	Projeto com detalhamento incompleto ou pouco claro
<b>PD7</b>	Cronograma estimativo da obra previsto inadequada
<b>PD8</b>	Falta ou deficiência de comunicação entre as partes interessadas do projeto
<b>PD9</b>	Carga de trabalho da equipe projetista
<b>PD10</b>	Não utilização de softwares de engenharia
<b>PD11</b>	Projeto elaborado em BIM (risco positivo)

Fonte: autor

Quadro 23 - Fatores de risco do Grupo Compliance

<b>Contrato / Legal / Político-regulatório - COMPLIANCE</b>	
<b>PR1</b>	Burocracia
<b>PR2</b>	Corrupção
<b>PR3</b>	Ineficiência dos órgãos licenciadores
<b>PR4</b>	Ineficiência da equipe administrativa de Compliance da contratada
<b>PR5</b>	Atrasos na obtenção de licenças do município
<b>PR6</b>	Mudanças nos regulamentos e leis governamentais

<b>PR7</b>	Descumprimento de leis, normas, procedimentos, regulamentos, códigos impostos por órgãos fiscalizadores/reguladores (CREA/CAU, IBAMA, Superintendência Regional do Trabalho, etc.)
------------	--

Fonte: autor

Quadro 24 - Fatores de risco do Grupo Mercadológico

<b>Econômico / Financeiro -MERCADOLÓGICO</b>	
<b>EF1</b>	Alto custo de financiamento
<b>EF2</b>	Alto custo dos seguros
<b>EF3</b>	Escassez de fontes privadas e públicas de financiamento
<b>EF4</b>	Mudança nas políticas governamentais de financiamento
<b>EF5</b>	Inflação
<b>EF6</b>	Variação do custo de insumos
<b>EF7</b>	Política monetária (quantidade de moeda em circulação, de crédito e das taxas de juros).
<b>EF8</b>	Variação de alíquotas e bases de cálculo de tributos (ex: taxa alfandegária)
<b>EF9</b>	Variação de câmbio
<b>EF10</b>	Variação dos custos de transporte/frete
<b>EF11</b>	Capacidade da contratada de suportar atrasos no pagamento de até 90 dias
<b>EF12</b>	Falta de numerário para pagamentos pelo contratante por período superior a 90 dias

Fonte: autor

Quadro 25 - Fatores de risco do Grupo Contratado

<b>Gerenciamento de Projeto / Comercial / Recursos / Terceirização - CONTRATADO</b>	
<b>GP1</b>	Planejamento da obra ineficaz (cronograma, plano de aquisição, compras e subcontratação)
<b>GP2</b>	Investigação inadequada do local (visita prévia)
<b>GP3</b>	Falhas na coordenação e supervisão da obra
<b>GP4</b>	Falta de comunicação ou inadequada entre as partes interessadas
<b>GP5</b>	Falta de maturidade organizacional para gerenciamento de projetos
<b>GP6</b>	Experiência, habilidade, competência e conhecimento da equipe de gerenciamento do projeto
<b>GP7</b>	Insolvência/falência de subcontratados e/ou fornecedores
<b>GP8</b>	Mudança frequente de subcontratados
<b>GP9</b>	Trabalho de subcontratados de baixa qualidade
<b>GP10</b>	Descumprimento de prazos pelos subcontratados
<b>GP11</b>	Seleção de subcontratado inadequada
<b>GP12</b>	Baixa confiabilidade e qualidade dos fornecedores
<b>GP13</b>	Disponibilidade de materiais de construção no mercado

<b>GP14</b>	Demora na entrega de materiais pelos fornecedores
<b>GP15</b>	Demora na fabricação própria de insumos da obra (pré-moldados, estrutura metálica, etc.)
<b>GP16</b>	Qualidade dos materiais inadequada ou em desacordo com a Especificação Técnica
<b>GP17</b>	Alterações no tipo e especificação de materiais durante a construção
<b>GP18</b>	Disponibilidade dos equipamentos de construção adequados
<b>GP19</b>	Lenta mobilização de equipamentos
<b>GP20</b>	Baixa produtividade e eficiência dos equipamentos de construção
<b>GP21</b>	Falta de pagamento de salários dos funcionários e subcontratados
<b>GP22</b>	Falha no dimensionamento das equipes de trabalho
<b>GP23</b>	Adoção de inovações tecnologias
<b>GP24</b>	Métodos de execução inadequados ou diferentes do previsto na especificação técnica

Fonte: autor

#### 4.1.2.3 Seleção de dados das obras

Os dados de entrada selecionados para o modelo ANFIS constam na Seção 0 e para a RNA estão na Seção 3.3, ambas do APÊNDICE A.

#### 4.1.3 Desenvolvimento do artefato (C.4)

##### 4.1.3.1 Modelo ANFIS

O desenvolvimento do modelo compreendeu o teste de combinações dos seguintes hiper-parâmetros: funções de associação (triangular, gaussiana e sino); número de funções (2 e 3); épocas (15); otimizador (Adam); função de perda (“*mean squared error*” – MSE); métrica (“*mean absolute error*” – MAE); lote =1. A Tabela 3 e a Tabela 4 apresentam os resultados de todos os modelos desenvolvidos para as etapas de treinamento e teste. Em cor vermelha, encontram-se em destaque os todos os modelos que obtiveram acurácia na base de treinamento e de teste superior 85%, valor estabelecido como condicionante de projeto.

Tabela 3 - Modelos ANFIS desenvolvidos – resultados de treinamento e validação

Modelo	Função de associação		Época	Treinamento		
	Tipo	Qtd		Perda	Métrica	Acurácia
<b>ANFIS1</b>	<b>Triangular</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>0.0663</b>	<b>0.2054</b>	<b>97.51%</b>
ANFIS2	Triangular	3	15	0.1184	0.2621	80.10%
<b>ANFIS3</b>	<b>Gaussiana</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>0.0490</b>	<b>0.1671</b>	<b>100%</b>
<b>ANFIS4</b>	<b>Gaussiana</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>0.0473</b>	<b>0.1700</b>	<b>100%</b>

<b>ANFIS5</b>	<b>Sino</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>0.0438</b>	<b>0.1709</b>	<b>99%</b>
<b>ANFIS6</b>	<b>Sino</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>0.0455</b>	<b>0.1739</b>	<b>98.01%</b>

Fonte: autor

Tabela 4 - Modelos ANFIS desenvolvidos - resultados de teste

Modelo	Função de associação		Época	Teste		
	Tipo	Qtd		Perda	Métrica	Acurácia
<b>ANFIS1</b>	<b>Triangular</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>0.0822</b>	<b>0.2352</b>	<b>92.16%</b>
ANFIS2	Triangular	3	15	0.1698	0.3278	74.51%
<b>ANFIS3</b>	<b>Gaussiana</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>0.0661</b>	<b>0.2014</b>	<b>96.08%</b>
<b>ANFIS4</b>	<b>Gaussiana</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>0.064</b>	<b>0.2014</b>	<b>100.00%</b>
<b>ANFIS5</b>	<b>Sino</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>0.0566</b>	<b>0.2007</b>	<b>98.04%</b>
<b>ANFIS6</b>	<b>Sino</b>	<b>3</b>	<b>15</b>	<b>0.0720</b>	<b>0.2119</b>	<b>94.12%</b>

Fonte: autor

As previsões iniciais, tanto para treinamento como para teste, tiveram valores contínuos como padrão de saída. No entanto, o padrão dos valores alvo é discreto. Esta diferença no padrão resultou em uma acurácia (inicial) ZERO em todos os modelos. Para contornar este problema, foi feito um arredondamento nos dados de saída do modelo, o que elevou significativamente a acurácia dos modelos, tanto para dados de treinamento como de teste.

Com base nos dados apresentados na Tabela 3 e na Tabela 4, constatou-se que os valores de perda e métrica do Treinamento, Validação e Teste são semelhantes o que demonstra não haver problemas de *overfitting* e *underfitting*. Além disso, foram feitas as seguintes análises para cada modelo ANFIS:

- ANFIS1: Uma acurácia maior no Treinamento do que no Teste é esperada em razão da quantidade de dados em cada amostra. A acurácia acima de 90% para os dados de treinamento e teste representam uma excelente capacidade de generalização. O número de épocas (15) para o melhor ajuste de modelo é considerado um valor pequeno para o Aprendizado de Máquina, podendo chegar a um melhor ajuste com 10 épocas.
- ANFIS2: Uma acurácia maior no Treinamento do que no Teste é esperada em razão da quantidade de dados em cada amostra. A acurácia de 80.10% no treinamento e 74.51% no teste, apesar de serem boas, foram as piores entre todos os modelos. O número de épocas (15) para o melhor ajuste de modelo é considerado um valor pequeno para o Aprendizado de Máquina, podendo chegar a um melhor ajuste com 10 épocas.
- ANFIS3: Uma acurácia maior no Treinamento do que no Teste é esperada em razão da quantidade de dados em cada amostra. A acurácia de 100.00% no treinamento e 96.08% no

teste ficaram atrás do ANFIS4 e do ANFIS5. O número de épocas (15) para o melhor ajuste de modelo é considerado um valor pequeno para o Aprendizado de Máquina, podendo chegar a um melhor ajuste com 10 épocas.

- d. ANFIS4: A acurácia de 100.00% no treinamento e no teste foram as maiores obtidas entre todos os modelos. No entanto, a viabilidade da implementação prática do modelo é questionável, pois como será visto a frente, o tempo de processamento superou as 5hrs. O número de épocas (15) para o melhor ajuste de modelo é considerado um valor pequeno para o Aprendizado de Máquina, podendo chegar a um melhor ajuste com 10 épocas.
- e. ANFIS5: Uma acurácia maior no Treinamento do que no Teste é esperada em razão da quantidade de dados em cada amostra. A acurácia de 99.00% no treinamento e 98.04% no teste foram as maiores obtidas entre todos os modelos de duas funções de associação. O número de épocas (15) para o melhor ajuste de modelo é considerado um valor pequeno para o Aprendizado de Máquina, podendo chegar a um melhor ajuste com 12 épocas.
- f. ANFIS6: Uma acurácia maior no Treinamento do que no Teste é esperada em razão da quantidade de dados em cada amostra. A acurácia de 98.01% no treinamento e 94.12% no teste ficaram atrás do ANFIS3, ANFIS4 e do ANFIS5. O número de épocas (15) para o melhor ajuste de modelo é considerado um valor pequeno para o Aprendizado de Máquina, podendo chegar a um melhor ajuste com 10 épocas.

Cabe ressaltar que apesar de não ser um critério essencial na escolha do melhor método, o tempo médio de treinamento nos modelos com três funções de associação (5 horas) foi muito maior do que nos modelos com duas funções (15 minutos), sem que isso resultasse numa melhoria significativa do modelo. Também foi observado um acréscimo significativo na predição. Neste caso este tempo é crucial, pois esta rotina será chamada com grande frequência quando o código estiver em produção. Em função do valor prático exigido para o artefato, os modelos com três funções foram descartados na busca pelo melhor modelo.

#### 4.1.3.2 Modelo RNA

O desenvolvimento do modelo da RNA compreendeu o teste de combinações de: três arquiteturas (1, 2 e 3 camadas); três taxas de aprendizagem (0.025 / 0.0025 / 0.00025); estado randômico (2, 5, 6, 9, 10, 11); funções de ativação (*relu*, *softmax*, *sigmoid*, *tanh*); tamanho do lote (1, 5, 10); otimizador (Adam e SGD); e *k-fold* (3, 5, 10).

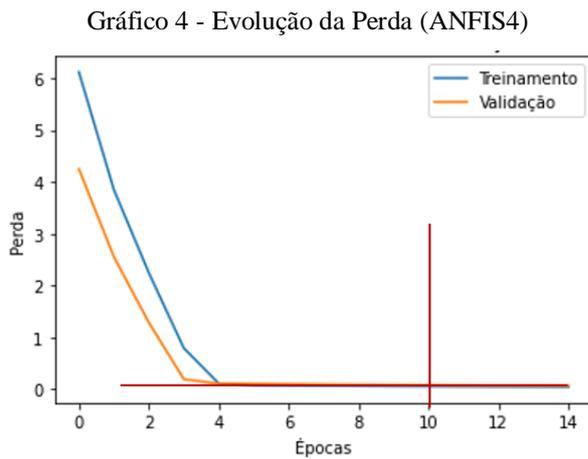
Com uso da função *GridSearchCV* da biblioteca em Python *scikit-learn*, o modelo testou 1.296 combinações, realizando 23.274 treinamentos, obtendo como melhor modelo (RNA1):

Nº de camadas ocultas (2); taxa de aprendizagem (0.025); estado randômico (5); função de ativação (*relu*); tamanho do lote (5); otimizador (Adam); e *k-fold* (5).

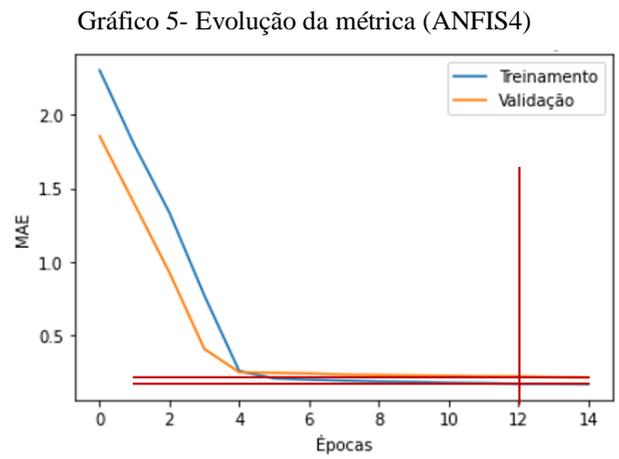
#### 4.1.4 Avaliação do artefato (C.5)

##### 4.1.4.1 Avaliação do Modelo ANFIS

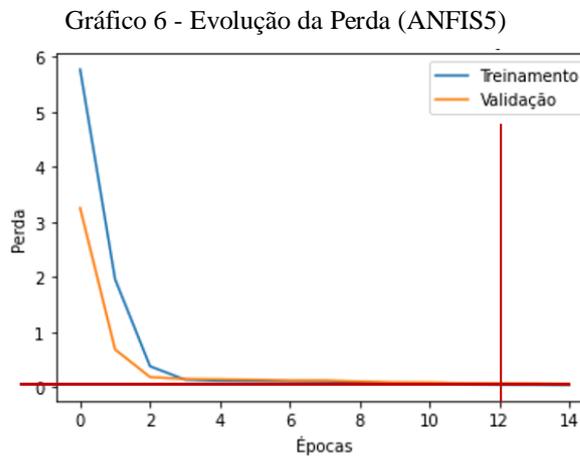
A avaliação do artefato foi feita para os modelos que apresentaram melhores resultados, isto é, ANFIS4 e ANFIS5. O ANFIS4 teve as melhores acurácias em dados de treinamento e de teste. Já o ANFIS5 teve um tempo de processamento muito menor do que o ANFIS4 e a acurácia com diferença máxima de 2%. O Gráfico 4 e o Gráfico 5 ilustram a evolução da perda e da métrica ao longo do treinamento e da validação do ANFIS4. Já o Gráfico 6 e o Gráfico 7 retratam o aprendizado do ANFIS5.



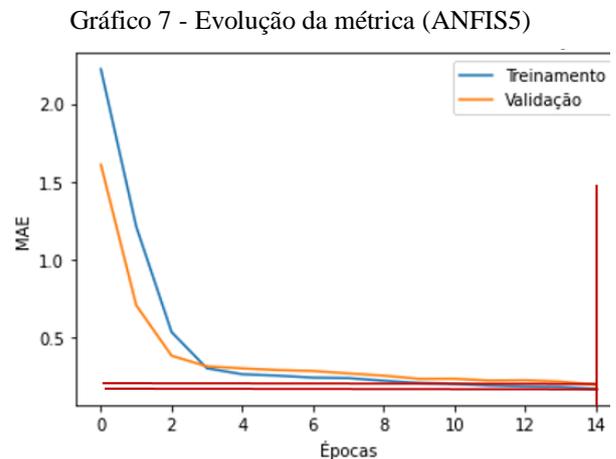
Fonte: autor



Fonte: autor



Fonte: autor



Fonte: autor

As linhas verticais vermelha nos gráficos indicam não haver uma sensível melhora nestes parâmetros à partir de 10 épocas (Gráfico 4), 12 épocas (Gráfico 5), 12 épocas (Gráfico 6) e 14 (Gráfico 7) o que indica que os treinamentos poderiam ser encerrado antes sem que o resultado final (acurácia do modelo) fosse alterado de forma significativa.

As Matrizes de confusão do ANFIS4 de treinamento e de teste não precisam ser apresentadas, pois a acurácia foi de 100%. Já as do ANFIS5 são apresentadas no Quadro 26 (treinamento) e no Quadro 27 (teste). Elas mostram uma pequena tendência do modelo para predição de NR = 2. Nos dados de teste, o modelo errou a predição em duas amostras, classificando como NR=2, quando deveria ser NR=1.

Quadro 26 - Avaliação do treinamento (ANFIS5)

TREINAMENTO						
Acurácia: 99.00%						
MATRIZ DE CONFUSÃO		Valores alvo				TOTAL
		1	2	3	4	
Valores de Predição	1	38	0	0	0	38
	2	2	45	0	0	47
	3	0	0	86	0	86
	4	0	0	0	30	30
TOTAL		40	45	86	30	201

Fonte: autor

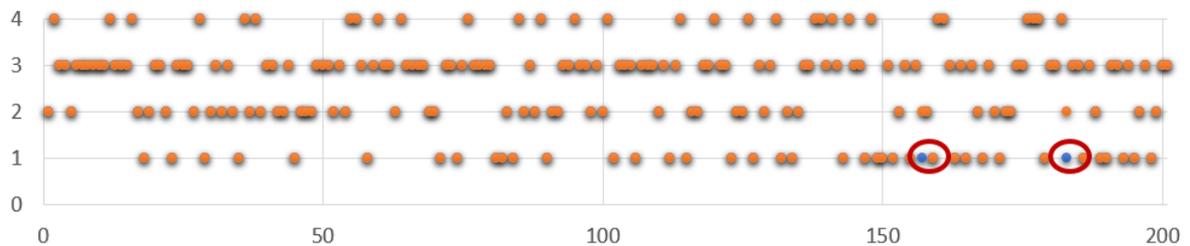
Quadro 27 - Avaliação do teste (ANFIS5)

TESTE						
Acurácia: 98.04%						
MATRIZ DE CONFUSÃO		Valores alvo				TOTAL
		1	2	3	4	
Valores de Predição	1	13	0	0	0	13
	2	1	11	0	0	12
	3	0	0	18	0	18
	4	0	0	0	8	8
TOTAL		14	11	18	8	51

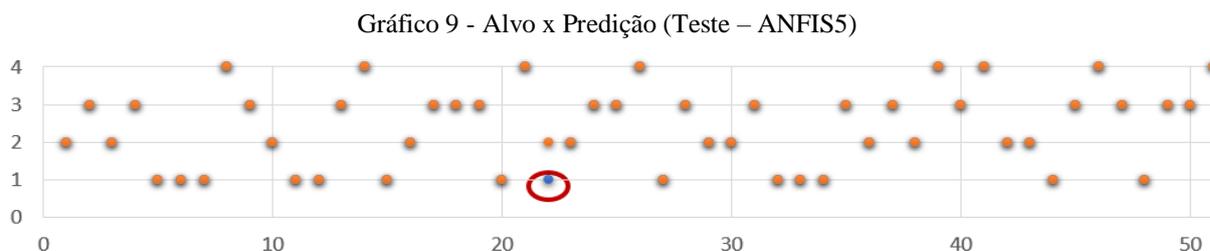
Fonte: autor

O Gráfico 8 e o Gráfico 9 ilustram os erros apresentados pelo modelo ANFIS5 nos dados de treinamento e teste, respectivamente. Sendo os pontos laranja a predição e os azuis os alvo. Os círculos vermelhos identificam os pontos que foram classificados de forma errada.

Gráfico 8 - Alvo x Predição (Treinamento – ANFIS5)



Fonte: autor



Fonte: autor

#### 4.1.4.2 Avaliação do Modelo RNA

Para os dados de teste, o melhor modelo (RNA14) obteve as seguintes métricas: MAE (65.8);  $R^2$  (93.00%); e  $R^2$  ajustado (92.71%). O passo seguinte, foi realizar a análise de sensibilidade. O paradigma inicial da análise foi o RNA1, em seguida foram excluídas, uma a uma, cada variável independente e treinando o modelo. A Tabela 5 apresenta os melhores modelos obtidos. A coluna  $C_{zi}$  apresenta a contribuição de cada variável para o  $R^2$  ajustado. O RNA7 apresentou métricas melhores do que o RNA1 e com um  $C_{zi}$  positivo, indicando que a ausência da variável Produtividade ( $m^2/dia$ ) melhorou o resultado final. Seguindo a metodologia apresentada na Figura 26, o RNA7 passou a ser o novo paradigma.

Tabela 5 - Análise de sensibilidade (Paradigma RNA1)

Modelo	Variável excluída	MAE	$R^2$	$R^2$ ajustado	$C_{zi}$
RNA1	NENHUMA	72.4	0.9104	0.9059	
RNA2	Nível de risco (NR)	76.4	0.8868	0.8816	-2.43%
RNA3	Área	78.5	0.8891	0.8840	-2.19%
RNA4	Valor Final	96.2	0.8692	0.8632	-4.27%
RNA5	Valor Unit	105.5	0.7941	0.7847	-12.12%
RNA6	Duração Final	166.9	0.5428	0.5218	-38.41%
RNA7	Prod( $m^2/dia$ )	68.1	0.9174	0.9136	0.77%
RNA8	Localização	109.4	0.8498	0.8442	-6.17%
RNA9	Grupo	108.8	0.7828	0.7737	-13.22%
RNA10	Tipo de Benfeitoria	92.8	0.8335	0.8259	-8.00%

Fonte: autor

Dando prosseguimento a análise sensibilidade uma nova rodada de treinamentos foi realizada. Desta vez, além da variável “Prod”, foram excluídas, uma a uma, cada variável independente e treinando o modelo. A Tabela 6 apresenta os melhores modelos obtidos. O RNA14 apresentou métricas melhores do que o RNA7 e com um  $C_{zi}$  positivo, indicando que a ausência das variáveis Produtividade ( $m^2/dia$ ) e valor unitário ( $RS/m^2$ ) melhoraram o resultado final. Seguindo a metodologia apresentada na Figura 26, o RNA14 passou a ser o novo paradigma.

Tabela 6 - Análise de sensibilidade (Paradigma RNA7)

Modelo	Variável excluída	MAE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Czi
<b>RNA7</b>	<b>Prod</b>	<b>68.1</b>	<b>0.9174</b>	<b>0.9136</b>	
RNA11	Prod + NR	72.8	0.9030	0.8989	-1.47%
RNA12	Prod + Área	100.4	0.8275	0.8204	-9.33%
RNA13	Prod + Valor Final	97.4	0.8674	0.8619	-5.18%
<b>RNA14</b>	<b>Prod + Valor Unit</b>	<b>65.8</b>	<b>0.9300</b>	<b>0.9271</b>	<b>1.35%</b>
RNA15	Prod + Duração Final	221.8	0.2242	0.1920	-72.16%
RNA16	Prod + Tipo de Benfeitoria	79.1	0.8993	0.8951	-1.85%
RNA17	Prod + Localização	79.3	0.8955	0.8921	-2.16%
RNA18	Prod + Grupo	102.9	0.8294	0.8231	-9.06%

Fonte: autor

Na última rodada de treinamento, além da variável “Prod” e da “Valor Unit”, foram excluídas, uma a uma, cada variável independente e treinando o modelo. A Tabela 7 apresenta os melhores modelos obtidos, porém nenhum apresentou resultados melhores do que o RNA14.

Tabela 7 - Análise de sensibilidade (Paradigma RNA14)

Modelo	Variável excluída	MAE	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	Czi
<b>RNA14</b>	<b>Prod+Valor Unit</b>	<b>65.8</b>	<b>0.9300</b>	<b>0.9271</b>	
RNA19	Prod+Valor Unit+NR	73.8	0.9096	0.9062	-2.09%
RNA20	Prod+Valor Unit+Área	164.1	0.6801	0.6682	-25.89%
RNA21	Prod+Valor Unit+Valor Final	75.3	0.9089	0.9055	-2.16%
RNA22	Prod+Valor Unit+Duração Final	260.4	0.0135	-0.0232	-95.02%
RNA23	Prod+Valor Unit+Localização	103.9	0.8423	0.8377	-8.93%
RNA24	Prod+Valor Unit+Grupo	92.2	0.8614	0.8568	-7.02%
RNA25	Prod+Valor Unit+Tipo de Benfeitoria	121.0	0.5124	0.4943	-43.28%

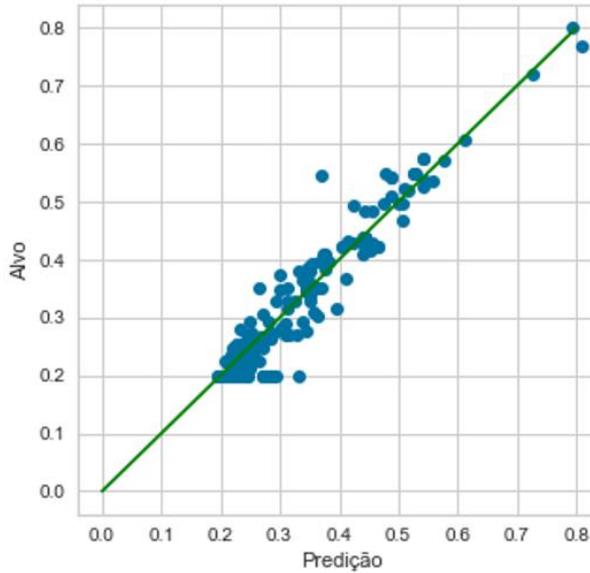
Fonte: autor

O RNA14 foi obtido com a exclusão de duas variáveis do conjunto inicial: Produtividade (m<sup>2</sup>/dia) e Valor Unitário (RS/m<sup>2</sup>). A queda de performance do modelo pode ser explicado pela multicolinearidade, que segundo NETO (2017) significa que duas ou mais variáveis independentes estão altamente correlacionadas entre si, contrariando o princípio da regressão de que não pode haver correlação forte entre variáveis independentes. Tanto Produtividade (m<sup>2</sup>/dia) como Valor Unitário (RS/m<sup>2</sup>) são combinações das variáveis área e duração, custo e área, respectivamente.

O RNA14 obteve as seguintes métricas: MAE (65.81); R<sup>2</sup> (93.00%); e R<sup>2</sup> ajustado (92.71%). O Gráfico 10 ilustra os resultados do treinamento e o Gráfico 11 os do teste. O

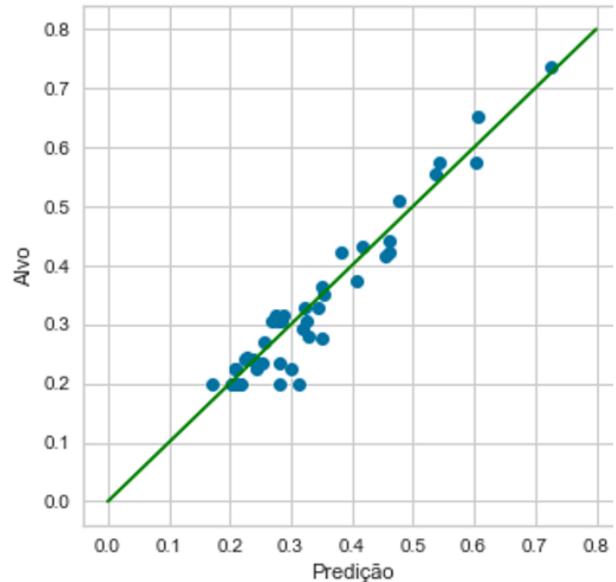
Gráfico de Predição x Alvo plota para cada amostra um par ordenado de valores alvo e predição. Quanto mais próximos estes pontos estiverem da bissetriz, melhor o modelo.

Gráfico 10 - Predição x Alvo  
(Dados de TREINAMENTO – RNA14)



Fonte: Spyder (2020)

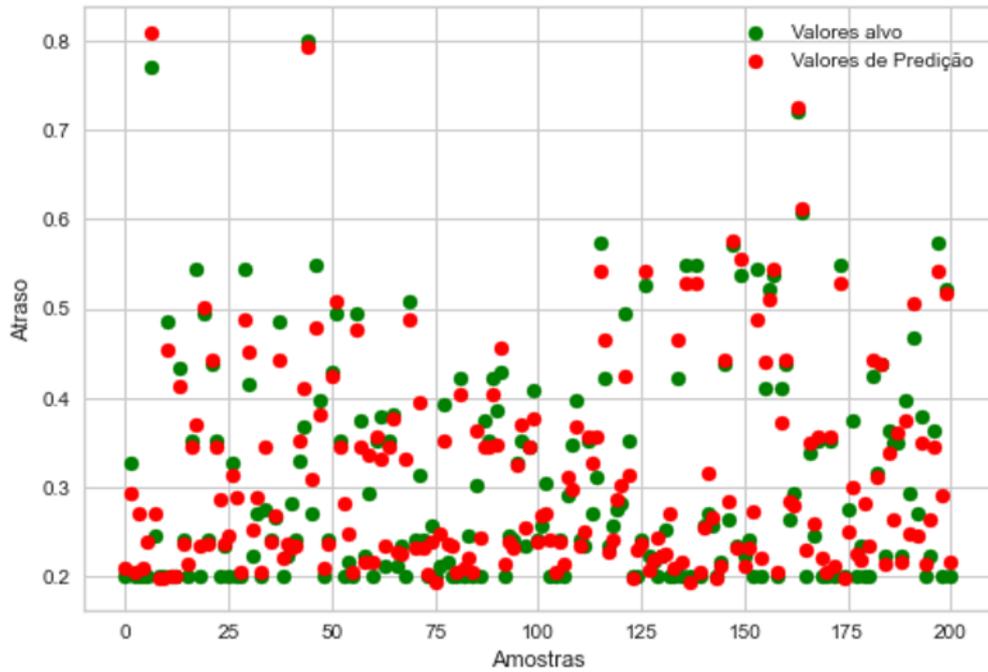
Gráfico 11 - Predição x Alvo  
(Dados de TESTE – RNA14)



Fonte: Spyder (2020)

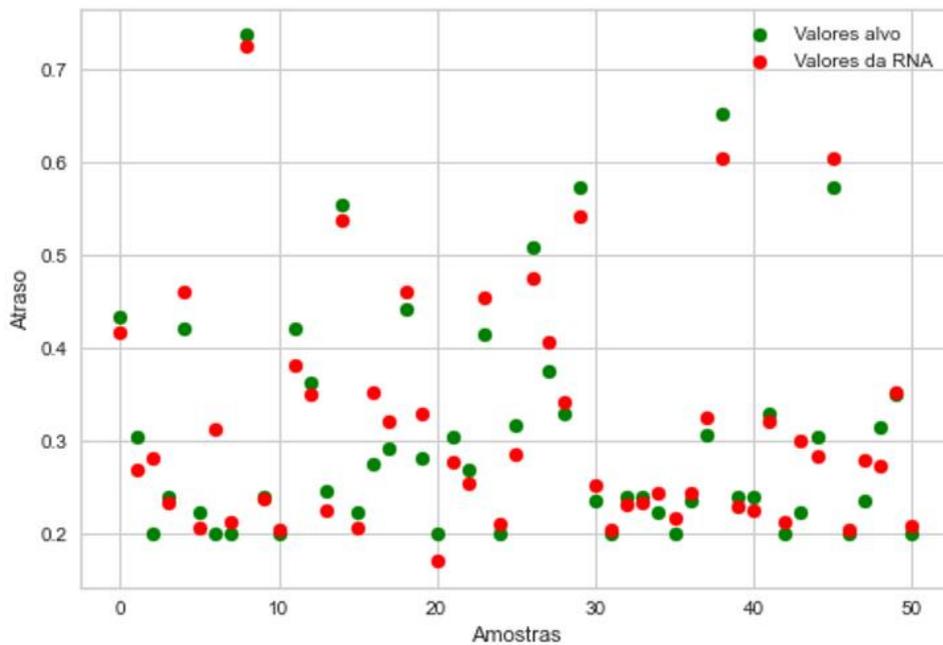
Os Gráficos de Acerto (12 e 13) são ilustrados pela para dados de treinamento e para dados de teste. Quanto mais próximos estiverem os pontos de alvo (bolas verdes) e de predição (bola vermelha), melhor o modelo.

Gráfico 12 - Gráfico de acerto (Dados de TREINAMENTO – RNA14)



Fonte: Spyder (2020)

Gráfico 13 - Gráfico de acerto (Dados de TESTE – RNA14)



Fonte: Spyder (2020)

#### 4.2 EXPLICITAÇÃO DAS APRENDIZAGENS

Nesta etapa do trabalho, seguindo a metodologia do DSR, serão apresentados aspectos que contribuíram para o sucesso do trabalho e os que se demonstraram como obstáculos para a

conclusão do trabalho. De forma que estas lições aprendidas possam contribuir para a geração de conhecimento de forma prática e acadêmica.

- a. A adoção da *Design Science Research* como base para a metodologia de pesquisa fornece um caminho mais estruturado para o desenvolvimento do artefato sob a ótica do valor prático e do valor acadêmico, ficando bem claro a relevância da pesquisa. Além disso, a metodologia destaca a necessidade de explicitar as aprendizagens e a generalização do modelo. Estas duas etapas são de grande importância para o repasse das lições aprendidas, indo além da produção de conhecimento, como forma de orientar futuras pesquisas quanto aos acertos e erros obtidos.
- b. Importância da base de dados: a quantidade, qualidade e confiabilidade dos dados interfere diretamente na escolha dos métodos de estimativa de probabilidade impacto.
- c. Acessibilidade à base de dados: o formato no qual os dados estão armazenados (impresso ou digital) e sua organização são fundamentais para a coleta e tratamento e para decisão de se trabalhar ou não com técnicas de *Big data*.
- d. Bibliotecas em Python: a falta de bibliotecas para o ANFIS exigiu um grande esforço de programação computacional.
- e. Colaboração dos especialistas: Na escolha de técnicas que exigem a contribuição de especialistas (Delphi, questionário e entrevistas) o tempo e a sensibilização são fatores críticos de sucesso.
- f. Background em programação: A curva de aprendizagem em programação computacional é lenta, o que torna o conhecimento e a experiência do pesquisador fundamentais.
- g. Arquitetura para desenvolvimento do modelo: O modelo ANFIS ou uma RNA podem ser desenvolvidos por meio de funções, de uma API ou de classes. Cada uma tem vantagens e desvantagens, principalmente com relação ao uso de ferramentas e bibliotecas de monitoramento. Sendo as funções e a API as mais amigáveis. Já o uso de classes (caso deste trabalho) requer maior esforço computacional e não permite uso de ferramentas com o *thensorboard* para acompanhamento gráfico do processo de aprendizagem em tempo real e visualização da arquitetura do modelo.

#### 4.3 GENERALIZAÇÃO DO MÉTODO

Com base na acurácia obtida para no modelo ANFIS5 (98.04%) sob a base de teste e no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ajustado de = 92.71%) obtido para o modelo da RNA14, fica comprovada a excelente capacidade de generalização do modelo para análises do

nível de risco e da estimativa de atraso em obras de edificações, podendo ter aplicação prática imediata com a criação de uma nova funcionalidade no Sistema OPUS do Exército Brasileiro.

Cabe ressaltar, a capacidade de generalização do Sistema híbrido *neuro-fuzzy* desenvolvido neste trabalho, permitirá que o conhecimento gerado em uma situação específica possa, posteriormente, ser aplicado a outras situações similares e que são enfrentadas por diversas organizações. É o caso de sua aplicação em outras tipologias de obras e até mesmo por outros órgãos da administração pública e empresas privadas, a depender dos Grupos e fatores de riscos mais relevantes e da base de dados disponível.

Por fim, esta generalização permite que haja o avanço do conhecimento, contribuindo para o fortalecimento da linha de Pesquisa de Gestão do Curso de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB).

## 5. CONCLUSÕES

Este trabalho discutiu o uso de um sistema híbrido *neuro-fuzzy* para análise de risco de atraso em obras militares, tendo como foco a classificação do nível de risco e o atraso esperado. Para tanto, o trabalho foi desenvolvido sob a base da *Design Science Research* de forma a desenvolver um artefato com foco no valor prático (para um caso específico) e o valor acadêmico (produção de conhecimento).

Ao final deste trabalho, percebe-se que o objetivo geral foi alcançado por meio dos objetivos específicos delineados no início. Os Grupos de fatores de riscos (GFR) associados com atraso em obras militares, primeiro objetivo específico, foram identificados com base em Revisões Sistemáticas da Literatura (1RSL e 2RSL) em conjunto com a Técnica Delphi. A partir de uma listagem dos principais GFR obtidos em produções científicas, 5 especialistas colaboraram na busca de um consenso sobre os principais GFR associados com atraso em obras militares.

Com relação ao segundo objetivo específico, os principais fatores de risco (FR) relacionados com atraso em obras militares foram selecionados com base nas 1RSL e 2RSL que resultou nos GFR e na colaboração de profissionais que gerenciam obras militares e de profissionais de empresas privadas que executam ou executaram obras militares. Estes grupos, receberam por meio de um questionário uma listagem com os GFR e os FR obtidos da literatura científica e foram solicitados a contribuir com outros FR que considerassem relevantes. Em seguida, 10 especialistas foram solicitados a votar nos FR mais significativos em cada GFR. Com base no Diagrama de Pareto, os FR mais importantes para obras militares foram em fim selecionados.

Quanto ao terceiro objetivo específico, a escolha por um Sistema híbrido *Neuro-fuzzy* para solução do problema foi baseada na busca por um artefato capaz de lidar com o conhecimento e a experiência de profissionais expressa de forma linguística e com uma base de dados de obras passadas disponíveis no Sistema OPUS, uma plataforma BIM para a Gestão de Obras Militares. Entre os tipos de Sistemas híbridos, a escolha por um modelo sequencial foi para que o nível de risco (NR) resultante do modelo ANFIS pudesse ser variável de entrada da RNA que estima o atraso esperado da obra.

A escolha do espaço amostral levou em consideração: obras concluídas entre 2009 e 2019; e obras de construção de edificações. A restrição de tipologia de obra não diminui o valor prático da pesquisa, pois as obras de edificações correspondem a 62% do total de obras no período definido para coleta de dados, e 78% do valor total das obras. Além disso, para evitar

problemas de micronumerosidade na base de dados em função de 25 subclasses de obras, as obras foram classificadas em operacional e assistencial, buscando refletir diferenças em padrões de projeto e construtivo.

Ainda com relação ao terceiro objetivo, no desenvolvimento do modelo ANFIS, a coleta de dados buscou, para cada obra do espaço amostral, subsídios que auxiliassem a definição da probabilidade, do impacto para cada GFR e do nível de risco global (NR). Cruzando a probabilidade e o impacto de cada GFR em uma matriz de discretização (probabilidade x impacto) com escala de Likert de 1-5, foi estabelecido o nível de risco (NR) de cada GFR.

Com a base de dados em escala linguística, foi feito um pré-processamento de Defuzzificação para transformar as variáveis *fuzzy* em *crispy*. Assim, por meio de uma função de associação triangular e do método de Centro de área, a base de dados de entrada do modelo ANFIS foi concluída.

O desenvolvimento do modelo ANFIS foi feito com a base de dados sendo dividida em treinamento (63.5%), validação (16.5%) e teste (20%). Para o treinamento foram testadas seis configurações de modelos sendo o melhor o ANFIS5, constituído por 2 funções de associação do tipo sino, 15 épocas, otimizador *Adam*, função de perda MSE, métrica MAE e tamanho do lote 1. O ANFIS obteve uma acurácia de 99% sobre a base de treinamento e 98.04% sobre a base de teste.

Concluindo o terceiro objetivo, foi desenvolvido com sucesso uma RNA para estimar o atraso esperado. O treinamento consistiu na divisão da base de dados em treinamento e teste, sendo utilizada a validação cruzada. Foram feitas 1296 configurações de modelos com base nas opções de arquitetura e de hiper-parâmetros, resultando em 23.274 treinamento. Por meio de uma análise de sensibilidade, foram testadas mais 32.325 configurações, num total de 161.625 treinamento. Ao final o melhor modelo foi o RNA14, que obteve um  $R^2$  de 93% e  $R^2$  ajustado de 92,71%. Com base na análise de sensibilidade, constatou-se que as variáveis Produtividade e Valor Unitário, inicialmente propostas, não contribuem para a formulação do modelo.

Além dos objetivos específicos, este trabalho também possuía condicionantes de pesquisa, isto é, demandas que fornecem ao artefato valor prático segundo a DSR. Em atendimento a estes delimitantes, o artefato foi desenvolvido em ambiente de desenvolvimento integrado (IDE), com linguagem de programação Python (aberta e gratuita). Esta condicionante tinha como objetivo que o artefato pudesse ser integrado no Sistema OPUS como uma API para a Gestão de risco de atraso em obras militares.

Ao final, cabe ressaltar, a relevância deste trabalho sob a perspectiva do valor prático (para um caso específico) e do valor acadêmico (produção de conhecimento).

Com relação ao valor prático, a acurácia obtida para no modelo ANFIS5 (98.04%) sob a base de teste e no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$  ajustado de = 92.71%) obtido para o modelo da RNA14, comprova a excelente capacidade do modelo para análises do nível de risco e da estimativa de atraso em obras de edificações, podendo ter aplicação prática imediata com a criação de uma nova funcionalidade no Sistema OPUS do Exército Brasileiro.

Ainda com relação ao valor prático, cabe ressaltar, a capacidade de generalização do Sistema híbrido *neuro-fuzzy* desenvolvido neste trabalho para outras classes de problemas, permitindo que o conhecimento gerado em uma situação específica possa ser aplicado à outras situações enfrentadas por diversas organizações públicas e privadas, com outras tipologias de riscos, projetos, até mesmo fora do Setor da Construção Civil.

