REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

APLICAÇÃO DE SISTEMA NEURO-FUZZY HIERÁRQUICO NA GESTÃO DE PROJETOS DE QUALIFICAÇÃO E RACIONALIZAÇÃO DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS

APPLICATION OF A NEURO-FUZZY HIERARCHICAL SYSTEM IN THE MANAGEMENT OF PROJECTS FOR THE QUALIFICATION AND RATIONALIZATION OF PUBLIC BUS TRANSPORT

Ronaldo Gilberto de Oliveira
Doutorado em Projetos – Universidad Internacional Iberoamericana (UNINI) – Campeche – México
E-mail: ronaldo@profuzzy.com.br

Daniel de Oliveira
Doutor, Programa de Pós-graduação no Ensino de Ciências e Saúde – Universidade do Grande Rio (UNIGRANRIO/Afya) – Duque de Caxias, RJ – Brazil
E-mail: daniel@profuzzy.com.br

Adriana Ferreira da Silva
Doutora, Campus de Ciencias Biológicas y Agropecuarias – Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) – Mérida, Yucatán – México.
E-mail: adriana.dasilva@correo.uady.mx

RESUMO

A gestão de projetos de racionalização e qualificação do transporte público por ônibus no Brasil enfrenta uma crise sistêmica profunda, agravada por incertezas, objetivos conflitantes e subjetividades que ferramentas convencionais, como o PMBOK/ISO 21500, não capturam adequadamente. Esta pesquisa propõe o desenvolvimento e a avaliação de um framework inovador fundamentado em Sistema Neuro-Fuzzy Hierárquico Adaptativo (HANFIS). A arquitetura foi estruturada sob o Design Science Research (DSR) em uma árvore binária de três níveis e sete sub-redes Takagi-Sugeno de primeira ordem, com oito variáveis independentes e funções de pertinência contínuas. Essa abordagem reduziu o espaço paramétrico de 65.536 para 112 regras lógicas, mitigando o efeito da "Maldição da Dimensionalidade". Para superar a escassez de dados longitudinais, utilizou-se um "Oráculo Mamdani" submetido à Amostragem por Hipercubo Latino para gerar 13.000 amostras sintéticas. O treinamento do sistema em Python/PyTorch obteve coeficiente de determinação (R^2) de 0,9951 e erro médio de viés (BEM) de 0,015 na validação interna. Ainda na validação interna, o modelo identificou fenômenos críticos, como o "Efeito Penhasco" e o "Veto Assimétrico". A aplicação em simulações de municípios do Sul do Brasil demonstrou o potencial da rede em traduzir heurísticas em recomendações de apoio à decisão (monitoramento de projetos de R&Q, ajuste de frota e viagens). O modelo atua como um simulador de Sistema de Alerta Antecipado (Early Warning System), sugerindo a viabilidade da transição para uma governança preditiva, desde que observados os limites de validação empírica e a accountability algorítmica em face de indicadores clássicos de transporte (demanda, headway e ocupação).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Palavras-chave: Transporte Público por Ônibus; Gestão de Projetos; Sistema Neuro-Fuzzy/HANFIS; Racionalização e Qualificação.

ABSTRACT

The management of projects for the rationalization and qualification of public bus transport in Brazil faces a deep systemic crisis, exacerbated by uncertainties, conflicting objectives, and subjectivities that conventional tools, such as PMBOK/ISO 21500, do not adequately capture. This research proposes the development and evaluation of an innovative framework based on a Hierarchical Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (HANFIS). The architecture was structured under Design Science Research (DSR) into a three-level binary tree and seven first-order Takagi-Sugeno sub-networks, with eight independent variables and continuous membership functions. This approach reduced the parametric space from 65,536 to 112 logical rules, mitigating the effect of the "Curse of Dimensionality". To overcome the scarcity of longitudinal data, a "Mamdani Oracle" subjected to Latin Hypercube Sampling was utilized to generate 13,000 synthetic samples. System training in Python/PyTorch achieved a coefficient of determination (R^2) of 0.9951 and a mean bias error (MBE) of 0.015 in the internal validation. Still in the internal validation, the model identified critical phenomena, such as the "Cliff Effect" and the "Asymmetric Veto". The application in simulations of municipalities in Southern Brazil demonstrated the potential of the network to translate heuristics into decision-support recommendations (R&Q project monitoring, fleet, and trip adjustments). The model acts as an Early Warning System simulator, suggesting the viability of the transition to predictive governance, provided that empirical validation limits and algorithmic accountability regarding classic transport indicators (demand, headway, and occupancy) are observed.

Keywords: Public Bus Transport; Project Management; Neuro-Fuzzy System/HANFIS; Rationalization and Qualification.

RESUMEN

RESUMEN La gestión de proyectos de racionalización y calificación del transporte público por autobús en Brasil enfrenta una crisis sistémica profunda, agravada por incertidumbres, objetivos en conflicto y subjetividades que las herramientas convencionales, como el PMBOK/ISO 21500, no capturan adecuadamente. Esta investigación propone el desarrollo y la evaluación de un marco innovador fundamentado en un Sistema Neuro-Fuzzy Jerárquico Adaptativo (HANFIS). La arquitectura fue estructurada bajo el Design Science Research (DSR) en un árbol binario de tres niveles y siete sub-redes Takagi-Sugeno de primer orden, con ocho variables independientes y funciones de pertenencia continuas. Este enfoque redujo el espacio paramétrico de 65.536 a 112 reglas lógicas, mitigando el efecto de la "Maldición de la Dimensionalidad". Para superar la escasez de datos longitudinales, se utilizó un "Oráculo Mamdani" sometido a Muestreo por Hipercubo Latino para generar 13.000 muestras sintéticas. El entrenamiento del sistema en Python/PyTorch obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9951 y un error medio de sesgo (MBE) de 0,015 en la validación interna. Aún en la validación interna, el modelo identificó fenómenos críticos, como el "Efecto Acantilado" y el "Veto Asimétrico". La aplicación en simulaciones de municipios del sur de Brasil demostró el potencial de la red para traducir heurísticas en recomendaciones de apoyo a la decisión (monitoreo de proyectos de R&Q, ajuste de flota y viajes). El modelo actúa como un simulador de Sistema de Alerta Temprana (Early Warning System), sugiriendo la viabilidad de la transición hacia una gobernanza predictiva, siempre que se observen los límites de validación empírica y la accountability algorítmica frente a indicadores clásicos de transporte (demanda, headway y ocupación).

Palabras clave: Transporte Público por Autobús; Gestión de Proyectos; Sistema Neuro-Fuzzy/HANFIS; Racionalización y Calificación.

1. INTRODUÇÃO

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

O transporte público coletivo atua como infraestrutura vital para a dinâmica socioeconômica e a inclusão nas áreas urbanas contemporâneas. No Brasil, a primazia deste modal é incontestável, sendo responsável por 85,7% de todas as viagens coletivas em cidades com mais de 60 mil habitantes (BID; MDR, 2021). Contudo, o setor enfrenta uma profunda crise sistêmica, severamente agravada pela pandemia de COVID-19, resultando no colapso da demanda e em prejuízos financeiros acumulados que ultrapassou R$ 36,2 bilhões de reais, acumulados somente no período entre 2020 e 2023 (NTU, 2023).

Para reverter esse declínio, destacam-se os projetos de Racionalização e Qualificação (R&Q). Enquanto a racionalização foca na eficiência operacional e adequação da frota, a qualificação busca aprimorar a atratividade sob a ótica do usuário, cujas decisões impactam diretamente os indicadores clássicos do sistema, como *headway* (intervalo de passagem), demanda de passageiros, velocidade operacional e equidade territorial (VUCHIC, 2017). Gerenciar esses empreendimentos constitui um "problema perverso" (*wicked problem*), marcado por profunda incerteza e múltiplos stakeholders com objetivos intrinsecamente conflitantes (FLYVBJERG, 2014).

As abordagens de governança alicerçadas em *frameworks* determinísticos como o PMBOK (PMI, 2021) mostram-se insuficientes por negligenciarem a imprecisão linguística inerente à esfera pública. Em contrapartida, as Redes Neurais Artificiais (RNA) atuam como "caixas-pretas" (*black-box*), sacrificando a transparência (CASTELVECCHI, 2016), ao passo que a Lógica *Fuzzy* isolada não aprende autonomamente (NAUCK et al., 1997; ZADEH, 1965).