Já com relação ao valor acadêmico, este trabalho tem como diferencial, o desenvolvimento de um Sistema híbrido *neuro-fuzzy*, quando a maioria dos trabalhos abordaram as técnicas de Aprendizado de Máquina de forma isolada. A grande vantagem de um sistema híbrido é poder explorar as potencialidades dentro de uma mesma solução (artefato).

Outra contribuição científica deste trabalho é o desenvolvimento do artefato em Python, uma linguagem de programação aberta e gratuita. Segundo a 8RSL e 9RSL realizadas, a maioria dos pesquisadores dessa classe de problemas utilizam softwares proprietários, tornando a programação em Python para desenvolvimento de soluções de Aprendizado de Máquina relacionada com risco em obras uma lacuna na produção científica.

Por fim, este trabalho contribuiu para o fortalecimento da linha de Pesquisa de Gestão do Curso de Pós-graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) da Universidade de Brasília (UnB).

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho aponta em duas direções como sugestões de trabalhos futuros. Uma voltada para o gerenciamento de risco em obras. Neste sentido, há possibilidade de novos trabalhos abordando outros tipos de riscos, relacionados com desempenho de um projeto, em especial, o custo e a qualidade, que junto com o prazo estão associados ao conceito do “*Triângulo de Ferro*”(ONG; WANG; ZAINON, 2018).

A outra direção de sugestões de pesquisas futuras está relacionada com as técnicas de aprendizado de máquina a serem desenvolvidas para solução de problemas relacionados com risco em obras. Para tanto, sugere-se:

- a. O aperfeiçoamento do artefato desenvolvido neste trabalho, um sistema híbrido *neuro-fuzzy*, com a implementação de outras funções de associação.

- b. Ainda no aperfeiçoamento do artefato desenvolvido, há a possibilidade de desenvolvimento de um modelo de análise de sensibilidade, capaz de avaliar de forma automática a importância de cada variável do modelo sobre o resultado final de outra. A importância do tema é salientada por HOREL e GIESECKE (2020).
- c. Além do sistema híbrido *neuro-fuzzy* desenvolvido, existem outras técnicas de aprendizado supervisionado (Quadro 35 da Seção 2.1.3 - APÊNDICE A) que podem ser estudadas com aplicação no gerenciamento de risco.
- d. Por outro lado, pode-se explorar soluções de aprendizado não supervisionado (Seção 2 do APÊNDICE B) para estudar a complexa relação entre os fatores de risco e propor agrupamentos e classificações.
- e. A integração da inteligência artificial com o *Building Information Modeling (BIM)* para explorar a dimensão de gestão de risco. Todas as fases do ciclo de vida de uma edificação possuem riscos associados e a inteligência artificial pode proporcionar ferramentas capazes de analisar grandes volumes de dados e informações subjetivas expressas de forma linguística.
- f. De forma mais específica a inteligência artificial poderia ser explorada na fase de execução da obra de forma associado com o cronograma do projeto e com o modelo, permitindo o gerenciamento de risco em cada fase da obra.

## 6. REFERÊNCIAS

A. MORETTIN, W. O. B. **Estatística Básica**. 6ª Edição ed. São Paulo/SP: Saraiva, 2010. 978-85-02-08177-2.

ABD EL-RAZEK, M. E.; BASSIONI, H. A.; MOBARAK, A. M. Causes of delay in building construction projects in Egypt. **Journal of Construction Engineering and Management**, 134, n. 11, p. 831-841, 2008. Article.

ABDEL-KHALEK, H.; AZIZ, R.; KAMEL, H. **Risk and Uncertainty Assessment Model in Construction Projects Using Fuzzy Logic**. 2016.

ABNT. ABNT NBR ABNT 14653 - Avaliação de bens - Parte 2: Imóveis urbanos. Brasil 2011.

ABNT. NBR ISO 31010:2012 - Gestão de riscos — Técnicas para o processo de avaliação de riscos. Rio de Janeiro - RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas 2012.

ABNT, A. B. D. N. T. ABNT NBR ISO 31000:2018 - Gestão de riscos - Diretrizes. 2018.

ABU SALEM, Z. T.; SULEIMAN, A. Risk factors causing time delay in the Jordanian construction sector. **International Journal of Engineering Research and Technology**, 13, n. 2, p. 307-315, 2020. Article.

ADAM, A.; JOSEPHSON, P. E. B.; LINDAHL, G. Aggregation of factors causing cost overruns and time delays in large public construction projects: Trends and implications. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 24, n. 3, p. 393-406, 2017. Article.

AFZAL, F.; YUNFEI, S.; NAZIR, M.; MAHMOOD, S. A review of artificial intelligence based risk assessment methods for capturing complexity-risk interdependencies: Cost overrun in construction projects. **International Journal of Managing Projects in Business**, ahead-of-print, 09/13 2019.

AGYEKUM-MENSAH, G.; KNIGHT, A. D. The professionals' perspective on the causes of project delay in the construction industry. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 24, n. 5, p. 828-841, 2017. Article.

AIBINU, A.; ODEYINKA, H. Construction Delays and Their Causative Factors in Nigeria. **Journal of Construction Engineering and Management-asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE**, 132, 07/01 2006.

AIBINU, A. A.; ODEYINKA, H. A. Construction delays and their causative factors in nigeria. **Journal of Construction Engineering and Management**, 132, n. 7, p. 667-677, 2006. Article.

AKINYOKUN, O.; INYANG, U. Experimental study of neuro-fuzzy-genetic framework for oil spillage risk management. **Artificial Intelligence Research**, 2, 05/24 2013.

AKINYOKUN, O.; INYANG, U.; AKPAN, E. Implementation of a Hybridized Machine Learning Framework for Flood Risk Management. *In*, 2020. p. 268-291.

AKOGBE, R. K. T. M.; FENG, X.; ZHOU, J. Importance and ranking evaluation of delay factors for development construction projects in Benin. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 17, n. 6, p. 1213-1222, 2013. Article.

AL-KHARASHI, A.; SKITMORE, M. Causes of delays in Saudi Arabian public sector construction projects. **Construction Management and Economics**, 27, n. 1, p. 3-23, 2009. Article.

ALAGHBARI, W.; KADIR, M. R. A.; SALIM, A.; ERNAWATI. The significant factors causing delay of building construction projects in Malaysia. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 14, n. 2, p. 192-206, 2007. Article.

ALAVI, A. H.; GANDOMI, A. H. Big data in civil engineering. **Automation in Construction**, 79, p. 1-2, 2017. Editorial.

ALI, T.; STEWART, R.; QURESHI, S. Evaluating Risk Management Practices in the Pakistani Construction Industry: The Current State of Play. 01/01 2007.

ALKASS, S.; MAZEROLLE, M.; HARRIS, F. Construction delay analysis techniques. **Construction Management and Economics**, 14, n. 5, p. 375-394, 1996. Article.

ALTURKI, A., 2012, English, **A design science research roadmap**. Pacific Asia Conference on Information Systems. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84928174816&partnerID=40&md5=b272645ff9d7702758259246e95cf7a7>.

ANSAH, R. H.; SOROOSHIAN, S. 4P delays in project management. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 25, n. 1, p. 62-76, 2018. Article.

ARAÚJO, L. G. **Quantificação da Influência dos Parâmetros da Produtividade da Mão de Obra na Construção Civil por meio de Sistemas Fuzzy de Inferência**. 2019. 182 f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, - UnB, Brasília, DF.

ARLOT, S.; CELISSE, A. A Survey of Cross Validation Procedures for Model Selection. **Statistics Surveys**, 4, 07/27 2009.

ASADI, P.; ZEIDI, J.; MOJIBI, T.; YAZDANI CHAMZINI, A. *et al.* Project risk evaluation by using a new fuzzy model based on Elena guideline. **Journal of Civil Engineering and Management**, 24, p. 284-300, 06/29 2018.

ASSAF, S. A.; AL-HEJJI, S. Causes of delay in large construction projects. **International Journal of Project Management**, 24, n. 4, p. 349-357, 2006. Article.

ASSAF, S. A.; AL-KHALIL, M.; AL-HAZMI, M. Causes of delay in large building construction projects. **Journal of Management in Engineering**, 11, n. 2, p. 45-50, 1995. Article.

AURÉLIO, M. V., M.;Lopes, C. H. **Descoberta de Conhecimento e Mineração de Dados**. Rio de Janeiro, Brasil. 1999.

AXELOS; OFFICE, S. **Managing Successful Projects with PRINCE2**. Stationery Office, 2017. 9780113315338.

AXELSSON, J. Model based systems engineering using a continuous-time extension of the Unified Modeling Language (UML). **Systems Engineering**, 5, n. 3, p. 165-179, 2002. Article.

AZIZ, R. F. Ranking of delay factors in construction projects after Egyptian revolution. **Alexandria Engineering Journal**, 52, n. 3, p. 387-406, 2013. Article.

BAFANDEH MAYVAN, B.; RASOOLZADEGAN, A.; GHAVIDEL YAZDI, Z. The state of the art on design patterns: A systematic mapping of the literature. **Journal of Systems and Software**, 125, p. 1339-1351, 2017. Article.

BALLESTEROS-PÉREZ, P.; CEREZO-NARVÁEZ, A.; OTERO-MATEO, M.; PASTOR-FERNÁNDEZ, A. *et al.* Performance comparison of activity sensitivity metrics in schedule risk analysis. **Automation in Construction**, 106, 2019. Article.

BALOI, D.; PRICE, A. Modeling global risk factors affecting construction cost performance. **International Journal of Project Management**, 21, p. 261-269, 05/01 2003.

BALTA, S.; BIRGONUL, M.; DIKMEN, I. Buffer Sizing Model Incorporating Fuzzy Risk Assessment: Case Study on Concrete Gravity Dam and Hydroelectric Power Plant Projects. **ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering**, 4, p. 04017039, 03/01 2018.

BAO, Y.; LI, H. Artificial Intelligence for civil engineering. **Tumu Gongcheng Xuebao/China Civil Engineering Journal**, 52, n. 5, p. 1-11, 2019. Article.

BARROS, L. B. **APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NO CONTEXTO DE ESTIMATIVA DE CUSTOS DE CONSTRUÇÃO DE RODOVIAS**. 2019. 106 f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF.

BASHIR, H.; OJIAKO, U.; MOTA, C. Modeling and Analyzing Factors Affecting Project Delays Using an Integrated Social Network-Fuzzy MICMAC Approach. **EMJ - Engineering Management Journal**, 2019. Article.

BAYAZIT, N. Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research. **Design Issues**, 20, p. 16-29, 12/01 2004.

BEKR, G. A. Causes of delay in public construction projects in Iraq. **Jordan Journal of Civil Engineering**, 9, n. 2, p. 149-162, 2015. Article.

BELTRÃO, L.; CARVALHO, M. Prioritizing Construction Risks Using Fuzzy AHP in Brazilian Public Enterprises. **Journal of Construction Engineering and Management**, 145, 02/01 2019.

BERRAR, D. Cross-Validation. *In*, 2018.

BHIH, M.; HEGAZY, T. Improving Concurrency Assessment and Resolving Misconceptions about But-For Delay Analysis Technique. **Journal of Legal Affairs and Dispute Resolution in Engineering and Construction**, 12, n. 2, 2020. Article.

BILAL, M.; OYEDELE, L. O.; QADIR, J.; MUNIR, K. *et al.* Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends. **Advanced Engineering Informatics**, 30, n. 3, p. 500-521, 2016. Review.

BILGIN, G.; DIKMEN, I.; BIRGONUL, M. T. An ontology-based approach for delay analysis in construction. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 22, n. 2, p. 384-398, 2018. Article.

BORDOLI, D. W.; BALDWIN, A. N. A methodology for assessing construction project delays. **Construction Management and Economics**, 16, n. 3, p. 327-337, 1998. Article.

BRAIMAH, N. Understanding construction delay analysis and the role of preconstruction programming. **Journal of Management in Engineering**, 30, n. 5, 2014. Article.

BUDAYAN, C.; DIKMEN, I.; TALAT BIRGONUL, M.; GHAZIANI, A. A Computerized Method for Delay Risk Assessment Based on Fuzzy Set Theory using MS Project™. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 22, n. 8, p. 2714-2725, 2018. Article.

BUNNI, N. **Risk and insurance in construction, second edition.** 2003. 1-484 p. 9780203476543.

C.LOGANATHAN; K.V.GIRIJA. Investigations on Hybrid Learning in ANFIS. **International Journal of Engineering Research and Applications**, 4, n. 10, p. 31-37, // 2014.

CAGDAS, V.; STUBKJÆR, E. Design research for cadastral systems. **Computers, Environment and Urban Systems**, 35, p. 77-87, 01/31 2011.

CALDEIRA, D. M. **Diretrizes para o Gerenciamento de Riscos em Contratos de Obras Públicas: Estudo de Caso da Contratação Integrada.** 2015. 168 f. Dissertação de Mestrado

em Estruturas e Construção Civil (Mestre) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF.

CARR, V.; TAH, J. H. M. A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system. **Advances in Engineering Software**, 32, n. 10, p. 847-857, 2001/10/01/ 2001.

CHAKRABARTI, A. A course for teaching design research methodology. **Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing: AIEDAM**, 24, n. 3, p. 317-334, 2010. Article.

CHAN, D. W. M.; KUMARASWAMY, M. M. Reasons for delay in civil engineering projects -the case of hong kong. **HKIE Transactions Hong Kong Institution of Engineers**, 2, n. 3, p. 1-8, 1995. Article.

CHENG, M. Y.; WU, Y. F.; WU, Y. W.; NDURE, S. Fuzzy Bayesian schedule risk network for offshore wind turbine installation. **Ocean Engineering**, 188, 2019. Article.

CHOLLET, F. **Deep Learning with Python**. Manning Publications Company, 2017. 9781617294433.

CHOUDHRY, R. M.; ASLAM, M. A.; ARAIN, F. M. Cost and schedule risk analysis of bridge construction in Pakistan: Establishing risk guidelines. **Journal of Construction Engineering and Management**, 140, n. 7, 2014. Article.

CORDEIRO ARAUJO, A. M. **Gerenciamento de Riscos em Contrato de Obras Públicas- Estudo de Caso: Serviços de Reforma em Imóveis Funcionais**. 2012. 181 f. Dissertação de Mestrado em Estruturas e Construção Civil (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília – UnB, Brasília-DF.

COSO. Enterprise Risk Management — Integrated Framework. : Committee of Sponsoring Organization of the Treadway Commission 2004.

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**, 33, n. 8, p. 1744-1754, 2015/11/01/ 2015.

COUTINHO, L. S. d. A. L.; DUARTE, A. A. A. M.; NEVES, R. M. d.; COUTINHO NETO, B. *et al*. Modelagem do tempo de execução de obras civis: estudo de caso na Universidade Federal do Pará %J Ambiente Construído. 12, p. 243-256, 2012.

DA SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A. J. S. P. A. Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas curso prático. 2010.

DAGLIATI, A.; MARINI, S.; SACCHI, L.; COGNI, G. *et al.* Machine Learning Methods to Predict Diabetes Complications. **Journal of Diabetes Science and Technology**, 12, n. 2, p. 295-302, 2018. Article.

DANTAS, R. A. **Engenharia de Avaliações: uma introdução à metodologia científica**. Pini, 1998. 8572660992.

DARKO, A.; CHAN, A.; ADABRE, M.; EDWARDS, D. *et al.* Artificial intelligence in the AEC industry: Scientometric analysis and visualization of research activities. **Automation in Construction**, 01/06 2020.

DE PÁDUA BRAGA, A. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. LTC Editora, 2007. 9788521615644.

DELNAZ, A.; RAKHSHANDEHROO, G.; NIKOO, M. R. Confined Aquifer's Hydraulic Parameters Estimation by a Generalized Regression Neural Network. **Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering**, 09/11 2018.

DERAKHSHANFAR, H.; ELMUALIM, A.; OCHOA, J. J.; MAYER, W. *et al.*, 2019, English, **Projects risk management using artificial neural networks based on lessons learned**. CRIOCM 2017 Organising Committee. 69-76. Disponível em: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85069867101&partnerID=40&md5=d39e6a3850504e6955ee3bad431050c2>.

DERAKHSHANFAR, H.; OCHOA, J. J.; KIRYTOPOULOS, K.; MAYER, W. *et al.* A cartography of delay risks in the Australian construction industry: impact, correlations and timing. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 2020. Article.

DERAKHSHANFAR, H. E., A. Ochoa, J.J. Projects risk management using artificial neural networks based on lessons learned. *In: Proceedings of 22nd International Conference on Advancement of Construction Management and Real Estate, 2017, CRIOCM 2017 Organising Committee*, p. 69-76. Conference Paper.

DEY, P. Dey, P.K.: Decision support system for risk management: a case study. *Management Decision* 39(8), 634-649. **Management Decision**, 39, 10/01 2001.

DIKMEN, I.; BIRGONUL, M.; HAN, S. Using fuzzy risk assessment to rate cost overrun risk in international construction projects. **International Journal of Project Management - INT J PROJ MANAG**, 25, p. 494-505, 07/01 2007.

DRESCH, A. **Design Science Research como Artefatos Metodológicos para Engenharia de Produção**. Orientador: LACERDA, P. D. D. P. 2013. 184 f. Dissertação (Mestre) - Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS.

DUARTE, G.; GOLIATT, L.; CAPRILES, P.; LEMONGE, A. Comparison of machine learning techniques for predicting energy loads in buildings. **Ambiente Construído**, 17, p. 103-115, 07/01 2017.

E DIEKMANN, J. Risk analysis: lessons from artificial intelligence. **International Journal of Project Management**, 10, n. 2, p. 75-80, 1992. Article.

EBRAT, M.; GHODSI, R. Construction project risk assessment by using adaptive-network-based fuzzy inference system: An empirical study. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 18, p. 1213-1227, 06/01 2014.

EBTEHAJ, I.; BONAKDARI, H.; ES-HAGHI, M. S. Design of a Hybrid ANFIS–PSO Model to Estimate Sediment Transport in Open Channels. **Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering**, 43, n. 4, p. 851-857, 2019/12/01 2019.

EEKELS, J.; ROOZENBURG, N. F. M. A methodological comparison of the structures of scientific research and engineering design: their similarities and differences. **Design Studies**, 12, n. 4, p. 197-203, 1991. Article.

EKANAYAKE, E. M. K.; PERERA, B. A. K. S. Appropriate delay analysis techniques to analyse delays in road construction projects in Sri Lanka. **Built Environment Project and Asset Management**, 6, n. 5, p. 521-534, 2016. Article.

EL-HIRI, M.; EN-NADI, A.; CHAFI, A. Suppliers selection in consideration of risks by a neural network. **International Journal of Engineering, Transactions A: Basics**, 32, n. 10, p. 1454-1463, 2019. Article.

ELHAG, T.; BOUSSABAIN, A. H. Tender price estimation using artificial neural networks. II: Modelling. **J. Finan. Mange. Property Constr.**, 7, p. 49-64, 01/01 2002.

FARIDI, A. S.; EL-SAYEGH, S. M. Significant factors causing delay in the UAE construction industry. **Construction Management and Economics**, 24, n. 11, p. 1167-1176, 2006. Article.

FARROW, T. Developments in the Analysis of Extensions of Time. **Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice - J PROF ISSUE ENG EDUC PRACT**, 133, 07/01 2007.

FAYEK, A. R. Fuzzy Logic and Fuzzy Hybrid Techniques for Construction Engineering and Management. **Journal of Construction Engineering and Management**, 146, n. 7, 2020. Article.

FEDISTIA, R.; MUSDI, E.; YERIZON. Advantages and challenges of the flipped classroom application – Based learning in enhancing 10th grade senior high school students' reasoning ability. **International Journal of Scientific and Technology Research**, 8, n. 8, p. 916-919, 2019. Article.

FINKE, M. R. Window analyses of compensable delays. **Journal of Construction Engineering and Management**, 125, n. 2, p. 96-100, 1999. Article.

FISCHER, C. G., S. 6th International Conference on Design Science Research in Information Systems and Technology, DESRIST 2011. VITHARANA, P.; JAIN, H., *et al.* : Springer Verlag. 6629 LNCS 2011.

FRAGIADAKIS, N. G.; TSOUKALAS, V.; PAPAZOGLU, V. An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry. **Safety Science**, 63, p. 226–235, 03/01 2014.

FRANÇA, D. d. **Modelagem de um adaptative neuro fuzzy inference system para análise de risco em projetos**. Orientador: LIMA, D. M. B. d. F. 2016. 103 f. Masters (Masters) -, Universidade Federal da Paraíba.

FURTADO, M. I. V. **Redes neurais artificiais : uma abordagem para sala de aula**. 1ª Edição ed. Ponta Grossa - PR: Atena Editora, 2019. 105 p. 978-85-7247-326-2

FURTADO MAUÉS, L.; SANTANA, W.; SANTOS, P.; DAS NEVES, R. *et al.* Construction delays: a case study in the Brazilian Amazon. **Ambiente Construído**, 17, p. 167-181, 07/01 2017.

GALLANT, S. I.; GALLANT, S. I. **Neural network learning and expert systems**. MIT press, 1993. 0262071452.

GE, Z.; SONG, Z.; DING, S.; HUANG, B. Data Mining and Analytics in the Process Industry: The Role of Machine Learning. **IEEE Access**, PP, p. 1-1, 09/26 2017.

GÉRON, A. **Mãos à Obra: Aprendizado de Máquina com Scikit-Learn & TensorFlow**. Alta Books, 2019. 9788550809021.

GHORBANZADEH, O.; BLASCHKE, T.; GHOLAMNIA, K.; ARYAL, J. Forest Fire Susceptibility and Risk Mapping Using Social/Infrastructural Vulnerability and Environmental Variables. **Fire**, 2, p. 50, 09/03 2019.

GIANNAKOS, L.; XENIDIS, Y. Risk Assessment in Construction Projects with the Use of Neural Networks. *In*, 2018. p. 1563-1570.

GOLMOHAMMADI, D. Neural network application for fuzzy multi-criteria decision making problems. **International Journal of Production Economics**, 131, p. 490-504, 06/01 2011.

GOMIDE, F., 2012, **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas: curso prático**.

GONDIA, A.; SIAM, A.; EL-DAKHAKHNI, W.; NASSAR, A. H. Machine Learning Algorithms for Construction Projects Delay Risk Prediction. **Journal of Construction Engineering and Management**, 146, n. 1, 2020. Article.

GOTHAND, K. D. Schedule delay analysis: Modified windows approach. **Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)**, 45, n. 9, p. 18-23, 2003. Article.

GOUVÊA DA COSTA, S. E. F., A.; MELLO, C. H. P.; NAKANO, D. N.; LIMA, E. P.; TURRIONI, J. B.; HO. L. L.; MORABITO, R.; MARTINS, R. A.; SOUZA, R.; PUREZA, V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2 ed. Rio de Janeiro: ELSEVIER: ABEPRO, 2012. 142 p.

GREGOR, S.; JONES, D. The Anatomy of a Design Theory. **Journal of the Association for Information Systems**, 8, p. 312, 05/01 2007.

GUNDUZ, M.; NIELSEN, Y.; OZDEMIR, M. Fuzzy Assessment Model to Estimate the Probability of Delay in Turkish Construction Projects. **Journal of Management in Engineering**, 31, p. 04014055, 09/07 2013.

GUNDUZ, M.; NIELSEN, Y.; OZDEMIR, M. Fuzzy assessment model to estimate the probability of delay in Turkish construction projects. **Journal of Management in Engineering**, 31, n. 4, 2015. Article.

GÜNDÜZ, M.; NIELSEN, Y.; ÖZDEMİR, M. Quantification of delay factors using the relative importance index method for construction projects in Turkey. **Journal of Management in Engineering**, 29, n. 2, p. 133-139, 2013. Article.

GUPTA, M. M.; SOLO, A. M. Important New Terms and Classifications in Uncertainty and Fuzzy Logic. *In: Fifty Years of Fuzzy Logic and its Applications*: Springer, 2015. p. 153-168.

HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN. **The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction**. Springer, 2009. 9780387848846.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. The elements of statistical learnin. : New York: Springer 2009.

HAYKIN, S. **Neural networks and learning machines**. Pearson, 1999.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Bookman Editora, 2007. 8577800865.

HAYKIN, S. S. **Neural Networks and Learning Machines**. Pearson, 2009. 9780131293762.

HEGAZY, T.; ZHANG, K. Daily windows delay analysis. **Journal of Construction Engineering and Management**, 131, n. 5, p. 505-512, 2005. Article.

HEGDE, J.; ROKSETH, B. Applications of machine learning methods for engineering risk assessment – A review. **Safety Science**, 122, 2020. Review.

HEVNER, A. A Three Cycle View of Design Science Research. **Scandinavian Journal of Information Systems**, 19, 01/01 2007.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. Design science in information systems research. **MIS Quarterly: Management Information Systems**, 28, n. 1, p. 75-105, 2004. Article.

HOREL, E.; GIESECKE, K. J. J. o. M. L. R. Significance Tests for Neural Networks. 21, n. 227, p. 1-29, 2020.

HSUEH, S.-L.; PERNG, Y.-H.; YAN, M.-R.; LEE, J.-R. On-line multi-criterion risk assessment model for construction Joint Ventures in China. **Automation in Construction - AUTOM CONSTR**, 16, p. 607-619, 08/01 2007.

HUANG, Y.; LI, J.; FU, J. Review on application of artificial intelligence in civil engineering. **CMES - Computer Modeling in Engineering and Sciences**, 121, n. 3, p. 845-875, 2019. Review.

ISLAM, M. S.; NEPAL, M. P.; SKITMORE, M.; ATTARZADEH, M. Current research trends and application areas of fuzzy and hybrid methods to the risk assessment of construction projects. **Advanced Engineering Informatics**, 33, p. 112-131, 2017/08/01/ 2017.

JANG; SUN; MIZUTANI. **Neuro-fuzzy and Soft Computing: A Computational Approach to Learning and Machine Intelligence**. Prentice Hall, 1997. 9780132610667.

JANG, J.-S. ANFIS Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System. **Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on**, 23, p. 665-685, 06/01 1993.

JANG, J.-S.; SUN, C.-T. Neuro-Fuzzy Modeling and Control. **Proceedings of the IEEE**, 83, p. 378-406, 04/01 1995.

JANG, J.-S.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E. **In Neuro-Fuzzy and Soft Computing**. 1997.

JHA, K.; IYER, K. Factors affecting cost performance: Evidence from Indian construction projects. **International Journal of Project Management**, 23(4), 283-295. **International Journal of Project Management**, 23, p. 283-295, 05/01 2005.

JHAWAR, A.; BAJPAI, P. Applying FMEA and ISM technique to identify factors causing delay in road construction projects. **International Journal of Applied Engineering Research**, 9, n. 5 SPEC. ISSUE, p. 517-524, 2014. Article.

JIN, J.; LI, Z.; ZHU, L.; TONG, X. *et al.* Application of BP Neural Network in Risk Evaluation of Railway Construction. **Journal of Railway Engineering Society**, 36, n. 3, p. 103-109, 2019. Article.

JIN, X.-H.; ZHANG, G. Modelling optimal risk allocation in PPP projects using artificial neural networks. **International Journal of Project Management**, 29, n. 5, p. 591-603, 2011/07/01/2011.

KADRY, M.; OSMAN, H.; GEORGY, M. Causes of Construction Delays in Countries with High Geopolitical Risks. **Journal of Construction Engineering and Management**, 143, n. 2, 2017. Article.

KANGARI, R. Business failure in construction industry. **Journal of Construction Engineering and Management**, 114, n. 2, p. 172-190, 1988. Article.

KANGARI, R.; RIGGS, L. Construction risk assessment by linguistics. **Engineering Management, IEEE Transactions on**, 36, p. 126-131, 06/01 1989.

KAZAZ, A.; ULUBEYLI, S.; TUNCBILEKLI, N. A. Causes of delays in construction projects in Turkey. **Journal of Civil Engineering and Management**, 18, n. 3, p. 426-435, 2012. Article.

KETKAR, N. **Deep Learning with Python**. Springer, 2017.

KHOSHGOFTAR, M.; BAKAR, A. H. A.; OSMAN, O. Causes of delays in Iranian construction projects. **International Journal of Construction Management**, 10, n. 2, p. 53-69, 2010. Article.

KIKWASI, G. Causes and Effects of Delays and Disruptions in Construction Projects in Tanzania. **Australasian Journal of Construction Economics and Building - Conference Series**, 1, p. 52, 02/05 2013.

KIM, J. I.; FISCHER, M.; KAM, C. Generation and evaluation of excavation schedules for hard rock tunnels in preconstruction and construction. **Automation in Construction**, 96, p. 378-397, 2018. Article.

KIM, M. H.; LEE, E. B. A forecast model for the level of engineering maturity impact on contractor s procurement and construction costs for offshore EPC megaprojects. **Energies**, 12, n. 12, 2019. Article.

KIM, Y.; ROH, S.; KIM, W.; LEE, J. *et al.* Case study of risk management for high-rise buildings using a control chart: Schedule management of the Busan M tower residential apartment complex. **International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development**, 10, n. 3, p. 136-146, 2019. Article.

KITCHENHAM, B. A.; BUDGEN, D.; PEARL BRERETON, O. Using mapping studies as the basis for further research - A participant-observer case study. **Information and Software Technology**, 53, n. 6, p. 638-651, 2011. Article.

KOHAVI, R. A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection. 14, 03/03 1995.

KONGCHASING, N.; SUA-IAM, G. The Major Causes of Construction Delays Identified Using the Delphi Technique: Perspectives of Contractors and Consultants in Thailand. **International Journal of Civil Engineering**, 2020. Article.

KOULINAS, G. K.; XANTHOPOULOS, A. S.; TSILIPIRAS, T. T.; KOULOURIOTIS, D. E. Schedule delay risk analysis in construction projects with a simulation-based expert system. **Buildings**, 10, n. 8, 2020. Article.

KOUSHKI, P. A.; AL-RASHID, K.; KARTAM, N. Delays and cost increases in the construction of private residential projects in Kuwait. **Construction Management and Economics**, 23, n. 3, p. 285-294, 2005. Article.

KUMARASWAMY, M. M.; CHAN, D. W. M. Contributors to construction delays. **Construction Management and Economics**, 16, n. 1, p. 17-29, 1998. Article.

LACERDA, D. P.; DRESCH, A.; PROENÇA, A.; JÚNIOR, J. A. V. A. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & Produção**, 20, n. 4, p. 741-761, 2013-11-26 2013.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. **Nature**, 521, n. 7553, p. 436-444, 2015. Review.

LEE, H. C.; LEE, E. B.; ALLEMAN, D. Schedule modeling to estimate typical construction durations and areas of risk for 1000 MW ultra-critical coal-fired power plants. **Energies**, 11, n. 10, 2018. Article.

LEE, J. S.; DIEKMANN, J. E. Delay analysis considering production rate. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 38, n. 4, p. 361-372, 2011. Article.

LI, C. Z.; HONG, J.; FAN, C.; XU, X. *et al.* Schedule delay analysis of prefabricated housing production: A hybrid dynamic approach. **Journal of Cleaner Production**, 195, p. 1533-1545, 2018. Article.

LI, H.; PHILIP, C. C. L.; HUANG, H.-P. **Fuzzy Neural Intelligent Systems: Mathematical Foundation and the Applications in Engineering**. CRC Press, Inc., 2000. 0849323606.

LI, X. Establishment and Application of Risk Forecast Model of Construction Project Based upon BP Neural Network. **Advanced Materials Research**, 945-949, p. 3056-3059, 06/01 2014.

LIN, C. T.; LEE, C. S. G. **Neural Fuzzy Systems: A Neuro-fuzzy Synergism to Intelligent Systems**. Prentice-Hall, 1995. 9780132614139.

LIU, P.; LI, H.-X. **Fuzzy neural network theory and application**. World Scientific, 2004. 9812387862.

LO, T. Y.; FUNG, I. W. H.; TUNG, K. C. F. Construction delays in Hong Kong civil engineering projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, 132, n. 6, p. 636-649, 2006. Article.

LU, M. Enhancing Project Evaluation and Review Technique Simulation through Artificial Neural Network-based Input Modeling. **Journal of Construction Engineering and Management-asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE**, 128, 10/01 2002.

LU, P.; CHEN, S.; ZHENG, Y. Artificial intelligence in civil engineering. **Mathematical Problems in Engineering**, 2012, 2012. Review.

LUCKEY, D.; FRITZ, H.; LEGATIUK, D.; DRAGOS, K. *et al.* **Artificial intelligence techniques for smart city applications**. 2020.

LUCKO, G.; ROJAS, E. M. Research validation: Challenges and opportunities in the construction domain. **Journal of Construction Engineering and Management**, 136, n. 1, p. 127-135, 2010. Article.

MAHAMID, I.; AL-GHONAMY, A.; AICHOUNI, M. Risk matrix for delay causes in construction projects in Saudi Arabia. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, 9, n. 8, p. 665-670, 2015. Article.

MAHDI, I.; SOLIMAN, E. Significant and top ranked delay factors in Arabic Gulf countries. **International Journal of Construction Management**, 21, n. 2, p. 167-180, 2021. Article.

MAMDANI, E.; ASSILIAN, S. J. I. j. o. h.-c. s. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. 51, n. 2, p. 135-147, 1999.

MARCH, S. T.; SMITH, G. F. Design and natural science research on information technology. **Decision Support Systems**, 15, n. 4, p. 251-266, 1995. Article.

MARTÍNEZ, D. M.; FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ, J. C. J. I. Artificial Intelligence applied to project success: a literature review. 3, n. 5, p. 77-84, 2015.

MCCULLOCH, W. S.; PITTS, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. **The bulletin of mathematical biophysics**, 5, n. 4, p. 115-133, 1943/12/01 1943.

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

MOHAN, S. B.; AL-GAHTANI, K. S. Current delay analysis techniques and improvements. **Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)**, 48, n. 9, p. 12-21, 2006. Article.

MOHAPATRA, B. Machine learning applications to smart city. **ACCENTS Transactions on Image Processing and Computer Vision**, 5, p. 1-6, 02/26 2019.

MOTALEB, O.; KISHK, M. An investigation into causes and effects of construction delays in UAE. 01/01 2010.

MOTAWA, I. Spoken dialogue BIM systems – an application of big data in construction. **Facilities**, 35, n. 13-14, p. 787-800, 2017. Article.

MPOFU, B.; OCHIENG, E. G.; MOOBELA, C.; PRETORIUS, A. Profiling causative factors leading to construction project delays in the United Arab Emirates. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 24, n. 2, p. 346-376, 2017. Article.

MULHOLLAND, B.; CHRISTIAN, J. Risk assessment in construction schedules. **Journal of Construction Engineering and Management**, 125, n. 1, p. 8-15, 1999. Article.

MÜLLER, A. C.; GUIDO, S. **Introduction to Machine Learning with Python: A Guide for Data Scientists**. O'Reilly Media, 2016. 9781449369897.

MUNESWARAN, G.; MANOHARAN, P.; AWOYERA, P. O.; ADESINA, A. A statistical approach to assess the schedule delays and risks in Indian construction industry. **International Journal of Construction Management**, 20, n. 5, p. 450-461, 2020. Article.

NAGY, Z. **Artificial Intelligence and Machine Learning Fundamentals**. UK: Packt Publishing Ltd, December 2018 2018. 978-1-78980-165-1.

NDEKUGRI, I.; BRAIMAH, N.; GAMESON, R. Delay analysis within construction contracting organizations. **Journal of Construction Engineering and Management**, 134, n. 9, p. 692-700, 2008. Article.

NETO, A. S. **ESTATÍSTICA E INTRODUÇÃO À ECONOMETRIA**. Saraiva Educação S.A., 2017. 9788502199842.

NG, S. T.; SKITMORE, M.; DENG, M. Z. M.; NADEEM, A. Improving existing delay analysis techniques for the establishment of delay liabilities. **Construction Innovation**, 4, n. 1, p. 3-17, 2004. Article.

NIETO-MOROTE, A.; RUZ-VILA, F. A fuzzy approach to construction project risk assessment. **International Journal of Project Management**, 29, p. 220-231, 02/28 2011.

OLIVEIRA, G. P., O.; Castro, N. METODOLOGIA DE ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E EXCLUSÃO DE VARIÁVEIS DE ENTRADA EM SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA POR

REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS (RNAs): resultados preliminares. *In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2011, Maceió/AL. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, p. 19.

OLIVEROS, A.; FAYEK, A. Fuzzy Logic Approach for Activity Delay Analysis and Schedule Updating. **Journal of Construction Engineering and Management-asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE**, 131, 01/01 2005.

OLIVEROS, A. V. O.; FAYEK, A. R. Fuzzy logic approach for activity delay analysis and schedule updating. **Journal of Construction Engineering and Management**, 131, n. 1, p. 42-51, 2005. Article.

ONG, H. Y.; WANG, C.; ZAINON, N. Developing a Quality-Embedded EVM Tool to Facilitate the Iron Triangle in Architectural, Construction, and Engineering Practices. **Journal of Construction Engineering and Management**, 144, n. 9, 2018. Article.

OTERO, J. A. **Ferramenta de Gestão de Riscos Baseada na Teoria dos Conjuntos Fuzzy para Suporte à Garantia do Desempenho de Edificações Habitacionais**. Orientador: ROSA MARIA SPOSTO, D. 2018a. 243 f. Doctoral (Doctoral Thesis) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

OTERO, J. A. **Ferramenta de Gestão de Riscos baseada na Teoria dos Conjuntos Fuzzy para Suporte à Garantia do Desempenho de Edificações Habitacionais**. 2018b. 243 f. Tese de Doutorado em Estruturas e Construção Civil (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, DF.

ÖZKAN, G.; İNAL, M. Comparison of neural network application for fuzzy and ANFIS approaches for multi-criteria decision making problems. **Applied Soft Computing**, 24, p. 232–238, 11/01 2014.

PALTRINIERI, N.; COMFORT, L.; RENIERS, G. Learning about risk: Machine learning for risk assessment. **Safety Science**, 118, p. 475-486, 2019. Article.

PAWAN, P.; LORTERAPONG, P. A Fuzzy-Based Integrated Framework for Assessing Time Contingency in Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, 142, p. 04015083, 10/12 2015.

PAZ, J. C.; ROZENBOIM, D.; CUADROS, Á.; CANO, S. *et al.* A simulation-based scheduling methodology for construction projects considering the potential impacts of delay risks. **Construction Economics and Building**, 18, n. 2, p. 41-69, 2018. Article.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, 24, n. 3, p. 45-77, 2007. Article.

PEHLIVAN, S.; ÖZTEMIR, A. E. Integrated Risk of Progress-Based Costs and Schedule Delays in Construction Projects. **EMJ - Engineering Management Journal**, 30, n. 2, p. 108-116, 2018. Article.

PELLI NETO, A. AVALIAÇÃO DE IMÓVEIS URBANOS COM UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS

ARTIFICIAIS *In*: XII COBREAP – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE AVALIAÇÕES E PERÍCIAS, 2003, BELO HORIZONTE/MG. p. 14.

PERRIER, N.; BLED, A.; BOURGAULT, M.; COUSIN, N. *et al.* Construction 4.0: a survey of research trends. **Journal of Information Technology in Construction**, 25, p. 416-437, 09/08 2020.

PETERSEN, K.; VAKKALANKA, S.; KUZNIARZ, L. Guidelines for conducting systematic mapping studies in software engineering: An update. **Information and Software Technology**, 64, p. 1-18, 2015. Conference Paper.

PMI. **Practice standard for scheduling** 2nd ed. ed. Pennsylvania, EUA: Project Management Institute, Inc. , English 2011. 978-1-935589-24-2

PMI. A Guide to the Project Management Body of Knowledge Newtown Square, Pensilvânia, EUA : Project Management Institute 2018.

PMI. The standard for risk management in portfólios, programs and projects. Newtown Square, Pennsylvania, EUA: Project Management Institute 2019.

POSPÍCHAL, J. Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications. By George J. Klir and Bo Yuan. Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, 1995. 574 pp. \$60.00. ISBN 0-13-101171-5. Sales e-mail: corp-sales@prenhall.com. **Journal of Chemical Information and Computer Sciences**, 36, n. 3, p. 619-619, 1996/01/01 1995.

PRIES-HEJE, J.; BASKERVILLE, R. The Design Theory Nexus. **MIS Quarterly**, 32, p. 731-755, 12/01 2008.

PRIETO, A.; PRIETO, B.; ORTIGOSA, E.; ROS, E. *et al.* Neural networks: An overview of early research, current frameworks and new challenges. **Neurocomputing**, 214, 06/01 2016.

RACHID, Z.; TOUFIK, B.; MOHAMMED, B. Causes of schedule delays in construction projects in Algeria. **International Journal of Construction Management**, 19, n. 5, p. 371-381, 2019. Article.

RAMANATHAN, C.; SAMBU, N.; IDRUS, A. Construction delays causing risks on time and cost - A critical review. **Australasian Journal of Construction Economics and Building**, 12, 02/26 2012.

RASTEGARMANESH, A.; MOOSAVI, M.; KALHOR, A. A data-driven fuzzy model for prediction of rockburst. **Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards**, p. 1-13, 04/11 2020.

RAUTIAINEN, A.; SIPPOLA, K.; MÄTTÖ, T. Perspectives on relevance: The relevance test in the constructive research approach. **Management Accounting Research**, 34, p. 19-29, 2017/03/01/ 2017.

RAZI, P. Z.; ALI, M. I.; RAMLI, N. I. AHP-based analysis of the risk assessment delay case study of public road construction project: An empirical study. **Journal of Engineering Science and Technology**, 14, n. 2, p. 875-891, 2019. Article.

REZAEI, K.; HOSSEINI, R.; MAZINANI, M. **A Fuzzy Inference System for Assessment of the Severity of the Peptic Ulcers**. 2014.

REZAKHANI, P. A review of fuzzy risk assessment models for construction projects. **Slovak Journal of Civil Engineering**, XX, p. 35-40, 11/01 2012.

RODRÍGUEZ, L.; VADILLO, C.; GÓMEZ, J.; TORRES ZÚÑIGA, I. Education + Industry 4.0: Developing a Web Platform for the Management and Inference of Information Based on Machine Learning for a Hydrogen Production Biorefinery. *In*, 2019. p. 603-613.

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. John Wiley & Sons, 2005. 0470860766.

RUSSEL, S. J. N., P. . **Artificial Intelligence - A Modern Approach**. 3ª Edição ed. Englewood Cliffs, New Jersey - EUA: 2014. 1151 p. 0-13-604259-7.

RUTKOWSKA, D. **Neuro-fuzzy architectures and hybrid learning**. Physica, 2012. 379081802X.

RUTKOWSKI, L. **Flexible Neuro-Fuzzy Systems: Structures, Learning and Performance Evaluation**. Boston, EUA: Springer US, 2004. 294 p. 1-4020-8043-3.

SACKEY, S.; KIM, B. S. Schedule Risk Analysis using a Proposed Modified Variance and Mean of the Original Program Evaluation and Review Technique Model. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 23, n. 4, p. 1484-1492, 2019. Article.

SALEHI, H.; BURGUEÑO, R. Emerging artificial intelligence methods in structural engineering. **Engineering Structures**, 171, p. 170-189, 09/15 2018.

SAMBASIVAN, M.; DEEPAK, T. J.; SALIM, A. N.; PONNIAH, V. Analysis of delays in Tanzanian construction industry Transaction cost economics (TCE) and structural equation modeling (SEM) approach. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 24, n. 2, p. 308-325, 2017. Article.

SAMUEL, P.; MALL, R.; BOTHRA, A. K. Automatic test case generation using unified modeling language (UML) state diagrams. **IET Software**, 2, n. 2, p. 79-93, 2008. Article.

SAN CRISTOBAL, J. R. Critical path definition using multicriteria decision making: Promethee method. **Journal of Management in Engineering**, 29, n. 2, p. 158-163, 2013. Article.

SANCHEZ, P. **Neural-Risk Assessment System for Construction Projects**. 2005. 1-11 p. 978-0-7844-0754-7.

SANNI-ANIBIRE; ZIN; OLATUNJI. Machine learning model for delay risk assessment in tall building projects. **International Journal of Construction Management**, 2020. Article.

SANNI-ANIBIRE, M.; ZIN, R.; OLATUNJI, S. Machine learning model for delay risk assessment in tall building projects. **International Journal of Construction Management**, p. 1-10, 05/25 2020.

SCHAFFER, C. Technical Note : Selecting a Classification Method by Cross-Validation. **Machine Learning - ML**, 13, p. 135-143, 10/01 1993.

SHAHSAVAND, P.; MAREFAT, A.; PARCHAMIJALAL, M. Causes of delays in construction industry and comparative delay analysis techniques with SCL protocol. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 25, n. 4, p. 497-533, 2018. Article.

SHARMA, S.; GOYAL, P. K. Applying “fuzzy techniques” in construction project management. **International Journal on Emerging Technologies**, 10, n. 2, p. 384-391, 2019. Review.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. Controle e modelagem Fuzzy. 1999.

SHEN, L.; WU, G.; NG, C. Risk Assessment for Construction Joint Ventures in China. **Journal of Construction Engineering and Management-asce - J CONSTR ENG MANAGE-ASCE**, 127, 02/01 2001.

SHERWIN, M. D.; MEDAL, H.; LAPP, S. A. Proactive cost-effective identification and mitigation of supply delay risks in a low volume high value supply chain using fault-tree analysis. **International Journal of Production Economics**, 175, p. 153-163, 2016. Article.

SILVA, I. S., D.; Flauzino, R. **Redes neurais artificiais para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2016.

SIMON, H. A. **The Sciences of the Artificial**. 3rd. Ed ed. 26 de setembro de 1996 1996. 248 p. 0-262-19374-4.

SINGH, H.; LONE, Y. A. Deep Neuro-Fuzzy Systems with Python. 2019.

SINGH, H.; LONE, Y. A. **Deep Neuro-fuzzy Systems with Python: With Case Studies and Applications from the Industry**. Apress, 2020. 9781484253625.

SINGH, S.; BALA, A.; DIXIT, S.; VARSHNEY, D. Critical analysis of causes of delay in residential construction projects in India. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, 9, n. 1, p. 330-345, 2018. Article.

SUBRAMANYAN, H.; SAWANT, P.; BHATT, V. Construction Project Risk Assessment: Development of Model Based on Investigation of Opinion of Construction Project Experts from India. **Journal of Construction Engineering and Management**, 138, p. 409-421, 03/01 2012.

SUGENO, M.; KANG, G. J. F. s.; SYSTEMS. Structure identification of fuzzy model. 28, n. 1, p. 15-33, 1988.

SZE, V.; CHEN, Y.-H.; YANG, T.-J.; EMER, J. Efficient Processing of Deep Neural Networks: A Tutorial and Survey. **Proceedings of the IEEE**, 105, 03/27 2017.

TAH, J.; CARR, V. A proposal for construction project risk assessment using fuzzy logic. **Construction Management & Economics**, 18, p. 491-500, 02/01 2000.

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

TAKAGI, T.; SUGENO, M. J. I. t. o. s., man,; CYBERNETICS. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. n. 1, p. 116-132, 1985.

TAKEDA, H.; VEERKAMP, P.; TOMIYAMA, T.; YOSHIKAWA, H. Modeling design processes. **AI Magazine**, 11, n. 4, p. 37-48, 1990. Article.

TAYLAN, O.; BAFAIL, A.; ABDULAAL, R.; KABLI, M. Construction projects Selection and risk assessment by Fuzzy AHP and Fuzzy TOPSIS methodologies. **Applied Soft Computing**, 17, 04/01 2014.

TOKDEMIR, O. B.; EROL, H.; DIKMEN, I. Delay Risk Assessment of Repetitive Construction Projects Using Line-of-Balance Scheduling and Monte Carlo Simulation. **Journal of Construction Engineering and Management**, 145, n. 2, 2019. Article.

TREASURY, G. B. **The Orange Book: Management of Risk- Principles and Concepts**. Stationery Office, 2020. 9781845320447.

TSAI, M. K.; YANG, J. B.; YAU, N. J. Developing computer-based schedule delay analysis methods based on information flow analysis: A case study. **Journal of Civil Engineering and Management**, 19, n. 6, p. 823-835, 2013. Article.

TSUKAMOTO, Y. An approach to fuzzy reasoning method. *In: MADAN M. GUPTA, R. K. R., Ronald R. Yager (Ed.). **Advances in Fuzzy Set Theory and Applications**. Second ed. EUA: North-Holland Publishing Company, 1979. p. 137-1479.*

VAN AKEN, J. E. Management Research Based on the Paradigm of the Design Sciences: The Quest for Field-Tested and Grounded Technological Rules. **Journal of Management Studies**, 41, n. 2, p. 219-246, 2004. Article.

VAN AKEN, J. E. Management research as a design science: Articulating the research products of mode 2 knowledge production in management. **British Journal of Management**, 16, n. 1, p. 19-36, 2005. Article.

VILES, E.; RUDELI, N. C.; SANTILLI, A. Causes of delay in construction projects: a quantitative analysis. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 27, n. 4, p. 917-935, 2019. Article.

VU, H. A.; CU, V. H.; MIN, L. X.; WANG, J. Q. Risk analysis of schedule delays in international highway projects in Vietnam using a structural equation model. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 24, n. 6, p. 1018-1039, 2017. Article.

WALIA, N.; SINGH, H.; SHARMA, A. ANFIS: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System- A Survey. **International Journal of Computer Applications**, 123, p. 32-38, 08/18 2015.

WALLS, J. G.; WIDMEYER, G. R.; EL SAWY, O. A. Building an information system design theory for vigilant EIS. **Information Systems Research**, 3, n. 1, p. 36-59, 1992. Article.

WANG, J.; YUAN, H. Factors affecting contractors' risk attitudes in construction projects: Case study from China. **International Journal of Project Management - INT J PROJ MANAG**, 29, p. 209-219, 02/01 2011.

WANG, J. Y.; SHEN, L. Y.; HAO, X. D. Study on risks of time delay in the execution of public sector projects. **Shenzhen Daxue Xuebao (Ligong Ban)/Journal of Shenzhen University Science and Engineering**, 23, n. 4, p. 303-308, 2006. Article.

WANG, T. K.; FORD, D. N.; CHONG, H. Y.; ZHANG, W. Causes of delays in the construction phase of Chinese building projects. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 25, n. 11, p. 1534-1551, 2018. Article.

WANG, W. C.; LIN, C. L.; WANG, S. H.; LIU, J. J. *et al.* Application of importance-satisfaction analysis and influence-relations map to evaluate design delay factors. **Journal of Civil Engineering and Management**, 20, n. 4, p. 497-510, 2014. Article.

WANG, Z.; LI, H.; JIA, Y. A Neural Network Model for Expressway Investment Risk Evaluation and its Application. **Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, 13, n. 4, p. 94-99, 2013/08/01/ 2013.

WESZ, J. G. B.; FORMOSO, C. T.; TZORTZOPOULOS, P. Planning and controlling design in engineered-to-order prefabricated building systems. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 25, n. 2, p. 134-152, 2018. Article.

WIRBA, E. N.; TAH, J.; HOWES, R. Risk interdependencies and natural language computations. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 3, p. 251-269, 12/31 1996.

XU, X.; WANG, J.; LI, C. Z.; HUANG, W. *et al.* Schedule risk analysis of infrastructure projects: A hybrid dynamic approach. **Automation in Construction**, 95, p. 20-34, 2018. Article.

YANG, J. B.; OU, S. F. Using structural equation modeling to analyze relationships among key causes of delay in construction. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 35, n. 4, p. 321-332, 2008. Article.

YANG, J. B.; YIN, P. C. Isolated collapsed but-for delay analysis methodology. **Journal of Construction Engineering and Management**, 135, n. 7, p. 570-578, 2009. Article.

YAP, J. B. H.; GOAY, P. L.; WOON, Y. B.; SKITMORE, M. Revisiting critical delay factors for construction: Analysing projects in Malaysia. **Alexandria Engineering Journal**, 2020. Article.

YASEEN; ALI; SALIH; AL-ANSARI. Prediction of risk delay in construction projects using a hybrid artificial intelligence model. **Sustainability (Switzerland)**, 12, n. 4, 2020. Article.

YASEEN, Z.; ALI, Z.; SALIH, S.; AL-ANSARI, N. Prediction of Risk Delay in Construction Projects Using a Hybrid Artificial Intelligence Model. **Sustainability**, 12, p. 1-14, 02/18 2020.

YOU, Z.; FENG, L. Integration of Industry 4.0 Related Technologies in Construction Industry: A Framework of Cyber-Physical System. **IEEE Access**, PP, p. 1-1, 07/06 2020.

ZADEH, L. Fuzzy probabilities. **Information Processing & Management**, 20, p. 363-372, 12/31 1984.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets, information and control. **Information Control**, 8, p. 353-388, 01/01 1965.

ZADEH, L. A. J. I.; CONTROL. Fuzzy sets. 8, n. 3, p. 338-353, 1965.

ZADEH, L. A. J. I. s. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II. 8, n. 4, p. 301-357, 1975.

ZAFAR, Z. Q. Construction project delay analysis. **Cost Engineering (Morgantown, West Virginia)**, 38, n. 3, p. 23-28, 1996. Article.

ZARDO, P.; MUSSI, A.; SILVA, J. Digital technologies in the contemporary design process: potentials and challenges for practice and academia. **Ambiente Construído**, 20, 05/08 2020.

ZAVADSKAS, E.; TURSKIS, Z.; TAMOSAITIENE, J. Risk assesment of construction projects. **JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT**, 16, p. 33-46, 03/01 2010.

ZAYED, T.; AMER, M.; PAN, J. Assessing risk and uncertainty inherent in Chinese highway projects using AHP. **International Journal of Project Management - INT J PROJ MANAG**, 26, p. 408-419, 05/01 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**, 25, n. 6, p. 589-600, 2007/08/01/ 2007.

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**, 25, p. 589-600, 08/01 2007.

ZHANG, H.; LI, H.; TAM, C. Fuzzy discrete-event simulation for modeling uncertain activity duration. **Engineering, Construction and Architectural Management**, 11, p. 426-437, 12/01 2004.

ZHANG, H.; ZHANG, L.; JIANG, Y. **Overfitting and Underfitting Analysis for Deep Learning Based End-to-end Communication Systems**. 2019. 1-6 p.

ZHAO, R.; GOVIND, R. Algebraic characteristics of extended fuzzy numbers. **Information Sciences**, 54, n. 1, p. 103-130, 1991/03/01/ 1991.

ZHU, W., 2007, **Applying an Improved BP Network to Risk Assessment of Performance for Expressway Management Corporations**. IEEE. 4618-4621.

ZHU, W. X.; SHAN, M. Y. Neural network model of risk analysis for public construction project. **Harbin Gongcheng Daxue Xuebao/Journal of Harbin Engineering University**, 27, n. SUPPL., p. 142-146, 2006. Article.

ZOU, P.; ZHANG, G.; WANG, J. Understanding the key risks in construction projects in China. **International Journal of Project Management**, 25, p. 601-614, 08/01 2007.

## APÊNDICE A

Apêndice desenvolvido em apoio ao Capítulo 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES.

### 1. IDENTIFICAÇÃO DA CLASSE DE PROBLEMAS E ARTEFATOS EXISTENTES (C.1)

Aqui serão apresentados os resultados das consultas que foram realizadas em normas e padrões internacionais que abordavam técnicas de análise de risco; e os estudos sistemáticos da literatura (RSL), realizados em conformidade com a metodologia de pesquisa adotada (Seção 3.1.2 - B - Estudos sistemáticos da literatura/ Figura 10).

### 2. REVISÕES SISTEMÁTICAS DA LITERATURA

Os resultados das RSL propostas na Seção 3.1.2 são apresentados no Quadro 28.

Quadro 28- resultados dos estudos sistemáticos da literatura

Nr Pesquisa	String / Campos de busca	Achados	Artigos	Engenharia
1RSL	delay (TI) AND risk (TO) AND construction (TO)	153	97	63
2RSL	delay (TI) AND construction (TO)	2.132	1.333	823/41(*)
3RSL	"risk analysis" (TO) OR "risk assessment" (TO) OR techniques (TO) AND delay (TI) AND construction (TO)	342	217	153
4RSL	risk (TI) OR delay (TI) AND "fuzzy" (TI) AND construction (TO)	402	243	147
5RSL	risk (TI) OR delay (TI) AND "artificial neural network" (TO) OR ANN (TO) AND construction (TO)	95	66	24
6RSL	risk (TI) OR delay (TI) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR ANFIS (TO)	180	100	51
7RSL	risk (TO) OR delay (TO) AND "machine learning" (TI) OR "artificial intelligence" (TI) AND construction (TO)	147	76	30
8RSL	Python (TO) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR "ANFIS" (TO)	4	3	1
9RSL	Matlab (TO) AND "neuro-fuzzy" (TO) OR "ANFIS" (TO)	1.386	424	283

**Legenda:** Tópico (TO): Título do artigo, palavra-chave e resumo

Título (TI): Título do artigo

(\*) O critério de exclusão N° 4 foi aplicado somente a esta pesquisa, reduzindo a seleção de 823 para 41 artigos

Fonte: autor

#### 2.1 Identificação dos Artefatos existentes

Nesta etapa da pesquisa buscou-se a identificação de dois tipos de artefatos: os de análise de atraso; e os de Aprendizado de Máquina. Para tanto, seguiu-se os passos definidos na

Metodologia de Pesquisa (Seção - 3.1.3.1 - C.1 – Identificação das classes de problemas e artefatos existentes). Para identificação de artefatos de análise de risco foram feitas consultas a normas e padrões internacionais e a 3RSL. Já para os artefatos de Aprendizado de Máquina foram feitas pesquisas em livros da área e a 7RSL.

### 2.1.1 Pesquisa em Normas e padrões internacionais

Nesta seção são apresentadas as técnicas de análise de risco identificadas nos seguintes normativos e padrões internacionais: Norma ABNT ISO 31010 - Gestão de Risco – Técnicas para o processo de avaliação de risco (Quadro 29); *Project Book of Knowledge* – PMBOK - PMI (Quadro 30); *Project Standard for Risk Management* - PMI (Quadro 31); e PRICE2 (Quadro 32). Encontra-se em destaque as técnicas utilizadas neste trabalho.

Quadro 29 - Técnicas de análise de risco (ABNT ISO 31010)

Ferramentas e Técnicas	Identificação de riscos	Análise de risco		
		Consequência	Probabilidade	Nível de Risco
<i>Brainstorming</i>	FA	NA	NA	NA
<b>Entrevistas estruturadas ou semi</b>	<b>FA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
<b>Delphi</b>	<b>FA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>	<b>NA</b>
Listas de verificação	FA	NA	NA	NA
Análise preliminar de perigos (SHERWIN; MEDAL; LAPP)	FA	NA	NA	NA
Análise de decisão por multicritérios (MCDA)	A	FA	A	FA
Simulação de Monte Carlo	NA	FA	NA	NA
<i>Sneak analysis (SA) e sneak circuit analysis (SCA)</i>				
Estudos de perigo e operabilidade (HAZOP)	FA	FA	A	A
Análise de perigos e pontos críticos de controle	FA	FA	NA	NA
Avaliação de risco ambiental	FA	FA	FA	FA
Técnicas estruturadas "E se" (SWIFT)	FA	FA	FA	FA
Análise de cenários	FA	FA	A	A
Análise de impactos no negócio	A	FA	A	A
Análise de causa-raiz	NA	FA	FA	FA
Análise de modo de falhas e efeito	FA	FA	FA	FA
Análise de árvore de falhas	A	NA	FA	A
Análise de árvore de eventos	A	FA	A	A
Análise de causa e consequência	A	FA	FA	A
Análise de causa e efeito	FA	FA	NA	NA
Análise de camadas de proteção (LOPA)	A	FA	A	A
Árvore de decisões	NA	FA	FA	A
Análise da confiabilidade humana	FA	FA	FA	FA
Análise Bow tie	NA	A	FA	FA
Manutenção centrada em confiabilidade	FA	FA	FA	FA
Análise de Markov	A	FA	NA	NA

Estatística Bayesiana e Redes Bayes	NA	FA	NA	NA
Curvas FN	A	FA	FA	A
Índice de risco	A	FA	FA	A
<b>Matriz de probabilidade / consequência</b>	<b>FA</b>	<b>FA</b>	<b>FA</b>	<b>FA</b>
Análise de custo / benefício	A	FA	A	A

**Legenda:** FA: Fortemente aplicável

NA: Não aplicável

A: Aplicável

Fonte: autor, adaptado de ABNT (2012)

Quadro 30 - Técnicas de Análise de Risco segundo o Project Book of Knowledge (PMBOK)

ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCOS	ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCO
Análise de especialistas	
Entrevistas estruturadas e semiestruturadas	
Reuniões	Simulações
Análise da qualidade dos dados sobre risco	<b>Análise de sensibilidade</b>
Avaliação de probabilidade / impacto dos riscos	Análise de árvore de decisões
Avaliação de outros parâmetros de riscos	Diagrama de influências

Fonte: autor adaptado de PMI (2018)

Quadro 31 - Técnicas de Análise de Risco segundo Project Standard for Risk Management

ANÁLISE QUALITATIVA DE RISCOS	ANÁLISE QUANTITATIVA DE RISCO
Diagramas de afinidade	Estimativa de reserva de contingência
Processo de hierarquia analítica (AHP)	Análise de árvore de decisão
Diagramas de influência	Técnicas de estimativa aplicadas à probabilidade e impacto
Técnica de grupo nominal	Valor monetário esperado
<b>Matriz de Probabilidade e impacto</b>	Análise de modo de falhas e efeitos (FMEA)
Análise de qualidade de dados de risco	Análise de árvore de falhas
Avaliação de outros parâmetros de risco	Simulação de Monte Carlo
Sistemas dinâmicos	Análise de PERT

Fonte: Autor baseado em PMI (2019)

Quadro 32 - Técnicas de gerenciamento de risco (PRINCE2)

EXEMPLOS DE TÉCNICAS DE IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS	EXEMPLOS DE TÉCNICAS DE ESTIMATIVA DE RISCO	EXEMPLO DE TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE RISCO
Revisão de lições	<b>Matriz de Probabilidade x Impacto</b>	Valor monetário esperado
Listas de verificação de risco	Valor esperado	Modelos de risco (simulação de Monte Carlo)
Listas de alerta de risco	Árvores de probabilidade	
Brainstorming	<b>Análise de Pareto</b>	
Estrutura Analítica de Riscos		

Fonte: Autor

### 2.1.2 3ª Revisão Sistemática da Literatura (3RSL)

Ao final da 3RSL constatou-se que nos estudos mais antigos, o foco da análise de atraso está majoritariamente sobre o gerenciamento do cronograma. No entanto, de 2010 em diante, observa-se um crescimento na quantidade de trabalhos que analisam o atraso com foco no gerenciamento de risco. Além disso, é possível observar uma clara distinção entre as técnicas de análise de atraso com foco no cronograma (Quadro 33) e com foco no risco (Quadro 34).

A 3RSL resultou em 18 artigos relacionados com gerenciamento de cronograma (Quadro 33) e 18 voltados para gerenciamento de risco (Quadro 34), com destaque para os artefatos (técnicas/modelos) de análise de atraso e os objetivos dos trabalhos. Do exposto, é possível fazer algumas considerações com base no Quadro 33:

- a. Foram identificadas como principais técnicas de análise de atraso com foco no cronograma: análise de Janela; ANOVA; tipo de atraso isolado (IDT); impacto global; impacto líquido; "but-for" ou técnica de recolhimento; técnica de instantâneo; técnica de impacto de tempo; técnica de influência generalizada; gráfico de barras ou gráfico de Gant; e Método do Caminho Crítico.
- b. Alguns estudos associaram o Método do Caminho Crítico com outras técnicas. É o caso de OLIVEROS, A. V. O. e FAYEK, A. R. (2005), que associou com a Lógica Fuzzy.
- c. Com relação as metodologias de análise de atraso, foram objetos de estudos: Conforme planejado x conforme construído, impactado conforme planejado, recolhido conforme construído, análise de janela e análise de impacto de tempo.

Quadro 33 – Artefatos encontrados na 3RSL com foco no gerenciamento de cronograma

Referência	Artefato (Técnica/modelo)	Objetivo
(NG; SKITMORE; DENG; NADEEM, 2004)	Técnicas de análise de atraso	Impacto global, impacto líquido, ‘but-for’, atraso de distribuição, instantâneo, tipo de atraso isolado, impacto de tempo.
(MOHAN; AL-GAHTANI, 2006)	<i>But-for</i> e Janela de análise	Este artigo discute algumas melhorias nas técnicas de análise de atraso, buscando incluir todos os tipos de atrasos, acelerações.
(GOTHAND, 2003)	Método da janela de análise	O artigo fornece uma metodologia detalhada para a abordagem de janelas modificadas para a análise em casos de conflito de interesses.
(MAHDI; SOLIMAN, 2021)	ANOVA	Um procedimento é proposto e aplicado para reclassificar e reagrupar os resultados de todas as pesquisas anteriores. A técnica de teste ANOVA é aplicada para verificar os resultados obtidos em estudos anteriores quanto à semelhança e comunalidade de fatores e causas de atraso no GCC.
(KONGCHASING; SUA-IAM, 2020)	Técnica Delphi	O objetivo da pesquisa é levantar e priorizar os fatores que levam a atrasos na construção, tanto da perspectiva dos consultores quanto dos empreiteiros.
(ALKASS; MAZEROLLE; HARRIS, 1996)	Tipo de atraso isolado (IDT).	Discute técnicas de análise de atraso na ICC: técnica de impacto global; técnica de impacto líquido; técnica CPM ajustada conforme construída; “ <i>but-for</i> ”; técnica de instantâneo; e técnica de impacto de tempo e IDT.
(HEGAZY; ZHANG, 2005)	Método do Caminho Crítico e Método da janela de análise	Uma abordagem de janelas modificada é introduzida com análise diária computadorizada de atrasos para que resultados precisos e repetíveis sejam produzidos.
(OLIVEROS, A. V. O.; FAYEK, A. R., 2005)	Lógica Fuzzy e Método do Caminho Crítico	Apresenta um modelo de lógica fuzzy que integra relatórios diários do progresso e atrasos das atividades, comum sistema de atualização e previsão de cronograma para monitoramento e controle de projetos de construção.
(FINKE, 1999)	Método da janela de análise	Avalia o método da janela de análise e discute uma etapa intermediária para evitar descobertas incorretas de falsa simultaneidade, e o método apropriado para lidar com atrasos repartíveis e não repartíveis.
(NDEKUGRI; BRAIMAH; GAMESON, 2008)	Metodologias de análise de atraso	Artigo relata um estudo empírico sobre a prática atual no uso metodologias de análise de atraso no Reino Unido: Conforme planejado x conforme construído, impactado conforme planejado, recolhido conforme construído, análise de janela e análise de impacto de tempo.
(SHAHSAVAND; MAREFAT; PARCHAMIJALAL, 2018)	métodos para analisar atrasos	Discute métodos para analisar atrasos: técnica de influência generalizada, gráfico de barras ou técnica de gráfico de Gant, ( <i>but-for</i> ), Método do caminho crítico, Técnica de impacto de tempo, Técnica de impacto global, Técnica de impacto líquido, Impacto conforme planejado Técnica, técnica recolhida conforme construído, técnica instantânea, técnica do tipo retardo isolado.
(YANG; YIN, 2009)	método do but-for colapsado isolado (ICBF)	Este estudo apresenta o método do mas-para colapsado isolado (ICBF), um método de análise de atrasos para projetos de construção.
(WANG; LIN; WANG; LIU et al., 2014)	Novo método (ISA+IRM)	O modelo integra a análise de satisfação de importância (ISA) e um mapa de relações de influência (IRM). O ISA avalia o desempenho de cada fator de atraso, enquanto o IRM captura as relações causais entre os fatores.

(TSAI; YANG; YAU, 2013)	métodos de análise de atraso de cronograma baseados em computador	Aplica a análise do fluxo de informações para classificar o trabalho necessário para desenvolver métodos de análise de atraso de cronograma baseados em computador que integra dois métodos de análise de atraso de cronograma baseados em processo simultaneamente.
(BHIH; HEGAZY, 2020)	<i>But-for</i>	Esclarece as interpretações enganosas dos resultados de but-for e introduz melhorias e um procedimento de implementação explícito que corresponde aos requisitos de análise de atraso de organismos profissionais.
(ZAFAR, 1996)	Método do caminho crítico	Uma análise de atraso com base em documentos contemporâneos e o método do caminho crítico ajuda a compreender a causa dos atrasos do projeto e a identificar o responsável. Por meio de uma análise adequada e uma apresentação clara e precisa da análise, as reclamações em atraso são resolvidas.
(LEE; DIEKMANN, 2011)	Método do caminho crítico	Para garantir a realidade e a razoabilidade, a análise de atraso deve permitir taxas de produção não lineares, bem como taxas de produção linear nas atividades atrasadas.
(JHAWAR; BAJPAI, 2014)	Modo de falha e a técnica de análise de efeito (FMEA) e Modelagem estrutural interpretativa - ISM	O objetivo principal deste artigo é investigar as causas dos atrasos no cronograma de construção e descobrir as relações críticas entre os vários parâmetros críticos de atraso usando o FMEA e ISM.

Fonte: autor

Com relação as técnicas e modelos de análise de atraso com foco no gerenciamento de riscos, com base no Quadro 34, considera-se relevantes as seguintes considerações:

- a. Foram identificados seis estudos que fizeram simulações utilizando o método de Monte Carlo (SMC) de forma isolada ou conjunta, com destaque para CHENG; WU; WU e NDURE (2019), que associou a SMC com a Teoria dos Conjuntos Fuzzy e uma Rede Bayesiana (aprendizado de máquina) ao estudar a correlação entre os riscos e a duração do projeto.
- b. A Análise de sensibilidade foi foco em dois trabalhos. Em um deles de forma isolada e em outro associado com o Método da linha de equilíbrio (LOB) e a Simulação de Monte Carlo (TOKDEMIR; EROL; DIKMEN, 2019), cuja intenção é a intenção é incorporar incerteza em planejamentos repetitivos.
- c. Uma ontologia foi proposta por BILGIN; DIKMEN e BIRGONUL (2018) para fornecer entendimento sobre análise de atraso. Esta ontologia e outros estudos neste contexto são muito importantes na mudança de paradigmas de análise de atraso com foco no risco.
- d. Foram observados estudos que se utilizam de algoritmos de Aprendizado de Máquina: Árvore de decisão e Algoritmos de classificação Bayesiana ingênuos (GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI; NASSAR, 2020); *K-Nearest Neighbours* (KNN), Artificial Neural Networks (ANN), *Support Vector Machines* (SVM) e *Ensemble* (SANNI-ANIBIRE; ZIN; OLATUNJI, 2020) (SANNI-ANIBIRE; ZIN; OLATUNJI, 2020).

e. AGYEKUM-MENSAH e KNIGHT (2017), ao estudarem as causas do atraso na construção no século 21 até 2017, identificaram na literatura, a utilização dos seguintes métodos: pesquisa, estudo de caso, revisão da literatura, questionário e entrevistas.

Quadro 34 - Artefatos encontrados na 3RSL com foco no gerenciamento de risco

Referência	Artefato (Técnica/modelo)	Objetivo
(SANNI-ANIBIRE; ZIN; OLATUNJI, 2020)	Matriz Probabilidade x Impacto	Consequentemente, este artigo apresenta o desenvolvimento de um modelo de aprendizado de máquina para avaliação de risco de atraso em projetos de edifícios altos. K-Nearest Neighbours (KNN), Artificial Neural Networks (ANN), Support Vector Machines (SVM) e Ensemble.
(KOULINAS; XANTHOPOULOS; TSILIPIRAS; KOULOURIOTIS, 2020)	Simulação de Monte Carlo	A principal contribuição deste estudo é o desenvolvimento de uma nova abordagem para a quantificação do risco de duração, que usa uma equação recém-introduzida para a estimativa do risco total em relação à duração das atividades e quantifica a experiência do gerente expressa por meio de um questionário.
(ANSAH; SOROOSHIAN, 2018)	4P (Projeto, Práticas, Participantes e Compras)	Proposição do conceito 4P como estrutura teórica para entender as fontes de atraso e seus riscos. Além de, identificar, analisar e classificar atrasos no ambiente interno do processo de desenvolvimento do projeto, por meio da análise de causa raiz.
(BILGIN; DIKMEN; BIRGONUL, 2018)	Uma abordagem baseada em ontologia	Proposta de uma ontologia de análise de atraso, que facilite processos de gerenciamento de riscos e reclamações. Em função de sua capacidade de adaptação ao mundo das máquinas, a ontologia pode ser usada para desenvolver modelos usando programas de software.
(GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI; NASSAR, 2020)	Árvore de decisão e Algoritmos de classificação Bayesiana ingênuos	Identificar fontes e fatores de risco de atraso em cronogramas. Desenvolver modelos de aprendizado de máquina (Árvore de decisão e Algoritmo de classificação Bayesiana), a fim de facilitar a análise e previsão de atrasos usando fontes de dados objetivas, considerando que os fatores de risco são interdependentes e fazem parte de um sistema complexo (setor da construção).
(PAZ; ROZENBOIM; CUADROS; CANO <i>et al.</i> , 2018)	SBSM - Metodologia de Programação Baseada em Simulação de Monte Carlo	Formulação de uma SBSM para análise o impacto dos riscos no cronograma, determinando a data final do projeto e quantificando a importância do risco. Foi proposto um novo conceito, definido para cada risco, o “impacto direto”, que integra a priorização de riscos com a probabilidade, impacto e possibilidade de risco. Permitindo uma análise quantitativa de riscos no cronograma de projetos de construção.
(BUDAYAN; DIKMEN; TALAT BIRGONUL; GHAZIANI, 2018)	PERT, Teoria dos conjuntos Fuzzy	Apresenta um método computadorizado como um complemento para o MS Project <sup>TM</sup> para identificação de riscos e estimativa de atraso ao nível de tarefa, com base em uma ontologia de análise de atraso. A Teoria dos conjuntos Fuzzy foi usada para estimar a duração dos projetos.
(LI; HONG; FAN; XU <i>et al.</i> , 2018)	Dinâmica de sistemas híbridos e modelo de simulação discreta	Desenvolver um modelo dinâmico híbrido para avaliar e simular o impacto dos riscos identificados no desempenho do cronograma do PHP em vista das inter-relações e interações subjacentes, empregando a dinâmica do sistema híbrido (FEDISTIA; MUSDI; YERIZON) e método de simulação de eventos discretos (DES).

(SACKEY; KIM, 2019)	Modelo de Avaliação e Revisão de Programas (PERT)	O modelo de Avaliação e Revisão de Programas (PERT) utiliza parâmetros para estimar a probabilidade do tempo de conclusão do projeto. Considerando o impacto da variação e a média na probabilidade dos tempos de conclusão do projeto, este estudo contribui para a melhoria da precisão da estimativa de risco do cronograma, propondo uma variação modificada e a média do modelo PERT original.
(KIM; FISCHER; KAM, 2018)	Programação dinâmica e análise de risco de tunelamento	Introduz uma metodologia de otimização de cronograma de custo que adapta a programação estocástica e as abordagens de controle de feedback para escavação de túneis de rocha dura. Os autores adaptaram os métodos de programação dinâmica e análise de risco de tunelamento para abordar vários conjuntos de propriedades de massa rochosa (RMPs). Os autores propuseram uma abordagem híbrida entre os métodos de programação estocástica multiobjetiva e determinística para cronogramas de construção.
(LEE; LEE; ALLEMAN, 2018)	PERT/CPM e Simulação de Monte Carlo	O estudo utilizou simulações com Técnica de Avaliação e Revisão de Programas / Método do Caminho Crítico (PERT / CPM) e Monte Carlo para estimar a duração apropriada da construção no estágio de planejamento de um novo projeto. A análise PERT permite a inclusão de incertezas e análises de risco, para tanto foram identificados os riscos, seu impacto, influência e prioridades.
(KIM; ROH; KIM; LEE <i>et al.</i> , 2019)	Método da linha de equilíbrio (LOB) e modelo de gerenciamento de risco	Apresentar os fatores ameaçadores do gerenciamento de cronogramas e sua importância. Para tanto, adota um modelo de gerenciamento de riscos para arranha-céus usando gráfico de controle.
(TOKDEMIR; EROL; DIKMEN, 2019)	Método da linha de equilíbrio (LOB), Simulação de Monte Carlo e Análise de sensibilidade	Proposição de um método de avaliação de risco de atraso para projetos agendados pelo LOB, a intenção é incorporar incerteza em planejamentos repetitivos. Os fatores de risco de atraso do projeto são identificados e quantificados para diferentes cenários, usando a simulação de Monte Carlo. Em seguida, é realizada uma análise de sensibilidade para descobrir quais parâmetros têm a influência mais significativa no resultado. Finalmente, os planos de resposta a riscos são desenvolvidos e os riscos do projeto são analisados novamente, considerando as estratégias implementadas.
(PEHLIVAN; ÖZTEMIR, 2018)	Simulação de Monte Carlo.	Este artigo tem como objetivo explorar o impacto da integração dos fatores de risco em marcos atrasados para projetos de construção. Um modelo de simulação foi desenvolvido para determinar o impacto da variabilidade do cronograma na estimativa de custos.
(BASHIR; OJIAKO; MOTA, 2019)	Análise de Rede Social e Fuzzy-Cross-impact matrix multiplication analysis (MICMAC)	Desenvolvimento de uma nova abordagem integrada de Rede Social com a Fuzzy MICMAC, empregando informações subjetivas sobre inter-relações de fatores de riscos de atraso. O Objetivo é visualizar e avaliar as influências dos fatores de riscos nos atrasos do projeto.
(BALLESTEROS-PÉREZ; CERZO-NARVÁEZ; OTERO-MATEO; PASTOR-FERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 2019)	Análise de Sensibilidade	Comparar métricas relevantes de sensibilidade à atividade de análise de risco de cronograma. Estas métricas medem a importância das atividades em um cronograma do projeto. Atividades altamente sensíveis são aquelas com maior probabilidade de aumentar a variabilidade da duração do projeto e / ou causar extensões da duração do projeto. Além disso, é proposta uma nova métrica com melhor desempenho para o ranking geral de sensibilidade.
(CHENG; WU; WU; NDURE, 2019)	Simulação de Monte Carlo, Teoria dos	Desenvolver o método Simulação de Monte Carlo da Rede Fuzzy Bayesiana (FBN-MCS) para modelar incertezas aleatórias e

	Conjuntos Fuzzy e Rede Bayesiana	imprecisas com impacto na duração do projeto, buscando a correlação entre os riscos e a duração do projeto. A Teoria dos Conjuntos Fuzzy (FST) foi usada para definir as funções de pertinência para cada risco com a ajuda de uma pesquisa de especialistas. A Rede Bayesiana (BN) foi aplicada para encontrar a relação de dependência entre os fatores de risco que afetam a instalação. O modelo de simulação de Monte Carlo (MCS) avaliou as probabilidades posteriores dependentes geradas a partir do BN como variáveis independentes para encontrar sua correlação e determinar a duração o projeto total.
AGYEKUM-MENSAH e KNIGHT (2017)	Revisão da literatura e questionários	Uma revisão crítica da literatura e uma abordagem qualitativa foram consideradas para uma compreensão mais profunda e atualizada das causas dos atrasos, em vez de reciclar os temas existentes e o risco de uma abordagem estatisticamente tendenciosa.

Fonte: autor

### 2.1.3 7ª Revisão Sistemáticas da Literatura (7RSL)

Os resultados da 7RSL, com foco em técnicas de Aprendizado de Máquina são apresentados no Quadro 35, que consolida os trabalhos considerados mais relevantes: SALEHI e BURGUEÑO (2018); (LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.*, 2020); (MOHAPATRA, 2019). As técnicas foram organizadas de acordo com o processo de aprendizagem.

Quadro 35 - Técnicas de Aprendizado de Máquina obtidas na 7RSL

Sistema de Classificação de Aprendizado de Máquina			
Aprendizado de Máquina	Aprendizado supervisionado	Classificação	Redes neurais
			Máquina de vetor de suporte
			Multi-camada perceptron
			K - Nearest neighbour
			Análise do componente principal
			Árvore de decisão
			Análise discriminante linear
			Método Ensemble
			Classificadores lineares
			Aprendizagem profunda
			Aprendizado métrico
			Aprendizagem múltipla
			Filtragem colaborativa
			Rede de funções de base radial
			Regressão logística
		Árvore de decisão	
		Métodos Bayesianos	
		Regressão	Redes neurais
			Regressão linear/não linear
			Regressão LASSO
			Árvore de decisão
Método Ensemble			
Regressão Multinomial			

			Aprendizado métrico
			Multi-camada perceptron
			Método nearest neighbour
			Regressão por Vetor de Suporte
			Árvore de regressão
	<b>Aprendizado não supervisionado</b>	<b>Clustering</b>	Clustering hierárquico, parcial, espectral
			K - Means
			Cluster expectativa-maximização (EM)
			Modelo de Markov oculto
			Teoria Gráfica
			Mistura gaussiana
			Modelos competitivos particionais
			Clustering baseado em densidade
			Clustering baseado em gráfico, em modelo
	<b>Aprendizado por reforço</b>		Processo de decisão Markov
			Programação Dinâmica
			Aprendizagem por reforço profundo
			Técnicas Ad-Hoc
			Pesquisa direta de política
			Métodos de Monte Carlo
			Aprendizagem de diferenças temporais

Fonte: autor

Ao abordar os artefatos relacionados com Aprendizado de Máquina, faz-se necessário incluir as ferramentas de desenvolvimento disponíveis para o desenvolvimento dos artefatos. Para tanto, foram realizadas a 8 RSL e a 9RSL (Quadro 3) com intuito de explorar a preferência entre os pesquisadores no desenvolvimento de soluções de Aprendizado de Máquina em softwares proprietário (Matlab) ou em linguagem de código aberto e gratuito (Python). O resultado consta do Quadro 28.

## 2.2 Identificação da Classe de Problemas

Com base nos dezoito estudos selecionados na3RSL e listados no Quadro 34, foi possível identificar as Classes de Problemas e as abordagens de cada trabalho (Quadro 36).

Foi observado o uso de denominações diferentes para o mesmo conceito. VU; CU; MIN e WANG (2017) basearam seus estudos nos fatores de risco de atraso em cronogramas. XU; WANG; LI; HUANG *et al.* (2018), por sua vez, pesquisaram riscos em cronogramas. Enquanto, PAZ; ROZENBOIM; CUADROS; CANO *et al.* (2018) abordaram risco de atraso. Já ANSAH e SOROOSHIAN (2018) e (RAZI; ALI; RAMLI, 2019) usam a terminologia de fontes de risco de atraso.

Neste trabalho foi adotado como classe de problema a classificação das técnicas de risco da NBR 31010 (ABNT, 2012), que as classificam de acordo com a etapa do processo a qual está relacionada (Figura 1) em: identificação de riscos; análise de riscos – análise de

consequências; análise de riscos – estimativa qualitativa, semi-quantitativa ou quantitativa da probabilidade; análise de riscos – avaliação da eficácia de quaisquer controles existentes; análise de riscos – estimativa do nível de risco; e avaliação de riscos.