Nesse contexto, a pesquisa é norteada pela seguinte pergunta: **Em que medida um Sistema Neuro-Fuzzy Hierárquico Adaptativo pode apoiar a gestão preditiva de projetos de racionalização e qualificação do transporte público por ônibus, integrando métricas determinísticas e variáveis qualitativas, inclusive de risco?** A partir desta formulação, o objetivo geral deste estudo é desenvolver, sob a ótica do Design Science Research (DSR), e avaliar um artefato baseado no HANFIS — uma abordagem "caixa-cinza" (gray-box) que funde a Lógica Fuzzy com as Redes Neurais (JANG, 1993). O intuito é atuar como um simulador de Sistema de Alerta Antecipado de apoio tático à decisão.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O Paradigma de Gestão e as Limitações Determinísticas

Os *frameworks* gerenciais tradicionais (e.g., PMBOK) falham ao não capturar interações não-lineares relacionadas ao ambiente sociopolítico. Fatores exógenos podem gerar o fenômeno

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

do "Veto Assimétrico", onde uma variável ambiental invalida todo o planejamento, resultando no colapso repentino da viabilidade do projeto (FLYVBJERG, 2014). No setor de transportes, a literatura carece de um arcabouço preditivo capaz de combinar métricas determinísticas (*Earned Value Management* - EVM) (FLEMING & KOPPELMAN, 2010) com variáveis qualitativas de pressões institucionais.

2.2. Bibliometria e o Estado da Arte em Sistemas Inteligentes

Uma revisão bibliométrica conduzida sobre 107 artigos (1995-2024) revelou um pico de publicações entre 2019 e 2022 voltadas a modelos adaptativos para lidar com incertezas pós-pandêmicas (LIYANAGE et al., 2022). A análise apontou a dominância de dois pilares tecnológicos: as RNAs, com 3.968 citações (ABIODUN et al., 2018), e a Lógica *Fuzzy*, com 2.644 citações (BELYADI & HAGHIGHAT, 2018). A fusão dessas metodologias emergiu como um nicho de alto impacto, propício para o presente estudo.

2.3. A Sinergia Híbrida e o Colapso da Dimensionalidade

A arquitetura ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), concebida por JANG (1993), estrutura o raciocínio linguístico *Fuzzy* em uma topologia de rede neural *feedforward* de cinco camadas, permitindo processar incertezas (e.g.: "risco alto") e ajustar hiperparâmetros (Mínimos Quadrados e Gradiente Descendente).

O ANFIS aplicado a portfólios complexos esbarra na "Maldição da Dimensionalidade" (YAGER, 1993). Processar simultaneamente oito variáveis interligadas, submetidas a quatro funções de pertinência, exigiria 65.536 regras e dezenas de milhares de parâmetros, inviabilizando o processamento. Como solução adota-se a estruturação HANFIS, hierarquizando os blocos de decisão (YAGER, 1993).

3. METODOLOGIA

A Pesquisa Adotou o Paradigma Design Science Research (DSR), cujo Framework desdobra-se nos seguintes itens:

1. **Identificação do Problema:** Falta de rastreabilidade e integração de dados técnicos (EVM) e sociopolíticos nos projetos de STPO.
2. **Concepção do Artefato:** Modelo HANFIS "caixa-cinza".
3. **Desenvolvimento e Simulação:** Criação do Oráculo Mamdani para geração de base de dados sintéticos via Hipercubo Latino.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

4. **Três Instâncias de Avaliação:** (1) Validação Computacional Interna (aderência ao Oráculo Mamdani); (2) Validação Lógica (cenários de estresse); (3) Simulações Empíricas Exploratórias em Municípios do Sul do Brasil.

A pesquisa foi estruturada para resolver um problema prático decorrente da falha de frameworks determinísticos clássicos de gestão, aptos para lidar com incertezas macroambientais em transportes. A solução proposta foi o desenvolvimento do modelo HANFIS. O artefato, denominado de “HANFIS Neuro-Fuzzy Studio” foi desenvolvido estruturando-se o conhecimento em árvores binárias para mitigar a explosão de regras.

3.1. O Oráculo Mamdani e a Extração do Conhecimento (Método Delphi)

Para formar a base de conhecimento (base de regras), utilizou-se o Método Delphi com um comitê de 9 especialistas selecionados intencionalmente. O perfil profissional selecionado envolveu 1 Engenheiro Civil Especialistas em STPO com mais de 20 anos de atuação no planejamento e gestão de transporte coletivo; 1 Engenheiro Civil na condição de gestor público com mais de 15 anos de atuação em mobilidade urbana; 1 Engenheiro Civil com mais de 5 anos de experiência em engenharia econômico-financeira e na organização operacional de STPO; 3 Diretores de empresas concessionárias responsáveis por operações urbanas de STPO, em cidades de médio e grande porte no Sul do Brasil, todos com mais de 20 anos de atuação; 1 Doutor em Engenharia de Produção Especialista no desenvolvimento de soluções informatizadas para STPO, com mais de 20 anos de experiência; 1 Economista especialista em economia e finanças de STPO, com mais de 6 anos de experiência; 1 Acadêmico de Engenharia Civil com 10 anos de experiência em cálculo tarifário e equilíbrio econômico e financeiro de STPO. Foram conduzidas 5 rodadas com 45 instrumentos de coleta de dados compostos na forma de questionário semiestruturado. As respostas fundamentaram as regras "Se-Então" e os limites linguísticos das Funções de Pertinência. Os centros e larguras (σ) foram calibrados a partir do consenso do comitê e submetidos a testes de sensibilidade.

O conjunto de variáveis aplicadas em cada um dos estudos de casos e os termos das funções de pertinência, isto é, as respostas linguísticas qualitativas/quantitativas, foram obtidas a partir de pesquisas de campo e entrevistas aplicada previamente junto a diretores e técnicos das empresas concessionárias de transporte público por ônibus e técnicos dos órgãos gestores do setor público, selecionados intencionalmente nas cidades de Lages, Criciúma, Jaraguá do Sul, Chapecó, Joinville, Florianópolis, Caxias do Sul e Curitiba. Nesta pesquisa foram aplicados 34 questionários estruturados e realizadas 8 entrevistas, independentemente das 5 rodadas realizadas junto aos 9 especialistas selecionados para aplicação do Método Delphi.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

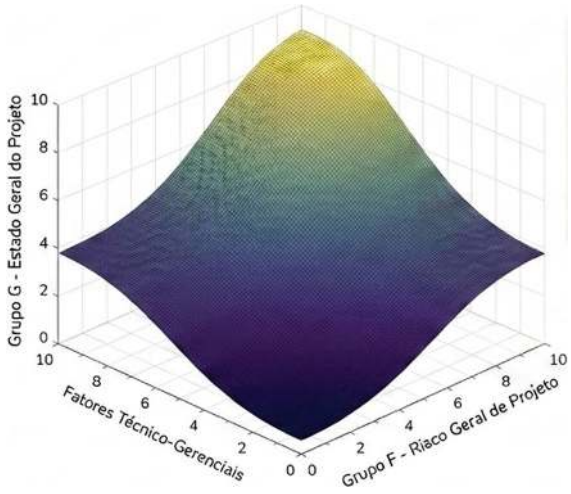
Sem dispor de dados reais históricos, desenvolveu-se um "Oráculo Mamdani" (OLIVEIRA, 2025), por mio do qual gerou-se 13.000 amostras sintéticas (LHS, Seed 28). Este procedimento foi replicado para cada um dos modelos de aplicação simulados abrangendo: Avaliação do Estado Geral do Projeto; Análise do Grau de Adequação do STPO; Racionalização e Qualificação da Oferta de Viagens do STPO e; Avaliação do Fator de Ajuste de Frota do STPO.

O eixo central da pesquisa baseia-se na análise de uma aplicação *hierárquica neuro fuzzy* do tipo HANFIS, modelada para fins de gestão e monitoramento, que simula o Estado Geral do Projeto. A pesquisa também abordou a modelagem de simulações voltadas para a qualificação e racionalização da oferta de serviço de transporte público por ônibus, tema de alta relevância socioeconômica. Dada a similaridade dos processos de modelagem e treinamento das aplicações HANFIS objeto do estudado, o foco do detalhamento será o Estado Geral do Projeto. (A Matriz completa de Regras e os instrumentos de coleta de dados encontram-se no Material Suplementar).

3.2. Topologia do Modelo HANFIS e Processamento Matemático

A arquitetura proposta atua na forma de uma árvore binária de três níveis estruturada por sete sub-redes Takagi-Sugeno interligadas. Essa hierarquia reduz drasticamente o espaço de mais de 28.720 parâmetros de redes planas para apenas 448 hiperparâmetros ajustáveis e 112 regras interligadas resultando numa compressão de 98,4% (TAKAGI & SUGENO, 1985; OLIVEIRA, 2025). A transição metodológica visa criar prescrições ligadas a métricas de custo e cronograma.

Figura 1 – Gráfico da superfície de controle do Bloco G - Risco Geral de Projeto.



Fonte: o autor, 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

A Figura 1 mostra a superfície de controle do Bloco G - Estado Geral do Projeto, formada pela interação entre as variáveis Fatores Técnico Gerenciais e o Risco Geral de Projeto. A transição das variáveis ocorre de forma contínua, previsível e sem saltos estocásticos. Este fenômeno também se aos demais Blocos que estruturam o modelo.