Quadro 36- Classe de problemas identificados na RSL

Referência	Classes de problema	Abordagens do trabalho
(SANNI-ANIBIRE; ZIN; OLATUNJI, 2020)	Análise de risco de atraso	Desenvolve um modelo de aprendizado de máquina para avaliação de risco de atraso em projetos de edifícios altos.
(KOULINAS; XANTHOPOULOS; TSILIPIRAS; KOULOURIOTIS, 2020)	Análise de risco - estimar riscos de atraso	Abordagem baseada em simulação para estimar efetivamente os riscos de atraso em cronogramas de projetos e prever as possibilidades de conclusão do projeto dentro do prazo para vários cenários.
(ANSAH; SOROOSHIAN, 2018)	Identificar, analisar e classificar as fontes de atraso	Análise sistemática das fontes de atrasos considerando 4P (Projeto, Práticas, Participantes e Compras).
(BILGIN; DIKMEN; BIRGONUL, 2018)	Análise de atraso	Desenvolvimento de uma ontologia que forneça um entendimento comum sobre os conceitos relacionados à análise de atrasos e o conceito de atraso.
(GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI; NASSAR, 2020)	Identificação e classificação de fatores de risco	Modelos de aprendizado de máquina em ambientes complexos. Considerando as inter-relações imprecisas e o efeito acumulativo entre os fatores de risco para previsão de atraso.
(PAZ; ROZENBOIM; CUADROS; CANO <i>et al.</i> , 2018)	Análise de risco de atraso em cronograma	Determinação da data final do projeto e medir quantitativamente a importância do risco, considerando a incerteza e o impacto do risco no cronograma.
(BUDAYAN; DIKMEN; TALAT BIRGONUL; GHAZIANI, 2018)	Identificação e análise de risco de atraso.	Estimativa de risco de atraso ao nível de tarefa. Impacto do risco na duração do projeto.
(LI; HONG; FAN; XU <i>et al.</i> , 2018)	Identificar, analisar e simular riscos em cronograma	Impacto dos riscos (principais, críticos) no desempenho do cronograma, considerando inter-relações e interações subjacentes a várias variáveis de risco do cronograma.
(SACKEY; KIM, 2019)	Análise de risco	Este estudo contribui para a melhoria da precisão da estimativa de risco do cronograma ao propor uma variância e média modificadas do modelo PERT original.
(KIM; FISCHER; KAM, 2018)	Análise de risco	Quantificação de custos por incerteza, considerando o risco de tunelamento.
(LEE; LEE; ALLEMAN, 2018)	Identificar, analisar e simular fatores de risco.	Estimar o impacto dos fatores de risco no cronograma e simular a duração da construção.
(KIM; ROH; KIM; LEE <i>et al.</i> , 2019)	Identificação de fatores de risco	O objetivo deste estudo é analisar os casos de risco de gerenciamento de cronograma para edifícios de grande altura usando um gráfico de controle para gerenciar as informações de gerenciamento de destino nos limites superior e inferior.
(TOKDEMIR; EROL; DIKMEN, 2019)	Avaliação de risco	Neste artigo, um método de avaliação de risco de atraso é proposto para projetos programados por LOB.

(PEHLIVAN; ÖZTEMIR, 2018)	Análise de risco	Um modelo de simulação foi desenvolvido para determinar o impacto da variabilidade do cronograma na estimativa de custos.
(BASHIR; OJIAKO; MOTA, 2019)	Identificação e classificação dos fatores de risco	Interrelação imprecisas e o o o efeito acumulativo entre os fatores de risco.
(BALLESTEROS-PÉREZ; CERESO-NARVÁEZ; OTERO-MATEO; PASTOR-FERNÁNDEZ <i>et al.</i> , 2019)	Análise de métricas de sensibilidade	Comparação de todas as métricas relevantes de sensibilidade à atividade do SRA Proposta uma nova métrica com melhor desempenho para o ranking geral de sensibilidade.
(CHENG; WU; WU; NDURE, 2019)	Análise de risco	Modelar incertezas com impacto na duração do projeto e também para encontrar a correlação entre os riscos e a duração do projeto.
AGYEKUM-MENSAH e KNIGHT (2017)	Identificação e classificação dos fatores de risco	Uma revisão crítica da literatura e uma abordagem qualitativa foram consideradas para uma compreensão mais profunda e atualizada das causas dos atrasos.

Fonte: autor

Seguindo NBR 31010 (ABNT, 2012), foram identificadas as seguintes classes de problemas relacionadas aos fatores de riscos de atraso: a identificação (oito artigos); a classificação (quatro trabalhos); a análise (treze estudos); avaliação (uma vez); e a simulação (dois textos).

Além das cinco classes de problemas identificadas nos trabalhos, observou-se uma variedade de abordagens dentro de cada classe de problemas, com terminologias diferentes para se referir a mesma abordagem. Além disso, identificou-se trabalhos com mais de uma abordagem. O Quadro 37 explicita as abordagens adotadas e as agrupa por relacionamento.

Quadro 37 – Quantificação dos trabalhos de acordo com as abordagens

ABORDAGENS	QUANTIDADE DE TRABALHOS	TOTAL DE ABORDAGENS
Ocorrência simultânea das fontes de risco	1	1
Interação entre fontes de risco	4	6
Efeito acumulativo dos riscos	2	
Influência dos riscos no cronograma	1	3
Importância do risco	2	
Efeito dos riscos no cronograma	3	8
Impacto do risco no cronograma	5	
Generalidade e praticidade do modelo	1	1
Análise sistemática	1	1
Priorização das fontes de risco	1	1
Estimativa da probabilidade de atraso	1	1

Estimativa do atraso	1	3
Previsão do atraso	1	
Quantificação do atraso	1	
Estimativa de duração do projeto	1	2
Estimativa da data final do projeto	1	
Dados insuficientes e imprecisos	1	1
Compreensão dos fatores de risco		
Compreensão dos fatores de risco	1	1

Fonte: autor

### 3. COLETA E TRATAMENTO DOS DADOS (C.2)

Conforme a Metodologia de Pesquisa (Seção 3.1.3.3), o artefato desenvolvido (Sistema híbrido *neuro-fuzzy* - Figura 12) possui duas entrada de dados (ANFIS e RNA). No entanto, como pré-requisitos há a necessidade de definição: dos grupos (GFR) e os fatores de risco de atraso em obras militares (variáveis de entrada do ANFIS); e do espaço amostral que irá alimentar o sistema proposto neste trabalho.

#### 3.1 Definição dos Grupos e dos Fatores de Risco

O processo para seleção dos grupos (GFR) e os fatores de risco (FR) de atraso foi descrito na Seção Definição dos Grupos e fatores de risco 3.1.3.3.1. O resultado de cada uma das etapas intermediárias, ilustradas na Figura 18, serão apresentadas a seguir.

Cabe ressaltar, que o resultado final da seleção dos GFR e dos FR compreende uma Estrutura Analítica de Riscos - EAR, onde no primeiro nível está “Riscos de atraso em obras militares”. O segundo nível apresenta os grupos de fatores de riscos (GFR). No terceiro nível estão os fatores de riscos (FR).

##### 3.1.1 Seleção dos Grupos de fatores de risco (GFR)

No processo de Seleção dos Grupos de Fatores (GFR), na 1RSL e a 2 RSL foram selecionados 35 artigos que resultaram em uma listagem inicial de 27 GFR (Quadro 17).

Para a aplicação da Técnica Delphi, foi desenvolvido um questionário, que apresentava o Quadro 17 com os GFR obtidos da 1RSL e 2 RSL e solicitava aos especialistas que priorizassem no Quadro 38 os 7 GFR mais importantes.

Quadro 38 - Ficha modelo de opinião de especialistas - Técnica Delphi

1ª Rodada	2ª Rodada	3ª Rodada

Fonte: autor

De forma a garantir que metodologia proposta atenderia aos objetivos, foi realizado um teste. O objetivo do teste era avaliar a clareza e eficácia do questionário antes de ser repassado aos demais especialistas. Neste teste, o questionário foi discutido apenas com o Especialista 1, que o respondeu já como parte da primeira rodada de consulta aos especialistas. Os resultados da primeira rodada de respostas são consolidados no Quadro 39. Além disso, os GFR que obtiveram consenso são listados na primeira coluna do Quadro 39.

Quadro 39 - Ficha modelo de consolidação da opinião dos especialistas - Técnica Delphi

Consenso entre os especialistas	ESPECIALISTA 1	ESPECIALISTA 2	ESPECIALISTA 3	ESPECIALISTA 4	ESPECIALISTA 5

Fonte: autor

Com os resultados da primeira rodada, os especialistas respondem novamente o questionário (Quadro 38), considerando o Quadro 17 e o resultados da primeira rodada. A cada rodada, os resultados foram consolidados e o Quadro 39 foi reajustado. Os Quadros 40,41,42,43 e 44 apresentam as opiniões dos especialistas ao longo das três rodadas que foram realizadas para obtenção de consenso.

Quadro 40 - Ficha do Especialista 1 - Técnica Delphi

1ª Rodada	2ª Rodada	3ª Rodada
Execução	Execução	Execução
Projeto	Legal/Regulatório	Legal
Planejamento	Gerenciamento	Gerenciamento
Financeiro	Design	Design
Mudanças	Cliente	Financeiro
Clima	Clima	Localização geográfica
Distâncias	Distâncias	Cliente

Fonte: autor

Quadro 41 - Ficha do Especialista 2 - Técnica Delphi

1ª Rodada	2ª Rodada	3ª Rodada
Execução	Trabalho	Trabalho
Regulatório	Regulatório	Gerenciamento
Segurança do Trabalho	Fiscalização	Fiscalização
Fiscalização	Contrato	Contrato
Projeto	Gerenciamento	Financeiro
Planejamento	Socioambiental	Socioambiental
Mudanças	Externo	Design

Fonte: autor

Quadro 42- Ficha do Especialista 3 - Técnica Delphi

1ª Rodada	2ª Rodada	3ª Rodada
Obra	Execução	Execução
Financeiro	Legislação	Ambiental/Natural
Projeto	Contratante	Design
Planejamento	Gerenciamento	Comercial/ Recursos
Ambiental/Natural	Ambiental/Natural	Contratante
Materiais	Comercial/ Recursos	Econômico
Distâncias	Econômico	Político-Regulatório

Fonte: autor

Quadro 43 - Ficha do Especialista 4 - Técnica Delphi

1ª Rodada	2ª Rodada	3ª Rodada
Obra	Execução	Execução
Regulatório	Fiscalização	Fiscalização
Projeto	Projeto	Socioambiental
Ambiental/Natural	Regulatório	Gerenciamento
Social	Socioambiental	Design
Fiscalização	Financeiro	Legal
Econômico	Econômico	Econômico/Financeiro

Fonte: autor

Quadro 44 – Ficha do Especialista 5 – Técnica Delphi

1ª Rodada	2ª Rodada	3ª Rodada
Execução	Trabalho	Trabalho
Regulatório	Regulatório	Legal
Projeto	Projeto	Design
Ambiental	Ambiental	Ambiental
Segurança do trabalho	Econômico	Financeiro
Subcontratados	Planejamento	Gerenciamento
Mudanças	Cliente	Cliente

Fonte: autor

O Quadro 45 apresenta o resultado final do consenso dos especialistas (primeira coluna). Já as demais colunas apresentam a opinião final de cada especialista após a terceira rodada (Técnica Delphi).

Quadro 45 – Ficha com consolidação final da opinião dos especialistas – Técnica Delphi

CONSENSO ENTRE OS ESPECIALISTAS	ESPECIALISTA 1	ESPECIALISTA 2	ESPECIALISTA 3	ESPECIALISTA 4	ESPECIALISTA 5
Operacional/Trabalho/Execução	Execução	Trabalho	Execução	Execução	Trabalho
Contrato/Legal/Político-Regulatório	Legal	Contrato	Político-Regulatório	Legal	Legal
Design/Método construtivo/Soluções de projeto	Design	Design	Design	Design	Design
Gerenciamento/Projeto/Comercial/Recursos/terceirização/Tecnológico	Gerenciamento	Gerenciamento	Comercial/Recursos	Gerenciamento	Gerenciamento
Contratante/Fiscalização/Patrocinador/Consultor/Cliente/Proprietário	Cliente	Fiscalização	Contratante	Fiscalização	Cliente
Localização geográfica/Social/Ambiental/Natural	Localização geográfica	Socioambiental	Ambiental/Natural	Socioambiental	Ambiental
Econômico/Financeiro	Financeiro	Financeiro	Econômico	Econômico/Financeiro	Financeiro

Fonte: autor

### 3.1.2 Seleção dos Fatores de risco (FR)

A seleção dos FR compreendeu uma fase de levantamento dos FR e a posterior seleção dos FR.

#### 3.1.2.1 Levantamento dos Fatores de risco (FR)

Nesta etapa foram levantados FR relacionados com os GFR (Quadro 45) obtidos da literatura (1RSL e 2RSL). Os resultados são apresentados no Quadro 46. Foram ao todo 426 FR identificados.

Quadro 46 – Fatores de riscos obtidos da 1RSL e 2RSL

Referência	Fatores de risco
(TAH; CARR, 2000)	1. Econômico, 2. Físico, 3. Político, 4. Técnico, 5. Força de trabalho, 6. Equipamentos, 7. Subcontratado, 8. Materiais, 9. Local do projeto, 10. Design, 11. Financeiro, 12. Contrato, 13. Cliente, 14. Gerencial, 15. Ambiental
(CARR; TAH, 2001)	1. Fadiga, 2. Segurança, 3. Adequação, 4. Avaria, 5. Disponibilidade, 6. Qualidade, 7. Clima, 8. Temperatura, 9. Condições do solo 10. Investigação no local
(DEY, 2001)	1. Mudança no escopo do projeto, 2. Seleção da tecnologia, 3. Seleção do método de implementação, 4. Equipamentos, 5. Materiais, 6. Mudanças nas decisões e engenharia, 7. Variações de preço, 8. Finanças, 9. Mudança nos regulamentos locais, 10. Mudança nas políticas governamentais, 11. Avaliação incorreta, 12. Competência dos proprietários, fornecedores, vendedores e consultores do projeto, 13. Condições ambientais e climáticas
(SHEN; WU; NG, 2001)	1. Aumento dos custos decorrentes de mudanças nas políticas, 2. Estudos de viabilidade ruins do projeto, 3. Atraso no projeto, 4. Previsão inexata da demanda do mercado, 5. Seleção inadequada do local do projeto, 6. Seleção incorreta do tipo de projeto, 7 Seleção inadequada de parceiros do projeto, 8. Burocracia na emissão de licenças, 9. Mudanças no design, 10. Aumento dos custos provenientes de nova seleção
(BUNNI, 2003)	1. Seleção de proprietários, 2. Seleção do local do projeto, 3. Falta de inspeção e pesquisa, 4. Estimativa financeira insuficiente, 5. Condições dos contratos, 6. Escolha inadequada de design em relação a outros e à sociedade, 7. Falta de técnicos conhecimento moderno; 8. Falha nas previsões; 9. Local do projeto, 10. Fraude, roubo, 11. Pessoal

(BALOI; PRICE, 2003)	1. Ambiguidade no escopo do projeto, 2. Complexidade do projeto, 3. Tamanho e tipo de projeto, 4. Políticas dos contratantes, 5. Status do mercado, 6. Número de mudanças, 7. Condições geográficas, 8. Condições inesperadas do local do projeto, 9. Condições climáticas, 10. Variações de preços, 11. Inflação, 12. Moeda, 13. Taxa de juros, 14. Fatores regionais e externos
(JHA; IYER, 2005)	1. Escassez de recursos humanos, 2. Configuração inicial inexata do projeto, 3. Conflito entre gerentes de projeto, 4. Discordância entre designers e clientes, 5. Discordância entre o gerenciamento do projeto e a mídia externa, como contratados, 6. Incompreensão dos procedimentos operacionais, 7. Conflito entre os membros do projeto, 8. Condições climáticas regionais desfavoráveis, 9. Oposições políticas e cenário econômico, 10. Exclusividade das atividades do projeto, 11. Tendência a culpar os outros
(ZOU; ZHANG; WANG, 2007)	1. Programação exata do projeto, 2. Dificuldades no orçamento do projeto, 3. Instabilidade nos clientes, 4. Instabilidades no design, 5. Programação inadequada, 6. Informações insuficientes do local do projeto, 7. Estimativa de custos incorreta ou incompleta, 8. Fraqueza na gestão dos contratados, 9. Fracas habilidades dos trabalhadores, 10. Inacessibilidade aos gerentes e especialistas exigidos, 11. Falta de seguro para instalações e equipamentos principais, 12. Falta de seguro para pessoal, 13. Operações inseguras, 14. Falta de processo legal por demolição ilegítima de resíduos de construção; 16. Poluição do ar, som e água por causa das atividades do projeto; 17. Falta na competência dos gerentes de empreiteiros 18. Falta na competência dos fornecedores para entrega pontual 19. Burocracia governamental, 20. Procedimentos de licenças governamentais, 21. Aumento dos custos de materiais
(ZENG, JIAHAO; AN, MIN; SMITH, N. J., 2007)	1. Tendência e motivação, 2. Treinamento e gerenciamento, 3. Comunicações, 4. Layout e área do projeto, 5. Restrições no local do projeto, 6. Programação do trabalho, 7. Materiais adequados, 8. Acessibilidade aos materiais, 9. Equipamentos adequados 10. Acessibilidade dos equipamentos
(DIKMEN; BIRGONUL; HAN, 2007)	1. Ambiguidades nos métodos de construção, 2. Complexidades, 3. Inacessibilidade de recursos, 4. Planejamento fraco, 5. Ambiguidades no escopo do projeto, 6. Erros de projeto, 7. Falta de financiamento, 8. Atraso nos pagamentos, 9. Tendências dos clientes, 10. Clientes inexperientes, 11. Experiência em projetos similares
(HSUEH; PERNG; YAN; LEE, 2007)	1. Comunicações com parceiros, 2. Registros dos parceiros, 3. Contratos, 4. Duração do projeto, 5. Liquidez requerida, 6. Complexidade, 7. Tipo de projeto, 8. Subcontratante, 9. Habilidades técnicas, 10. Acessibilidade de máquinas e equipamentos, 11. Posição do local do projeto, 12. Pessoal, 13. Mudança de políticas governamentais, 14. Flutuações nas taxas de juros, 15. Instalações gerais, 16. Flutuações nos preços dos materiais, 17. Competições, 18. Demanda
(ALI; STEWART; QURESHI, 2007)	1. Habilidades técnicas do contratado, 2. Instabilidade política, 3. Qualidade, 4. Estudos de viabilidade inadequados, 5. Estabilidade financeira do contratado, 6. Suborno, 7. Tempo de término do projeto, 8. Flutuações e inflação do mercado, 9. Avaliação incorreta
(ZAYED; AMER; PAN, 2008)	1. Problemas na transferência e implementação de tecnologia, 2. Retenção de vantagem tecnológica, 3. Possibilidade de disputas contratuais, 4. Problemas na solução de controvérsias devido às leis do país, 5. Escassez de mão de obra qualificada, 6. Disponibilidade de equipamento especial, 7. Atrasos no fornecimento de material, 8. Atraso no projeto e aprovação regulatória, 9. Projeto defeituoso, erro e retrabalho, 10. Ordem de mudança de trabalho, 11. Dificuldades para atender ao fornecimento de programas de construção, 12. Condições adversas imprevistas do terreno, 13. Má qualidade dos materiais, 14. Qualidade ruim da obra, 15. Gerente de construção, 16. Atrasos com terceiros, 17. Segurança, 18. Condições climáticas e causas naturais de atraso, 19. Danos físicos
(ZAVADSKAS; TURSKIS; TAMOSAITIENE, 2010)	1 Político, 2. Econômico, 3. Social, 4. Clima, 5. Tempo, 6. Custo, 7. Qualidade, 8. Técnico, 9. Construção, 10. Recursos, 11. Membros do projeto, 12. Local do projeto, 13. Documentos e informações
(WANG; YUAN, 2011)	1. Consequências da tomada de decisão, 2. Experiência em engenharia, 3. Completude das informações do projeto, 4. Sensibilidade da informação externa, 5. Motivação da decisão, 6. Conhecimento profissional, 7. Escopo do conhecimento, 8. Ousadia, 9. Força do juiz, 10. Força econômica da empresa, 11. Experiência social, 12. Valores, 13. Tendência a revisão técnica, 14. Tendência a alcançar os objetivos de decisão, 15. Cenário econômico externo
(NIETO-MOROTE; RUZ-VILA, 2011)	1 Falta de processo correto, 2. Falta de recursos, 3. Inexperiência dos membros do projeto, 4. Falta de abordagem motivacional, 5. Erros de projeto, 6. Alterações de projeto, 7. Falhas de fabricação, 8. Baixa eficiência, 9. Falta de experiência, 10. Acidentes, 11. Questões técnicas, 12. Atraso no suprimento de necessidades, 13. Falta de qualidade
(EBRAT; GHODSI, 2014)	<b>Gerenciamento:</b> 1. Habilidade e conhecimento técnico, 2. Comunicação, 3. Seleção dos membros da Equipe de Projeto, 4. Suporte da equipe de gerenciamento, 5. Qualidade do Gerenciamento. <b>Design:</b> 1. Contrato e condições, 2. Cronograma, 3. Método Construtivo, 4. Estudo de viabilidade. <b>Projeto:</b> 1. Duração do projeto, 2. Densidade do projeto, 3. Tipo e natureza, 4. Complexidade. <b>Financeiro:</b> 1. Contrato e condições, 2. Poder econômico da empresa, 3. Estabilidade financeira dos contratantes. <b>Operacional:</b> 1. Equipamentos e

	<p>materiais, 2. Pessoal e equipes executivas, 3. Defeito de estrutura e falha de operação. <b>Externos:</b> 1. Leis, políticas e governos, 2. Proprietário, contratante, parceiros e fornecedores, 3. Mercado, 4. Segurança, 5. Meio ambiente e cultura.</p>
(GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI; NASSAR, 2020)	<p><b>Proprietário:</b> 1. Planejamento inadequado do projeto pelo proprietário, 2. Selecionando empreiteiros inadequados, 3. Atrasos na entrega do local ao contratado, 4. Atrasos na revisão e aprovação de documentos de projeto, 5. Pedidos de alteração pelo proprietário, 6. Processo lento de tomada de decisão pelo proprietário, 7. Atrasos nos pagamentos em andamento pelo proprietário, 8. Suspensão do trabalho pelo proprietário, 9. Má coordenação do proprietário entre consultor e contratado, 10. Conflitos entre propriedade conjunta do projeto. <b>Consultor:</b> 1. Atrasos na revisão e aprovação de documentos de projeto, 2. Atrasos na realização de inspeções e testes, 3. Atrasos na aprovação de grandes mudanças no escopo do trabalho do consultor, 4. Experiência inadequada do consultor, 5. Má comunicação do consultor com o contratado e o proprietário. <b>Contratante:</b> 1. Planejamento ineficaz do projeto pelo contratado, 2. Incompetência ou inexperiência do contratante, 3. Investigação inadequada do local, 4. Investigação inadequada do local, 5. Má gestão e supervisão do local, 6. Atrasos devido ao trabalho de subcontratados não confiáveis, 7. Mudança frequente de subcontratados, 8. Retrabalho devido a erros durante a construção, 9. Má comunicação do contratado com o consultor e o proprietário. <b>Design:</b> 1. Experiência inadequada da equipe de design, 2. Incompreensão dos requisitos do proprietário pelo engenheiro de projeto, 3. Atrasos na produção de documentos de projeto, 4. Erros de projeto / desenhos de projeto incompletos ou pouco claros. <b>Trabalho:</b> 1. Escassez de mão de obra, 2. Baixa produtividade do trabalho, 3. Conflitos pessoais entre trabalho. <b>Materiais:</b> 1. Escassez de materiais de construção no mercado, 2. Atrasos na entrega de materiais, 3. Qualidade inadequada dos materiais, 4. Danos em materiais classificados, 5. Alterações nos tipos e especificações de material durante a construção. <b>Equipamentos:</b> 1. Escassez de equipamentos, 2. Lenta mobilização de equipamentos, 3. Baixa produtividade e eficiência do equipamento, 4. Avarias frequentes do equipamento, 5. Equipamento inadequado ou falta de equipamento de alta tecnologia. <b>Projeto:</b> 1. Tipo inadequado de licitação e premiação do projeto, 2. Erros ou discrepâncias nos documentos do contrato, 3. A duração original do contrato é muito curta, 4. Penalidades ineficazes por atraso, 5. Falta de comunicação entre as partes do projeto, 6. Disputas legais entre participantes do projeto. <b>Externo:</b> 1. Atrasos na obtenção de licenças do município, 2. Mudanças nos regulamentos e leis governamentais, 3. Atrasos na prestação de serviços de serviços públicos (por exemplo, água, eletricidade, telefones, etc.), 4. Condições inesperadas de superfície e subsuperfície (por exemplo, solo, lençol freático, etc.), 5. Problemas com vizinhos, 6. Condições climáticas desfavoráveis, 7. Acidentes durante a construção.</p>
(BELTRÃO; CARVALHO, 2019)	<p><b>Social:</b> 1. Ação civil pública, 2. Dificuldade de desapropriação do terreno, 3. Greves de grupos de trabalhadores que afetem direta ou indiretamente a obra, 4. Oposição pública e protestos, 5. Questões indígenas, quilombolas e arqueológicas, 6. Vandalismo. <b>Projeto:</b> 1. Atraso no desenvolvimento e/ou aprovação do projeto, 2. Complexidade do projeto subestimada, 3. Edital e Contrato deficientes, 4. Estimativa de custos subestimada ou superestimada, 5. Orçamento subestimado ou superestimado, 6. Soluções de projeto inadequadas. <b>Construção:</b> 1. Adequação de interferências (redes de água, luz, esgoto, etc.), 2. Alterações no projeto durante a execução da obra, 3. Condições de terreno diferentes das previstas, 4. Descumprimento de especificações técnicas contratuais, 5. Indisponibilidade de insumos, 6. Inexperiência no gerenciamento de obra, 7. Insolvência/falência de subcontratados e/ou fornecedores, 8. Planejamento falho, 9. Problemas na implementação e transferência de tecnologia. <b>Financiamento:</b> 1. Alterações societárias, 2. Alto custo de financiamento, 3. Alto custo dos seguros, 4. Escassez de fontes privadas de financiamento, 5. Escassez de fontes públicas de financiamento, 6. Falta de atratividade financeira do projeto para investidores, 7. Mudança nas políticas governamentais de financiamento. <b>Econômico:</b> 1. Crise econômica, 2. Inflação, 3. Variação dos custos de insumos, 4. Política monetária, 5. Variação de alíquotas e bases de cálculo de tributos, 6. Variação de câmbio, 7. Variação dos custos de transporte. <b>Político:</b> 1. Burocracia, 2. Corrupção, 3. Corte do projeto, 4. Criação de tributos, 5. Disputas políticas, 6. Ingerência política, 7. Mudança de governo, 8. Risco legal e regulatório. <b>Ambiental:</b> 1. Catástrofes naturais, 2. Condicionantes ambientais desproporcionais e excessivos, 3. Condições climáticas desfavoráveis, 4. Dificuldade na obtenção de licenças ambientais, 5. Impactos ambientais imprevistos. <b>Gestão:</b> 1. Atraso no pagamento dos serviços prestados, 2. Comunicação falha entre as partes envolvidas, 3. Disputas contratuais, 4. Falta de transparência, 5. Fiscalização inadequada da obra, 6. Indisponibilidade orçamentária.</p>
(SUBRAMANYAN; SAWANT; BHATT, 2012)	<p><b>Projeto:</b> 1. Tamanho do projeto, 2. Exclusividade da localização, 3. Aprovações regulatórias, 4. Tipo de projeto, 5. Concorrência intensa na fase de licitação, 6. Metodologia de seleção de propostas, 7. Desvio de escopo, 8. A duração do contrato original é rígida e não tem escopo para acomodar quaisquer mudanças, 9. Nenhuma definição clara de conclusão do trabalho, 10. Penalidades por atraso, 11. Disputas legais e ações judiciais, 12. Fluxo de finanças, 13. Estratégia de seguro, 14. Exposição a acidentes, 15. Gestão da informação, 16. Impactos imprevistos. <b>Proprietário:</b> 1. Definição inadequada do escopo do projeto no início, 2. Atraso na entrega do local ao empreiteiro, 3. Chances de enfrentar crise financeira, 4. Atraso na revisão e aprovação do documento de design pelo proprietário, ou seja, ineficiente na tomada de decisão, 5. Atraso nos pagamentos pelo proprietário; não oferecendo incentivos para o início conclusão das</p>

atividades, 6. Encerramento repentino do trabalho pelo proprietário, 7. Expectativa excessivamente alta do proprietário, 8. Falta de visão / incapacidade de identificar atividades críticas, 9. Mantendo as principais decisões em suspenso, 10. Alterações feitas pelo proprietário durante a construção, 11. Falta de exposição do proprietário às tendências em mudança na indústria. **Contratante:** 1. Atraso na mobilização, 2. Má gestão do local e supervisão por parte da contratada, 3. Métodos de construção inadequados / variações de qualidade, 4. Atrasos no trabalho do subcontratado, 5. Mudança frequente de subcontratados, 6. Fraca qualificação / experiência do contratante, 7. Manter as principais decisões em suspenso, 8. Ignorância do impacto da cláusula contratual, 9. Chances de enfrentar crise financeira. **Consultor:** 1. Coleta de dados e pesquisa insuficientes antes do projeto, 2. Experiência inadequada do consultor no que diz respeito ao tipo de projeto, 3. Atraso na realização de inspeção e teste por consultor, 4. Inflexibilidade do consultor, 5. Design complexo / não executável, 6. Detalhes pouco claros e inadequados nos desenhos, 7. Chances de consultor deixando o projeto no meio do caminho, 8. Não uso de software de projeto de engenharia avançado. **Gerenciamento:** 1. Capacidade técnica do gerente de projeto, 2. Uso de ferramentas e técnicas de planejamento adequadas pelo gerente de projeto, 3. Mantendo as principais decisões em suspenso, 4. Falta de indução e treinamento de recursos humanos, 5. Atitude negativa do gerente de projeto, 6. Falta de capacidade de coordenação e relacionamento do gerente de projeto com outros contratados no local, 7. Relutância em manter o cronograma alvo por parte do topo gestão, 8. Falta de qualidade de liderança do gerente de projeto, 9. Falta de monitoramento e feedback eficazes por parte do gerente de projeto, 10. Chances de gerente de projeto deixando o projeto, 11. Ferramentas e técnicas. **Recurso:** 1. Seleção de materiais e equipamentos, 2. Atraso na entrega de materiais, 3. Mudanças nos tipos de materiais e especificações durante a construção, 4. Variação irreal de preço no material, 5. Seleção inadequada de equipamentos, 6. Avarias de equipamento, 7. Falta de equipamento, 8. Variações de qualidade, 9. Escassez de mão de obra, 10. Força de trabalho não qualificada, 11. Má gestão de estoque. **Ambiente externo:** 1. Ambiente social desfavorável, 2. Flutuações econômicas / de mercado desfavoráveis, 3. Ambiente político desfavorável, 4. Mudando as políticas governamentais, 5. Greves trabalhistas, 6. Calamidades naturais, 7. Eventos imprevistos repentinos. **Financeiro:** 1. Políticas financeiras, 2. Liquidez, 3. Custo de capital, 4. Risco de mercado, 5. Risco de crédito, 6. Risco operacional, 7. Risco de lucratividade, 8. Risco de contingência, 9. Risco de tempo.

Fonte: autor

Os 426 FR obtidos da literatura (Quadro 46) foram relacionados com os GFR selecionados na fase anterior e organizados dentro de EAR (Quadro 47). Ao final, após a eliminação dos FR repetidos, resultaram em 262 FR.

Quadro 47 - Estrutura Analítica de Erros (EAR)

Grupo de Fatores de Risco (GFR)	Fatores de risco (FR)
<b>CONSTRUÇÃO</b>	Saúde e Segurança, Avarias em equipamentos, Condições inesperadas do local do projeto, Operações e Condições inseguras, Falta, Acidentes, Atrasos na prestação de serviços de serviços públicos (por exemplo, água, eletricidade, telefones, etc.), Condições inesperadas de superfície e subsuperfície (por exemplo, solo, lençol freático, etc.), Problemas com vizinhos, Acidentes durante a construção, Adequação de interferências (redes de água, luz, esgoto, etc.), Exposição a acidentes, Impactos ambientais imprevistos, Risco operacional, Atraso na mobilização.
<b>COMPLIANCE</b>	Questões contratuais com deficiência (Metodologia de seleção de propostas, penalidades, especificações técnicas contratuais, Edital, etc), Mudança nos regulamentos para aprovação de licenças, Burocracia, Fraude, Roubo, Políticas dos contratantes, Atraso para obtenção de licenças nas três esferas (federal, estadual e municipal), Mudança de políticas governamentais, Instabilidade política, Suborno, Disputas contratuais, Problemas na solução de controvérsias devido às leis do país, Atraso na aprovação regulatória, Leis, políticas e governos, Disputas legais entre participantes do projeto, Tipo inadequado de licitação e premiação do projeto, Corrupção, Criação de tributos, Disputas políticas, Mudança de governo, Risco legal e regulatório, Mudança das políticas governamentais (regulamento, leis, etc.).
<b>PROJETO</b>	Qualidade, Investigação no local, Seleção da tecnologia, Estudos de viabilidade ruins do projeto, Seleção incorreta do tipo de projeto, Seleção do local do projeto, Falta de inspeção e pesquisa, Estimativa financeira insuficiente, Escolha inadequada de design em relação a outros e à sociedade, Falha nas previsões, Ambiguidade no escopo do projeto, Complexidade do projeto, Configuração inicial inexata do projeto, Dificuldades na elaboração do orçamento do projeto, Informações

	<p>insuficientes do local do projeto, Estimativa de custos incorreta ou incompleta, Layout e área do projeto, Restrições no local do projeto, Seleção dos Materiais adequados, Falha na estimativa da duração do projeto, Complexidade, Alterações de projeto, Cronograma, Método Construtivo, Densidade do projeto, Tipo e natureza, Complexidade, Incompreensão dos requisitos do proprietário pelo engenheiro de projeto, Atrasos na produção de documentos de projeto, Detalhamento insuficiente do projeto (incompletos ou pouco claros), Erros ou discrepâncias nos documentos do contrato, Atraso no desenvolvimento e/ou aprovação do projeto, Orçamento subestimado ou superestimado, Soluções de projeto inadequadas, Planejamento falho, Tamanho do projeto, Tipo de projeto, Desvio de escopo, A duração do contrato original é rígida e não tem escopo para acomodar quaisquer mudanças, Nenhuma definição clara de conclusão do trabalho, Coleta de dados e pesquisa insuficientes antes do projeto, Design inviável / não executável.</p>
<p><b>CONTRATADO</b></p>	<p>Materiais (Disponibilidade, Qualidade), Seleção do método de implementação, Avaliação incorreta na escolha do portfólio, Seleção inadequada de parceiros do projeto, Tamanho e tipo de projeto, Conflito entre gerentes de projeto, Exclusividade das atividades do projeto, Programação inadequada, Processo para destinação de resíduos de construção, Falta na competência dos gerentes de empreiteiros, dos fornecedores, Treinamento e gerenciamento, Equipamentos adequados, Acessibilidade dos equipamentos, Mudança frequente de subcontratados, Ambiguidades nos métodos de construção, Comunicações com parceiros, Inacessibilidade de recursos, Planejamento fraco, Experiência em projetos similares, Registros dos parceiros, Subcontratante, Habilidades técnicas do contratado, Problemas na transferência e implementação de tecnologia, Retenção de vantagem tecnológica, Disponibilidade de equipamento especial, Atrasos no fornecimento de material pelos subcontratados/parceiros, Dificuldades para atender ao fornecimento de programas de construção, Má qualidade dos materiais, Atrasos com terceiros, Experiência em engenharia, Falta de experiência em gerenciamento (parceiros e fornecedores), Baixa eficiência, Falhas de fabricação, Habilidade e conhecimento técnico, Seleção dos membros da Equipe de Projeto, Suporte da equipe de gerenciamento, Escassez de equipamentos, Lenta mobilização de equipamentos, Baixa produtividade e eficiência do equipamento, Avarias de equipamento, Equipamento inadequado ou falta de equipamento de alta tecnologia, Insolvência/falência de subcontratados e/ou fornecedores, Problemas na implementação e transferência de tecnologia, Comunicação falha entre as partes envolvidas, Falta de transparência, Gestão da informação, Capacidade técnica do gerente de projeto, Uso de ferramentas e técnicas de planejamento adequadas pelo gerente de projeto, Falta de indução e treinamento de recursos humanos, Atitude negativa do gerente de projeto, Falta de capacidade de coordenação e relacionamento do gerente de projeto com outros contratados no local, Relutância em manter o cronograma alvo por parte do topo gestão, Falta de qualidade de liderança do gerente de projeto, Falta de monitoramento e feedback eficazes por parte do gerente de projeto, Chances de gerente de projeto deixando o projeto, Seleção de materiais e equipamentos, Seleção inadequada de equipamentos, Falta de equipamento, Má gestão de estoque, Risco de contingência, Risco de tempo.</p>
<p><b>CONTRATANTE</b></p>	<p>Cliente, Proprietário, contratante, Mudanças nas decisões de engenharia (design), Avaliação incorreta, Competência dos proprietários, Seleção de proprietários, Discordância entre designers e clientes, Discordância entre o gerenciamento do projeto e a mídia externa, Incompreensão dos procedimentos operacionais, Instabilidade nos clientes, Clientes inexperientes, Experiência em projetos similares, Tendências dos clientes, Habilidades técnicas da equipe de fiscalização e dos consultores, Experiência em engenharia, Planejamento inadequado do projeto pelo proprietário, Selecionando empreiteiros inadequados, Atrasos na entrega do local ao contratado, Atrasos na revisão e aprovação de documentos de projeto, Pedidos de alteração pelo proprietário, Processo lento de tomada de decisão pelo proprietário, Suspensão do trabalho pelo proprietário, Má coordenação do proprietário entre consultor e contratado, Conflitos entre propriedade conjunta do projeto, Atrasos na revisão e aprovação de documentos de projeto, Atrasos na realização de inspeções e testes, Atrasos na aprovação de grandes mudanças no escopo do trabalho do consultor, Experiência inadequada do consultor, Má comunicação do consultor com o contratado e o proprietário, Planejamento ineficaz do projeto pelo contratado, Incompetência ou inexperiência do contratante, Investigação inadequada do local, Investigação inadequada do local, Má gestão e supervisão do local, Fiscalização inadequada da obra, Atraso na entrega do local ao empreiteiro, Atraso na revisão e aprovação do documento de design pelo proprietário, ou seja, ineficiente na tomada de decisão, Encerramento repentino do trabalho pelo proprietário, Expectativa excessivamente alta do proprietário, Falta de visão / incapacidade de identificar atividades críticas, Má gestão do local e supervisão por parte da contratada, Métodos de construção inadequados / variações de qualidade, Fraca qualificação / experiência do contratante, Ignorância do impacto da cláusula contratual, Experiência inadequada do consultor no que diz respeito ao tipo de projeto, Atraso na realização de inspeção e teste por consultor, Inflexibilidade do consultor, Chances de consultor deixando o projeto no meio do caminho, Não uso de software de projeto de engenharia</p>

	avançado, Seleção de materiais e equipamentos, Mudanças nos tipos de materiais e especificações durante a construção, Mudança no escopo do projeto.
<b>SOCIOAMBIENTAL</b>	Local do projeto, Condições ambientais e climáticas, Pessoal, Condições geográficas, Fatores regionais e externos, Escassez de recursos humanos, Fracas habilidades dos trabalhadores, Tendência e motivação, Escassez de mão de obra qualificada, Causas naturais de atraso, Experiência social, Meio ambiente e cultura, Baixa produtividade do trabalho, Conflitos pessoais entre trabalho, Ação civil pública, Dificuldade de desapropriação do terreno, Greves de grupos de trabalhadores que afetem direta ou indiretamente a obra, Oposição pública e protestos, Questões indígenas, quilombolas e arqueológicas, Vandalismo, Catástrofes naturais, Ambiente social desfavorável, Greves trabalhistas, Calamidades naturais, Escassez de mão de obra.
<b>MERCADOLÓGICO</b>	Estabilidade financeira do contratado, Variações de preço, Aumento dos custos dos insumos, Previsão inexata da demanda do mercado, Status do mercado, Inflação, Taxa de juros, Cenário econômico, Falta de seguro para instalações e equipamentos principais, Falta de seguro para pessoal, Falta de financiamento, Atraso nos pagamentos, Liquidez requerida, Força econômica da empresa, Atraso nos suprimentos necessários, Contrato e condições, Poder econômico da empresa, Escassez de materiais de construção no mercado, Atrasos na entrega de materiais, Qualidade inadequada dos materiais, Indisponibilidade de insumos, Alterações societárias, Alto custo de financiamento, Alto custo dos seguros, Escassez de fontes privadas de financiamento, Escassez de fontes públicas de financiamento, Falta de atratividade financeira do projeto para investidores, Mudança nas políticas governamentais de financiamento, Política monetária, Variação de alíquotas e bases de cálculo de tributos, Variação de câmbio, Variação dos custos de transporte, Atraso no pagamento dos serviços prestados, Indisponibilidade orçamentária, Fluxo de finanças, Estratégia de seguro, Atraso nos pagamentos pelo proprietário; não oferecendo incentivos para o início conclusão das atividades, Chances de enfrentar crise financeira, Políticas financeiras, Custo de capital, Risco de mercado, Risco de crédito, Risco de lucratividade.

Fonte: autor

A EAR representada pelo Quadro 47 foi organizada na forma de um questionário e enviado a dois grupos, que representam as empresas com experiência na execução de obras militares e engenheiros militares que trabalham na fiscalização de obras. O objetivo esperado com os questionários é o de obter contribuições de FR relacionados com obras militares, mas que não tenham sido identificados na literatura científica.

O questionário foi enviado para 169 empresas, com cadastro no OPUS e para 120 profissionais do Sistema de Obras Militares (SOM) com experiência na fiscalização de obras militares. O questionário foi elaborado no “*Google Formulário*”. O questionário foi encaminhado por “*e-mail*” com o texto da Figura 27 para o grupo das empresas e por mensagem no *whatsapp* com o texto da Figura 28 ao grupo de profissionais do SOM.

Figura 27 - Texto da mensagem de e-mail encaminhando o questionário

Prezado(a) empresário(a), inicialmente, espero que esteja bem e se cuidando junto com a sua família.

Sou TC Castro, da Diretoria de Obras Militares e estou escrevendo minha dissertação de mestrado sobre análise de risco de atraso em obras militares, NA FASE DE EXECUÇÃO. Considero este estudo seja de grande importância para as obras militares como reflexo em diversas partes interessadas, inclusive o Sr.(a).

O objetivo deste estudo é desenvolver uma ferramenta para identificar o nível de criticidade no atraso de obras militares. Desta forma, junto com o Sr.(a) podemos unir esforços para ações preventivas e de mitigação de atraso em obras militares.

Como parte da minha pesquisa, encontra-se abaixo um link para um questionário sobre FATORES DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES.

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScAK2AOxxU-g-Os3Nb7gT54-9JD9mqw\\_VPT1oP5qBuile3IVQ/viewform?usp=pp\\_url](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScAK2AOxxU-g-Os3Nb7gT54-9JD9mqw_VPT1oP5qBuile3IVQ/viewform?usp=pp_url)

Não precisa se preocupar não é vírus, observe que é um link do formulário do google doc.

Gostaria de contar com toda a experiência do Sr e de sua equipe. **Todos tem condições de contribuir. O Sr.(a) pode repassar o link para outros integrantes da sua equipe.**

**DESDE JÁ AGRADEÇO TODA A ATENÇÃO E TODA AJUDA QUE POSSA SER DADA.**

Fonte: autor

Figura 28 - Texto da mensagem whatsapp encaminhando o questionário

Prezados(as) companheiros(as), inicialmente, espero que todos estejam bem e se cuidando.

Sou TC Castro, da Diretoria de Obras Militares e estou escrevendo minha dissertação de mestrado sobre análise de risco de atraso em obras militares. Considero este estudo de grande importância para o Sistema de Obras Militares (SOM) e irá aludá-los na definição do nível de criticidade em uma obra, permitindo que medidas mitigadoras sejam tomadas de forma preventiva.

Como parte da minha pesquisa, encontra-se anexo um link para um questionário sobre FATORES DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES. Gostaria de contar com toda a experiência de vcs, que carregam o nosso SOM. **Todos tem condições de contribuir, valorizem o trabalho de vocês como eu valorizo!!**

[https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfeTfm2EGSgT8DmgeQz0gOU-tic4oxR\\_CLZLL5iO7y7T06o1Q/viewform?usp=pp\\_url](https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfeTfm2EGSgT8DmgeQz0gOU-tic4oxR_CLZLL5iO7y7T06o1Q/viewform?usp=pp_url)

**DESDE JÁ AGRADEÇO TODA A ATENÇÃO E TODA AJUDA QUE POSSA SER DADA.**

Fonte: autor

A Figura 29 ilustra o questionário do “GoogleForms” enviado aos grupos selecionados. Os questionários foram enviados em 24 Jul 2010, ficando disponível por 30 dias até 24 Ago 2020.

Figura 29 - Questionário para identificação de Fatores de risco

## Questionário de fatores de risco em obras militares

Este questionário faz parte da minha dissertação de mestrado: "INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A ANÁLISE DE RISCO DE ATRASO EM OBRAS MILITARES USANDO UM SISTEMA HÍBRIDO NEURO-FUZZY"

Este questionário possui duas partes:

PARTE 1 - IDENTIFICAÇÃO DO PROFISSIONAL

PARTE 2 - IDENTIFICAÇÃO DE FATORES DE RISCO

Fonte: Google Formulário

O questionário enviado aos profissionais do SOM teve 52 respostas, correspondendo a aproximadamente 42% do universo consultado. O questionário às empresas teve 14 respostas, isto é, 8% dos consultados responderam. As 11 contribuições obtidas pelos questionários são apresentadas no Quadro 48.

Quadro 48 - Contribuição obtidas dos questionários

Grupo de Fatores de Risco (GFR)	Fatores de risco (FR)
<b>CONSTRUÇÃO</b>	Restrição de tráfego no acesso ao local da obra (grandes centros urbanos)
<b>CONTRATANTE</b>	Falta de dedicação e comprometimento da equipe de Fiscalização
	Equipe de Fiscalização com sobrecarga de trabalho
<b>PROJETO</b>	Carga de trabalho da equipe projetista
	Projeto elaborado em BIM (risco positivo)
<b>COMPLIANCE</b>	Ineficiência da equipe administrativa de Compliance da contratada
<b>MERCADOLÓGICO</b>	Capacidade da contratada de suportar atrasos no pagamento de até 90 dias
	Falta de numerário para pagamentos pelo contratante por período superior a 90 dias
<b>CONTRATADO</b>	Falha no dimensionamento das equipes de trabalho
	Demora na fabricação própria de insumos da obra (pré-moldados, estrutura metálica, etc.)
	Falta de maturidade organizacional para gerenciamento de projetos

Fonte: autor

### 3.1.2.2 Seleção dos Fatores de risco (FR)

Ao final do levantamento, foram identificados 262 FR na literatura científica e 11 FR por meio dos questionários, totalizando 273 FR. Esse total de FR dificulta a implementação prática da solução de análise de risco. Com intuito de reduzir a quantidade de FR foi adotado a Técnica de Pareto, onde 30% dos FR mais votados por um grupo de 10 especialistas são responsáveis por mais de 70% dos riscos. O Quadro 49, mostra os 82 FR selecionados com sua respectiva votação.

Quadro 49 - Votos dos Fatores de riscos selecionados

Construção / Operacional - CONSTRUÇÃO		VOTOS
<b>CN1</b>	Fatos supervenientes relacionados com as ligações provisórias de água, luz, esgoto, etc.	10
<b>CN2</b>	Fatos supervenientes relacionados com as condições geológicas (resistência do solo e nível freático)	10
<b>CN3</b>	Acidentes de trabalho durante a obra	10
<b>CN4</b>	Imprevistos na mobilização e instalação do canteiro após a ordem de serviço	10
<b>CN5</b>	Retrabalho devido a erros durante a execução dos serviços	10
<b>CN6</b>	Problemas com vizinhos	9
<b>CN7</b>	Restrição de tráfego no acesso ao local da obra (grandes centros urbanos)	8

<b>CN8</b>	Ineficiência de concessionárias no fornecimento de serviços públicos (água, energia, telefones, etc.)	9
<b>CN9</b>	Tipo, natureza e complexidade do projeto	10
<b>CN10</b>	Descumprimento de aspectos de saúde e segurança do trabalho pela contratada	10
<b>Localização geográfica / Social / Ambiental / Natural - SOCIOAMBIENTAL</b>		<b>VOTOS</b>
<b>SA1</b>	Condições climáticas desfavoráveis	9
<b>SA2</b>	Escassez de mão de obra qualificada e/ou não qualificada	8
<b>SA3</b>	Baixa produtividade do trabalhador	10
<b>SA4</b>	Conflitos pessoais no trabalho	10
<b>SA5</b>	Greves de trabalhadores	8
<b>SA6</b>	Distância aos Centros Logísticos e urbanos	8
<b>Contratante / Fiscalização / Contrato / Consultor / Cliente - CONTRATANTE</b>		<b>VOTOS</b>
<b>CF1</b>	Falta ou inadequada comunicação entre as partes interessadas	10
<b>CF2</b>	Inflexibilidade (rigidez) da Fiscalização	8
<b>CF3</b>	Atrasos na realização de inspeções e testes de comissionamento	9
<b>CF4</b>	Experiência inadequada da equipe de Fiscalização	10
<b>CF5</b>	Falta de dedicação e comprometimento da equipe de Fiscalização	10
<b>CF6</b>	Equipe de Fiscalização com sobrecarga de trabalho	10
<b>CF7</b>	Fatores que prejudiquem a liberação do local da obra para o contratado	8
<b>CF8</b>	Pedidos de alteração no projeto pela OM beneficiada	10
<b>CF9</b>	Ingerência da OM beneficiada sobre a contratada	9
<b>CF10</b>	Erros, discrepâncias ou falta de clareza nos documentos do contrato	9
<b>CF11</b>	Sanções por atraso ineficazes previstas em contrato	10
<b>CF12</b>	Demora na análise pela Fiscalização de demandas da contratada (análise de medições, solicitação de alterações no projeto, Termos Aditivos, aprovação de materiais, etc.)	10
<b>Projeto / Design - PROJETO</b>		<b>VOTOS</b>
<b>PD1</b>	Falhas no orçamento (levantamento de quantitativos, precificação)	10
<b>PD2</b>	Soluções de projeto inadequadas (Método Construtivo)	8
<b>PD3</b>	Falhas no levantamento de dados (condições locais e outros)	10
<b>PD4</b>	Projeto / Design - Projeto	10
<b>PD5</b>	Experiência da equipe de Projetistas	10
<b>PD6</b>	Projeto com detalhamento incompleto ou pouco claro	10
<b>PD7</b>	Cronograma estimativo da obra previsto inadequada	10
<b>PD8</b>	Falta ou deficiência de comunicação entre as partes interessadas do projeto	10
<b>PD9</b>	Carga de trabalho da equipe projetista	10
<b>PD10</b>	Não utilização de softwares de engenharia	10
<b>PD11</b>	Projeto elaborado em BIM (risco positivo)	8
<b>Contrato / Legal / Político-regulatório - COMPLIANCE</b>		<b>VOTOS</b>

<b>PR1</b>	Burocracia	8
<b>PR2</b>	Corrupção	8
<b>PR3</b>	Ineficiência dos órgãos licenciadores	10
<b>PR4</b>	Ineficiência da equipe administrativa de Compliance da contratada	10
<b>PR5</b>	Atrasos na obtenção de licenças do município	10
<b>PR6</b>	Mudanças nos regulamentos e leis governamentais	8
<b>PR7</b>	Descumprimento de leis, normas, procedimentos, regulamentos, códigos impostos por órgãos fiscalizadores/reguladores (CREA/CAU, IBAMA, Superintendência Regional do Trabalho, etc.)	10
<b>Econômico / Financeiro -MERCADOLÓGICO</b>		<b>VOTOS</b>
<b>EF1</b>	Alto custo de financiamento	10
<b>EF2</b>	Alto custo dos seguros	10
<b>EF3</b>	Escassez de fontes privadas e públicas de financiamento	10
<b>EF4</b>	Mudança nas políticas governamentais de financiamento	10
<b>EF5</b>	Inflação	8
<b>EF6</b>	Variação do custo de insumos	8
<b>EF7</b>	Política monetária (quantidade de moeda em circulação, de crédito e das taxas de juros).	8
<b>EF8</b>	Variação de alíquotas e bases de cálculo de tributos (ex: taxa alfandegária)	10
<b>EF9</b>	Variação de câmbio	10
<b>EF10</b>	Variação dos custos de transporte/frete	10
<b>EF11</b>	Capacidade da contratada de suportar atrasos no pagamento de até 90 dias	10
<b>EF12</b>	Falta de numerário para pagamentos pelo contratante por período superior a 90 dias	10
<b>Gerenciamento de Projeto / Comercial / Recursos / Terceirização - CONTRATADO</b>		<b>VOTOS</b>
<b>GP1</b>	Planejamento da obra ineficaz (cronograma, plano de aquisição, compras e subcontratação)	10
<b>GP2</b>	Investigação inadequada do local (visita prévia)	8
<b>GP3</b>	Falhas na coordenação e supervisão da obra	10
<b>GP4</b>	Falta de comunicação ou inadequada entre as partes interessadas	10
<b>GP5</b>	Falta de maturidade organizacional para gerenciamento de projetos	10
<b>GP6</b>	Experiência, habilidade, competência e conhecimento da equipe de gerenciamento do projeto	10
<b>GP7</b>	Insolvência/falência de subcontratados e/ou fornecedores	10
<b>GP8</b>	Mudança frequente de subcontratados	10
<b>GP9</b>	Trabalho de subcontratados de baixa qualidade	10
<b>GP10</b>	Descumprimento de prazos pelos subcontratados	10
<b>GP11</b>	Seleção de subcontratado inadequada	10
<b>GP12</b>	Baixa confiabilidade e qualidade dos fornecedores	9
<b>GP13</b>	Disponibilidade de materiais de construção no mercado	10
<b>GP14</b>	Demora na entrega de materiais pelos fornecedores	10
<b>GP15</b>	Demora na fabricação própria de insumos da obra (pré-moldados, estrutura metálica, etc.)	8

<b>GP16</b>	Qualidade dos materiais inadequada ou em desacordo com a Especificação Técnica	8
<b>GP17</b>	Alterações no tipo e especificação de materiais durante a construção	10
<b>GP18</b>	Disponibilidade dos equipamentos de construção adequados	10
<b>GP19</b>	Lenta mobilização de equipamentos	10
<b>GP20</b>	Baixa produtividade e eficiência dos equipamentos de construção	8
<b>GP21</b>	Falta de pagamento de salários dos funcionários e subcontratados	10
<b>GP22</b>	Falha no dimensionamento das equipes de trabalho	10
<b>GP23</b>	Adoção de inovações tecnológicas	10
<b>GP24</b>	Métodos de execução inadequados ou diferentes do previsto na especificação técnica	8

Fonte: autor

### 3.2 Dados para o ANFIS

#### 3.2.1 Dados da análise de risco

As Tabela 8 e 9 apresentam a consolidação das Fichas utilizadas para análise de risco. Nelas são retratadas as opiniões dos especialistas com relação ao impacto e probabilidade de cada GFR e o risco global de cada obra do espaço amostral. Por meio da matriz de probabilidade x impacto (Quadro 9) foi definido o risco de cada GFR.

Tabela 8 - Análise de Risco - Dados obtidos das Fichas de informações

Item	Mercadológico			Construção			Compliance			Projeto		
	Prob	Impac	NR	Prob	Impac	NR	Prob	Impac	NR	Prob	Impac	NR
1	P	P	P	P	M	M	P	P	P	MP	P	P
2	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
3	MP	P	P	MP	MP	P	P	M	M	P	P	P
4	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
5	P	A	A	M	A	MA	M	A	MA	M	M	A
6	P	M	M	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
7	MP	P	P	MP	M	M	P	M	M	A	M	A
8	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
9	MP	M	M	M	A	MA	MP	A	A	M	A	MA
10	P	A	A	MP	MP	P	MP	P	P	P	M	M
11	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
12	P	M	M	M	A	MA	MP	A	A	P	P	P
13	MP	M	M	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
14	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
15	MP	P	P	MP	MP	P	P	M	M	A	M	A
16	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
17	P	A	A	M	A	MA	M	A	MA	M	M	A
18	P	A	A	M	A	MA	M	A	MA	M	M	A
19	P	P	P	M	M	A	M	M	A	MP	P	P

20	P	A	A	P	A	A	A	A	MA	M	A	MA
21	P	M	M	M	A	MA	M	P	M	MP	A	A
22	M	M	A	MP	A	A	M	A	MA	M	A	MA
23	P	A	A	M	A	MA	P	M	M	M	A	MA
24	M	A	MA	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
25	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	P	P	P
26	M	P	M	M	M	A	P	P	P	P	MA	MA
27	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
28	MP	M	M	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
29	P	M	M	M	A	MA	P	M	M	P	A	A
30	P	P	P	P	M	M	M	M	A	MP	M	M
31	P	A	A	P	A	A	A	A	MA	M	A	MA
32	M	M	A	MP	A	A	M	A	MA	M	A	MA
33	M	A	MA	A	A	MA	P	M	M	P	M	M
34	P	A	A	M	A	MA	A	MA	MA	A	A	MA
35	MP	M	M	A	A	MA	P	M	M	P	M	M
36	P	A	A	M	A	MA	M	MA	MA	M	M	A
37	P	M	M	M	A	MA	MP	A	A	M	A	MA
38	MP	M	M	MP	A	A	P	M	M	P	M	M
39	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
40	MP	P	P	P	M	M	P	M	M	MP	P	P
41	P	M	M	M	A	MA	P	A	A	P	M	M
42	MP	M	M	MP	M	M	P	M	M	P	M	M
43	P	M	M	M	A	MA	P	M	M	P	M	M
44	MP	P	P	M	A	MA	MP	P	P	P	M	M
45	M	M	A	M	M	A	M	M	A	P	A	A
46	M	M	A	M	M	A	P	M	M	A	M	A
47	P	P	P	MP	P	P	P	P	P	P	M	M
48	M	M	A	M	M	A	P	M	M	A	M	A
49	MP	P	P	M	A	MA	P	MA	MA	P	M	M
50	M	M	A	MP	A	A	M	A	MA	M	A	MA
51	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	M	M
52	M	M	A	P	M	M	M	P	M	MP	M	M
53	M	MA	MA	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
54	MP	M	M	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
55	P	MP	P	MP	P	P	P	M	M	P	P	P
56	P	M	M	MP	P	P	P	M	M	P	M	M
57	P	P	P	P	P	P	M	M	A	MP	M	M
58	P	P	P	P	P	P	M	P	M	P	M	M
59	M	A	MA	MP	M	M	P	P	P	P	M	M
60	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	P	P
61	P	M	M	P	A	A	P	M	M	P	P	P
62	P	A	A	A	A	MA	P	A	A	P	A	A
63	M	M	A	M	A	MA	P	M	M	M	A	MA
64	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M

65	P	A	A	A	A	MA	P	A	A	P	A	A
66	M	P	M	P	M	M	M	M	A	P	A	A
67	P	MP	P	MP	M	M	P	P	P	P	M	M
68	M	P	M	M	A	MA	M	P	M	P	A	A
69	M	P	M	P	P	P	M	P	M	MP	P	P
70	P	P	P	P	P	P	M	P	M	P	A	A
71	M	M	A	P	M	M	M	P	M	P	A	A
72	P	P	P	P	P	P	M	P	M	P	MA	MA
73	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
74	P	P	P	P	P	P	M	M	A	MP	P	P
75	P	P	P	P	P	P	M	M	A	MP	P	P
76	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	P	P
77	P	M	M	M	A	MA	M	M	A	P	M	M
78	P	P	P	P	M	M	M	P	M	MP	P	P
79	M	M	A	M	A	MA	M	A	MA	P	A	A
80	P	P	P	P	M	M	P	M	M	P	M	M
81	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
82	MP	P	P	MP	MP	P	MP	A	A	P	M	M
83	M	M	A	M	A	MA	M	A	MA	P	A	A
84	M	P	M	P	P	P	M	P	M	P	A	A
85	MP	M	M	M	A	MA	MP	P	P	A	M	A
86	M	P	M	P	P	P	M	M	A	P	A	A
87	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	P	M	M
88	M	M	A	M	A	MA	M	P	M	MP	M	M
89	M	M	A	M	A	MA	M	A	MA	M	M	A
90	M	M	A	M	A	MA	M	A	MA	P	A	A
91	P	A	A	A	A	MA	P	A	A	P	A	A
92	M	M	A	M	M	A	M	A	MA	M	A	MA
93	M	M	A	M	M	A	M	A	MA	M	A	MA
94	P	M	M	M	A	MA	P	M	M	M	A	MA
95	M	M	A	M	M	A	M	P	M	P	MA	MA
96	M	P	M	M	A	MA	M	M	A	MP	P	P
97	P	MP	P	MP	P	P	P	M	M	P	M	M
98	P	P	P	P	P	P	M	A	MA	P	A	A
99	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	P	P
100	M	M	A	M	M	A	M	M	A	MP	M	M
101	M	M	A	M	M	A	M	M	A	MP	M	M
102	M	M	A	M	M	A	M	M	A	P	A	A
103	P	M	M	MP	M	M	P	M	M	A	M	A
104	MP	P	P	MP	M	M	P	M	M	P	M	M
105	P	M	M	M	M	A	M	P	M	MP	M	M
106	M	P	M	P	M	M	M	P	M	MP	M	M
107	P	P	P	P	M	M	M	P	M	P	A	A
108	M	P	M	P	P	P	M	M	A	P	A	A
109	P	P	P	P	M	M	M	P	M	P	A	A

110	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
111	P	P	P	P	M	M	M	P	M	P	MA	MA
112	M	P	M	P	P	P	M	A	MA	P	MA	MA
113	M	M	A	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
114	MP	M	M	M	A	MA	MP	A	A	P	M	M
115	P	P	P	P	P	P	P	M	M	P	P	P
116	M	M	A	MP	P	P	P	A	A	P	M	M
117	M	M	A	M	M	A	M	P	M	MP	M	M
118	M	A	MA	M	M	A	M	MA	MA	P	M	M
119	P	P	P	P	P	P	M	M	A	MP	M	M
120	MP	P	P	MP	MP	P	P	M	M	P	P	P
121	MP	P	P	MP	MP	P	P	M	M	P	P	P
122	P	M	M	M	M	A	M	M	A	MP	M	M
123	P	M	M	M	M	A	M	A	MA	P	A	A
124	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
125	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
126	MP	P	P	MP	MP	P	P	M	M	M	A	MA
127	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
128	A	A	MA	P	A	A	M	A	MA	A	M	A
129	P	M	M	M	M	A	M	M	A	P	A	A
130	P	A	A	M	A	MA	M	A	MA	P	A	A
131	M	M	A	M	M	A	P	M	M	P	M	M
132	P	A	A	M	A	MA	M	A	MA	P	A	A
133	M	M	A	P	M	M	M	M	A	MP	M	M
134	P	A	A	M	M	A	P	M	M	A	M	A
135	M	M	A	M	M	A	M	M	A	MP	M	M
136	MP	M	M	MP	M	M	MP	P	P	P	M	M
137	P	M	M	M	A	MA	P	M	M	P	M	M
138	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
139	P	A	A	M	M	A	M	P	M	P	A	A
140	P	M	M	P	M	M	M	A	MA	P	A	A
141	P	P	P	M	M	A	P	P	P	P	MA	MA
142	A	A	MA	M	A	MA	M	A	MA	MP	M	M
143	M	M	A	P	M	M	M	P	M	P	A	A
144	P	M	M	MP	MP	P	P	M	M	P	M	M
145	P	M	M	MP	P	P	P	M	M	P	P	P
146	P	A	A	M	M	A	M	M	A	MP	M	M
147	M	M	A	P	M	M	M	P	M	P	MA	MA
148	P	M	M	MP	P	P	P	M	M	P	P	P
149	P	A	A	P	M	M	M	P	M	MP	M	M
150	P	M	M	P	M	M	M	P	M	P	A	A
151	M	M	A	P	M	M	MP	A	A	M	A	MA
152	MP	P	P	MP	MP	P	P	MA	MA	P	P	P
153	P	M	M	P	M	M	M	M	A	MP	M	M
154	M	M	A	P	M	M	M	M	A	P	A	A

155	P	MP	P	MP	P	P	P	A	A	A	M	A
156	P	MP	P	MP	P	P	P	M	M	M	A	MA
157	P	M	M	M	M	A	P	A	A	P	M	M
158	P	M	M	M	A	MA	M	A	MA	P	A	A
159	P	M	M	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
160	P	P	P	P	M	M	M	P	M	P	MA	MA
161	M	M	A	M	A	MA	P	M	M	A	M	A
162	M	M	A	M	A	MA	MP	M	M	A	M	A
163	M	M	A	M	A	MA	MP	A	A	A	M	A
164	P	M	M	P	P	P	M	A	MA	P	MA	MA
165	P	M	M	P	A	A	M	P	M	P	A	A
166	M	MA	MA	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
167	M	P	M	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
168	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
169	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	P	P
170	P	MP	P	MP	P	P	P	P	P	P	P	P
171	P	MP	P	MP	M	M	P	P	P	A	M	A
172	P	P	P	M	A	MA	M	P	M	MP	P	P
173	P	MP	P	MP	M	M	P	P	P	P	M	M
174	P	MP	P	MP	P	P	P	M	M	A	M	A
175	P	M	M	P	A	A	M	A	MA	P	M	M
176	P	M	M	M	A	MA	M	P	M	P	A	A
177	M	M	A	M	MA	MA	M	M	A	P	A	A
178	P	P	P	MP	M	M	P	M	M	P	P	P
179	M	M	A	M	MA	MA	P	A	A	P	A	A
180	P	A	A	P	A	A	M	A	MA	M	A	MA
181	M	M	A	P	M	M	P	M	M	M	A	MA
182	M	M	A	P	A	A	P	M	M	P	P	P
183	M	M	A	M	A	MA	P	M	M	P	M	M
184	M	M	A	MP	M	M	P	M	M	M	A	MA
185	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	P	P
186	P	M	M	M	M	A	M	M	A	MP	M	M
187	M	M	A	P	M	M	P	M	M	MP	M	M
188	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	P	P
189	M	M	A	P	A	A	P	M	M	P	P	P
190	P	P	P	P	M	M	M	M	A	MP	M	M
191	P	P	P	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M
192	M	M	A	MP	P	P	M	M	A	P	M	M
193	P	MP	P	MP	P	P	M	A	MA	A	M	A
194	P	P	P	P	P	P	M	M	A	P	MA	MA
195	M	M	A	P	P	P	M	P	M	MP	P	P
196	M	M	A	P	A	A	P	M	M	MP	P	P
197	P	P	P	P	M	M	P	P	P	P	M	M
198	P	MP	P	MP	P	P	P	A	A	M	A	MA
199	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	P	P

200	M	M	A	P	M	M	M	P	M	MP	P	P
201	M	MA	MA	M	A	MA	A	MA	MA	P	A	A
202	P	M	M	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
203	MP	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
204	P	P	P	MP	P	P	M	P	M	MP	P	P
205	P	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
206	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
207	M	A	MA	M	M	A	M	MA	MA	P	M	M
208	M	P	M	M	A	MA	M	P	M	MP	M	M
209	M	A	MA	M	A	MA	A	MA	MA	P	A	A
210	P	M	M	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
211	M	P	M	P	P	P	M	A	MA	MP	P	P
212	P	M	M	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
213	MP	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
214	M	A	MA	A	A	MA	A	MA	MA	P	A	A
215	M	M	A	P	M	M	M	P	M	P	A	A
216	M	A	MA	A	A	MA	A	MA	MA	P	A	A
217	M	M	A	P	P	P	M	A	MA	P	MA	MA
218	M	P	M	P	M	M	P	P	P	MP	M	M
219	M	P	M	P	M	M	M	P	M	MP	P	P
220	M	A	MA	M	M	A	M	MA	MA	P	M	M
221	MP	P	P	P	P	P	P	P	P	MP	M	M
222	P	M	M	P	P	P	M	A	MA	MP	M	M
223	M	P	M	P	M	M	M	M	A	MP	P	P
224	M	A	MA	M	M	A	M	MA	MA	P	M	M
225	P	P	P	M	A	MA	M	P	M	MP	M	M
226	M	A	MA	A	A	MA	A	MA	MA	P	A	A
227	P	P	P	P	P	P	M	P	M	P	A	A
228	M	P	M	P	M	M	M	P	M	P	A	A
229	M	M	A	P	M	M	M	P	M	MP	M	M
230	P	M	M	MP	M	M	P	M	M	A	M	A
231	P	MP	P	MP	P	P	P	M	M	A	M	A
232	P	MP	P	P	A	A	P	P	P	P	M	M
233	P	P	P	MP	P	P	P	M	M	P	P	P
234	M	P	M	P	M	M	M	P	M	P	A	A
235	P	MP	P	MP	P	P	P	M	M	P	M	M
236	M	A	MA	M	A	MA	A	MA	MA	P	A	A
237	P	P	P	P	P	P	P	M	M	P	P	P
238	P	P	P	P	P	P	P	M	M	MP	P	P
239	P	A	A	MP	MP	P	M	M	A	P	M	M
240	MP	P	P	MP	MP	P	P	M	M	P	M	M
241	MP	M	M	MP	A	A	MP	P	P	P	P	P
242	P	A	A	MP	M	M	P	A	A	P	M	M
243	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	M	M
244	M	M	A	P	M	M	M	M	A	MP	M	M

245	P	P	P	P	P	P	M	A	MA	MP	M	M
246	P	M	M	P	P	P	M	M	A	P	MA	MA
247	P	P	P	P	P	P	M	P	M	MP	P	P
248	M	M	A	MP	M	M	P	M	M	A	M	A
249	M	A	MA	M	A	MA	A	A	MA	A	M	A
250	M	M	A	P	M	M	M	M	A	P	A	A
251	M	M	A	P	M	M	P	A	A	P	M	M
252	P	P	P	P	M	M	M	P	M	MP	P	P

Fonte: autor

Tabela 9 - Análise de Risco - Dados obtidos das Fichas de informações (continuação)

Item	Contratado			Contratante			Socioambiental			NR Geral
	Prob	Impac	NR	Prob	Impac	NR	Prob	Impac	NR	
1	M	M	A	MP	A	A	MP	M	M	2
2	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	1
3	P	M	M	P	M	M	MP	MP	P	1
4	P	M	M	P	P	P	P	P	P	1
5	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	4
6	M	A	MA	P	P	P	P	A	A	3
7	M	M	A	P	P	P	MP	MP	P	2
8	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	1
9	M	M	A	P	P	P	MP	M	M	3
10	M	M	A	P	P	P	MP	M	M	2
11	P	M	M	P	P	P	MP	P	P	1
12	M	A	MA	P	P	P	P	A	A	3
13	M	A	MA	P	P	P	MP	A	A	3
14	P	M	M	MP	P	P	MP	P	P	1
15	M	A	MA	P	P	P	MP	MP	P	2
16	P	M	M	P	P	P	MP	P	P	1
17	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	4
18	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	4
19	M	M	A	MP	MP	P	MP	MP	P	2
20	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
21	M	A	MA	MP	M	M	P	M	M	3
22	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
23	M	M	A	P	P	P	MP	M	M	3
24	M	M	A	P	P	P	MP	M	M	3
25	P	M	M	P	P	P	P	P	P	1
26	M	M	A	M	A	MA	MP	MP	P	3
27	MP	M	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
28	M	M	A	P	A	A	MP	MP	P	3
29	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
30	M	P	M	MP	MP	P	MP	M	M	2
31	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	4

32	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
33	M	M	A	P	M	M	MP	MP	P	3
34	M	A	MA	P	M	M	P	A	A	4
35	M	A	MA	P	P	P	MP	A	A	3
36	M	A	MA	MP	M	M	MP	M	M	4
37	P	M	M	P	M	M	P	M	M	3
38	P	M	M	P	P	P	MP	MP	P	2
39	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	1
40	P	M	M	P	P	P	P	P	P	1
41	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
42	P	M	M	P	A	A	MP	MP	P	2
43	M	M	A	P	M	M	P	A	A	3
44	P	M	M	P	P	P	MP	M	M	2
45	M	M	A	MP	MP	P	MP	M	M	3
46	M	A	MA	MP	P	P	P	A	A	3
47	P	M	M	P	M	M	MP	MP	P	1
48	M	A	MA	P	M	M	MP	MP	P	3
49	M	A	MA	P	M	M	MP	MP	P	3
50	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
51	M	P	M	MP	M	M	MP	MP	P	1
52	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	2
53	M	P	M	MP	MP	P	MP	M	M	2
54	M	A	MA	P	P	P	MP	A	A	3
55	M	A	MA	MP	P	P	P	A	A	2
56	M	M	A	P	M	M	MP	MP	P	2
57	P	P	P	MP	MP	P	MP	P	P	1
58	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
59	P	P	P	MP	P	P	MP	M	M	2
60	M	P	M	MP	MP	P	MP	P	P	1
61	M	M	A	MP	P	P	MP	MP	P	2
62	M	A	MA	MP	M	M	P	A	A	4
63	M	M	A	MP	P	P	MP	MP	P	3
64	M	M	A	MP	M	M	MP	M	M	2
65	M	A	MA	MP	M	M	P	A	A	4
66	M	M	A	M	A	MA	MP	M	M	3
67	M	P	M	MP	P	P	MP	MP	P	1
68	M	M	A	M	A	MA	MP	M	M	3
69	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
70	M	M	A	MP	MP	P	MP	M	M	2
71	M	M	A	M	A	MA	MP	M	M	3
72	M	M	A	MP	MP	P	MP	MP	P	2
73	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	2
74	M	M	A	MP	A	A	MP	MP	P	2
75	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
76	M	P	M	MP	M	M	MP	MP	P	1

77	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
78	M	M	A	MP	A	A	MP	MP	P	2
79	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
80	P	P	P	MP	P	P	MP	P	P	1
81	P	M	M	MP	MP	P	MP	P	P	1
82	M	M	A	P	P	P	MP	M	M	2
83	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
84	M	P	M	MP	M	M	MP	M	M	2
85	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	3
86	M	A	MA	M	A	MA	MP	MP	P	3
87	M	M	A	MP	A	A	MP	MP	P	3
88	M	A	MA	MP	M	M	MP	M	M	3
89	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
90	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	4
91	M	A	MA	MP	M	M	P	A	A	4
92	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	4
93	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	4
94	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	3
95	M	M	A	MP	MP	P	MP	M	M	3
96	M	P	M	M	A	MA	MP	M	M	3
97	P	P	P	MP	P	P	MP	MP	P	1
98	M	A	MA	M	A	MA	MP	MP	P	3
99	P	M	M	MP	MP	P	MP	M	M	1
100	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
101	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
102	M	A	MA	P	M	M	P	MA	MA	4
103	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	2
104	P	M	M	P	M	M	A	M	A	2
105	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	3
106	M	P	M	MP	MP	P	M	M	A	2
107	M	M	A	MP	A	A	M	A	MA	3
108	M	A	MA	MP	MP	P	M	A	MA	3
109	M	M	A	P	MA	MA	M	A	MA	3
110	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	2
111	M	A	MA	MP	M	M	M	A	MA	3
112	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	3
113	M	M	A	MP	A	A	M	A	MA	3
114	M	A	MA	P	P	P	M	A	MA	3
115	P	M	M	MP	M	M	P	P	P	1
116	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	2
117	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	3
118	M	A	MA	P	M	M	M	A	MA	4
119	M	M	A	MP	MP	P	P	M	M	2
120	P	M	M	P	P	P	P	P	P	1
121	P	M	M	P	P	P	P	P	P	1

122	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	3
123	M	M	A	MP	MP	P	MP	M	M	3
124	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
125	P	M	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
126	M	M	A	P	P	P	MP	MP	P	2
127	M	A	MA	MP	M	M	MP	M	M	2
128	M	A	MA	P	M	M	P	A	A	4
129	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
130	M	M	A	P	M	M	P	A	A	4
131	M	A	MA	P	M	M	P	M	M	3
132	M	M	A	MP	M	M	P	A	A	4
133	M	M	A	P	M	M	P	A	A	3
134	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
135	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
136	M	A	MA	P	P	P	MP	MP	P	2
137	M	M	A	P	M	M	P	A	A	3
138	P	M	M	MP	MP	P	MP	M	M	1
139	M	M	A	P	M	M	P	M	M	3
140	M	M	A	P	M	M	P	A	A	3
141	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	2
142	M	A	MA	P	P	P	P	A	A	4
143	M	M	A	P	M	M	P	A	A	3
144	P	M	M	P	A	A	MP	M	M	2
145	P	M	M	MP	P	P	MP	MP	P	1
146	M	P	M	P	M	M	P	A	A	3
147	M	A	MA	MP	MP	P	MP	M	M	3
148	P	M	M	MP	P	P	MP	P	P	1
149	M	A	MA	P	M	M	P	A	A	3
150	M	A	MA	P	M	M	P	A	A	3
151	M	A	MA	P	P	P	P	M	M	3
152	P	M	M	P	M	M	M	P	M	2
153	M	A	MA	MP	A	A	P	M	M	3
154	M	A	MA	MP	MP	P	P	M	M	3
155	M	M	A	MP	P	P	MP	MP	P	2
156	M	M	A	MP	P	P	MP	MP	P	2
157	P	M	M	MP	A	A	P	A	A	3
158	P	M	M	P	M	M	MP	M	M	3
159	M	M	A	P	M	M	MP	M	M	3
160	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	2
161	M	A	MA	P	M	M	MP	MP	P	3
162	M	A	MA	P	P	P	MP	M	M	3
163	P	A	A	P	M	M	MP	MP	P	3
164	M	A	MA	MP	MP	P	MP	M	M	3
165	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	3
166	M	P	M	MP	M	M	MP	MP	P	2

167	M	P	M	MP	MP	P	MP	MP	P	1
168	P	P	P	MP	MP	P	MP	M	M	1
169	M	P	M	MP	MP	P	MP	M	M	1
170	P	M	M	P	M	M	P	P	P	1
171	M	A	MA	MP	P	P	MP	MP	P	2
172	M	P	M	MP	MP	P	MP	M	M	2
173	P	M	M	MP	P	P	MP	MP	P	1
174	M	M	A	MP	P	P	MP	M	M	2
175	P	M	M	P	M	M	P	A	A	3
176	M	A	MA	MP	MP	P	MP	M	M	3
177	M	A	MA	MP	M	M	P	A	A	4
178	P	P	P	P	M	M	MP	MP	P	1
179	M	A	MA	MP	M	M	P	A	A	4
180	M	A	MA	MP	P	P	P	A	A	4
181	M	M	A	P	M	M	MP	M	M	3
182	M	M	A	P	M	M	M	A	MA	3
183	M	M	A	P	M	M	MP	M	M	3
184	M	A	MA	P	M	M	MP	MP	P	3
185	M	M	A	MP	MP	P	MP	M	M	1
186	M	A	MA	P	M	M	MP	M	M	3
187	M	A	MA	P	M	M	P	A	A	3
188	M	P	M	P	M	M	P	M	M	1
189	M	M	A	P	M	M	M	A	MA	3
190	M	P	M	MP	M	M	P	P	P	2
191	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	3
192	M	A	MA	MP	P	P	M	A	MA	3
193	M	M	A	P	M	M	M	A	MA	3
194	M	A	MA	MP	MP	P	M	A	MA	3
195	M	M	A	P	MA	MA	M	A	MA	3
196	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	3
197	P	P	P	MP	MP	P	M	P	M	1
198	M	M	A	P	M	M	M	A	MA	3
199	M	M	A	MP	MP	P	P	M	M	1
200	M	A	MA	MP	M	M	M	A	MA	3
201	M	A	MA	P	P	P	A	MA	MA	4
202	M	M	A	P	MA	MA	M	A	MA	3
203	M	P	M	MP	MP	P	P	P	P	1
204	M	P	M	MP	MP	P	P	M	M	1
205	M	P	M	MP	MP	P	P	P	P	1
206	M	P	M	MP	MP	P	P	P	P	1
207	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	4
208	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	3
209	M	A	MA	P	P	P	A	MA	MA	4
210	M	A	MA	MP	A	A	M	A	MA	3
211	M	M	A	MP	MP	P	P	P	P	2

212	M	M	A	P	MA	MA	M	A	MA	3
213	M	P	M	MP	MP	P	P	P	P	1
214	A	A	MA	P	P	P	A	MA	MA	4
215	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	3
216	A	A	MA	P	P	P	A	MA	MA	4
217	P	P	P	MP	MP	P	M	A	MA	3
218	M	M	A	MP	M	M	P	M	M	2
219	M	A	MA	MP	MP	P	P	M	M	2
220	M	M	A	P	M	M	M	A	MA	4
221	M	P	M	MP	MP	P	P	M	M	1
222	M	A	MA	MP	MP	P	M	A	MA	3
223	M	M	A	MP	A	A	M	A	MA	3
224	M	M	A	P	M	M	M	A	MA	4
225	M	M	A	MP	M	M	M	A	MA	3
226	A	A	MA	P	P	P	A	MA	MA	4
227	M	M	A	MP	M	M	P	P	P	2
228	M	P	M	MP	MP	P	P	P	P	2
229	M	A	MA	MP	MP	P	M	A	MA	3
230	P	M	M	MP	P	P	P	P	P	2
231	M	A	MA	MP	P	P	P	P	P	2
232	P	M	M	MP	P	P	M	M	A	2
233	P	M	M	MP	P	P	P	M	M	1
234	P	P	P	MP	M	M	P	P	P	2
235	P	M	M	MP	P	P	A	A	MA	2
236	M	A	MA	P	P	P	M	A	MA	4
237	M	P	M	MP	MP	P	P	M	M	1
238	P	P	P	MP	MP	P	M	P	M	1
239	M	M	A	P	A	A	M	A	MA	3
240	P	P	P	P	P	P	M	P	M	1
241	M	M	A	P	P	P	M	P	M	2
242	M	A	MA	MP	P	P	M	A	MA	3
243	P	M	M	MP	MP	P	P	P	P	1
244	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	3
245	M	P	M	MP	MP	P	P	M	M	2
246	M	M	A	MP	MP	P	M	A	MA	3
247	M	P	M	MP	MP	P	M	P	M	1
248	M	A	MA	MP	P	P	M	A	MA	3
249	M	A	MA	P	M	M	M	A	MA	4
250	M	P	M	MP	MP	P	M	A	MA	3
251	M	M	A	MP	P	P	M	A	MA	3
252	M	M	A	MP	M	M	M	P	M	2

Fonte: autor

### 3.2.2 Dados para o ANFIS

Na Tabela 10 são apresentados os dados de entrada do modelo ANFIS, resultantes do processo de Defuzzificação dos dados de risco de cada GFR das Tabela 8 e 9.