Os valores brutos (x_{real}) foram submetidos à normalização *Min-Max Scaling* (x_{norm}) para ancoragem vetorial. O fluxo de cada sub-rede seguiu 5 camadas *feedforward:*

- **Camada 1 (Fuzzificação):** Projeção por funções Gaussianas:

$$O_{1,i} = \mu_{A_i}(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right).$$

- **Camada 2 (Força de Disparo):** Cálculo via T-norma algébrica:

$$O_{2,k} = w_k = \mu_{A_i}(x_1) \times \mu_{B_i}(x_2).$$

- **Camada 3 (Normalização Escalar):** Relativização do disparo:

$$O_{3,k} = \overline{w}k = \frac{w_k}{\sum j=1^{16} w_j}.$$

- **Camada 4 (Consequentes Lineares):** Aplicação de polinômio de Sugeno de primeira ordem: $O_{4,k} = \overline{w}kf_k = \overline{w}k(ak0 + ak1x_1 + a_{k2}x_2).$

- **Camada 5 (Defuzzificação):** Colapso da média ponderada:

$$O_{5,k} = \sum_{k=1}^{16} \overline{w}_k f_k.$$

3.3. Protocolo de Treinamento e Otimização Computacional

O HNFS foi implementado em Python 3, apoiado em PyTorch, Scikit-learn, Pandas e NumPy (Oliveira, 2025). O *dataset* foi estratificado em 80% para treinamento (10.400 instâncias) e 20% para teste cego / *hold-out* (2.600 instâncias). O algoritmo Adam (*Adaptive Moment Estimation*) atualizou a rede a uma taxa $\eta = 0{,}01$ (Kingma & Ba, 2014). A otimização ocorreu sob *Large Mini-Batch* (lotes de 1.040 amostras simultâneas) e foi blindada contra *overfitting* através do protocolo de *Early Stopping* (PRECHELT, 1998; GOODFELLOW et al., 2016).

3.4. Critérios de Avaliação Estatística

O grau de adequação do construto matemático foi validado por: Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) (CHAI & DRAXLER, 2014), Erro Absoluto Médio (MAE) (WILLMOTT & MATSUURA, 2005), Erro Médio de Viés (MBE), Coeficiente de Determinação (R^2) e Correlação de Pearson (R) (LEGATES & MCCABE, 1999). A parcimônia estrutural foi auditada pelos Critérios de Informação de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) (AKAIKE, 1974; SCHWARZ, 1978).

3.5. Os modelos Analisados

REMUNOM
ISSN 2178-6925

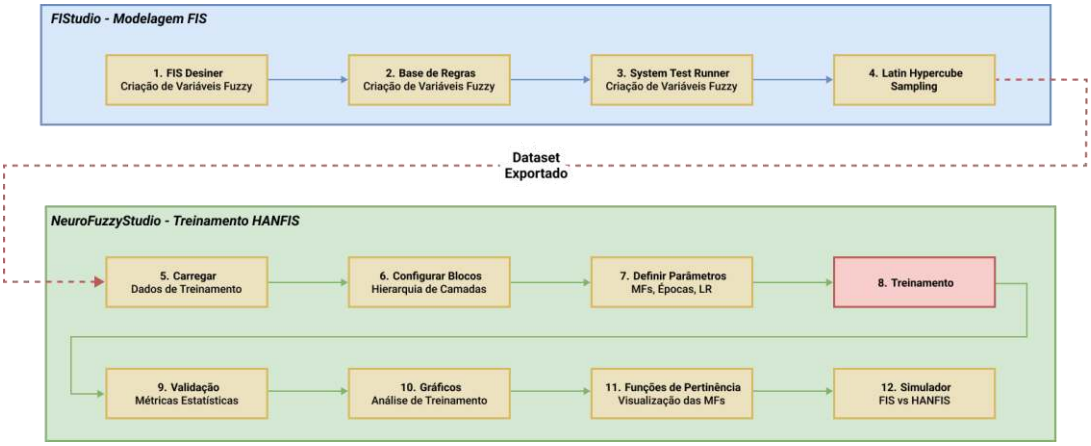
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Para cada modelo analisado, as variáveis representam as condições e características do projeto e seu ambiente que se presume influenciarem os resultados $X = \{x_1, x_2, ..., x_n\}$. Em todos os casos, as variáveis foram agrupadas na forma de uma rede hierárquica de diagnóstico, onde o gestor pode avaliar a situação em cada “nó.

Este conjunto de variáveis pode ser ajustado ou definido de acordo com os objetivos de monitoramento e gestão de projetos elencados pelo gestor. As aplicações HANFIS submetidas ao processo de análise por simulação seguiram o fluxo do diagrama apresentado na Figura 2.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Figura 2 – Diagrama demonstrativo da aplicação do Simulador HANFIS a partir do FIS-M.

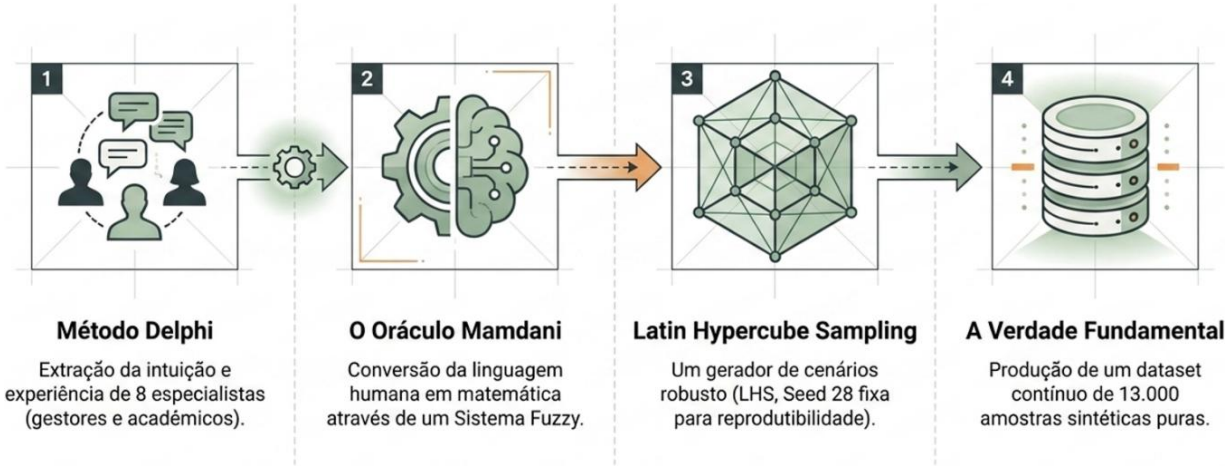


Fonte: o autor, 2026.

A Figura 2 mostra a sequência de passos necessários para tratar da base de dados gerada por meio do “Oráculo Mamdani” (Artefato FIS-M) até a submissão ao processo de treinamento e uso do Simulador HANFIS (Artefato HNFS).

O presente artigo abordado com detalhes a aplicação modelada para análise simulada do Estado Geral do Projeto.

Figura 3 – Diagrama de Transformação do Conhecimento Tácito em Dados.



Fonte: o autor, 2026.

O diagrama representado na Figura 3 é um complemento da Figura 2, que mostra as etapas necessárias para se obter a transformação do conhecimento tácito do especialista em dados. Mostra o processo desde a extração da intuição e experiência dos especialistas, passando pelo Oráculo Mamdani, pelo LHS resultando na produção de um dataset contínuo de 13.000 amostras sintéticas a serem submetidas ao processo de treinamento na aplicação HANFIS modelada.