Tabela 10 - Dados de entrada do modelo ANFIS

Obra	Mercadológico	Construção	Compliance	Projeto	Contratado	Contratante	Socioambiental	Risco Global
1	0.165	0.355	0.165	0.165	0.64	0.64	0.355	2
2	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
3	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.355	0.165	1
4	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
5	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
6	0.355	0.83	0.355	0.64	0.83	0.165	0.64	3
7	0.165	0.355	0.355	0.64	0.64	0.165	0.165	2
8	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
9	0.355	0.83	0.64	0.83	0.64	0.165	0.355	3
10	0.64	0.165	0.165	0.355	0.64	0.165	0.355	2
11	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
12	0.355	0.83	0.64	0.165	0.83	0.165	0.64	3
13	0.355	0.83	0.355	0.64	0.83	0.165	0.64	3
14	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
15	0.165	0.165	0.355	0.64	0.83	0.165	0.165	2
16	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
17	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
18	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
19	0.165	0.64	0.64	0.165	0.64	0.165	0.165	2
20	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
21	0.355	0.83	0.355	0.64	0.83	0.355	0.355	3
22	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
23	0.64	0.83	0.355	0.83	0.64	0.165	0.355	3
24	0.83	0.83	0.355	0.64	0.64	0.165	0.355	3
25	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
26	0.355	0.64	0.165	0.83	0.64	0.83	0.165	3
27	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
28	0.355	0.83	0.355	0.64	0.64	0.64	0.165	3
29	0.355	0.83	0.355	0.64	0.64	0.355	0.355	3

30	0.165	0.355	0.64	0.355	0.355	0.165	0.355	2
31	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
32	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
33	0.83	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.165	3
34	0.64	0.83	0.83	0.83	0.83	0.355	0.64	4
35	0.355	0.83	0.355	0.355	0.83	0.165	0.64	3
36	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
37	0.355	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	0.355	3
38	0.355	0.64	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	2
39	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
40	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
41	0.355	0.83	0.64	0.355	0.64	0.355	0.355	3
42	0.355	0.355	0.355	0.355	0.355	0.64	0.165	2
43	0.355	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.64	3
44	0.165	0.83	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	2
45	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.165	0.355	3
46	0.64	0.64	0.355	0.64	0.83	0.165	0.64	3
47	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	1
48	0.64	0.64	0.355	0.64	0.83	0.355	0.165	3
49	0.165	0.83	0.83	0.355	0.83	0.355	0.165	3
50	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
51	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	1
52	0.64	0.355	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	2
53	0.83	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.355	2
54	0.355	0.83	0.355	0.64	0.83	0.165	0.64	3
55	0.165	0.165	0.355	0.165	0.83	0.165	0.64	2
56	0.355	0.165	0.355	0.355	0.64	0.355	0.165	2
57	0.165	0.165	0.64	0.355	0.165	0.165	0.165	1
58	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
59	0.83	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	0.355	2
60	0.165	0.165	0.165	0.165	0.355	0.165	0.165	1
61	0.355	0.64	0.355	0.165	0.64	0.165	0.165	2
62	0.64	0.83	0.64	0.64	0.83	0.355	0.64	4
63	0.64	0.83	0.355	0.83	0.64	0.165	0.165	3
64	0.165	0.165	0.355	0.355	0.64	0.355	0.355	2

65	0.64	0.83	0.64	0.64	0.83	0.355	0.64	4
66	0.355	0.355	0.64	0.64	0.64	0.83	0.355	3
67	0.165	0.355	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	1
68	0.355	0.83	0.355	0.64	0.64	0.83	0.355	3
69	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
70	0.165	0.165	0.355	0.64	0.64	0.165	0.355	2
71	0.64	0.355	0.355	0.64	0.64	0.83	0.355	3
72	0.165	0.165	0.355	0.83	0.64	0.165	0.165	2
73	0.165	0.165	0.355	0.355	0.83	0.355	0.355	2
74	0.165	0.165	0.64	0.165	0.64	0.64	0.165	2
75	0.165	0.165	0.64	0.165	0.355	0.165	0.165	1
76	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.355	0.165	1
77	0.355	0.83	0.64	0.355	0.64	0.355	0.355	3
78	0.165	0.355	0.355	0.165	0.64	0.64	0.165	2
79	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
80	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	0.165	1
81	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
82	0.165	0.165	0.64	0.355	0.64	0.165	0.355	2
83	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
84	0.355	0.165	0.355	0.64	0.355	0.355	0.355	2
85	0.355	0.83	0.165	0.64	0.83	0.355	0.355	3
86	0.355	0.165	0.64	0.64	0.83	0.83	0.165	3
87	0.64	0.355	0.83	0.355	0.64	0.64	0.165	3
88	0.64	0.83	0.355	0.355	0.83	0.355	0.355	3
89	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
90	0.64	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.355	4
91	0.64	0.83	0.64	0.64	0.83	0.355	0.64	4
92	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
93	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.355	0.355	4
94	0.355	0.83	0.355	0.83	0.83	0.355	0.355	3
95	0.64	0.64	0.355	0.83	0.64	0.165	0.355	3
96	0.355	0.83	0.64	0.165	0.355	0.83	0.355	3
97	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	0.165	1
98	0.165	0.165	0.83	0.64	0.83	0.83	0.165	3
99	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	1

100	0.64	0.64	0.64	0.355	0.64	0.355	0.355	3
101	0.64	0.64	0.64	0.355	0.64	0.355	0.355	3
102	0.64	0.64	0.64	0.64	0.83	0.355	0.83	4
103	0.355	0.355	0.355	0.64	0.355	0.165	0.165	2
104	0.165	0.355	0.355	0.355	0.355	0.355	0.64	2
105	0.355	0.64	0.355	0.355	0.64	0.355	0.83	3
106	0.355	0.355	0.355	0.355	0.355	0.165	0.64	2
107	0.165	0.355	0.355	0.64	0.64	0.64	0.83	3
108	0.355	0.165	0.64	0.64	0.83	0.165	0.83	3
109	0.165	0.355	0.355	0.64	0.64	0.83	0.83	3
110	0.165	0.165	0.165	0.355	0.64	0.165	0.83	2
111	0.165	0.355	0.355	0.83	0.83	0.355	0.83	3
112	0.355	0.165	0.83	0.83	0.64	0.165	0.83	3
113	0.64	0.165	0.355	0.355	0.64	0.64	0.83	3
114	0.355	0.83	0.64	0.355	0.83	0.165	0.83	3
115	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.355	0.165	1
116	0.64	0.165	0.64	0.355	0.355	0.165	0.165	2
117	0.64	0.64	0.355	0.355	0.64	0.165	0.83	3
118	0.83	0.64	0.83	0.355	0.83	0.355	0.83	4
119	0.165	0.165	0.64	0.355	0.64	0.165	0.355	2
120	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
121	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
122	0.355	0.64	0.64	0.355	0.64	0.165	0.83	3
123	0.355	0.64	0.83	0.64	0.64	0.165	0.355	3
124	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	1
125	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
126	0.165	0.165	0.355	0.83	0.64	0.165	0.165	2
127	0.165	0.165	0.165	0.355	0.83	0.355	0.355	2
128	0.83	0.64	0.83	0.64	0.83	0.355	0.64	4
129	0.355	0.64	0.64	0.64	0.64	0.355	0.355	3
130	0.64	0.83	0.83	0.64	0.64	0.355	0.64	4
131	0.64	0.64	0.355	0.355	0.83	0.355	0.355	3
132	0.64	0.83	0.83	0.64	0.64	0.355	0.64	4
133	0.64	0.355	0.64	0.355	0.64	0.355	0.64	3
134	0.64	0.64	0.355	0.64	0.64	0.355	0.355	3

135	0.64	0.64	0.64	0.355	0.64	0.355	0.355	3
136	0.355	0.355	0.165	0.355	0.83	0.165	0.165	2
137	0.355	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.64	3
138	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	1
139	0.64	0.64	0.355	0.64	0.64	0.355	0.355	3
140	0.355	0.355	0.83	0.64	0.64	0.355	0.64	3
141	0.165	0.64	0.165	0.83	0.355	0.165	0.165	2
142	0.83	0.83	0.83	0.355	0.83	0.165	0.64	4
143	0.64	0.355	0.355	0.64	0.64	0.355	0.64	3
144	0.355	0.165	0.355	0.355	0.355	0.64	0.355	2
145	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
146	0.64	0.64	0.64	0.355	0.355	0.355	0.64	3
147	0.64	0.355	0.355	0.83	0.83	0.165	0.355	3
148	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	1
149	0.64	0.355	0.355	0.355	0.83	0.355	0.64	3
150	0.355	0.355	0.355	0.64	0.83	0.355	0.64	3
151	0.64	0.355	0.64	0.83	0.83	0.165	0.355	3
152	0.165	0.165	0.83	0.165	0.355	0.355	0.355	2
153	0.355	0.355	0.64	0.355	0.83	0.64	0.355	3
154	0.64	0.355	0.64	0.64	0.83	0.165	0.355	3
155	0.165	0.165	0.64	0.64	0.64	0.165	0.165	2
156	0.165	0.165	0.355	0.83	0.64	0.165	0.165	2
157	0.355	0.64	0.64	0.355	0.355	0.64	0.64	3
158	0.355	0.83	0.83	0.64	0.355	0.355	0.355	3
159	0.355	0.83	0.355	0.64	0.64	0.355	0.355	3
160	0.165	0.355	0.355	0.83	0.355	0.165	0.165	2
161	0.64	0.83	0.355	0.64	0.83	0.355	0.165	3
162	0.64	0.83	0.355	0.64	0.83	0.165	0.355	3
163	0.64	0.83	0.64	0.64	0.64	0.355	0.165	3
164	0.355	0.165	0.83	0.83	0.83	0.165	0.355	3
165	0.355	0.64	0.355	0.64	0.83	0.355	0.355	3
166	0.83	0.165	0.355	0.355	0.355	0.355	0.165	2
167	0.355	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	1
168	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	0.355	1
169	0.165	0.165	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	1

170	0.165	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	1
171	0.165	0.355	0.165	0.64	0.83	0.165	0.165	2
172	0.165	0.83	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	2
173	0.165	0.355	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	1
174	0.165	0.165	0.355	0.64	0.64	0.165	0.355	2
175	0.355	0.64	0.83	0.355	0.355	0.355	0.64	3
176	0.355	0.83	0.355	0.64	0.83	0.165	0.355	3
177	0.64	0.83	0.64	0.64	0.83	0.355	0.64	4
178	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	0.355	0.165	1
179	0.64	0.83	0.64	0.64	0.83	0.355	0.64	4
180	0.64	0.64	0.83	0.83	0.83	0.165	0.64	4
181	0.64	0.355	0.355	0.83	0.64	0.355	0.355	3
182	0.64	0.64	0.355	0.165	0.64	0.355	0.83	3
183	0.64	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.355	3
184	0.64	0.355	0.355	0.83	0.83	0.355	0.165	3
185	0.165	0.165	0.165	0.165	0.64	0.165	0.355	1
186	0.355	0.64	0.64	0.355	0.83	0.355	0.355	3
187	0.64	0.355	0.355	0.355	0.83	0.355	0.64	3
188	0.165	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	1
189	0.64	0.64	0.355	0.165	0.64	0.355	0.83	3
190	0.165	0.355	0.64	0.355	0.355	0.355	0.165	2
191	0.165	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.83	3
192	0.64	0.165	0.64	0.355	0.83	0.165	0.83	3
193	0.165	0.165	0.83	0.64	0.64	0.355	0.83	3
194	0.165	0.165	0.64	0.83	0.83	0.165	0.83	3
195	0.64	0.165	0.355	0.165	0.64	0.83	0.83	3
196	0.64	0.64	0.355	0.165	0.64	0.355	0.83	3
197	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.165	0.355	1
198	0.165	0.165	0.64	0.83	0.64	0.355	0.83	3
199	0.165	0.165	0.165	0.165	0.64	0.165	0.355	1
200	0.64	0.355	0.355	0.165	0.83	0.355	0.83	3
201	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.165	0.83	4
202	0.355	0.165	0.355	0.355	0.64	0.83	0.83	3
203	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1

204	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	1
205	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	1
206	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
207	0.83	0.64	0.83	0.355	0.64	0.355	0.83	4
208	0.355	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.83	3
209	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.165	0.83	4
210	0.355	0.165	0.355	0.355	0.83	0.64	0.83	3
211	0.355	0.165	0.83	0.165	0.64	0.165	0.165	2
212	0.355	0.165	0.355	0.355	0.64	0.83	0.83	3
213	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
214	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.165	0.83	4
215	0.64	0.355	0.355	0.64	0.64	0.165	0.83	3
216	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.165	0.83	4
217	0.64	0.165	0.83	0.83	0.165	0.165	0.83	3
218	0.355	0.355	0.165	0.355	0.64	0.355	0.355	2
219	0.355	0.355	0.355	0.165	0.83	0.165	0.355	2
220	0.83	0.64	0.83	0.355	0.64	0.355	0.83	4
221	0.165	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.355	1
222	0.355	0.165	0.83	0.355	0.83	0.165	0.83	3
223	0.355	0.355	0.64	0.165	0.64	0.64	0.83	3
224	0.83	0.64	0.83	0.355	0.64	0.355	0.83	4
225	0.165	0.83	0.355	0.355	0.64	0.355	0.83	3
226	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.165	0.83	4
227	0.165	0.165	0.355	0.64	0.64	0.355	0.165	2
228	0.355	0.355	0.355	0.64	0.355	0.165	0.165	2
229	0.64	0.355	0.355	0.355	0.83	0.165	0.83	3
230	0.355	0.355	0.355	0.64	0.355	0.165	0.165	2
231	0.165	0.165	0.355	0.64	0.83	0.165	0.165	2
232	0.165	0.64	0.165	0.355	0.355	0.165	0.64	2
233	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	1
234	0.355	0.355	0.355	0.64	0.165	0.355	0.165	2
235	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.83	2
236	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.165	0.83	4
237	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	1
238	0.165	0.165	0.355	0.165	0.165	0.165	0.355	1

239	0.64	0.165	0.64	0.355	0.64	0.64	0.83	3
240	0.165	0.165	0.355	0.355	0.165	0.165	0.355	1
241	0.355	0.64	0.165	0.165	0.64	0.165	0.355	2
242	0.64	0.355	0.64	0.355	0.83	0.165	0.83	3
243	0.165	0.165	0.355	0.355	0.355	0.165	0.165	1
244	0.64	0.355	0.64	0.355	0.64	0.165	0.83	3
245	0.165	0.165	0.83	0.355	0.355	0.165	0.355	2
246	0.355	0.165	0.64	0.83	0.64	0.165	0.83	3
247	0.165	0.165	0.355	0.165	0.355	0.165	0.355	1
248	0.64	0.355	0.355	0.64	0.83	0.165	0.83	3
249	0.83	0.83	0.83	0.64	0.83	0.355	0.83	4
250	0.64	0.355	0.64	0.64	0.355	0.165	0.83	3
251	0.64	0.355	0.64	0.355	0.64	0.165	0.83	3
252	0.165	0.355	0.355	0.165	0.64	0.355	0.355	2

Fonte: autor

### 3.3 Dados para a RNA

Tabela 11 - Dado de entrada da RNA

Nr da obra	Nível de risco (NR)	Área (m2)	Valor da obra (R\$)	Valor Unitário (R\$/m2)	Prazo Final com aditivo (dias)	Produtividade (m2/dia)	Localização	Grupo	Tipo de Benfeitoria	Prazo Aditivado (dias)
1	2	2,116.00	2,550,263.16	1,205.23	373	5.673	CMS-CMSE	R1	Operacional	193
2	1	4,190.41	13,592,201.74	3,243.64	644	6.507	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
3	1	4,000.00	11,803,150.02	2,950.79	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
4	1	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
5	4	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
6	3	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
7	2	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
8	1	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
9	3	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
10	2	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
11	1	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
12	3	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
13	3	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
14	1	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
15	2	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
16	1	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
17	4	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104

18	4	4,000.00	13,592,201.72	3,398.05	644	6.211	CMS-CMSE	R1	Assistencial	104
19	2	458.94	1,648,917.70	3,592.88	644	0.713	CMS-CMSE	Q2	Assistencial	104
20	4	1,579.29	3,244,535.85	2,054.43	390	4.049	CMS-CMSE	Q2	Operacional	210
21	3	560.54	1,728,223.51	3,083.14	390	1.437	CMS-CMSE	Q2	Operacional	150
22	4	2,315.92	5,392,014.24	2,328.24	1263	1.834	CMS-CMSE	R1	Assistencial	898
23	3	2,315.92	5,392,014.23	2,328.24	1263	1.834	CMS-CMSE	R1	Assistencial	898
24	3	2,315.92	5,392,014.22	2,328.24	1263	1.834	CMS-CMSE	R1	Assistencial	898
25	1	2,315.92	5,392,014.22	2,328.24	1263	1.834	CMS-CMSE	R1	Assistencial	898
26	3	99.54	264,682.66	2,659.06	942	0.106	CMS-CMSE	Q2	Operacional	762
27	1	182.36	658,370.31	3,610.28	972	0.188	CMS-CMSE	Q2	Operacional	762
28	3	4,164.80	8,821,706.52	2,118.16	990	4.207	CMS-CMSE	Q2	Operacional	540
29	3	266.00	719,293.51	2,704.11	912	0.292	CMS-CMSE	Q2	Operacional	762
30	2	405.00	1,266,264.42	3,126.58	690	0.587	CMS-CMSE	Q2	Operacional	180
31	4	570.00	1,655,438.66	2,904.28	360	1.583	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
32	4	2,705.24	6,320,006.67	2,336.21	885	3.057	CMS-CMSE	Q2	Operacional	285
33	3	7,200.00	28,777,950.41	3,996.94	730	9.863	CMS-CMSE	Q1	Operacional	0
34	4	11,656.11	49,635,848.88	4,258.35	1331	8.757	CMS-CMSE	R1	Assistencial	601
35	3	11,656.00	47,392,624.77	4,065.94	1330	8.764	CMS-CMSE	R1	Assistencial	600
36	4	2,238.80	8,697,222.59	3,884.77	730	3.067	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
37	3	2,238.80	8,697,223.90	3,884.77	730	3.067	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
38	2	2,238.80	7,447,543.10	3,326.58	820	2.730	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
39	1	2,238.80	7,187,812.07	3,210.56	820	2.730	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0

40	1	2,238.80	7,187,625.91	3,210.48	820	2.730	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
41	3	1,145.64	3,898,850.52	3,403.21	795	1.441	CMS-CMSE	Q2	Operacional	180
42	2	1,720.00	4,675,245.21	2,718.17	835	2.060	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
43	3	900.00	2,843,546.26	3,159.50	450	2.000	CMS-CMSE	Q2	Operacional	90
44	2	2,380.42	9,664,092.54	4,059.83	790	3.013	CMS-CMSE	Q2	Operacional	60
45	3	450.00	1,519,430.27	3,376.51	365	1.233	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
46	3	2,238.83	6,916,408.54	3,089.30	810	2.764	CMS-CMSE	R1	Assistencial	270
47	1	1,034.66	3,022,352.80	2,921.11	690	1.500	CMS-CMSE	R1	Assistencial	330
48	3	1,045.79	3,096,169.88	2,960.60	657	1.592	CMS-CMSE	R1	Assistencial	297
49	3	2,101.00	8,139,645.29	3,874.18	660	3.183	CMS-CMSE	Q1	Operacional	300
50	4	1,697.75	4,361,423.57	2,568.94	1690	1.005	CMS-CMSE	Q2	Operacional	1340
51	1	1,008.96	1,465,121.22	1,452.11	450	2.242	CMS-CMSE	Q2	Operacional	180
52	2	910.00	1,779,604.34	1,955.61	1140	0.798	CMS-CMSE	Q2	Operacional	840
53	2	191.76	761,196.46	3,969.53	300	0.639	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
54	3	3,745.15	10,163,291.91	2,713.72	920	4.071	CMS-CMSE	R1	Assistencial	380
55	2	2,000.00	3,287,593.16	1,643.80	1019	1.963	CMS-CMSE	Q2	Operacional	759
56	2	2,794.00	6,112,681.91	2,187.79	687	4.067	CMS-CMSE	R1	Assistencial	387
57	1	445.50	1,111,624.09	2,495.23	300	1.485	CMS-CMSE	Q1	Operacional	0
58	1	300.00	348,888.39	1,162.96	240	1.250	CMS-CMSE	Q1	Operacional	60
59	2	2,300.78	4,266,365.32	1,854.31	605	3.803	CMS-CMSE	R1	Assistencial	240
60	1	308.38	1,020,555.26	3,309.41	285	1.082	CMS-CMSE	Q1	Operacional	45
61	2	592.62	2,309,266.29	3,896.71	450	1.317	CMS-CMSE	Q1	Operacional	90

62	4	445.50	1,095,266.47	2,458.51	695	0.641	CMS-CMSE	Q1	Operacional	335
63	3	1,621.21	5,032,070.36	3,103.90	690	2.350	CMS-CMSE	Q1	Operacional	330
64	2	445.50	1,110,968.19	2,493.76	695	0.641	CMS-CMSE	Q1	Operacional	335
65	4	2,658.23	2,481,828.48	933.64	404	6.580	CMS-CMSE	Q1	Operacional	44
66	3	445.50	1,224,397.65	2,748.37	285	1.563	CMS-CMSE	Q1	Operacional	45
67	1	1,283.14	3,413,189.03	2,660.03	605	2.121	CMS-CMSE	Q1	Operacional	240
68	3	450.93	952,074.49	2,111.36	450	1.002	CMS-CMSE	Q1	Operacional	270
69	1	784.13	1,608,627.65	2,051.48	405	1.936	CMS-CMSE	Q1	Operacional	105
70	2	101.73	336,814.72	3,310.87	120	0.848	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
71	3	185.97	151,595.83	815.16	120	1.550	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
72	2	112.00	151,595.83	1,353.53	120	0.933	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
73	2	112.00	151,595.83	1,353.53	120	0.933	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
74	2	85.02	151,595.83	1,783.06	120	0.709	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
75	1	90.51	139,440.30	1,540.61	120	0.754	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
76	1	90.51	133,102.10	1,470.58	120	0.754	CMS-CMSE	R1	Assistencial	0
77	3	1,031.60	1,974,982.72	1,914.48	469	2.200	CMS-CMSE	Q1	Operacional	169
78	2	185.00	380,749.17	2,058.10	120	1.542	CMS-CMSE	Q1	Operacional	0
79	4	836.30	1,710,207.53	2,044.97	390	2.144	CMS-CMSE	Q1	Operacional	90
80	1	2,255.94	5,234,452.08	2,320.30	510	4.423	CMS-CMSE	R1	Assistencial	60
81	1	140.00	113,438.79	810.28	180	0.778	CMS-CMSE	Q1	Operacional	0
82	2	2,220.13	5,023,734.68	2,262.81	720	3.084	CMS-CMSE	R1	Assistencial	270
83	4	748.42	2,225,055.59	2,973.00	420	1.782	CMS-CMSE	Q2	Operacional	90

84	2	773.39	657,377.50	849.99	268	2.886	CMS-CMSE	Q1	Operacional	118
85	3	3,351.45	10,167,931.05	3,033.89	720	4.655	CMS-CMSE	Q1	Operacional	180
86	3	160.00	420,399.50	2,627.50	286	0.559	CMS-CMSE	Q2	Operacional	136
87	3	565.26	2,258,703.22	3,995.87	780	0.725	CMS-CMSE	Q2	Operacional	390
88	3	450.00	753,950.75	1,675.45	210	2.143	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
89	4	296.00	596,213.02	2,014.23	120	2.467	CMS-CMSE	Q2	Operacional	0
90	4	504.00	1,926,358.66	3,822.14	420	1.200	CMS-CMSE	Q1	Operacional	180
91	4	320.00	993,855.55	3,105.80	330	0.970	CMS-CMSE	Q1	Operacional	60
92	4	2,000.00	8,921,335.54	4,460.67	1536	1.302	CMNE	Q2	Operacional	1165
93	4	1,500.00	4,557,310.08	3,038.21	2010	0.746	CMNE	Q2	Operacional	1470
94	3	1,630.00	4,139,812.25	2,539.76	1913	0.852	CMNE	Q2	Operacional	1548
95	3	300.00	869,209.55	2,897.37	566	0.530	CMNE	Q2	Operacional	386
96	3	373.35	786,992.65	2,107.92	1230	0.304	CMNE	Q2	Assistencial	960
97	1	2,100.00	3,814,620.75	1,816.49	636	3.302	CMNE	Q2	Operacional	211
98	3	1,339.81	1,217,284.97	908.55	518	2.587	CMNE	Q2	Operacional	375
99	1	495.00	1,020,630.91	2,061.88	195	2.538	CMNE	Q2	Operacional	90
100	3	247.00	663,748.10	2,687.24	660	0.374	CMNE	Q2	Operacional	450
101	3	237.80	513,322.63	2,158.63	514	0.463	CMNE	Q2	Operacional	332
102	4	472.30	642,326.26	1,360.00	180	2.624	CMNE	Q1	Operacional	0
103	2	2,344.52	4,597,069.58	1,960.77	360	6.513	CMA-CMN	R1	Operacional	0
104	2	3,439.86	10,310,591.80	2,997.39	990	3.475	CMA-CMN	R1	Assistencial	510
105	3	890.50	2,207,866.04	2,479.36	359	2.481	CMA-CMN	Q2	Operacional	60

106	2	110.00	401,653.92	3,651.40	310	0.355	CMA-CMN	R1	Assistencial	60
107	3	110.00	401,653.88	3,651.40	310	0.355	CMA-CMN	R1	Assistencial	60
108	3	110.00	401,653.95	3,651.40	310	0.355	CMA-CMN	R1	Assistencial	60
109	3	110.00	401,653.95	3,651.40	310	0.355	CMA-CMN	R1	Assistencial	60
110	2	110.00	401,653.97	3,651.40	310	0.355	CMA-CMN	R1	Assistencial	60
111	3	269.57	839,858.62	3,115.55	270	0.998	CMA-CMN	Q2	Operacional	0
112	3	254.93	716,601.98	2,810.98	389	0.655	CMA-CMN	Q2	Operacional	90
113	3	51.94	175,403.85	3,377.05	90	0.577	CMA-CMN	Q2	Operacional	0
114	3	3,200.00	9,890,543.29	3,090.79	569	5.624	CMA-CMN	R1	Assistencial	90
115	1	886.50	1,492,449.39	1,683.53	300	2.955	CMA-CMN	Q2	Operacional	60
116	2	2,272.67	6,482,901.61	2,852.55	1409	1.613	CMA-CMN	R1	Assistencial	870
117	3	1,064.16	1,296,404.63	1,218.24	364	2.924	CMA-CMN	Q2	Operacional	0
118	4	2,171.00	4,558,992.98	2,099.95	899	2.415	CMA-CMN	Q1	Operacional	360
119	2	312.26	281,838.55	902.58	90	3.470	CMA-CMN	Q1	Operacional	0
120	1	3,500.00	11,743,472.03	3,355.28	1289	2.715	CMA-CMN	R1	Assistencial	570
121	1	3,500.00	11,743,472.03	3,355.28	1289	2.715	CMA-CMN	R1	Assistencial	570
122	3	301.57	973,981.94	3,229.70	749	0.403	CMA-CMN	R1	Assistencial	570
123	3	493.43	1,038,447.76	2,104.55	210	2.350	CMO-CMP	Q2	Operacional	0
124	1	639.45	1,606,562.48	2,512.41	510	1.254	CMO-CMP	Q2	Operacional	240
125	1	639.45	2,241,946.62	3,506.05	240	2.664	CMO-CMP	Q2	Operacional	60
126	2	2,963.85	8,651,462.64	2,918.99	660	4.491	CMO-CMP	Q2	Operacional	390
127	2	189.36	804,353.65	4,247.75	240	0.789	CMO-CMP	R1	Assistencial	90

128	4	1,271.70	2,903,420.69	2,283.10	540	2.355	CMO-CMP	Q2	Operacional	330
129	3	301.00	1,321,553.79	4,390.54	270	1.115	CMO-CMP	R1	Assistencial	90
130	4	2,258.83	5,560,363.86	2,461.61	840	2.689	CMO-CMP	R1	Assistencial	420
131	3	1,685.00	4,249,182.97	2,521.77	1190	1.416	CMO-CMP	Q1	Operacional	890
132	4	432.40	1,171,120.14	2,708.42	628	0.689	CMO-CMP	Q1	Operacional	448
133	3	214.97	871,137.80	4,052.37	330	0.651	CMO-CMP	R1	Assistencial	150
134	3	717.34	3,162,654.55	4,408.86	630	1.139	CMO-CMP	Q2	Operacional	420
135	3	1,620.00	2,120,313.52	1,308.84	600	2.700	CMO-CMP	Q2	Operacional	450
136	2	2,238.00	7,001,518.12	3,128.47	870	2.572	CMO-CMP	R1	Assistencial	450
137	3	2,000.00	5,159,475.67	2,579.74	1365	1.465	CMO-CMP	Q2	Operacional	1050
138	1	358.00	928,190.97	2,592.71	877	0.408	CMO-CMP	Q2	Operacional	688
139	3	358.00	1,184,122.12	3,307.60	816	0.439	CMO-CMP	Q2	Operacional	591
140	3	510.00	770,278.06	1,510.35	270	1.889	CMO-CMP	Q2	Operacional	30
141	2	358.00	781,288.76	2,182.37	270	1.326	CMO-CMP	Q2	Operacional	30
142	4	15.00	32,496.10	2,166.41	210	0.071	CMO-CMP	Q2	Operacional	120
143	3	21.25	32,496.10	1,529.23	210	0.101	CMO-CMP	Q2	Operacional	120
144	2	2,238.00	6,045,292.26	2,701.20	780	2.869	CMO-CMP	R1	Assistencial	240
145	1	2,238.00	5,715,764.06	2,553.96	1130	1.981	CMO-CMP	R1	Assistencial	590
146	3	40.00	134,040.05	3,351.00	165	0.242	CMO-CMP	Q2	Operacional	45
147	3	40.00	121,106.21	3,027.66	590	0.068	CMO-CMP	Q2	Operacional	470
148	1	1,430.00	4,488,416.39	3,138.75	1114	1.284	CMO-CMP	Q1	Operacional	497
149	3	85.00	237,923.60	2,799.10	460	0.185	CMO-CMP	Q2	Operacional	0

150	3	266.30	780,782.05	2,931.96	240	1.110	CMO-CMP	Q1	Operacional	0
151	3	7,200.00	12,634,437.50	1,754.78	894	8.054	CMNE	R1	Assistencial	150
152	2	12,397.12	12,634,437.50	1,019.14	894	13.867	CMNE	R1	Assistencial	150
153	3	121.75	370,893.00	3,046.35	210	0.580	CMNE	Q2	Operacional	60
154	3	200.00	891,628.22	4,458.14	555	0.360	CMO-CMP	Q2	Operacional	195
155	2	1,525.18	4,352,026.29	2,853.45	855	1.784	CMO-CMP	Q2	Operacional	555
156	2	2,278.08	5,969,121.71	2,620.24	925	2.463	CMO-CMP	Q2	Operacional	625
157	3	3,180.00	5,733,863.31	1,803.10	540	5.889	CMO-CMP	Q2	Operacional	0
158	3	2,805.00	5,106,001.03	1,820.32	540	5.194	CMO-CMP	Q2	Operacional	0
159	3	2,383.00	4,036,859.68	1,694.02	493	4.834	CMO-CMP	Q2	Operacional	193
160	2	432.00	1,353,266.09	3,132.56	360	1.200	CMO-CMP	Q2	Operacional	120
161	3	8,711.28	15,404,805.90	1,768.37	903	9.647	CMO-CMP	Q2	Operacional	543
162	3	14,595.46	23,895,739.51	1,637.20	903	16.163	CMO-CMP	Q2	Operacional	543
163	3	15,021.44	34,961,576.37	2,327.45	913	16.453	CMO-CMP	Q2	Operacional	553
164	3	90.00	329,254.23	3,658.38	270	0.333	CMO-CMP	R1	Assistencial	30
165	3	312.26	1,078,644.92	3,454.32	480	0.651	CMO-CMP	Q2	Operacional	300
166	2	178.00	439,115.96	2,466.94	300	0.593	CMO-CMP	R1	Assistencial	0
167	1	178.00	439,113.45	2,466.93	300	0.593	CMO-CMP	R1	Assistencial	0
168	1	178.00	439,113.45	2,466.93	300	0.593	CMO-CMP	R1	Assistencial	0
169	1	178.00	439,113.45	2,466.93	300	0.593	CMO-CMP	R1	Assistencial	0
170	1	2,500.00	4,717,927.23	1,887.17	873	2.864	CMO-CMP	Q2	Operacional	573
171	2	2,452.00	7,183,875.82	2,929.80	1200	2.043	CMO-CMP	Q2	Operacional	870

172	2	350.00	1,122,970.06	3,208.49	390	0.897	CMO-CMP	Q2	Operacional	270
173	1	2,664.77	6,586,400.23	2,471.66	510	5.225	CMO-CMP	R1	Assistencial	90
174	2	2,664.77	6,210,079.60	2,330.44	1339	1.990	CMO-CMP	R1	Assistencial	829
175	3	2,664.77	6,210,079.57	2,330.44	1338	1.992	CMO-CMP	R1	Assistencial	828
176	3	342.00	1,154,609.81	3,376.05	515	0.664	CMO-CMP	Q2	Operacional	275
177	4	323.72	1,358,864.55	4,197.65	482	0.672	CMO-CMP	Q2	Operacional	182
178	1	955.98	2,272,148.27	2,376.77	1194	0.801	CMO-CMP	Q1	Operacional	294
179	4	2,959.73	4,734,890.99	1,599.77	1476	2.005	CMO-CMP	Q1	Operacional	576
180	4	1,175.15	2,967,226.24	2,524.98	1164	1.010	CMO-CMP	Q1	Operacional	264
181	3	2,026.03	5,047,390.77	2,491.27	1334	1.519	CMO-CMP	Q1	Operacional	434
182	3	4,592.35	3,866,607.36	841.97	990	4.639	CMO-CMP	Q1	Operacional	0
183	3	2,580.00	3,866,607.36	1,498.69	990	2.606	CMO-CMP	Q1	Operacional	0
184	3	2,378.75	3,866,607.35	1,625.48	990	2.403	CMO-CMP	Q1	Operacional	0
185	1	412.70	1,719,306.68	4,166.00	240	1.720	CMO-CMP	Q2	Operacional	0
186	3	300.00	543,826.89	1,812.76	510	0.588	CMO-CMP	R1	Assistencial	165
187	3	559.12	546,091.52	976.70	510	1.096	CMO-CMP	R1	Assistencial	165
188	1	168.60	737,700.91	4,375.45	480	0.351	CMA-CMN	Q2	Operacional	150
189	3	100.00	271,761.08	2,717.61	1110	0.090	CMA-CMN	Q2	Operacional	570
190	2	164.00	203,030.85	1,237.99	60	2.733	CMA-CMN	Q2	Operacional	0
191	3	80.00	229,889.99	2,873.62	1110	0.072	CMA-CMN	Q2	Operacional	570
192	3	1,653.24	4,794,059.52	2,899.80	1325	1.248	CMA-CMN	R1	Assistencial	965
193	3	1,653.24	4,794,059.54	2,899.80	1325	1.248	CMA-CMN	R1	Assistencial	965

194	3	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
195	3	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
196	3	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
197	1	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
198	3	1,653.24	4,794,059.54	2,899.80	1325	1.248	CMA-CMN	R1	Assistencial	965
199	1	167.61	577,063.09	3,442.89	1325	0.126	CMA-CMN	R1	Assistencial	965
200	3	1,520.79	1,688,049.68	1,109.98	585	2.600	CMA-CMN	Q2	Operacional	465
201	4	566.70	770,214.63	1,359.12	585	0.969	CMA-CMN	Q2	Operacional	465
202	3	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
203	1	103.20	378,026.47	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
204	1	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
205	1	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
206	1	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
207	4	103.20	378,026.46	3,663.05	690	0.150	CMA-CMN	R1	Assistencial	390
208	3	257.33	981,097.86	3,812.61	690	0.373	CMA-CMN	Q2	Operacional	510
209	4	371.00	884,707.36	2,384.66	690	0.538	CMA-CMN	Q2	Operacional	510
210	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
211	2	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
212	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
213	1	104.08	304,489.80	2,925.54	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
214	4	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
215	3	104.08	304,489.46	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0

216	4	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
217	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
218	2	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
219	2	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
220	4	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
221	1	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
222	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
223	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
224	4	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
225	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
226	4	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
227	2	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
228	2	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
229	3	104.08	304,489.56	2,925.53	300	0.347	CMA-CMN	R1	Assistencial	0
230	2	2,238.83	6,807,310.69	3,040.57	1185	1.889	CMA-CMN	R1	Assistencial	885
231	2	2,238.83	6,807,310.71	3,040.57	1185	1.889	CMA-CMN	R1	Assistencial	885
232	2	2,238.83	5,364,777.64	2,396.24	1035	2.163	CMA-CMN	R1	Assistencial	735
233	1	2,238.83	5,364,777.62	2,396.24	1035	2.163	CMA-CMN	R1	Assistencial	735
234	2	227.49	454,316.50	1,997.08	300	0.758	CMA-CMN	Q2	Operacional	0
235	2	1,751.54	3,729,893.79	2,129.49	780	2.246	CMA-CMN	Q1	Operacional	480
236	4	385.00	1,022,765.62	2,656.53	360	1.069	CMA-CMN	Q1	Operacional	0
237	1	313.55	979,548.10	3,124.06	360	0.871	CMA-CMN	Q1	Operacional	0

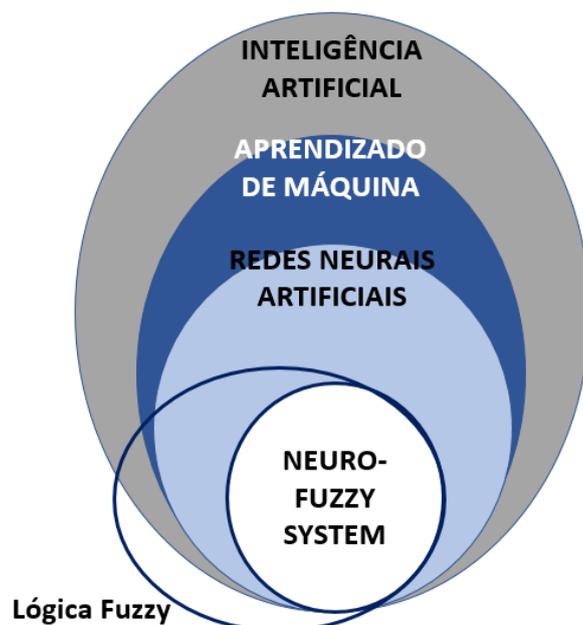
238	1	100.59	160,007.18	1,590.69	120	0.838	CMA-CMN	Q2	Assistencial	0
239	3	3,219.90	13,111,743.32	4,072.10	1636	1.968	CMA-CMN	R1	Assistencial	916
240	1	3,219.90	13,006,755.04	4,039.49	1516	2.124	CMA-CMN	R1	Assistencial	796
241	2	3,219.90	13,006,755.05	4,039.49	1516	2.124	CMA-CMN	R1	Assistencial	796
242	3	1,849.52	4,265,491.69	2,306.27	1835	1.008	CMA-CMN	Q2	Operacional	1385
243	1	134.20	574,293.22	4,279.38	120	1.118	CMA-CMN	Q2	Operacional	0
244	3	120.00	531,091.28	4,425.76	915	0.131	CMA-CMN	R1	Assistencial	615
245	2	120.00	478,971.06	3,991.43	915	0.131	CMA-CMN	R1	Assistencial	615
246	3	120.00	478,971.06	3,991.43	915	0.131	CMA-CMN	R1	Assistencial	615
247	1	120.00	478,971.07	3,991.43	915	0.131	CMA-CMN	R1	Assistencial	615
248	3	1,000.00	1,835,252.20	1,835.25	575	1.739	CMA-CMN	Q2	Operacional	210
249	4	1,537.40	3,019,161.02	1,963.81	475	3.237	CMA-CMN	Q2	Operacional	235
250	3	219.00	389,519.72	1,778.63	661	0.331	CMA-CMN	Q1	Operacional	421
251	3	390.00	1,391,752.39	3,568.60	420	0.929	CMA-CMN	Q1	Operacional	120
252	2	666.70	916,082.36	1,374.05	662	1.007	CMA-CMN	Q2	Operacional	195

Fonte: autor

## APÊNDICE B

Este Apêndice foi desenvolvido em apoio ao Capítulo – 2 REVISÃO DA LITERATURA. A intenção é facilitar a compreensão dos temas explorados neste trabalho, evidenciados na Figura 30, evitando dúvidas e questionamentos com relação aos aspectos teóricos adotados.

Figura 30 - Interrelação entre os conceitos de AI



Fonte: Autor, baseado em SALEHI e BURGUEÑO (2018) e SZE; CHEN; YANG e EMER (2017)

### 1. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A inteligência artificial é um ramo da ciência dos computadores, envolvida na pesquisa, design e aplicação de computadores inteligentes (LU; CHEN; ZHENG, 2012). Em sentido mais amplo, IA refere-se à capacidade de uma máquina ou artefato de executar as mesmas funções que uma mente humana. (HUANG; LI; FU, 2019). Para NAGY (2018), a IA é uma ciência usada para construir inteligência usando soluções de hardware e software. A intenção é automatizado raciocínio humano com base na maneira como o cérebro humano processa as informações, buscando simular o comportamento humano (NAGY, 2018).

RUSSEL (2014), LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS et al. (2020) definiram seis categorias de IA: Aprendizado de Máquina, robótica, visão computacional, processamento de linguagem natural, representação do conhecimento e raciocínio automatizado.

E DIEKMANN (1992) já havia identificado o surgimento de novas ferramentas de análise com potencial para realizar análises complexas de riscos. Segundo o autor, essas novas

ferramentas, que são sustentadas pela análise de decisão e pela tecnologia de sistemas especialistas, podem levar a abordagens poderosas, porém simples, para a representação de problemas de risco.

Com o desenvolvimento da computação em nuvem e da Internet, a disponibilidade e acessibilidade aos dados de uma obra têm tido um crescimento explosivo (HUANG; LI; FU, 2019). Diferentes tipos de dados são gerados em diferentes estágios do ciclo de vida de uma edificação (MOTAWA, 2017). Se por um lado cresceu a disponibilidade de dados, por outro lado, os algoritmos de AI têm como vantagens em relação aos tradicionais sua capacidade de processar grandes quantidades de dados e detectar padrões e recursos que permaneceriam sem serem detectados usando abordagens tradicionais. (LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.*, 2020). Assim, a Inteligência Artificial (IA) traz novas oportunidades para o desenvolvimento da engenharia civil (BAO; LI, 2019).

O processamento de grandes volume de dados e a extração de informação úteis é o campo de atuação do *Big Data* (BILAL; OYEDELE; QADIR; MUNIR *et al.*, 2016). Segundo ALAVI e GANDOMI (2017), entre os diferentes campos de engenharia, a análise de *Big Data* está impactando notavelmente o domínio da Engenharia Civil.

Segundo SALEHI e BURGUEÑO (2018), a IA refere-se ao ramo da ciência da computação que desenvolve máquinas e softwares que se baseiam na inteligência humana. Desta forma a complexidade computacional dos métodos de aprendizado de máquina causada por uma grande quantidade de dados (*Big Data*) pode ser contrabalanceada por técnicas de aprendizado profundo (LECUN; BENGIO; HINTON, 2015). Neste mesmo sentido, (HUANG; LI; FU, 2019) ressalta que a combinação de big data e aprendizado profundo se tornará uma nova direção de pesquisa em inteligência artificial em engenharia civil.

Em muitos problemas complexos da vida real, de acordo com SALEHI e BURGUEÑO (2018), a modelagem matemática ou convencional é inútil devido a fatores como: complexidade dos processos de raciocínio matemático, incertezas durante o processo e a natureza estocástica do processo. É neste contexto que a big data e tecnologias de aprendizagem profunda têm sido aplicadas com sucesso em vários campos da engenharia civil (HUANG; LI; FU, 2019). Como resultado, a IA tem-se demonstrado capaz de acelerar o processo de tomada de decisão, diminuir taxas de erro e aumentar a eficiência computacional (SALEHI; BURGUEÑO, 2018).

HEGDE e ROKSETH (2020) realizou uma revisão estruturada da literatura, na qual, identificou que o setor da Construção Civil só fica atrás do Automotivo no uso de métodos de “*Aprendizado de Máquina*” (ML) para análise de risco. Além disso, as RNAs são usadas com

mais frequência na avaliação de risco do que qualquer outro método de aprendizado de máquina na literatura selecionada pelo autor.

Neste sentido, Perrier, et al. (PERRIER; BLED; BOURGAULT; COUSIN *et al.*, 2020) e Darko, et al. (DARKO; CHAN; ADABRE; EDWARDS *et al.*, 2020) destacam a IA como uma fermenta capaz de melhorar o desempenho de projetos de construção e estruturar seus processos de gestão subjacentes. Para Bao e Li (BAO; LI, 2019), a IA traz novas oportunidades para o desenvolvimento da engenharia civil. You e Feng (YOU; FENG, 2020) considera que a IA tem aplicação ao longo de todo o ciclo de vida da construção.

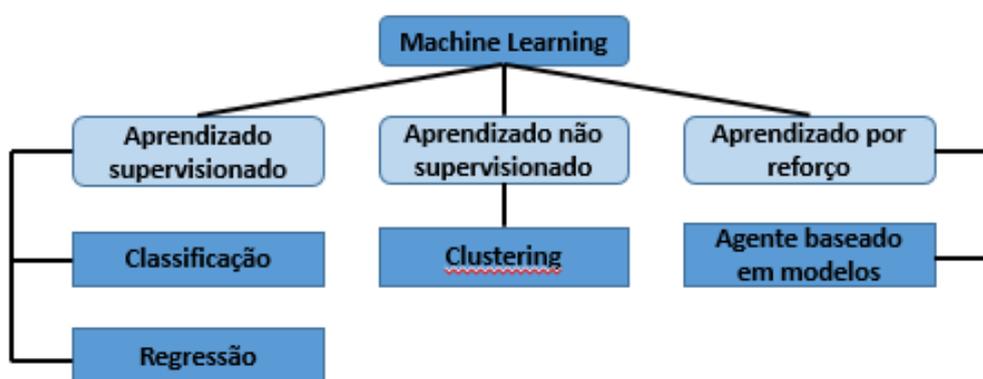
Para NAGY (2018), a intenção da IA é simular o comportamento humano, automatizando o raciocínio humano com base na maneira como o cérebro humano processa as informações. Para imitar o comportamento humano, Russel e Norvig (RUSSEL, 2014) definiram seis categorias de IA: aprendizado de máquina (AM), robótica, visão computacional, processamento de linguagem natural, representação de conhecimento e raciocínio automatizado.

## 2. APRENDIZADO DE MÁQUINA

Segundo YOU e FENG (2020) e GE; SONG; DING e HUANG (2017), o Aprendizado de Máquina (AM) é um subcampo da Inteligência Artificial (IA) que permite que os computadores apliquem modelos de previsão com base em dados e obtenham conhecimento de forma independente resumindo fenômenos complexos.

De acordo com LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.* (2020), os algoritmos de *ML* podem ser categorizados de acordo com o aprendizado em: supervisionado; não supervisionado; e por reforço (Figura 31).

Figura 31- Tipos de aprendizado em Aprendizado de Máquina



Fonte: autor

De acordo com SALEHI e BURGUEÑO (2018), o objetivo do aprendizado supervisionado é criar um algoritmo/artefato capaz de prever com precisão satisfatória o resultado alvo desconhecido de exemplos futuros. Para LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.* (2020), as aplicações típicas são a classificação e a regressão. No primeiro, os dados são classificados em categorias predefinidas, enquanto na regressão, as saídas para os dados de entrada são calculadas. Neste mesmo sentido, na classificação, o objetivo é prever os rótulos de classe de novas instâncias com base em observações anteriores. Já a regressão foca na previsão de resultados contínuos por meio de análises de regressão, onde são dadas variáveis de entrada e de saída e o artefato busca uma relação entre estas variáveis.

No aprendizado supervisionado, os dados de entrada são chamados de “dados de treinamento” e cada grupo de dados de treinamento tem um rótulo claro (YOU; FENG, 2020). Segundo DUARTE; GOLIATT; CAPRILES e LEMONGE (2017), o conjunto de dados usado na fase de treinamento deve representar o máximo possível o contexto do problema no qual a ferramenta será usada.

Sobre o aprendizado não supervisionado, LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.* (2020) explicam que, ao contrário do aprendizado supervisionado, os dados de treinamento não são rotulados. Um problema típico de aprendizado não supervisionado é o agrupamento, em que os dados são agrupados de acordo com os pontos em comum. Para SALEHI e BURGUEÑO (2018), o objetivo do aprendizado não supervisionado é separar o conjunto de dados de treinamento em *clusters*, de modo que os dados em todos os *clusters* exibam um alto nível de proximidade. Não há um supervisor, os agrupamentos são feitos pelo próprio artefato a partir dos padrões de entrada.

Por fim, no aprendizado por reforço, nenhum dado de treinamento é fornecido (LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.*, 2020). Segundo SALEHI e BURGUEÑO (2018), os algoritmos/artefatos de reforço são forçados a aprender objetivos ideais por tentativa e erro. Neste tipo de artefato, os agentes recebem uma recompensa numérica (um reforço) que representa o sucesso de uma ação. O objetivo do agente é aprender a selecionar ações que maximizem a recompensa acumulada ao longo do tempo.

Para LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.* (2020), dependendo do algoritmo de ML, podem ser utilizadas formas mistas de aprendizado. Por exemplo, as redes neurais artificiais dependendo do objetivo e da estrutura podem se encaixar em qualquer dos três tipos de aprendizagem. Assim, a classificação apresentada na Figura 31 deve ser

considerada como um ponto de partida para abordar os conceitos básicos de aprendizado de máquina.

Ao explorar as técnicas de Aprendizado de Máquina (AM) na Indústria de Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC), chamou a atenção o trabalho de DARKO; CHAN; ADABRE; EDWARDS *et al.* (2020), cujos resultados indicaram que Algoritmos Genéticos, RNA e Técnicas *Fuzzy* têm sido os métodos de AM mais amplamente utilizados em AEC. Já a otimização, a simulação, a análise de risco e o gerenciamento de projetos foram os tópicos/problemas mais comumente abordados em conjunto com métodos de AM.

LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.* (2020) e PALTRINIERI; COMFORT e RENIERS (2019) destacam que, devido sua capacidade de reconhecer e classificar padrões em grandes conjuntos de dados, os algoritmos de AM tem despertado o interesse crescente na engenharia civil, o que inclui a avaliação de riscos.

ZARDO; MUSSI e SILVA (2020) destacaram que, em riscos relacionados com custo e cronograma, é importante a antecipação da resolução de problemas durante o processo de projeto pelo uso das tecnologias digitais. RODRÍGUEZ; VADILLO; GÓMEZ e TORRES ZÚÑIGA (2019) chamam a atenção para que nos dias de hoje, não basta uma análise estatística dos dados, mas um aprendizado de máquina precisa ser aplicado para obter melhores informações inferenciais.

### 3. REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

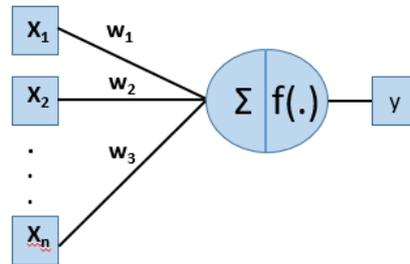
#### 3.1 Neurônio artificial

As Redes Neurais Artificiais (RNA) foram concebidas inspiradas no cérebro humano, um sistema de processamento de informação “altamente complexo, não-linear e paralelo” (HAYKIN, 1999). A intenção é modelar a RNA a partir da menor unidade de processamento, chamada de neurônio artificial, que tenta reproduzir as principais características de um neurônio biológico.

O modelo de neurônio artificial mais simples foi proposto por (MCCULLOCH; PITTS, 1943) sendo, até hoje, o modelo mais utilizado nas diferentes arquiteturas de redes neurais artificiais. HAYKIN (2007) o descreve (Figura 32) com  $n$  variáveis de entrada ( $x_n$ ) e uma saída ( $y$ ), que representam os dendritos e o axônio do neurônio biológico, respectivamente. Os pesos sinápticos ( $w_i$ ) são ponderadores das variáveis de entrada e permitem quantificar a relevância para a funcionalidade do neurônio. O Combinador linear ( $\Sigma$ ) ou função soma agrega

todas as entradas ponderadas pelos pesos sinápticos. O valor obtido é o processado por uma função de ativação –  $f(.)$ , que limita a saída do neurônio ( $y$ ).

Figura 32 - neurônio artificial



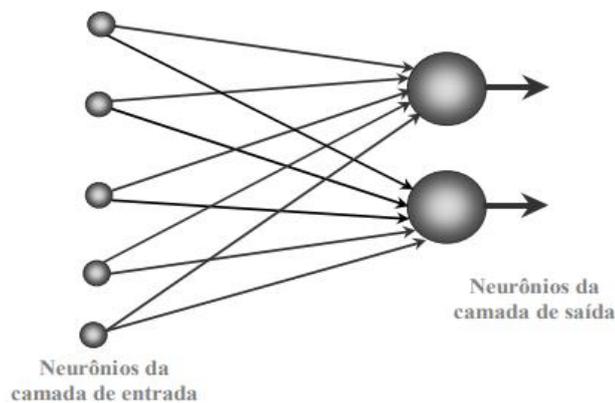
Fonte: HAYKIN (2007)

### 3.2 Arquitetura das RNA

Para SILVA (2016) a arquitetura de uma RNA define a forma como os neurônios estão arranjados, uns em relação aos outros. O autor explica que uma RNA pode ser dividida em até três partes: camada de entrada, camadas ocultas e camada de saída.

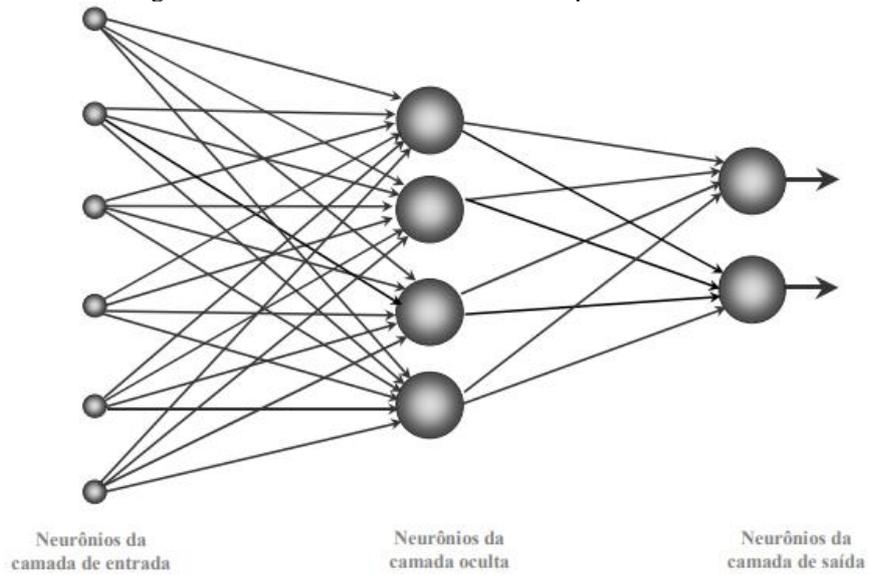
FURTADO (2019) cita três classes de arquiteturas de RNA fundamentalmente diferentes: redes *feedforward* de camada única (Figura 33); redes *feedforward* com múltiplas camadas (Figura 34); e Redes recorrentes–*feedback* (Figura 35).

Figura 33 - Redes “*feedforward*” de camada única



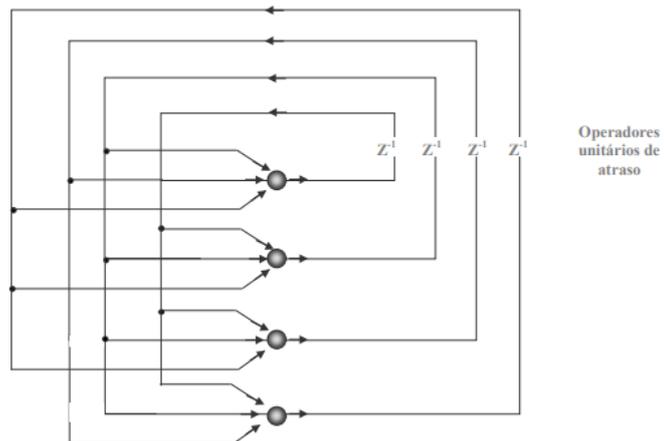
Fonte: HAYKIN (2007)

Figura 34 - Redes feedforward com múltiplas camadas



Fonte: HAYKIN (2007)

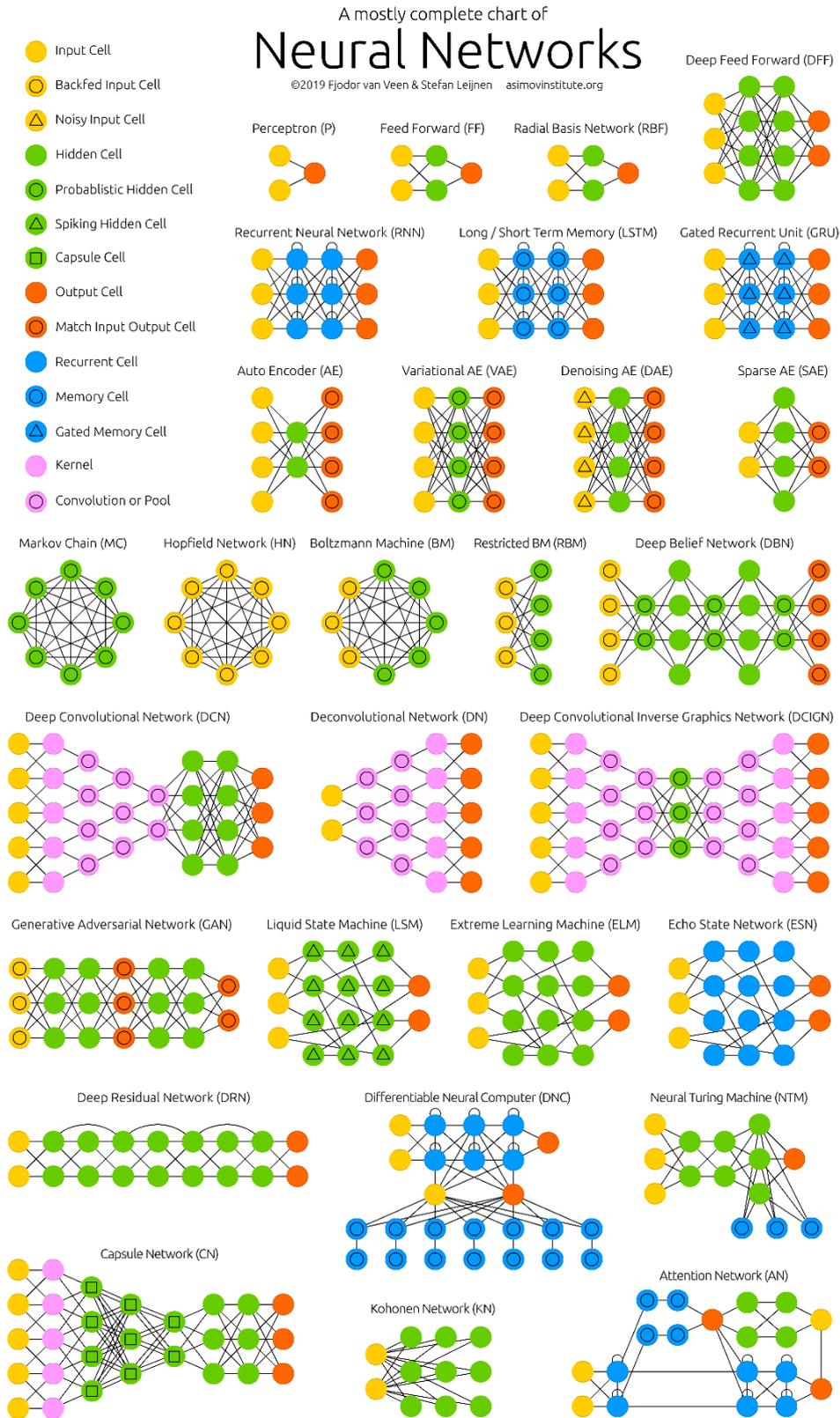
Figura 35 - Redes recorrentes – feedback



Fonte: HAYKIN (2007)

Van Veen, F. &Leijnen, S. (2019) expande as tipologias de RNA conforme Figura 36.

Figura 36 - Arquitetura dos principais tipos de redes neurais artificiais



Fonte: Van Veen, F. & Lejnen, S. (2019).

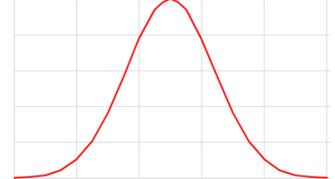
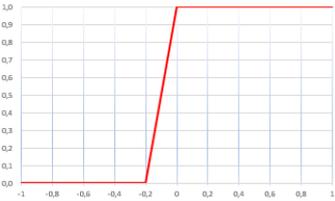
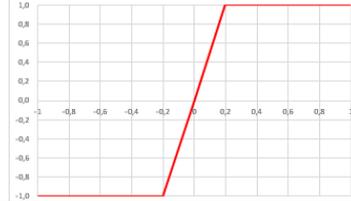
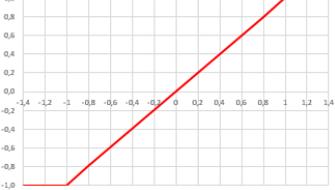
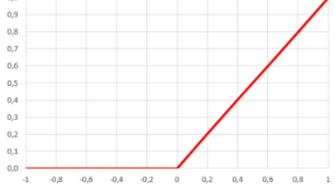
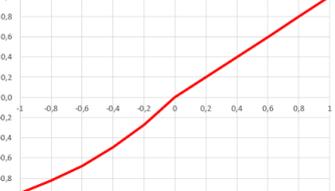
O Perceptron, idealizado por Rosenblatt (1958), é a forma mais simples de configuração de uma rede *feedforward* de camada única. Para GOMIDE (2012), a simplicidade da rede Perceptron está associada à sua condição de ser constituída de apenas uma camada neural, tendo-se também somente um neurônio artificial.

Para definição da arquitetura de uma RNA, além do número de camadas e dos números de neurônios em cada camadas, DE PÁDUA BRAGA (2007) ressalta a necessidade de se definir o tipo de conexão entre os neurônios e a topologia da rede. Na conexão do tipo *feedforward* a saída do neurônio da  $i$ -ésima camada não pode ser usada como entrada de neurônios em camadas de índice menor ou igual a “ $i$ ”, isto é, o sinal se propaga sempre para adiante da camada de entrada. No *feedback* isso já é possível. (FURTADO, 2019) cita que as redes *feedforward* também são conhecidas como redes totalmente conectada, quando todos os neurônios estão conectados a todos os neurônios da camada adjacente seguinte. Em caso contrário, é dita parcialmente conectada.

### 3.3 Funções de Ativação

DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO (2010) dividiram as funções de ativação em dois grupos, as parcialmente e as totalmente diferenciáveis. No primeiro grupo estão: a Logística ou Sigmoide (Figura 37a), a Tangente Hiperbólica (Figura 37b), a Linear ou de Identidade (Figura 37c) e a Gaussiana (Figura 37d). Já no segundo grupo estão: a Degrau (Figura 37e), degrau bipolar ou sinal (Figura 37f), e a rampa simétrica (Figura 37g). Para HAYKIN (1999) a Função Sigmóide é de longe a forma mais comum de função de ativação usada na construção de redes neurais. Além destas funções, também se observa o crescente uso de funções baseadas nestes grupos. É o caso da Função Unidade Linear Refiticada - ReLU (Figura 37h) e da Função Unidade Linear - ELU (Figura 37i).

Figura 37 - Funções de ativação

<p><b>a) Função Sigmóide</b></p> $f(x) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x - c)]}$ <p>onde "a" representa a inclinação no ponto de cruzamento <math>x = c</math></p>	<p><b>b) Tangente hiperbólica</b></p> $f(x) = \tanh(kx) = \frac{e^{kx} - e^{-kx}}{e^{kx} + e^{-kx}}$ <p>onde k é um escalar positivo</p>
	
<p><b>c) Função Linear</b></p> $f(x) = x$	<p><b>d) Função Gaussiana</b></p> $f(x) = \exp\left(-\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right)^2\right)$ <p>onde x representa a média e <math>\sigma</math> o desvio padrão</p>
	
<p><b>e) Função Degrau</b></p> $f(x) = \begin{cases} 1, & \text{para } x \geq 0 \\ 0, & \text{para } x < 0 \end{cases}$	<p><b>f) Função degrau bipolar ou sinal</b></p> $f(x) = \begin{cases} 1, & \text{para } x > 0 \\ 0, & \text{para } x = 0 \\ -1, & \text{para } x < 0 \end{cases}$
	
<p><b>g) Função rampa simétrica</b></p> $f(x) = \begin{cases} a, & \text{para } x > a \\ x, & \text{para } -a \leq x \leq a \\ -a, & \text{para } x < -a \end{cases}$	<p><b>h) Função Unidade Linear Refiticada (ReLU)</b></p> $f(x) = \begin{cases} 0, & \text{para } x < 0 \\ x, & \text{para } x \geq 0 \end{cases}$
	
<p><b>i) Função Unidade Linear (ELU)</b></p>	
$f(x) = \begin{cases} \alpha(e^x - 1), & \text{para } x < 0 \\ x, & \text{para } x \geq 0 \end{cases}$	
	

Fonte: autor

### 3.4 Aprendizado

É consenso entre os autores pesquisados, entre eles, DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO (2010), que a principal habilidade de uma RNA é sua capacidade de aprender e de generalizar soluções. Segundo DE PÁDUA BRAGA (2007), o processo de aprendizagem compreende um conjunto de procedimentos bem-definidos para adaptar os parâmetros de uma RNA, que é chamado de algoritmo de aprendizado.

Fazendo uma analogia com o processo de aprendizado humano, HAYKIN (1999) afirma que há diferentes formas das RNA aprenderem. FURTADO (2019) divide os algoritmos de aprendizado em: supervisionado; não supervisionado; e de reforço.

No treinamento não supervisionado, de acordo com FURTADO (2019) não há uma saída-alvo, para servir de referência. Logo, a própria rede deverá ser capaz de extrair as características relevantes das entradas e realizar o ajuste dos pesos de acordo com um conjunto de regras pré-estabelecidas até que se chegue a uma configuração final.

Ainda segundo FURTADO (2019), o treinamento supervisionado utiliza um agente externo – supervisor – para indicar à rede a resposta desejada para o padrão de entrada. Através do erro, que é a diferença entre os valores esperados e os valores obtidos, os parâmetros da rede (pesos) são ajustados. Este ajuste é feito até que o erro seja minimizado, passando a não existir mais ou atingindo um valor considerado satisfatório. Como exemplo desta classe de algoritmo de treinamento pode-se citar como exemplo o do Erro Médio Quadrático e a generalização do mesmo, o *backpropagation*, utilizado no processo de treinamento do Perceptron multicamadas.

De acordo com HAYKIN (1999), o *backpropagation* (retropropagação de erros) constitui-se de uma técnica para treinamento de RNA, baseada no método de otimização de gradiente descendente. Inicialmente são definidos os parâmetros do modelo aleatoriamente. Em seguida ocorre a propagação dos dados de entrada, sendo calculado o erro de previsão na camada de saída. Depois, ocorre a propagação para trás dos erros através da rede. Por fim, os parâmetros do modelo são atualizados com base no gradiente de erro.

Para DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO (2010), o treinamento por reforço é realizado tipicamente como um processo de tentativa e erro, onde as respostas se restringem ao binário (satisfatório ou não), não permitindo o ajuste do modelo como ocorre com a aprendizagem supervisionada, que busca minimizar o erro quadrático médio.

### 3.5 Avaliação

Segundo DA SILVA; SPATTI e FLAUZINO (2010), o processo de aprendizagem ocorre através de duas rotinas: treinamento e teste. Para tanto, as amostras do conjunto de dados

são divididas em dois subconjuntos. Este procedimento permite a aprendizagem (treinamento) e a avaliação (teste), para verificar se a generalização obtida com o treinamento está em patamares aceitáveis. CHOLLET (2017) propõe uma divisão em três conjuntos: treinamento, validação e teste. Segundo o autor, o modelo é treinado e validado, para depois ser testado. Segundo KETKAR (2017), a divisão dos dados em três conjuntos pode ser usado para reduzir o *overfitting*.

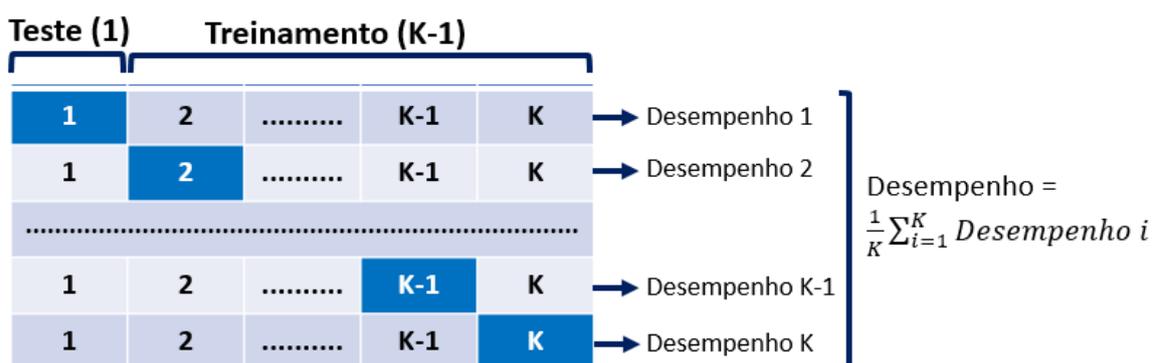
### 3.6 Validação Cruzada

A validação cruzada (VC) é aplicada a base de treinamento, sendo considerada um dos métodos mais comuns para estimativa de precisão de um classificador ao prever um resultado futuro (KOHAVI, 1995). Neste mesmo sentido, BERRAR (2018) afirma que a validação cruzada é um dos métodos de amostragem de dados mais amplamente utilizados para estimar o verdadeiro erro de previsão dos modelos e ajustar os parâmetros do modelo. Por sua vez, ARLOT e CELISSE (2009) ressaltam que a VC é uma estratégia generalizada devido à sua simplicidade e sua (aparente) universalidade. BERRAR (2018) resalta ainda que, a VC avaliar a capacidade de generalização de modelos preditivos. Sendo um dos principais aspectos a serem analisados na validação externa proposta por LUCKO e ROJAS (2010).

Com relação aos benefícios da VC, SCHAFFER (1993) destaca que a VC pode levar a um desempenho médio mais alto do que a aplicação de qualquer estratégia de classificação única, além de reduzir o risco de desempenho ruim. GONDIA; SIAM; EL-DAKHAKHNI e NASSAR (2020) aplicaram a validação cruzada k-dobra (Figura 38) em função de ser um método de teste confiável que minimiza o viés e a variação associados à divisão aleatória realizada no método de validação.

Na validação cruzada k-dobras, o conjunto de dados de aprendizagem é particionado em k subconjuntos disjuntos de tamanho aproximadamente igual. Esse particionamento é realizado por amostragem aleatória. O modelo é treinado usando k-1 subconjuntos (conjunto de treinamento). Em seguida, o modelo é aplicado ao subconjunto restante (conjunto de validação) e o desempenho é medido. Este procedimento é repetido até que cada um dos k subconjuntos tenha servido como conjunto de validação. A média das k medições de desempenho nos k conjuntos de validação é o desempenho com validação cruzada (ARLOT; CELISSE, 2009) e (BERRAR, 2018), isto é, a estimativa de precisão da validação cruzada é o número geral de classificações corretas, dividido pelo número de instâncias no conjunto de dados (KOHAVI, 1995).

Figura 38 - Validação Cruzada K - dobras



Fonte: autor

#### 4. LÓGICA FUZZY

Para GUPTA e SOLO (2015), a Lógica Fuzzy tem provado ser muito eficiente no processamento de incertezas decorrentes da percepção humana e dos processos cognitivos, sendo de grande importância na solução de muitos problemas de tomada de decisão em engenharia, pois permite considerar avaliações humanas vagas, imprecisas e incompletas no processamento de informações. Para tanto, com base em JANG; SUN e MIZUTANI (1997), a teoria dos conjuntos *fuzzy* fornece um cálculo sistemático para lidar com essas informações linguisticamente.

ZADEH e CONTROL (1965) ao introduzirem a Teoria dos conjuntos *Fuzzy*, afirmam que esses conjuntos ou classes imprecisamente definidas desempenham um papel importante no pensamento humano, particularmente nos domínios de reconhecimento de padrões, comunicação de informações e abstração". JANG; SUN e MIZUTANI (1997) ressaltam ainda que a imprecisão não vem da aleatoriedade dos elementos, mas da natureza incerta e imprecisa dos pensamentos e dos conceitos abstratos, que definem as variáveis linguísticas.

LIN e LEE (1995) ressaltam os benefícios de técnicas Fuzzy, que incluem maior generalidade, maior capacidade de expressão e de modelagem de problemas do mundo real com tolerância à imprecisão, o que pode levar a soluções com rastreabilidade, robustez e menor custo. Em especial, segundo PAWAN e LORTERAPONG (2015), a Lógica *Fuzzy* tem sido usada na análise da probabilidade de ocorrência e do impacto de riscos nas durações das atividades.

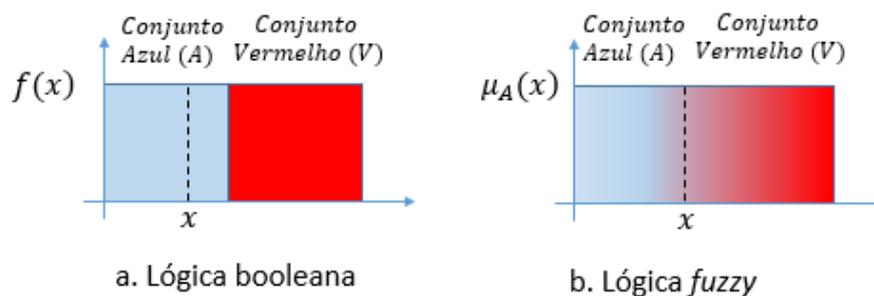
Segundo SHARMA e GOYAL (2019), as Técnicas Fuzzy incluem conjunto Fuzzy, lógica Fuzzy e técnicas Fuzzy híbridas, que combinam a lógica Fuzzy com outras técnicas, como as redes neurais artificiais, resultando em sistemas como o Sistema Adaptativo de Inferência *Neuro-Fuzzy* (ANFIS), foco deste trabalho. Assim, a intenção desta seção é de

apresentar os conceitos, princípios, fundamentos e noções matemáticas da Lógica Fuzzy que darão suporte ao desenvolvimento do artefato do tipo ANFIS.

#### 4.1 Conceito de Lógica *Fuzzy*

Diferentemente da lógica booleana (Figura 39a.) ou da lógica clássica, que assume que todo fato é inteiramente verdadeiro ou falso, a lógica *Fuzzy* (Figura 39b.) estende a lógica booleana para lidar com expressões vagas e imprecisas (WALIA; SINGH; SHARMA, 2015), próprias da percepção humana e dos processos cognitivos. Esta diferença fica mais nítida ao observar a Figura 39. Na Lógica booleana (letra a), o limite entre os Conjuntos Azul (A) e Vermelho (V) é bem nítido e ao aplicar uma função de pertinência  $f(x)$  ao elemento  $x$ , podemos garantir que ele pertence somente ao Conjunto Azul. No caso da lógica fuzzy, o limite entre (A) e (B) não estão bem definidos e a função de pertinência  $\mu_A(x)$  define que “ $x$ ” pertence aos dois conjuntos, com diferentes níveis de pertinência. Por exemplo, pode-se dizer que “ $x$ ” possui um grau de pertinência de 0,6 com (V) e de 0,4 com (A).

Figura 39 - Lógica booleana x Lógica fuzzy



Fonte: autor

Em seus estudos, GUPTA e SOLO (2015) indicam que a teoria estocástica só é eficaz para lidar com a incerteza decorrentes de comportamentos aleatórios dos processos físicos, não sendo capaz de descrever fenômenos de percepção e cognição, o que tem sido explorado pela lógica *Fuzzy*.

#### 4.2 Conjuntos Fuzzy

A teoria dos conjuntos *Fuzzy* oferece a capacidade de expressar a ambiguidade do pensamento humano e traduzir o conhecimento especializado em dados numéricos computáveis, usando rótulos linguísticos estipulados por funções de pertinência (WALIA; SINGH; SHARMA, 2015) e (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997). Para ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.* (2018), um conjunto fuzzy pode ser descrito como um conjunto

com uma fronteira linguística flexível em vez de uma fronteira nítida clássica. Desta forma, os conjuntos *fuzzy* são números *fuzzy* e as variáveis associadas são variáveis linguísticas. (POSPÍCHAL, 1995).

Matematicamente, para LIN e LEE (1995) e (RUTKOWSKA, 2012), os conjuntos *fuzzy* (*difuso*) podem ser considerados uma generalização da teoria clássica dos conjuntos crisp (nítido). De forma objetiva, na teoria clássica dos conjuntos, a função característica atribui um valor de 0 ou 1  $\{0,1\}$  para definir se o elemento do universo pertence ou não ao conjunto. JANG; SUN e MIZUTANI (1997) apresentam outras denominações usais para os conjuntos nítidos, tais como: clássicos, comuns, não *fuzzy* ou apenas conjuntos.

Segundo LIN e LEE (1995), nos conjuntos *fuzzy*, a função de pertinência estabelece valores entre 0 e 1  $[0,1]$ . Neste caso, o elemento do universo pode pertencer a um conjunto com diferentes graus de pertinência dentro do intervalo de  $[0,1]$ , isto é, a associação não precisa ser completa, os elementos *fuzzy* também podem ser membros de outros conjuntos difusos no mesmo universo (ROSS, 2005). Valores maiores indicam graus mais altos de associação ao conjunto (POSPÍCHAL, 1995).

Com base neste entendimento matemático dos conjuntos *fuzzy*, POSPÍCHAL (1995) explica que as variáveis *fuzzy* proporcionam uma transição gradual entre estados (baixo, médio e alto, por exemplo) e, conseqüentemente, possuem uma capacidade natural de expressar e lidar com a observação e com incertezas. JANG; SUN e MIZUTANI (1997) explicam que esta transição suave é caracterizada por funções de pertinência que dão flexibilidade aos conjuntos *fuzzy* na modelagem de expressões linguísticas usadas com frequência, como "a água é quente "ou" a temperatura está alta ".

#### 4.3 Função de pertinência

Como já visto anteriormente, as funções de pertinência (MF do inglês "*membership functions*") associam cada elemento do universo com um grau pertinência a um determinado conjunto *fuzzy*, variando entre 0 e 1 (ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.*, 2018). Assim, segundo TAYLAN; BAFAIL; ABDULAAL e KABLI (2014) a função de pertinência de um conjunto difuso mapeia a imprecisão de cada elemento do projeto de construção e espaço de alcance que, na maioria dos casos, é um conjunto para o intervalo de unidade.

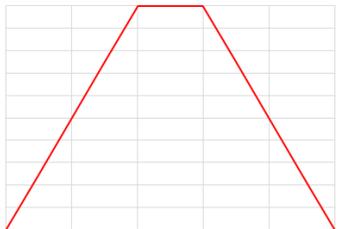
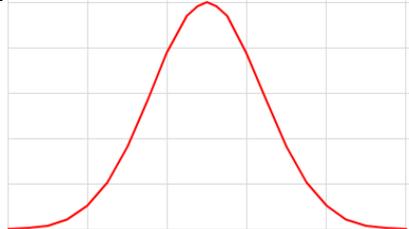
JANG; SUN e MIZUTANI (1997) representa um conjunto *fuzzy* "A", Equação (6), como um par ordenado onde: "x" é um elemento de X; e  $\mu_A(x)$  é uma função de pertinência

(FP) que mapeia cada elemento de X e seu grau de associação com o conjunto *fuzzy* “A”, valor este entre 0 e 1.

$$A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\} \quad (6)$$

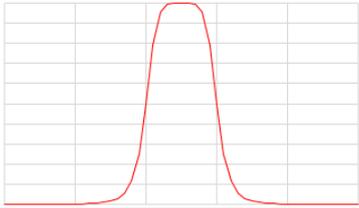
RUTKOWSKI (2004) apresenta como funções de pertinência mais usadas: Singleton (f); Gaussiana (d), Sino Generalizada (e), Sigmoidal (a), Triangular (b) e Trapezoidal (c), que são retratadas na Figura 40 e na Figura 41.

Figura 40 - Exemplos de Funções de pertinência

<p><b>a. Sigmoidal</b></p> $\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp[-a(x - c)]}$ <p>onde “a” representa a inclinação no ponto de cruzamento <math>x = c</math></p>	<p><b>b. Triangular</b></p> $\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases}$ <p>onde {a,b,c} são parâmetros tais que: <math>a &lt; b &lt; c</math></p>
	
<p><b>c. Trapezoidal</b></p> $\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases}$ <p>onde {a,b,c,d} são parâmetros tais que: <math>a &lt; b &lt; c &lt; d</math></p>	<p><b>d. Gaussiana</b></p> $\mu(x) = \exp\left(-\left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma}\right)^2\right)$ <p>onde <math>\bar{x}</math> representa a média e <math>\sigma</math> o desvio padrão</p>
	

Fonte: autor

Figura 41 - Exemplos de Funções de pertinência

e. Sino Generalizada	f. Singleton
$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left \frac{x-c}{a}\right ^{2b}}$ <p>onde “a” representa o desvio, “b” as inclinações e “c” o centro</p>	$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{para } x = \bar{x} \\ 0 & \text{para } x \neq \bar{x} \end{cases}$ <p>onde <math>\bar{x}</math> representa um ponto específico em <math>\mathbf{X} \subset \mathbf{R}</math>, isto é, reproduz um conjunto fuzzy unitário</p>
	

Fonte: autor

Segundo este mesmo autor, as funções Gaussiana e Sino Generalizada não podem ser usadas em conjuntos fuzzy assimétricos, pois trabalham com desvio padrão em torno de um valor médio. Já as funções triangular e trapezoidal ressaltam-se por possuírem uma fórmula simples e terem uma boa eficiência computacional.