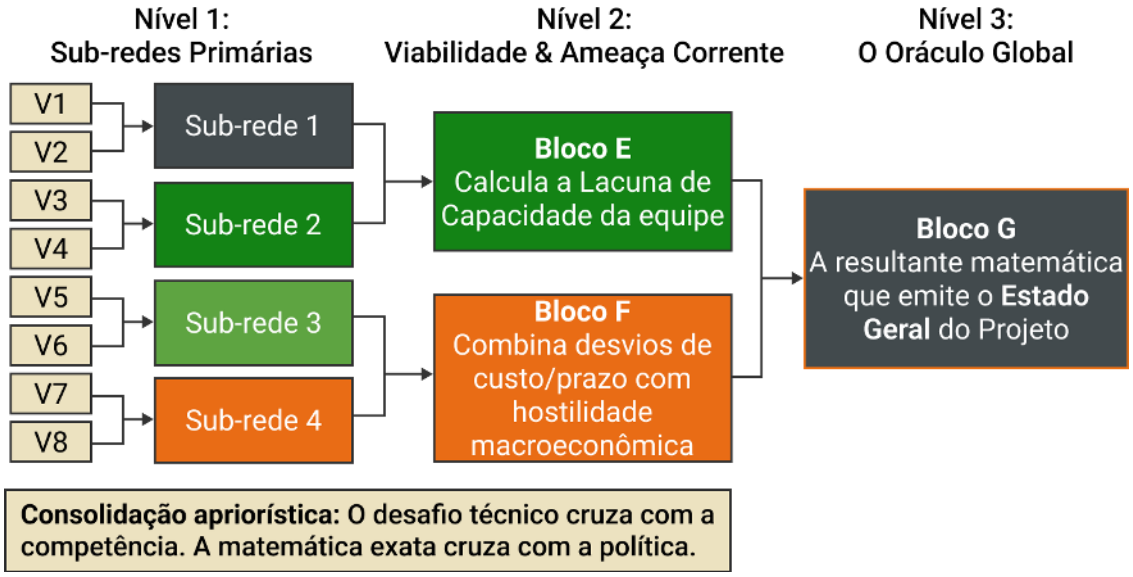
REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

3.6. Dicionário de Dados e Entradas

Esta secção aborda a arquitetura hierárquica do "Oráculo Mamdani (Artefato FIS-M) configurado para três níveis de sub-redes (Nível 1, Nível 2 e Nível 3), com oito variáveis basais e sete sub-redes, que juntamente com o dicionário de dados caracterizam a aplicação básica da presente pesquisa. Esta aplicação foi configurada para mostrar o uso do modelo HANFIS visando simular o monitoramento e a gestão de projeto de R&Q, com a finalidade de simular a Avaliação do Estado Geral do Projeto. O desenho do sistema, foi focado no desempenho computacional e na explicabilidade dos resultados.

A metodologia desta aplicação baseia-se, primeiramente, na construção de um Sistema de Inferência *Fuzzy* (FIS) do tipo Mamdani (MAMDANI & ASSILIAN, 1975), estruturado em cascata hierárquica. O objetivo é simular o raciocínio heurístico de um planejador de transportes (especialista) para gerar uma base de dados sintética contínua e não-linear que, em segundo lugar, sirva de referência para o treinamento do uso em aplicações simuladas do modelo HANFIS.

Figura 4 – Arquitetura hierárquica do modelo FIS-M, Nível 1, Nível 2 e Nível 3.



Fonte: o autor, 2026.

A Figura 4 mostra a construção topológica em cascata do modelo e consiste no desenho do Oráculo Mamdani (Artefato denominado FIS-M Designer) estruturado para rodar as simulações do especialista em Gestão de Projetos de R&Q e gerar a base de dados para treinamento do modelo HANFIS. Demonstra também, o detalhamento hierárquico estruturado de acordo com o Dicionário de Dados formulado para a Avaliação do Estado Geral do Projeto. A seguir serão detalhados os respectivos Blocos de Sub-redes.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Sub-rede 1: Bloco A – Dimensão da Engenharia e Escopo.

Definição do Construto: Este bloco temático consolida as variáveis determinísticas inerentes ao objeto do projeto (a dimensão do "O Quê"). Ele atua como o vetor estrutural do modelo, capturando a magnitude do desafio técnico exigido pela solução e a precisão com que as fronteiras desse desafio foram delineadas na fase de planejamento. O comportamento destas variáveis dita o risco basal do empreendimento antes mesmo do início de sua execução.

- **V1 Complexidade Técnica:** Grau de dificuldade intrínseca, ineditismo tecnológico, nível de interdependência sistêmica e volume de incertezas associadas ao desenvolvimento e à implementação da solução técnica proposta para o projeto. Tipo de Variável: Linguística (Fuzzy).
- **V2 Clareza de Escopo:** Nível de precisão, completude e ausência de ambiguidade com que os objetivos estratégicos, as entregas estruturadas (via Work Breakdown Structure - WBS) e as fronteiras (limites e exclusões) do projeto estão documentados e formalmente validados pelas partes interessadas (stakeholders). Tipo de Variável: Linguística (Fuzzy).

Sub-rede 2: Bloco B - Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK).

Definição do Construto: Este bloco temático consubstancia a dimensão executiva do projeto (o "Como"). Ele avalia o ecossistema de gestão, as capacidades organizacionais sistêmicas e o arcabouço metodológico que suportam a equipe. Enquanto o Grupo A define o tamanho do desafio, o Grupo B mensura a competência técnica e gerencial da organização executora para absorver, estruturar e entregar esse desafio de forma previsível.

- **V3 Maturidade na Gestão de Projetos:** Grau de institucionalização, sofisticação e padronização dos processos, ferramentas e competências gerenciais no âmbito da organização executora. Este construto fundamenta-se nos preceitos de *frameworks* globais de governança corporativa, tais como o OPM3 (*Organizational Project Management Maturity Model* do PMI) e o CMMI (*Capability Maturity Model Integration*). Tipo de Variável: Linguística (*Fuzzy*).
- **V4 Qualidade dos Dados e Planejamento:** Fidedignidade, acurácia, rastreabilidade e tempestividade do arcabouço informacional que subsidia a construção da linha de base (*baseline*) do projeto e alimenta seus indicadores de performance contínua (e.g., estudos de viabilidade, levantamentos topográficos, estimativas paramétricas e composições de custos unitários). Tipo de Variável: Linguística (*Fuzzy*).

Sub-rede 3: Bloco C - Dimensão de Performance Determinística (EVM).

Definição do Construto: Este grupo temático consolida a avaliação quantitativa da performance retrospectiva do projeto (a dimensão do "Quanto"). Diferentemente dos Fatores de

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Engenharia (Grupo A) e de Governança (Grupo B), que são majoritariamente qualitativos e apriorísticos, o Grupo C apoia-se estritamente na metodologia determinística de Gerenciamento do Valor Agregado (*Earned Value Management* - EVM). Estes indicadores operam como as "variáveis de estado" do modelo, traduzindo o progresso físico e financeiro real da obra em dados paramétricos preditivos.

- **V5 Índice de Desempenho de Custos (CPI - *Cost Performance Index*):** Métrica quantitativa que afere a eficiência financeira estrita do trabalho fisicamente realizado no projeto, em contraste direto com os custos reais incorridos para sua execução. Tipo de Variável: Numérica Contínua (Fuzzificada).
- **V6 Índice de Desempenho de Cronograma (SPI - *Schedule Performance Index*):** Indicador vetorial de eficiência temporal que mensura o ritmo real de execução e entrega do escopo frente à linha de base de cronograma preestabelecida no planejamento. Tipo de Variável: Numérica Contínua (Fuzzificada).

Sub-rede 4: Bloco D - Dimensão Exógena (Incontrolável).

Definição do Construto: Este bloco temático mapeia as variáveis exógenas e ambientais que orbitam o projeto (a dimensão do “Onde” ou "Contexto Exógeno"). Diferentemente dos Fatores de Governança (Bloco B), que são endógenos e controláveis pela equipe de gestão. As variáveis deste grupo representam forças sistêmicas independentes. Elas atuam como amplificadores ou supressores de risco macro, capturando a sensibilidade do projeto às volatilidades do mercado, às intempéries do meio ambiente e à dinâmica das esferas de poder político-institucional.

- **V7 Fatores Institucionais e Políticos:** Grau de legitimidade, aceitação pública e "licença social para operar" concedida pela sociedade civil e pelas comunidades diretamente afetadas. Engloba, simultaneamente, o nível de patrocínio das autoridades governamentais, a estabilidade do apoio dos sponsors institucionais e o grau de aderência estrita às obrigações legais e de compliance. Tipo de Variável: Linguística (*Fuzzy*).
- **V8 Risco Sistêmico:** Probabilidade de materialização de eventos exógenos de força maior — englobando volatilidades macroeconômicas agudas, intempéries climáticas severas e rupturas regulatórias estruturais — que impactam diretamente a viabilidade técnica e financeira do empreendimento. Tipo de Variável: Linguística (*Fuzzy*).

Sub-rede 5: Bloco E - Viabilidade Interna.

- **Sub-rede 1: Bloco A - Dimensão da Engenharia e Escopo:** Representa a magnitude consolidada do risco estrutural e do desafio técnico do projeto (a dimensão do "O Quê"). Este construto captura a essência do risco basal do empreendimento antes mesmo do

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

início de sua execução, unificando a dificuldade intrínseca da solução tecnológica proposta com o nível de precisão com que suas fronteiras e entregas foram delineadas na fase de concepção e planejamento. Tipo de Variável: Numérica/Linguística Intermediária (*Output* da sub-rede basal / Input da rede principal).

- **Sub-rede 2: Bloco B - Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK):** Representa a magnitude consolidada da capacidade executiva e gerencial da organização executora (a dimensão do "Como"). Este construto captura o nível de blindagem do projeto contra incertezas operacionais, unificando a maturidade institucional dos processos de gestão com a fidedignidade do arcabouço informacional que embasa o planejamento. Enquanto o Bloco A define o tamanho do desafio técnico, o Bloco B mensura a competência sistêmica da organização para absorver, estruturar e entregar esse desafio de forma controlada e previsível. Tipo de Variável: Numérica/Linguística Intermediária (*Output* da sub-rede basal / *Input* da rede principal).

Sub-rede 6: Bloco F - Trajetória Real X Ambiente.

- **Sub-rede 3: Bloco C - Dimensão de Performance Determinística (EVM):** Representa a magnitude consolidada da "saúde" físico-financeira atual do projeto (a dimensão do "Quanto"). Este construto consolida a avaliação quantitativa da performance retrospectiva da obra. Diferentemente dos Fatores de Engenharia (Bloco A) e de Governança (Bloco B), que são majoritariamente qualitativos e apriorísticos, o Grupo C apoia-se estritamente na metodologia determinística de Gerenciamento do Valor Agregado (*Earned Value Management* - EVM). Ele opera como o núcleo de "variáveis de estado" do modelo, traduzindo o progresso físico e o consumo financeiro real da obra em um indicador paramétrico preditivo único. Tipo de Variável: Numérica/Linguística Intermediária (*Output* da sub-rede basal / *Input* da rede principal).
- **Sub-rede 4: Bloco D - Dimensão Exógena (Incontrolável):** Representa a magnitude consolidada da exposição e vulnerabilidade do projeto às forças sistêmicas incontroláveis (a dimensão do "Contexto Exógeno"). Este construto captura o nível de hostilidade do ambiente externo no qual o empreendimento está inserido, unificando a volatilidade macroeconômica e climática com a estabilidade socioinstitucional e política. Diferentemente dos Fatores de Governança (Bloco B), que são endógenos e controláveis pela equipe de gestão, o Bloco D mensura pressões puramente exógenas que atuam como amplificadores absolutos do risco basal. Tipo de Variável: Numérica/Linguística Intermediária (*Output* da sub-rede basal / *Input* da rede principal).

Sub-rede 7: Bloco G: Estado Geral do Projeto.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

- **Sub-rede 5: Grupo E - Fatores Técnico-Gerenciais:** Representa a síntese da viabilidade estrutural e executiva interna do projeto. Este construto de segunda ordem consolida a relação de forças dinâmicas entre o "tamanho do problema" (Bloco A - a dimensão do desafio técnico) e a "capacidade de resolução" da organização (Bloco B - a dimensão da competência executiva). Ao amalgamar estas duas esferas, o Bloco E reflete o Risco Técnico-Gerencial intrínseco, determinando se a equipe designada (o "Quem") possui a musculatura metodológica e técnica necessária para suportar a complexidade do escopo assumido. Tipo de Variável: Numérica/Linguística de Segunda Ordem (*Output* de rede intermediária / *Input* da rede terminal).
- **Sub-rede 6: Bloco F - Trajetória Real X Ambiente:** Representa a síntese do risco real e materializado do projeto em seu ambiente de execução. Este construto de segunda ordem consolida a "saúde" empírica e quantitativa do projeto (Bloco C - a dimensão do EVM) com a pressão exercida pelo ecossistema externo incontrolável (Bloco D - a dimensão do Contexto Exógeno). Ao amalgamar estas duas esferas, o Bloco F reflete o nível de ameaça corrente, identificando se os desvios de prazo e custo já materializados estão sendo agravados ou atenuados por fatores macroeconômicos e institucionais, fornecendo um panorama holístico de vulnerabilidade. Tipo de Variável: Numérica/Linguística de Segunda Ordem (*Output* de rede intermediária / *Input* da rede terminal).

O Nível 1 constitui-se na Camada Basal, ou seja, as Sub-redes Primárias. Esta camada abrange as oito variáveis originais do FIS-M, agrupando-as em pares lógicos através de quatro sub-redes independentes: a) Sub-rede 1 (Bloco A - O Quê): Processa a Complexidade Técnica e a Clareza de Escopo para inferir o Risco Estrutural de Engenharia; b) Sub-rede 2 (Bloco B - O Como): Processa a Maturidade na Gestão e a Qualidade dos Dados para inferir a Capacidade Executiva. c) Sub-rede 3 (Bloco C - O Quanto): Processa o CPI e o SPI para inferir a Saúde Físico-Financeira Atual. d) Sub-rede 4 (Bloco D - Contexto Exógeno): Processa o Risco Sistêmico e os Fatores Político-Institucionais para inferir a Exposição Exógena.

O Nível 2 trata-se de Camada Intermediária, ou seja, a Sub-redes de Segunda Ordem. Esta camada cruza as saídas latentes do Nível 1 para formar construtos de alta complexidade gerencial: a) Sub-rede 5 (Bloco E - Viabilidade Interna): Facciona o desafio técnico (Saída A) com a capacidade da equipe (Saída B), calculando a Lacuna de Capacidade (*Capability Gap*) da organização. b) Sub-rede 6 (Bloco F - Risco Geral do Projeto): Facciona a eficiência matemática real (Saída C) com a hostilidade do ambiente externo (Saída D), calculando o nível de ameaça corrente.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

O Nível 3 é a Camada Terminal (Oráculo Global), o seja, o nó de inferência final. A Sub-rede 7 (Bloco G), atua como o *sink node* (nó coletor) da topologia. Ele recebe as saídas parciais dos Grupos E e F e computa a resultante matemática unificada: o Estado Geral do Projeto. O valor absoluto final é decodificado para o espectro semântico da alta gestão corporativa.

Tabela 1 – Funções de Pertinência do tipo Gaussianas - Avaliação do Estado Geral do Projeto.

Variável (Centro σ) (UdD)	**Termo 1 (Centro)**	**Termo 2 (Centro)**	**Termo 3 (Centro)**	**Termo 4 (Centro)**
V1 - Complexidade Técnica ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	Rotineira (0)	Moderada (3,33)	Alta (6,66)	Extrema (10)
V2 - Clareza de Escopo ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	Obscuro (0)	Impreciso (3,33)	Definido (6,66)	Cristalino (10)
V3 - Maturidade (Gestão) ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	Ad-hoc (0)	Repetível (3,33)	Gerenciada (6,66)	Otimizada (10)
V4 - Qualidade Dados ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	Deficiente (0)	Razoável (3,33)	Boa (6,66)	Excelente (10)
V5 - CPI (Custos) ($\sigma = 0{,}3$); ([0, 2])	Estouro Crítico (0)	Alerta (0,66)	No Alvo (1,33)	Superávit (2)
V6 - SPI (Cronograma) ($\sigma = 0{,}3$); ([0, 2])	Atraso Crítico (0)	Atraso Leve (0,66)	No Prazo (1,33)	Adiantado (2)
V7 - Fatores Institucionais ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	Oposição (0)	Resistência (3,33)	Neutro (6,66)	Favorável (10)
V8 - Risco Sistêmico ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	Colapso (0)	Crise (3,33)	Instabilidade (6,66)	Estável (10)
Bloco A – Dimensão da Engenharia e Escopo ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	N1 Crítico (0)	N2 Preocupante (3,33)	N3 Adequado (6,66)	N4 Excelente (10)
Bloco B – Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK) ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	N1 Crítico (0)	N2 Preocupante (3,33)	N3 Adequado (6,66)	N4 Excelente (10)
Bloco C – Dimensão de Performance Determinística (EVM) ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	N1 Crítico (0)	N2 Preocupante (3,33)	N3 Adequado (6,66)	N4 Excelente (10)
Bloco D – Dimensão Exógena (Incontrolável) ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	N1 Crítico (0)	N2 Preocupante (3,33)	N3 Adequado (6,66)	N4 Excelente (10)
Bloco E – Viabilidade Interna ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	N1 Crítico (0)	N2 Preocupante (3,33)	N3 Adequado (6,66)	N4 Excelente (10)
Bloco F – Trajetória Real X Ambiente ($\sigma = 1{,}4$); ([0, 10])	N1 Crítico (0)	N2 Preocupante (3,33)	N3 Adequado (6,66)	N4 Excelente (10)
Bloco G - Estado Geral ($\sigma = 13$); ([0, 100])	Fracasso Iminente (0)	Atenção (33,33)	Sob Controle (66,66)	Sucesso Absoluto (100)

Fonte: o autor, 2026.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

A Tabela 1 apresenta as funções de pertinência com seus centros e larguras (σ) estipulados via avaliação de sensibilidade no método Delphi. A Tabela 1 contempla as informações que permitem identificar os termos das funções de pertinência que definem cada variável, bem como, a dimensão do centro e da largura σ da função Gaussiana que estrutura o modelo FIS-M. Também permite associar o valor medido com o valor linguístico de cada variável. As informações apresentadas na Tabela 1 são necessárias para a reprodutibilidade do modelo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Diagnóstico Empírico da Gestão Setorial

Com a pesquisa de campo e as entrevistas realizadas previamente junto a diretores e técnicos das empresas concessionárias de transporte público por ônibus e técnicos dos órgãos gestores do setor público encarregados do monitoramento e gestão do STPO, constatou-se que 100% das concessionárias e órgãos públicos operam ferramentas de monitoramento básico de cronograma e custos. Constatou-se uma abstenção crítica no uso do EVM para projeções probabilísticas de custo final de projetos de R&Q e para a Estimativa no Término - EAC. Apenas 20% relataram possuir bases de "Lições Aprendidas", evidenciando que o conhecimento gerencial permanece tácito (OLIVEIRA, 2025). Ademais, 100% dos entrevistados relataram utilizar termos de "Valor Linguístico" que são utilizados para caracterizar imprecisões e incertezas. Constatou-se que 62,5% das organizações convertem essas incertezas através de heurísticas rígidas em números. Estes achados justificam a adoção da Lógica *Fuzzy*.