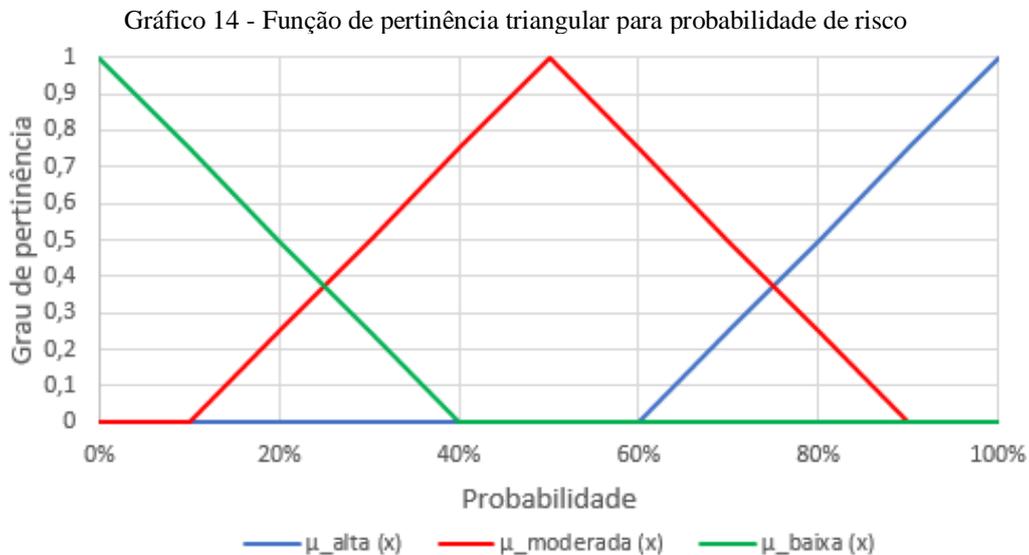
#### 4.4 Variáveis linguísticas e valores linguísticos

ZADEH (1965) propôs o conceito de variáveis linguísticas como uma abordagem para lidar com a forma imprecisa do pensamento humano, uma abordagem que, de maneira aproximada, serve para resumir informações e expressá-las em termos de conjuntos fuzzy em vez de números nítidos. Em outra publicação, ZADEH (1975) explica que por uma variável linguística, entende-se uma variável cujos valores são palavras ou sentenças em uma linguagem natural ou artificial. Segundo RUTKOWSKA (2012) O conceito de variáveis linguísticas fornece uma base para o raciocínio fuzzy, que será abordado mais à frente.

Para melhor entender este conceito, seja  $X$  uma variável linguística que representa a probabilidade de ocorrência de um risco. O (PMI, 2019) apresenta como melhores práticas 6 graduações de probabilidade de risco (muito alta, alta, moderada, baixa, muito baixa, desprezível). A fim de ilustrar, vamos considerar apenas três classes (alta, moderada e baixa), que serão os conjuntos *fuzzy* deste exemplo. Para cada conjunto temos uma função de pertinência ( $\mu_{\text{alta}}(x)$ ,  $\mu_{\text{moderada}}(x)$ ,  $\mu_{\text{baixa}}(x)$ ), conforme Gráfico 14. Assim, um fator de risco “ $x$ ” tem sua probabilidade associada aos conjuntos *fuzzy* com diferentes graus.

Segundo JANG; SUN e MIZUTANI (1997), uma variável linguística possui 5 parâmetros ( $x$ ,  $T(x)$ ,  $X$ ,  $G$ ,  $M$ ), onde:  $x$  (nome da variável);  $T(x)$  é o conjunto de nomes dos valores linguísticos que  $x$  pode assumir;  $X$  é o universo em estudo;  $G$  é uma regra sintática que gera os valores linguísticos em  $T(x)$ ; e  $M$  ou  $\mu$  é uma regra semântica que define a função de

associação/pertinência entre cada valor lingüístico “A” e seu significado  $\mu(A)$  ou grau de pertinência. Para o exemplo do parágrafo anterior:  $x$  é provabilidade do risco;  $T(x) = \{\text{provável, pouco provável e improvável}\}$ ;  $X = [0\%, 100\%]$ ; G risco não muito alto e não muito baixo (exemplo)  $\mu(x)$  função de pertinência triangular.



Fonte: autor

#### 4.5 Operações Fuzzy

As operações com conjuntos *fuzzy* permitem estabelecer relações entre conjuntos e, de acordo com (POSPÍCHAL, 1995), são generalizações da teoria clássica dos conjuntos. Segundo (RUTKOWSKA, 2012), a teoria dos conjuntos *fuzzy* foi formulada com base em três operações básicas da teoria dos conjuntos nítidos: complemento, união e interseção, que são conhecidas como operações fuzzy padrão de acordo com (ROSS, 2005).

Quadro 50 - Operações de conjuntos

Operação	Teoria clássica dos conjuntos	Teoria dos conjuntos <i>fuzzy</i>	Operação lógica	Operação Algébrica
<b>União</b>	$C = A \cup B$	$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$ $\mu_C(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x)$	$C = A \text{ OR } B$	$\mu_C(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) - \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
<b>Interseção</b>	$C = A \cap B$	$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$ $\mu_C(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x)$	$C = A \text{ AND } B$	$\mu_C(x) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(x)$
<b>Complemento</b>	$\bar{A}$	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$	$NOT A$	$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$

Fonte: autor

ZADEH (1965) estabeleceu uma relação direta entre as operações com conjuntos *fuzzy* com a teoria clássica dos conjuntos, os operadores lógicos (“OR”, “AND” e “NOT”), e as operações algébricas de soma e produto, conforme Quadro 50.

#### 4.6 Sistemas de Inferência Fuzzy (SIF)

Segundo POSPÍCHAL (1995), em geral, um SIF é qualquer sistema que possui algumas de suas variáveis com estado variando em conjuntos *fuzzy*. Para (ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.*, 2018), é o processo de mapear as variáveis de entrada fornecidas para um espaço de saída. Em complemento, RUTKOWSKA (2012) e JANG; SUN e MIZUTANI (1997) partilham o entendimento de que os conceitos de conjuntos *fuzzy* e a lógica *fuzzy* são a base dos SIF, sendo as relações entre as variáveis representadas por regras *fuzzy If-then*.

Devido à sua natureza multidisciplinar, JANG; SUN e MIZUTANI (1997) listam outras denominações para o Sistema de Inferência Fuzzy (SIF): Sistema *Fuzzy*, Sistema baseado em regras difusas, Sistema especialista *fuzzy*, Modelo *Fuzzy*, Memória associativa *fuzzy*, e Lógica *fuzzy* com controlador.

Ainda segundo RUTKOWSKA (2012), os SIF baseados em regras podem ser empregados para resolver problemas de classificação de padrões e de aproximação de função, sendo capazes de modelar efetivamente a experiência humana em uma aplicação específica (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997).

##### 4.6.1 Regras If-then

Para (ROSS, 2005) a maneira mais comum de representar o conhecimento humano é transformá-lo em expressões de linguagem natural do tipo regras *If-then*. JANG; SUN e MIZUTANI (1997) cita outras denominações para a regra *fuzzy If-then* (Se - então): regra *fuzzy*, implicação *fuzzy* ou declaração condicional difusa; e a representa por meio da forma:

$$\text{If } x \text{ é } A \text{ then } y \text{ é } B \quad (7)$$

onde A e B são valores linguísticos definidos por conjuntos *fuzzy* nos universos X e Y, respectivamente. "x é A" costuma ser chamado de antecedente ou premissa, enquanto "y é B" é chamado consequência ou conclusão. Segundo ROSS (2005), a Equação (7) compreende um processo indutivo, no qual, à partir de um fato (premissa, hipótese, antecedente), poderemos inferir ou derivar outro fato chamado conclusão (consequente).

ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.* (2018) ressaltam que o número de regras *If-then* depende do número de entradas e saídas e do comportamento desejado do

sistema, e concluem dizendo que as regras *If-Then*, que estabelecem a base de conhecimento, são conhecidas como os elementos fundamentais de um modelo baseado em fuzzy.

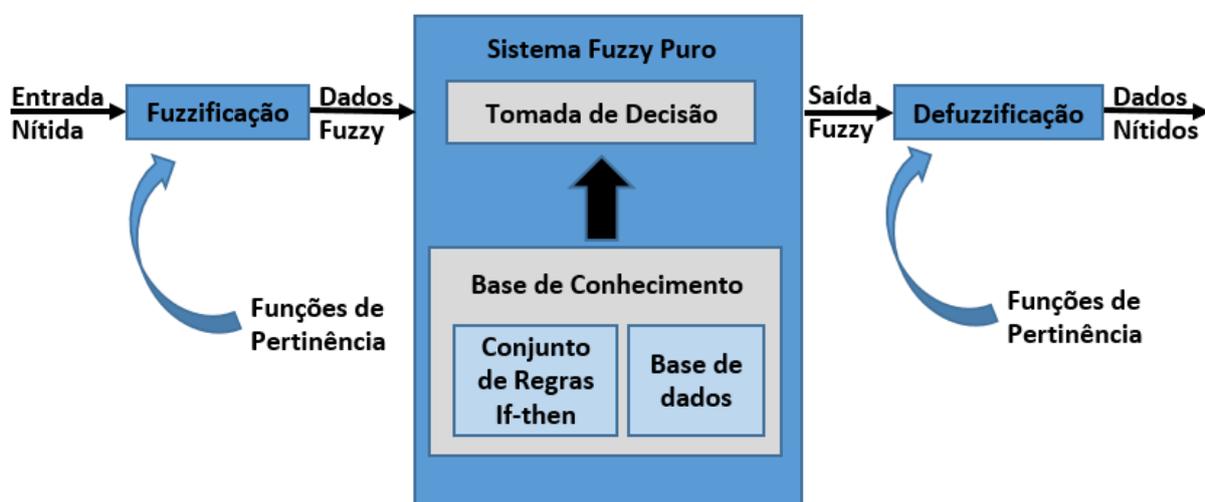
Conforme será explicado na Seção 4.6.3 - Tipos de Sistemas de Inferência Fuzzy, JANG (1993) classifica os SIF de acordo com o raciocínio fuzzy em três tipos:

- a. Tsukamoto (Tipo 1), para o qual, as regras são do tipo : se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  então  $z=C$  O consequente de cada regra é um conjunto fuzzy, cuja função de pertinência é monótona
- b. Mamdani (Tipo 2), onde as regras são do tipo: se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  então  $z = C$  ( $A$ ,  $B$  e  $C$  são conjuntos fuzzy)
- c. Takagi-Sugeno (Tipo 3), no qual as regras são do tipo se  $x$  é  $A$  e  $y$  é  $B$  então  $z = f(x,y)$ . O consequente da regra é uma função não fuzzy das variáveis de entrada, em geral um polinômio.

#### 4.6.2 Arquitetura dos Sistema de Inferência Fuzzy

(RUTKOWSKI, 2004), (LIU; LI, 2004),(RUTKOWSKA, 2012) e JANG (1993)apresentam arquiteturas para representar os SIF, que, na essência, compreendem três etapas: a Fuzzificação; o Sistema Fuzzy puro; e a Defuzzificação (Figura 42).

Figura 42 - Arquitetura de um Sistema de Inferência Fuzzy



Fonte: Autor, adaptado de (JANG, 1993) e (RUTKOWSKA, 2012)

De acordo com RUTKOWSKA (2012), o Sistema *Fuzzy* Puro realiza um mapeamento dos conjuntos *fuzzy* de entrada para os *fuzzy* de saída. Este mapeamento é conduzido por um mecanismo de inferência, com base em um conjunto de regras *If-then* e na base de dados (funções de pertinência), que são a base de conhecimento para tiragem de conclusões. JANG;

SUN e MIZUTANI (1997) chamam a operação do SIF de raciocínio *fuzzy* ou raciocínio aproximado.

JANG (1993) explica as três etapas do raciocínio *fuzzy* (Fuzzificação, Tomada de Decisão e Defuzzificação). Na Fuzzificação as entradas nítidas são associadas em graus de correspondência com valores linguísticos por meio de funções de pertinência, isto é, os valores numéricos nítidos das variáveis de entrada são transformados em valores fuzzy (ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.*, 2018). Na Tomada de Decisão, os valores das funções de pertinência da fase anterior são combinados através de operadores T-norm para obter o peso de cada regra, simulando o pensamento humano (SHAW; SIMÕES, 1999). A Defuzzificação agrega as saídas fuzzy para produzir uma saída nítida.

RUTKOWSKI (2004) ressalta a importância das regras *If-then* e as considera a base do raciocínio *fuzzy*. Ainda segundo o autor, para a aplicação do conjunto de regras *fuzzy*, as mesmas devem estar agregadas pela disjunção ou pela conjunção. JANG; SUN e MIZUTANI (1997) ressaltam além da base de regras e do mecanismo de raciocínio *fuzzy*, o banco de dados (ou dicionário), que define as funções de pertinência usadas na Fuzzificação e Defuzzificação. Para RUTKOWSKI (2004), a entrada do Sistema Fuzzy Puro deve-se dar com a função singleton a mais usual na Fuzzificação. LIU e LI (2004) listam os quatro principais métodos de Defuzzificação: o método do Centro-de-Área (C-o-A) ou de Gravidade (DAGLIATI; MARINI; SACCHI; COGNI *et al.*), o método da máxima média (MOM), o método de corte integral e o método p-mean.

#### 4.6.3 Tipos de Sistemas de Inferência Fuzzy

JANG (1993) classifica os SIF de acordo com o raciocínio fuzzy em três tipos, a depender dos tipos de raciocínio difuso e das regras difusas *If-Then* empregadas.

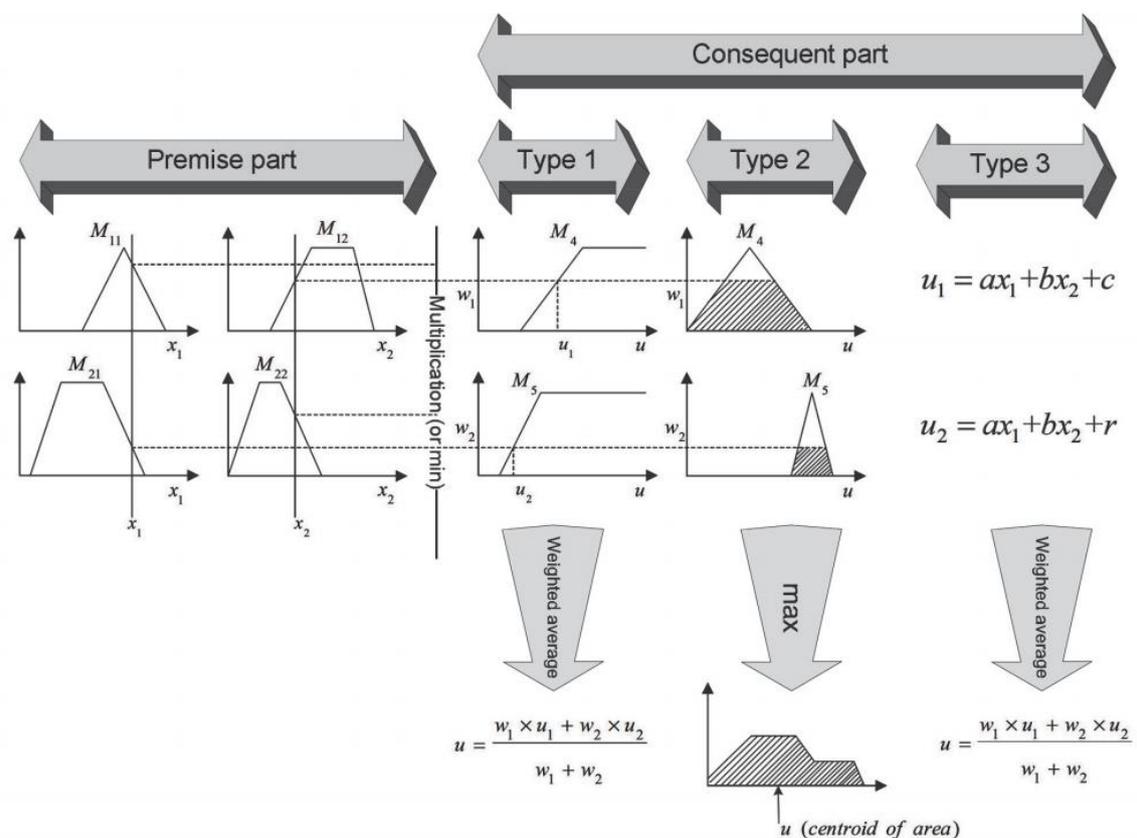
No Tipo 1 (Figura 43), Tsukamoto emprega um conjunto difuso com uma função de pertinência monotônica para definir o consequente de cada regra (ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.*, 2018). A saída geral é a média ponderada da saída nítida de cada regra induzida pela força de disparo da regra e funções de associação de saída.

No Tipo 2 (Figura 43), Mamdani, define o consequente de cada regra por um conjunto fuzzy. O resultado geral é obtido por um processo de agregação e Defuzzificação (ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.*, 2018). A saída fuzzy geral é derivada aplicando-se a operação “max” às saídas fuzzy qualificadas.

Por fim, no Tipo 3 (Figura 43), as regras *fuzzy If-Then* de Takagi e Sugeno TAKAGI e SUGENO (1985) são usadas. A saída de cada regra é uma combinação linear de variáveis de entrada mais um termo constante, e a saída final é a média ponderada da saída de cada regra.

JANG; SUN e MIZUTANI (1997) e ROSS (2005) apresentam como Sistemas de Inferência Fuzzy mais empregados: o Sistema Mamdani (JANG; SUN; MIZUTANI, 1997; MAMDANI; ASSILIAN, 1999) – Tipo 2, Tsukamoto (TSUKAMOTO, 1979)– Tipo 1 e o Sugeno (SUGENO; KANG; SYSTEMS, 1988)– Tipo 3 e (TAKAGI; SUGENO; CYBERNETICS, 1985). LIU e LI (2004) adicionaram a esta lista os Sistemas *Fuzzy* Puros, mas segundo os autores, estes sistemas “puros” lidam principalmente com informações linguísticas, enquanto os demais sistemas *fuzzy* podem lidar com informações linguísticas e informações de dados.

Figura 43- SIF - Tsukamoto (Tipo 1), Mamdani (Tipo 2) e Takagi-Sugeno (Tipo 3)



Fonte: ASADI; ZEIDI; MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.* (2018)

Com relação aos Sistemas Mamdani, Tsukamoto e Sugeno, JANG; SUN e MIZUTANI (1997) consideram que as diferenças entre esses três sistemas estão nos procedimentos de agregação das regras *fuzzy*, e na Defuzzificação (Parte consequente). Para (ASADI; ZEIDI;

MOJIBI; YAZDANI CHAMZINI *et al.*, 2018), todos os algoritmos são iguais na parte anterior. Considerando que, eles são diferentes na parte consequente.

LIU e LI (2004) compara os sistemas Mamdani e Sugeno, e ressalta que as formas consequentes das regras *If-then* de um sistema Mamdani são conjuntos *fuzzy*, enquanto que as correspondentes a um sistema Sugeno são funções das variáveis de entrada do sistema. LI; PHILIP e HUANG (2000) ao comparar os sistemas Mamdani e Sugeno, destacam como vantagens do modelo Sugeno: eficiência computacional; funciona muito bem com técnicas lineares e técnicas de otimização e adaptação; garante a continuidade da superfície de saída; e é mais adequado para análise matemática. Por outro lado, os autores destacam que o modelo Mamdani é mais intuitivo e é mais adequado para a contribuição humana.

JANG; SUN e MIZUTANI (1997) expõem que assim como os sistemas Mamdani, os sistemas Tsukamoto possuem o consequente de cada regra *fuzzy If-then* representado por um conjunto *fuzzy* com uma função de pertinência monotônico. (ROSS, 2005) explica que a saída inferida de cada regra é definida como um valor nítido induzido pelo valor de associação proveniente da cláusula antecedente da regra.

O sistema Sugeno, segundo JANG; SUN e MIZUTANI (1997), é também conhecido como modelo *fuzzy* TSK, por ter sido proposto por Takagi, Sugeno e Kang.

LI; PHILIP e HUANG (2000) apresenta, sob a ideia do modelo *fuzzy* TSK, um tipo de sistema *neuro-fuzzy*, conhecido como Sistema de Inferência *Fuzzy* Adaptável em Rede (ANFIS), desenvolvido por JANG (1993). Este modelo é o que foi desenvolvido neste trabalho, e por esta razão iremos nos aprofundar um pouco mais no sistema TKS.

Entre as limitações observadas nos modelos, o Professor José Francisco cita, em notas de aula, que no Mamdani, a Defuzzificação pelo centro de gravidade demanda bastante tempo computacional. No modelo de Sugeno, há uma dificuldade de atribuir um conceito linguístico ao consequente das regras, pois este é uma função não-*fuzzy* das variáveis de entrada. Já no de Tsukamoto, a função de pertinência do consequente é uma função monótona o que é incompatível com o termo linguístico médio.

#### 4.6.4 Sistema Takagi, Sugeno e Kang (TKS)

Segundo LI; PHILIP e HUANG (2000), o modelo *fuzzy* TKS é conhecido como o primeiro modelo *fuzzy* desenvolvido para gerar regras *fuzzy* a partir de um determinado conjunto de dados de entrada e saída. Os autores apresentam como regra *fuzzy* típica tem a forma dada pela Equação(8).

$$\text{If } x \text{ é } A \text{ e } y \text{ é } B \text{ then } z = f(x, y) \quad (8)$$

onde A e B são conjuntos fuzzy no antecedente, enquanto  $z = f(x, y)$  é uma função nítida no consequente. Para ROSS (2005), geralmente  $z = f(x, y)$  é uma função polinomial nas entradas x e y, mas pode ser qualquer função geral desde que descreva a saída do sistema dentro da região fuzzy especificada no antecedente da regra à qual está aplicado. O autor complementa dizendo que quando  $f(x, y)$  é uma constante, o sistema de inferência é chamado de modelo de ordem zero, que é um caso especial do sistema Mamdani no qual o consequente de cada regra é especificado como um singleton fuzzy.

#### 4.7 Técnicas híbridas Fuzzy

FAYEK (2020), ao estudar as Técnicas híbridas Fuzzy (Figura 44), discute como a lógica fuzzy foi combinada com o *Aprendizado de Máquina*(AM) para desenvolver técnicas híbridas fuzzy. Segundo o autor, o AM está voltado para o desenvolvimento de sistemas capazes de aprender a partir de uma base de dados. No entanto, esses sistemas não podem processar variáveis subjetivas (linguísticas), que estão presentes em problemas de construção. Ainda segundo o autor, por sua vez, os sistemas de lógica Fuzzy, baseados somente no conhecimento de especialistas, não são capazes de aprender com os dados e se adaptar a diferentes projetos, por exemplo. Assim o autor, conclui que modelos que integram lógica difusa e aprendizado de máquina são mais reflexivos da realidade do que aqueles que usam apenas um tipo de abordagem.

Figura 44 - Técnicas híbridas Fuzzy



Fonte: autor

#### 5. ANFIS

O Sistema de inferência fuzzy baseado em rede adaptável (ANFIS) foi apresentado por JANG (1993). Em seu trabalho, o autor define três tipos de modelos ANFIS de acordo com o SIF incorporado.

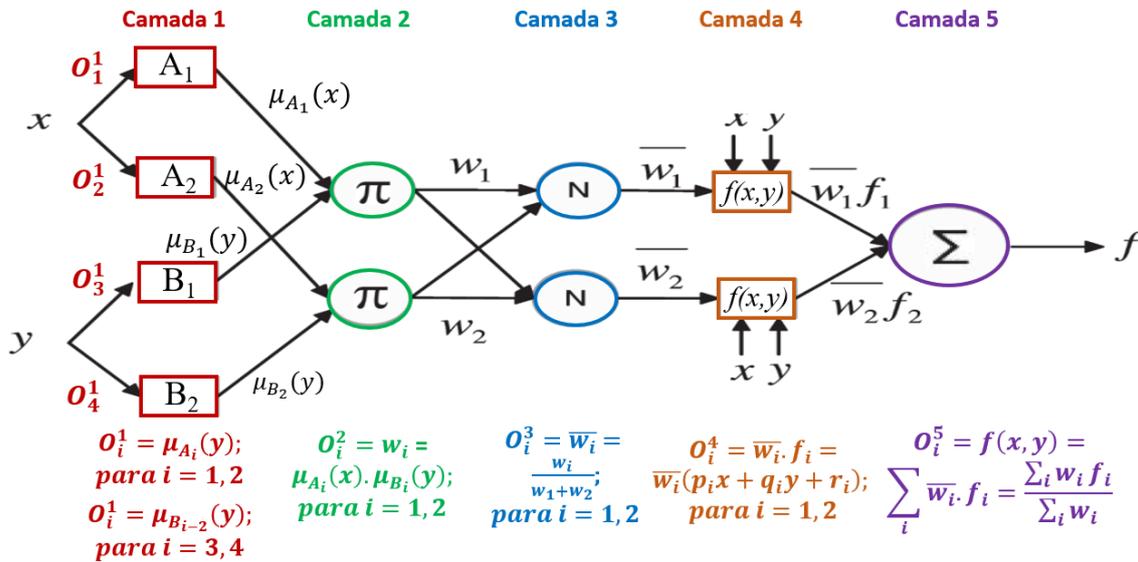
Neste trabalho foi adotado o modelo ANFIS do Tipo 3, ilustrado na Figura 45 como exemplo e sendo constituído por duas regras e duas entradas para mostrar os diferentes tipos de regras fuzzy e o raciocínio fuzzy (Tipo 3).

Tomando como exemplo a arquitetura ANFIS ilustrada na Figura 45, têm-se duas entradas  $x$  e  $y$  e uma saída  $z$ , com duas regras *If-then* do tipo TAKAGI e SUGENO (1985):

**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 45 - Modelo ANFIS (Tipo 3)



Fonte: JANG (1993), modificado

Tomando como exemplo a arquitetura ANFIS ilustrada na Figura 45, têm-se duas entradas  $x$  e  $y$  e uma saída  $z$ , com duas regras *If-then* do tipo TAKAGI e SUGENO (1985):

**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  $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$ .

- a. **Camada 1:** nesta camada, é feita a Fuzzificação, que estabelece o quanto cada entrada nítida pertence ao conjunto fuzzy. A saída desta camada é calculada pela Equação (9)

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x); \text{ para } i = 1, 2 \quad (9)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(y); \text{ para } i = 3, 4$$

Onde:  $x$  e  $y$  são entradas do nó  $i$ ;  $A_i$  e  $B_{i-2}$  são os valores linguísticos associados (pequeno e grande, por exemplo), pertencentes aos conjuntos fuzzy  $A$  ( $A_1, A_2$ ) e  $B$  ( $B_1, B_2$ );  $O_i^1$  é o grau de pertinência das entradas ( $x$  ou  $y$ ) nos conjuntos fuzzy  $A_i$  e  $B_{i-2}$ , sendo calculado com base nas funções de pertinência  $\mu_A$  e  $\mu_B$ . Neste trabalho todas as funções de pertinência são do mesmo tipo, logo:  $\mu_A = \mu_B$ , assim como os conjuntos fuzzy ( $A = B$ ).

Em um ANFIS o conjunto de parâmetros das funções de pertinência (Figura 41) 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, J.-S.; SUN, C.-T.; MIZUTANI, E., 1997).

Para JANG (1993), normalmente é adotado a função de pertinência de Sino Generalizada (Figura 41). No entanto, o autor também admite que quaisquer funções contínuas e diferenciáveis por partes, como funções de pertinência trapezoidais ou de formato triangular comumente usadas, também são candidatas qualificadas para funções de nó nesta camada.

- b. **Camada 2:** Segundo EBRAT e GHODSI (2014), esta camada é formada por nós fixos, chamados de “ $\pi$ ”, sendo cada saída desta camada representa a “*firingstrength*” (força de disparo – tradução literal) de uma regra. Para JANG (1993), este valor determina o quanto uma regra é verdadeira em diferentes valores de entradas. A saída desta camada é calculada pela Equação(10), que se utiliza de operadores norma-T “AND” ou “OR”. Normalmente o operador norma-T utilizado é o produto.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \cdot \mu_{B_i}(y); \text{ para } i = 1,2 \quad (10)$$

De uma forma objetiva, os valores obtidos pela Fuzzificação (Camada 1), são repassados a um nó e multiplicados pela força de uma regra fuzzy gerada automaticamente, resultando numa espécie de “peso”.

- c. **Camada 3:** De acordo com EBRAT e GHODSI (2014), cada uma das saídas da camada anterior é dividida por todas as saídas daquela regra, isto é, o  $i$ -ésimo nó calcula a razão da “*firingstrength*” da  $i$ -ésima regra para a soma de todas as “*firingstrength*” das regras. A saída desta camada é chamada “*firingstrength*” normalizados (JANG, 1993) e é apresentada na Equação (11):

$$O_i^3 = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}; \text{ para } i = 1,2 \quad (11)$$

Tentando ser mais claro, a força de uma regra de saída de um único nó é comparada com a força de outros nós e suas regras subjacentes. Se a força for maior para um determinado nó, esta é provavelmente a configuração de regra “melhor possível” para o conjunto de dados e será priorizada para a próxima etapa.

- d. **Camada 4:** Esta camada é constituída por nós adaptativos com uma função linear, representada pela Equação (12).

$$O_i^4 = \bar{w}_i \cdot f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i), \text{ para } i = 1,2 \quad (12)$$

Onde:  $\bar{w}_i$  é a saída da Camada 3; e  $\{p_i, q_i \text{ e } r_i\}$  são os parâmetros consequentes.

- e. **Camada 5:** Esta é a camada de saída, constituído por um nó fixo, chamado de  $\Sigma$ . Segundo EBRAT e GHODSI (2014), as saídas dos neurônios anteriores são somadas entre si e, finalmente, por Defuzzificação, as saídas fuzzy são convertidas em saídas numéricas. A mostra o processo. JANG (1993) explica que está camada é constituída por um único nó, que calcula a saída geral como a soma de todos os sinais de entrada.

$$O_i^5 = f(x, y) = \sum_i \bar{w}_i \cdot f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i} \quad (13)$$

## APÊNDICE C

Neste Apêndice são abordados os aspectos relacionados com o DESIGN SCIENCE (DS), o DESIGN SCIENCE RESEARCH (DSR), Estudos Sistemáticos da Literatura e Validação Cruzada. A intenção é permitir um melhor entendimento sobre estes temas de forma a compreender a adoção do DSR como metodologia de pesquisa.

### 1. DESIGN SCIENCE (DS)

Segundo (BAYAZIT, 2004), Sidney Gregory foi o primeiro a definir *Design Science*, em 1965, em seu artigo “*The Design Method*”. Herbert Simon é outra referência na área e que primeiro esboçou a diferença entre as ciências exploratórias (ciência tradicional) e as “ciências do artificial” – *Design Science*(SIMON, 1996). Dentro da engenharia, a missão principal da DS é apoiar o desenvolvimento de conhecimento para projetar soluções para seus problemas de campo, pesquisa prescritiva ou orientada à solução (VAN AKEN, 2005). Para tanto, vários métodos tem sido propostos para condução de pesquisas na área da engenharia são os casos do: *Design Cycle* abordado por EEKELS e ROOZENBURG (1991), do *Design Science Research Roadmap* de (ALTURKI, 2012) e do método para engenharia de produção de LACERDA; DRESCH; PROENÇA e JÚNIOR (2013).

Em seus estudos, DRESCH (2013) e OTERO (2018a) fazem críticas à capacidade das ciências tradicionais em orientar pesquisas relacionadas com o estudo de projetos, com a construção ou criação de um novo artefato voltado para a resolução de problemas reais e que possam contribuir para a melhora do sistema em estudo, produzindo resultados satisfatórios. Segundo VAN AKEN (2004), isto ocorre porque as ciências tradicionais têm como objetivos centrais explorar, descrever, explicar e, quando possível, prever.

Segundo CAGDAS e STUBKJÆR (2011), os artefatos são as principais ferramentas para resolver problemas, avaliar o que foi projetado ou o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos. MARCH e SMITH (1995) afirma que os artefatos devem ser avaliados com base em critérios de valor ou utilidade. Neste mesmo sentido, para BAYAZIT (2004) e CHAKRABARTI (2010), o trabalho deve ser visto sob o foco acadêmico (desafiador, não resolvido e valor científico) e organizacional (isto é, relacionado à sua utilidade para a organização). Estas características da DS é que justificam a sua adoção como base epistemológico a guiar esta pesquisa (DSR) na busca da solução de problemas por meio do desenvolvimento de um artefato.

## 2. DESIGN SCIENCE RESEARCH (DSR)

DRESCH (2013) em sua Dissertação de Mestrado, realiza um amplo estudo sobre os métodos para condução de pesquisas baseados na *Design Science*, desde (TAKEDA; VEERKAMP; TOMIYAMA; YOSHIKAWA, 1990), que adotava a terminologia de *Design Cycle*, passando por (EEKELS; ROOZENBURG, 1991) e (WALLS; WIDMEYER; EL SAWY, 1992), cujos métodos voltavam-se para a área de engenharia. VAN AKEN (2004, 2005) publicou trabalhos relacionados com a solução de problemas nas organizações. PEFERS; TUUNANEN; ROTHENBERGER e CHATTERJEE (2007) consolidam estudos de vários autores em um método para prescrever soluções para problemas e construção de artefatos. Na mesma época, GREGOR e JONES (2007) propõem um método para a construção de teorias com aplicação no gerenciamento de riscos no desenvolvimento de softwares. *O Design Science Research Roadmap* de ALTURKI (2012) sintetiza um roteiro estruturado e detalhado para pesquisas em DS. Por fim, (DRESCH, 2013) apresenta o seu método voltado para à engenharia de produção. O Quadro 51 resume os principais aspectos relacionados com a DSR.

Quadro 51: Principais aspectos relacionados com a DSR

Aspecto	Detalhamento
Propósito	Entender fenômenos organizacionais, com base em uma objetividade consensual, desvendando padrões gerais e as forças que explicam estes fenômenos.
Modelo	Design e engenharia (por exemplo, arquitetura, engenharia aeronáutica, ciências da computação).
Visão do conhecimento	Pragmática: conhecimento a serviço da ação; a natureza do pensamento é normativa e sintética. Mais especificamente, o design assume que cada situação é única e se inspira em propostas e soluções ideais, pensamento sistêmico, e informações limitadas. Além disso, enfatiza a participação, o discurso como um meio de intervenção, e a experimentação pragmática.
Natureza dos objetos	Questões organizacionais e sistemas como objetos artificiais com propriedades mal definidas, tanto descritivas como imperativas, exigindo intervenções não rotineiras por parte de agentes com posições internas na organização. Propriedades imperativas também se desdobram de fins e de sistemas idealizados de maneira mais ampla.
Foco no desenvolvimento da teoria	Será que um dado conjunto integrado de proposições de projeto funciona em uma certa situação (problema) mal definida? O projeto e desenvolvimento de novos artefatos tendem a se mover para fora das fronteiras da definição inicial da situação.
Objetivos	Desenvolver artefatos que permitam soluções satisfatórias aos problemas práticos. Projetar e Prescrever.
Principais Atividades	Definir o problema, sugerir, desenvolver, avaliar, concluir e comunicar
Resultados	Artefatos (Constructos, Modelos, Métodos, Instanciações) e aprimoramento de teorias
Tipo de Conhecimento	Como as coisas deveriam ser
Base Empírica	Construtor e/ou Avaliador do Artefato

Colaboração Pesquisador-Pesquisado	Não obrigatória
Implementação	Não obrigatória
Avaliação dos Resultados	Aplicações Simulações Experimentos com o artefato
Abordagem (natureza dos dados)	Qualitativa e/ou Quantitativa
Especificidade	Generalizável à uma determinada Classe de Problemas

Fonte: Adaptado de (DRESCH, 2013)

## 2.1. Ciclos de Pesquisa

Com base em HEVNER (2007), é possível relacionar os Ciclos de Pesquisa com a Metodologia de Pesquisa, conforme a seguir:

O Ciclo de Design abrange todas as etapas da pesquisa, desde a fase de definição do problema, passando pelo desenvolvimento do artefato até as conclusões.

O Ciclo de Relevância, por sua vez, une o ambiente contextual do projeto de pesquisa às atividades de ciência do Ciclo de Design, contribuindo com a etapa “A - *Definição do problema*” deste trabalho (Figura 9) de forma a ressaltar a importância da pesquisa para a organização.

O Ciclo Rigor conecta as atividades do Ciclo do Design com os as bases de conhecimento científico, por meio da etapa “B - *Estudos sistemáticos da literatura*”, desta forma, colaborando com a etapa “C - *Desenvolvimento do artefato*”. Estes ciclos são interdependentes, colaborando entre si, a Figura 9 ilustra esta interação.

Outro aspecto importante deste trabalho é fazer a correlação entre a metodologia de pesquisa e a estrutura desta dissertação. Na Figura 9 há uma correlação entre as etapas de pesquisa e a organização dos capítulos desta produção acadêmica.

## 2.2. Classes de problemas

Para DRESCH (2013), a *Design Science* reconhece que os problemas orientados à prescrição existentes nas organizações costumam ser particulares. No entanto, VAN AKEN (2004) defende que as pesquisas realizadas sobre a base da *DS* devem ser generalizáveis – não servir para resolver somente um problema em dada situação, mas sim para resolver problemas de uma certa Classe de Problemas. Este importante conceito, agrega grande diferencial aos estudos de *DS*, pois permitiria que outros pesquisadores e profissionais, em situações diversas, também pudessem fazer uso do conhecimento gerado (DRESCH, 2013). A título de exemplificação, DRESCH (2013), considerando a realidade da engenharia de produção, apresenta como Classes de Problemas: Planejamento e Controle da Produção, Mensuração dos

Custos, Alinhamento estratégico, Planejamento de Cenários, mapeamento de Processos, Análise de problemas e apoio à tomada de decisão e gestão de projetos.

Neste trabalho uma Revisão Sistemática da Literatura (LUCKEY; FRITZ; LEGATIUK; DRAGOS *et al.*) foi utilizada, conforme será descrito no item 3.3 ABORDAGEM EPISTEMOLÓGICA DESENVOLVIDA, para identificar Classe de Problemas relacionados à pesquisa, assim como, soluções e teorias que possam servir de embasamento para a pesquisa desenvolvida sob o paradigma da *Design Science*(ALTURKI, 2012). Os achados constam do Capítulo - 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

### 2.3. Artefatos

Para SIMON (1996), Os artefatos são objetos artificiais que podem ser caracterizados em termos de objetivos, funções e adaptações. A Engenharia se preocupa com a utilização do conhecimento científico com o objetivo de projetar e construir artefatos para a solução dos problemas(GOUVÊA DA COSTA, 2012).

Os artefatos foram tipificados por (MARCH; SMITH, 1995), que os divide em: constructos, modelos, métodos e instanciação. Neste trabalho o artefato será do tipo instanciação, pois busca-se a concretização de um artefato em seu ambiente, operacionalizando o método a ser desenvolvido e buscando demonstrar a sua viabilidade e a eficácia. Sendo que, o conceito de método que norteará este trabalho é o (DRESCH, 2013), que o define em sentido amplo, representam um conjunto de passos que devem ser obedecidos para que um resultado seja produzido em determinado ambiente externo por meio de uma representação gráfica ou encapsulados em heurísticas ou algoritmos específicos.

Com relação ao método a ser desenvolvido, na *DS*, o método científico comumente utilizado é o abdução (FISCHER, 2011), que consiste em estudar fatos (problemas) e propor uma teoria (solução) para explicá-los (DRESCH, 2013).

## 3. VALIDAÇÃO DA PESQUISA

Para LUCKO e ROJAS (2010), é essencial para qualquer investigação científica que os pesquisadores garantam a qualidade de seu trabalho em todas as etapas de sua metodologia, incluindo coleta de dados, análise e interpretação dos resultados, através de técnicas de validação apropriadas. LUCKO e ROJAS (2010) salienta que os resultados da pesquisa precisam ser aceitos pelas comunidades acadêmica e profissional.

Segundo PRIES-HEJE e BASKERVILLE (2008), a validade do design é comprovada pela avaliação dos artefatos e pela consecução dos objetivos de *design* (a satisfação da função

de utilidade). Neste mesmo sentido, CHAKRABARTI (2010) ressaltam que a validade deve demonstrar a utilidade, a qualidade e a eficácia da solução proposta por meio de métodos de avaliação bem executados. HEVNER; MARCH; PARK e RAM (2004) vai mais além e resalta que os artefatos de TI podem ser avaliados em termos de funcionalidade, integridade, consistência, precisão, desempenho, confiabilidade, usabilidade, ajuste com a organização e outros atributos de qualidade relevantes. Sobre outro prisma, HEVNER; MARCH; PARK e RAM (2004) afirma que a avaliação do artefato fornece informações de feedback e uma melhor compreensão do problema, a fim de melhorar a qualidade do produto e o processo de design, sendo assim capaz de contribuir para o próprio processo de desenvolvimento do artefato.

HEVNER; MARCH; PARK e RAM (2004) apresentam cinco formas para avaliar um artefato: observacional, analítica, experimental, teste e descritiva (Quadro 52).

Quadro 52 - Métodos de avaliação de artefatos

<b>Tipos de Avaliação</b>	<b>Métodos de Avaliação</b>
<b>Observacional</b>	Estudos de caso – Estudo do artefato em profundidade no ambiente relacionado ao problema
	Estudos de campo – Monitoramento do uso do artefato em múltiplos projetos
<b>Analítica</b>	Análise estática – Exame da estrutura do artefato quanto a aspectos estáticos (por exemplo, complexidade)
	Análise estrutural – Estudo de adequação do artefato quanto a sua arquitetura técnica
	Otimização – Demonstração das propriedades ótimas inerentes ao artefato ou caracterização dos limites de excelência em sua aplicação
	Análise dinâmica - Estudo do artefato em uso quanto a aspectos dinâmicos (por exemplo, desempenho)
<b>Experimental</b>	Experimento controlado – Estudo do artefato em ambiente controlado quanto a suas qualidades (por exemplo, utilidade)
	Simulação – Uso do artefato com dados artificiais
<b>Teste</b>	Teste funcional – Aplicação do artefato em suas interfaces para identificação de falhas e defeitos
	Teste estrutural – Aplicação de testes quantitativos para análise de resultados na implementação do artefato
<b>Descritivo</b>	Argumento informado – Uso de informações relevantes da base de conhecimento disponível para construção de argumentos convincentes sobre a utilidade do artefato
	Cenários – Construção de cenários detalhados para aplicação do artefato a fim de demonstrar sua utilidade

Fonte: HEVNER; MARCH; PARK e RAM (2004)

LUCKO e ROJAS (2010) divide o processo de validação, de forma ampla, em interna e externa, mas também cita outros tipos de validação: face, conteúdo, critério e construção. Este trabalho focou-se nas validações interna e externa. A validade interna está relacionada a confiabilidade e estabilidade do artefato. A validade externa está relacionada com a generalização dos resultados e sua usabilidade.