4.2. Validação Computacional Interna (Treinamento)

A validação computacional interna (treinamento) da arquitetura HANFIS modelada para os casos: Avaliação do Estado Geral do Projeto; Avaliação do Grau de Adequação do STPO; Racionalização e Qualificação da Oferta de Viagens e; Avaliação do Fator de Ajuste de Frota, foram executadas sobre o conjunto de amostras geradas com a aplicação do Oráculo Mamdani, para cada caso. Cada um dos dataset sintéticos foi gerado considerando 13.000 amostras, obtidas via Amostragem por Hipercubo Latino (LHS). No processamento do treinamento interno no HANFIS, cada dataset foi particionado na proporção de 80% para treinamento, o que corresponde a 10.400 amostras (registros) e 20% para validação interna cega (hold-out) com 2.600 amostras. Neste caso, cada dataset foi preparado para o treinamento de acordo com a modelagem da aplicação. Este conjunto de amostras oferece uma relação de 23 amostras para cada um dos 448 hiperparâmetros da rede. O modelo HANFIS configurado para analisar o Grau

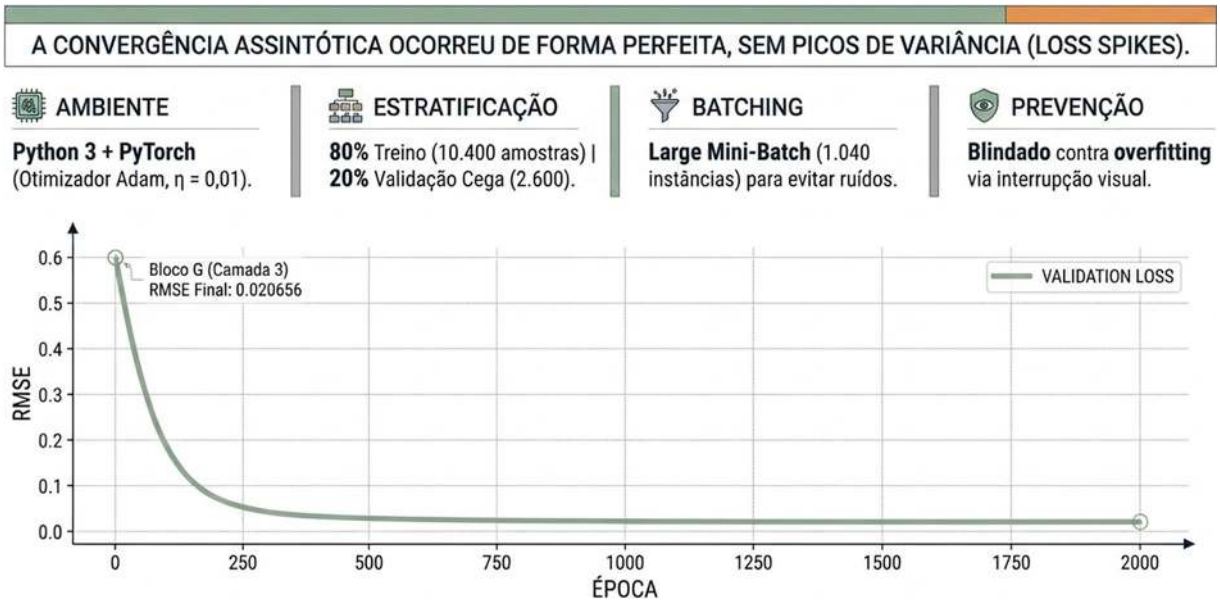
REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

de Adequação do STPO, foi executado sobre o dataset sintético de 5.000 amostras (gerado via LHS no FIS-M), particionado na mesma proporção de 80% para treinamento, o que corresponde a 4.000 amostras e 20% para validação interna cega com 1.000 amostras.

A dinâmica de treinamento e otimização computacional seguiu o protocolo descrito na secção 3.3 e essa etapa atesta a aderência do HANFIS ao modelo sintético, superando modelos baseline de regressão linear que não comportam não-linearidade.

A curva de aprendizado exponencial decrescente mostrada na Figura 5, exemplifica o comportamento convergente dado pela métrica do erro RMSE para o Bloco G. Este comportamento convergente, também se estende para os demais Blocos do modelo analisados.

Figura 5 – Curva de Aprendizado (*Loss*) Bloco G, RMSE: 0,020656.



Fonte: o autor, 2026.

A Figura 5 mostra que, ao longo do processo de treinamento a convergência ocorreu sem picos de variância (*loss spikes*), mostrando a evolução do Erro Quadrático Médio (RMSE) e atestando a adequação da taxa de aprendizado fixada em $\eta = 0{,}01$.

Nos ensaios oficiais optou-se por não regular a capacidade de generalização topológica, ou seja, ativar a parada antecipada (*Early Stopping*). Este recurso está programado para uso no modelo HANFIS. Assim, a interrupção dos treinamentos deu-se com a conclusão do ciclo de épocas estabelecido para cada ensaio. Isto permitiu identificar visualmente a configuração da trajetória descendente em que a curva de validação interna (*Validation Loss*) cessou sua trajetória. Este protocolo garantiu a extração da matriz de pesos no instante de máxima aderência fenomenológica para o número de épocas estabelecido, blindando a topologia contra a memorização de ruídos (*overfitting*).

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Tabela 2 – Métricas de Convergência no Conjunto de Teste.

Vaiável de Saída/Entrada	Métricas
	RMSE
Bloco A – Dimensão da Engenharia e Escopo	0,048262
Bloco B - Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK)	0,033718
Bloco C - Dimensão de Performance Determinística (EVM)	0,037270
Bloco D - Dimensão Exógena (Incontrolável)	0,033901
Bloco E - Viabilidade Interna	0,040043
Bloco F - Trajetória Real X Ambiente	0,032407
Bloco G - Estado Geral do Projeto	0,020656

Fonte: o autor, 2026.

A Tabela 2 apresenta as métricas de convergência do RMSE para cada um dos Blocos de Sub-rede, obtidos com a realização do treinamento do modelo HANFIS em 2.000 épocas. Isto indica que as métricas foram extraídas da matriz de pesos no instante de máxima aderência fenomenológica que ocorre ao atingir o limite de épocas estabelecidas para o treinamento. Destaca-se que o RMSE não é uma métrica em percentual, mas sim, uma medida que indica, em unidades, o intervalo de ocorrência no universo discurso.

Tabela 3 – Configuração operacional do aplicativo HANFIS Neuro-fuzzy Studio após o treinamento.

Parâmetro	Configuração
Entradas	8 Variáveis
Blocos de Sub-rede	7
Níveis	3
Variáveis de Saída/Entrada	7
Variáveis por Sub-rede	2
Épocas	2.000
MFs	4
Raio (Ratio)	0,5
Tipo de MFs	Gaussian
Split Test	0,2
Learning Rate	0,01
Batch Size	1.040
Early Stopping	Não aplicado
Amostras de Treinamento	10.400
Amostras de Teste Cego	2.600

Fonte: o autor, 2026.

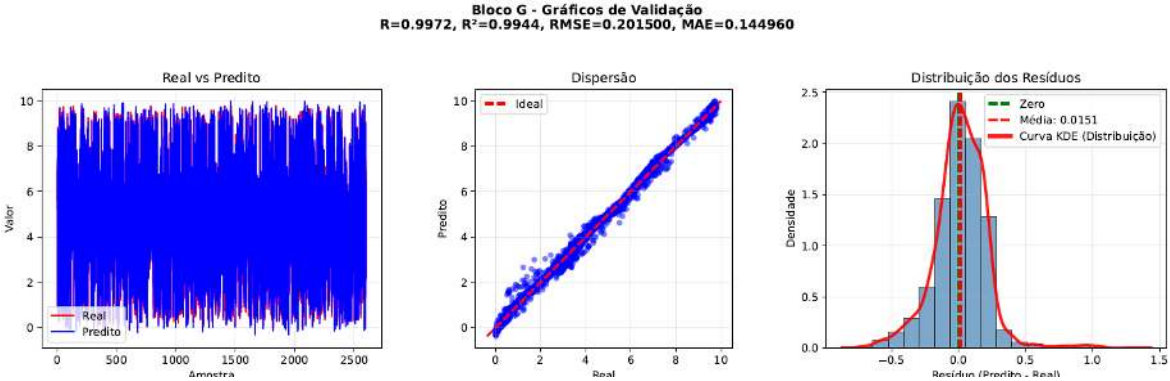
A Tabela 3 mostra a configuração do aplicativo HANFIS para o processamento do treinamento da rede.

O aplicativo HANFIS disponibiliza recursos gráficos para a constatação do Recobrimento Amostral Real vs. Predito; para a Dispersão na Amostra, onde se pode constata a força da correlação e; para a Distribuição dos Resíduos que, sobreposto pela Curva de Distribuição KDE,

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

normalmente apresenta uma forma leptocúrtica, de onde se pode inferir a conformidade do teste cego para todos os blocos estruturais do modelo. A Figura 6 exemplifica o uso dos recursos gráficos na análise dos resultados obtidos para o Bloco G.

Figura 6: Bloco G – Gráficos de Validação contemplando o Gráfico de recobrimento amostral Real vs. Predito; Gráfico de Dispersão; Gráfico de Distribuição de Resíduos sobreposto pela Curva de Distribuição KDE, cuja forma assegura conformidade para o teste cego.



Fonte: o autor, 2026.

A Figura 6, mostra os Gráficos de Validação do Bloco G, gerados a partir da aplicação do HANFIS, onde constata-se que o Gráfico de Recobrimento Real vs. Predito apresenta um ótimo recobrimento. O Gráfico de Dispersão do Bloco G, obtido com o conjunto de testes cego, resultou num Coeficiente de Correlação de Pearson R: 0,9972, o que mostra uma alta linearidade entre predição e alvo. Enquanto o Coeficiente de Determinação R^2: 0,9944 mostra um alto grau de ajuste do modelo aos dados sintéticos gerados. **Estas métricas demonstram uma forte fidelidade reprodutiva da lógica especialista original, ainda que não substitua a validação com dados empíricos observados**. O Gráfico de Distribuição de Resíduos sobreposto pela Curva de Distribuição KDE apresenta característica leptocúrtica. Este comportamento se estende para os demais Blocos do modelo.

A validação de modelos híbridos neuro-fuzzy baseia-se na quantificação da discrepância entre o valor alvo (*target*), que no presente estudo é fornecido pelo sistema especialista FIS-M (Oráculo Mamdani) e a saída é simulada pelo modelo Sugeno HANFIS treinado.

As métricas obtidas para os sete blocos processados no conjunto de testes cego, após o treinamento realizado, constam relacionadas na Figura 7. Os resultados estatísticos do treinamento realizado com as amostras sintéticas, indicam que nestas condições a rede registrou métricas excepcionais. O Bloco G (Estado Geral do Projeto) alcançou Coeficiente de Determinação (R2) de 0,9951 e Correlação de Pearson *(R)* de 0,9972, capturando mais de 99,5% da variabilidade não-linear original. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) limitou-se a 0,2015,

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

muito próxima ao MAE de 0,1449, provando a inexistência de *outliers* ruidosos. O Erro Médio de Viés (MBE) marcou 0,015 e o Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) aferiu 0,2009, chancelando a imparcialidade preditiva da IA. Os testes de Akaike (AIC) e Bayesiano (BIC) atestaram a vantagem inequívoca e parcimoniosa dos 448 hiperparâmetros da árvore binária frente a redes planas incomputáveis

Figura 7: Métricas de Desempenho do Modelo HNFS (HANFIS) no Conjunto de Teste utilizado para a avaliação do Estado Geral do Projeto.

Métricas de Validação

Bloco	Camada	R	R^2	RMSE	MAE	MBE	StdRes	AIC	BIC
A	1	0.9790	0.9584	0.458727	0.364995	-0.002902	0.458806	3376.12	3522.70
B	1	0.9907	0.9813	0.336498	0.246886	-0.013152	0.336306	1764.83	1911.42
C	1	0.9924	0.9848	0.350517	0.281246	-0.011236	0.350404	1977.08	2123.66
D	1	0.9861	0.9724	0.377819	0.291229	0.008923	0.377786	2367.11	2513.70
E	2	0.9859	0.9719	0.368622	0.285849	-0.012244	0.368490	2238.97	2385.55
F	2	0.9927	0.9850	0.323790	0.243860	-0.053322	0.319431	1564.66	1711.24
G	3	0.9972	0.9944	0.201500	0.144960	0.015099	0.200972	-901.73	-755.15

Fonte: o autor, 2026.

Como se constata na Figura 7, todos os Blocos submetidos ao teste cego apresentaram a Correlação de Pearson acima de 0,9790 (Bloco A), Coeficiente de Determinação *(R^2)* acima de 0,9584 (Bloco A) e a Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) menor do que 0,458727 (Bloco A). Também a métrica MAE máximo foi de 0,364995. Diante destes e dos demais resultados estatísticos apresentados na Figura 7, constata-se que o treinamento baseado em dados sintéticos foi bem sucedido.

A análise do Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) confirmou a precisão do modelo, ao apresentar um valor de erro quase idêntico ao RMSE. Isto mostra que o erro médio ($\bar{e}$) tende a zero, indicando a completa ausência de viés sistemático nas inferências do modelo HANFIS (aplicativo HNFS), conforme detalhado na Tabela 4.

Tabela 4 – Métrica da diferença do RMSE e o Desvio Padrão dos Resíduos - Teste Cego.

Vaiável de Saída	**Métricas**		
	RMSE	**SdeRes**	**RMSE - SdeRes**
Bloco A – Dimensão da Engenharia e Escopo	0,458727	0,458806	-0,000079
Bloco B - Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK)	0,336498	0,336306	0,000192
Bloco C - Dimensão de Performance Determinística (EVM)	0,350517	0,350404	0,000113
Bloco D - Dimensão Exógena (Incontrolável)	0,377819	0,377786	0,000033
Bloco E - Viabilidade Interna	0,368622	0,36849	0,000132

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Bloco F - Trajetória Real X Ambiente	0,32379	0,319431	0,004359
Bloco G - Estado Geral do Projeto	0,2015	0,200972	0,000528

Fonte: o autor, 2026.

A Tabela 4 mostra a diferença entre o RMSE e o Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) resultantes do teste cego em face da aplicação do modelo HANFIS, confirmando a precisão do modelo, ao apresentar um valor de erro quase idêntico ao RMSE. Isto mostra que o erro médio ($\bar{e}$) tende a zero, indicando a completa ausência de viés sistemático nas inferências do modelo HANFIS.

Em todos os casos analisados a partir de amostras sintéticas, optou-se por não regular a capacidade de generalização topológica, ou seja, a parada antecipada (*Early Stopping*). Assim, a interrupção do treinamento deu-se com a conclusão do ciclo de 2.000 épocas fixadas para uso no modelo. Isto permitiu identificar visualmente a configuração da trajetória descendente em que a curva de validação (*Validation Loss*) cessou sua trajetória (Figura 7). Este protocolo garantiu a extração da matriz de pesos no instante de máxima aderência fenomenológica para o número de épocas estabelecido, blindando a topologia contra a memorização de ruídos (*overfitting*).

4.3. Validação Lógica e Sensibilidade Qualitativa (Cenários de Estresse)

Para testar a lógica da “caixa-cinza”, aplicaram-se cenários arquetípicos extremos. A matriz de pesos treinada para avaliar o Estado Geral do Projeto, foi submetida a cenários arquetípicos simulados de estresse, simulando condições arquetípicas de projetos de pequeno, médio e grande porte. A Tabela 5 contempla a aplicação do Cenário 1.

Tabela 5 – O Projeto Ideal, Cenário C1.

Cenário:	**Projeto:**	
C1	**O Projeto Ideal**	
Objeto: Implantar 5 Estações de pré-embarque na Linha Troncal da Avenida Centenário.		
Escopo: Engenharia simples, baixa complexidade técnica, escopo claro e objetivo bem definido, alta maturidade na gestão de projetos de R&Q, qualidade dos dados e planejamento bem estabelecido, ótima situação financeira, cronograma adiantado, ótimo apoio político e baixo risco.		
V1	Clareza de Escopo	7,34
V2	Complexidade Técnica	3,69
V3	Maturidade na Gestão de Projeto	6,55
V4	Qualidade dos Dados e Planejamento	7,89
V5	Índice de Desempenho de Custos (*CPI - Cost Performance Index*).	8,80
V6	Índice de Desempenho de Cronograma (*SPI - Schedule Performance Index*)	7,48
V7	Fatores Institucionais e Políticos	5,41

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

V8	Risco sistêmico	0,99
Sub-rede	**Nível 1**	**Medida**
Bloco A	Dimensão da Engenharia e Escopo	7,4494
Bloco B	Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK)	7,4513
Bloco C	Dimensão de Performance Determinística (EVM)	8,6693
Bloco D	Dimensão Exógena (Incontrolável)	5,7213
Sub-rede	**Nível 2**	**Medida**
Bloco E	Viabilidade Interna	7,5527
Bloco F	Trajetória Real X Ambiente	9,3286
Sub-rede	**Nível 3**	**Medida**
Bloco G	Estado Geral do Projeto	9,2304

Fonte: Gerada pelo autor, 2026 usando dados de entrada e saídas geradas pela aplicação do HNFS.

A Tabela 5 apresenta a simulação de um projeto de pequeno porte, mostrando os escores de desempenho registrados com a aplicação do modelo HANFIS. Nota-se que o estado geral do projeto atingiu nível de excelência ao obter o escore de 9,2304 pontos na escala do modelo, que vai de [0, 10] (contínua de zero a dez), sinalizando um alto nível de conformidade (Oliveira, 2025). A Tabela 6 contempla a aplicação do Cenário 2.

Tabela 6 – O Gigante Ineficiente, Cenário C2.

Cenário:	**Projeto:**	
C2	**O Gigante Ineficiente**	
Objeto: Construir a Estação Terminal Central da Rede de Transporte Público por Ônibus do Município.		
Escopo: Engenharia inédita, alta complexidade técnica, escopo claro e objetivo, alta maturidade na gestão de projetos de R&Q, qualidade dos dados e planejamento bem estabelecido, estouro do orçamento, cronograma atrasado, bom apoio político e baixo risco sistêmico.		
V1	Clareza de Escopo	9,68
V2	Complexidade Técnica	8,72
V3	Maturidade na Gestão de Projeto	8,00
V4	Qualidade dos Dados e Planejamento	8,00
V5	Índice de Desempenho de Custos (CPI - Cost Performance Index).	1,12
V6	Índice de Desempenho de Cronograma (SPI - Schedule Performance Index)	1,36
V7	Fatores Institucionais e Políticos	9,36
V8	Risco sistêmico	2,00
Sub-rede	**Nível 1**	**Medida**
Bloco A	Dimensão da Engenharia e Escopo	8,4454
Bloco B	Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK)	8,0949
Bloco C	Dimensão de Performance Determinística (EVM)	0,7285
Bloco D	Dimensão Exógena (Incontrolável)	9,3152
Sub-rede	**Nível 2**	**Medida**

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Bloco E	Viabilidade Interna	8,8015
Bloco F	Trajetória Real X Ambiente	3,5922
Sub-rede	**Nível 3**	**Medida**
Bloco G	Estado Geral do Projeto	4,0439

Fonte: Gerada pelo autor, 2026 usando dados de entrada e saídas geradas pela aplicação do HNFS.

A Tabela 6 apresenta a simulação de um projeto de grande porte, mostrando os escores de desempenho registrados com a aplicação do modelo HANFIS treinado com dados sintéticos. Nota-se que o estado geral do projeto atingiu nível preocupante ao obter o escore 4,0439 pontos (Oliveira, 2025). O diagnóstico de ineficiência pode ser constatado com a medida obtida no Nível 1, Bloco C - Dimensão de Performance Determinística (EVM) com um escore de 0,7285 pontos, muito baixo em relação a escala do mesmo que vai de [0, 10]. Este escore influenciou a avaliação do estado geral do projeto, reduzindo o escore da avaliação do Bloco F Trajetória Real X Ambiente, que convulocionada com o Bloco E, resultando num escore preocupante pela ineficiência. A Tabela 7 contempla o Cenário 3.

Tabela 7 – O Cisne Negro, Cenário C3.

Cenário:	**Projeto:**	
C3	**O Cisne Negro**	
Objeto: Racionalização e qualificação da Rede de Transporte Público por Ônibus do Município.		
Escopo: Engenharia de racionalização e qualificação complexa, alta complexidade técnica, escopo claro e objetivo bem definido, alta maturidade na gestão de projetos de R&Q, alta qualidade dos dados e planejamento bem estabelecido, situação financeira no plano, cronograma no prazo, Baixo apoio político e alto risco sistêmico.		
V1	Clareza de Escopo	10,00
V2	Complexidade Técnica	10,00
V3	Maturidade na Gestão de Projeto	9,00
V4	Qualidade dos Dados e Planejamento	9,00
V5	Índice de Desempenho de Custos (*CPI - Cost Performance Index*).	5,28
V6	Índice de Desempenho de Cronograma (*SPI - Schedule Performance Index*)	5,12
V7	Fatores Institucionais e Políticos	1,00
V8	Risco sistêmico	9,00
Sub-rede	**Nível 1**	**Medida**
Bloco A	Dimensão da Engenharia e Escopo	9,8149
Bloco B	Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK)	8,7263
Bloco C	Dimensão de Performance Determinística (EVM)	5,3440
Bloco D	Dimensão Exógena (Incontrolável)	0,3905
Sub-rede	**Nível 2**	**Medida**
Bloco E	Viabilidade Interna	8,8015
Bloco F	Trajetória Real X Ambiente	3,5922
Sub-rede	**Nível 3**	**Medida**

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Bloco G	Estado Geral do Projeto	2,3215

Fonte: Gerada pelo autor, 2026 usando dados de entrada e saídas geradas pela aplicação do HNFS.

A Tabela 7 apresenta a simulação de um projeto de médio porte, mostrando os escores de desempenho registrados com a aplicação do modelo HNFS. Nota-se que o diagnóstico simulado apresentado no Bloco D demonstra a fragilidade da Dimensão Exógena (Fatores Incontroláveis) ao atingir um escore insustentável (0,3905). O diagnóstico demonstrado no Bloco F, que trata da relação Trajetória Real X Ambiente, imputou um alto Risco para o Projeto (3,5922). Isto indica que a continuidade do projeto está comprometida, caso permaneça a falta de apoio político e institucional. O escore apontado no Bloco G, que efetivamente avalia o Estado Geral do Projeto foi de 2,3215, numa escala que vai de [0, 10] que, em termos linguísticos, atribui o grau ruim para o estado geral do projeto, mas em face do diagnóstico do Bloco D a situação do projeto seria dada como insustentável.

Com a simulando do cenário "C3: O Cisne Negro", o sistema detectou perfeitamente o "Efeito Penhasco" e o "Veto Assimétrico". A IA demonstrou algebricamente que uma oposição macropolítica extrema sobrepuja totalmente um ótimo desempenho orçamentário (EVM), conduzindo instantaneamente o placar do projeto a meros 2,32 pontos na escala do modelo, sinalizando que, num caso com dados empíricos, o Fracasso seria iminente (Oliveira, 2025).

Na Tabela 8, apresenta-se uma síntese da análise dos casos de estresse avaliados.

Tabela 8 – Síntese da Validação Lógica.

Cenário Simulado	**Entradas**	**Comportamento**	**Saída do HANFIS**
	Basais Fornecidas	**Topológico**	**(Grupo G)**
C1: O Projeto Ideal	Engenharia simples, baixa complexidade técnica, escopo claro e objetivo bem definido, alta maturidade na gestão de projetos de R&Q, qualidade dos dados e planejamento bem estabelecido, ótima situação financeira, cronograma adiantado, ótimo apoio político e baixo risco.	Os tensores propagam sinais de baixa penalização em todas as sub-redes.	[9.2304] (Estado Excelente)
C2: O Gigante Ineficiente	Engenharia inédita, alta complexidade técnica, escopo claro e objetivo, alta maturidade na gestão de projetos de R&Q, qualidade dos dados e planejamento bem estabelecido, estouro do orçamento, cronograma atrasado, bom apoio político e baixo risco sistêmico.	A rede identifica a ruptura matemática no Bloco C, sobrepujando a alta governança dos demais Blocos.	[4,0439] (Estado Preocupante)
C3: O Cisne Negro	Engenharia de racionalização e qualificação complexa, alta complexidade técnica, escopo claro e objetivo bem definido, alta maturidade na gestão de projetos de R&Q, alta qualidade dos dados e planejamento	O nó de inferência do Bloco F atua como um vetor de colapso, contaminando a	[2,3215] (Estado Crítico/Falha)

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

	bem estabelecido, situação financeira no plano, cronograma no prazo, Baixo apoio político e alto risco sistêmico.	avaliação geral (Bloco G).	

Fonte: Gerada pelo autor, 2026, com resultados da aplicação do HNFS.

A Tabela 8 sintetiza que o modelo ANFIS treinado com dados sintéticos e submetido a casos simulados para tratar casos de estresse, mitigou a limitação linear detectando matematicamente o "Efeito Penhasco", demonstrando consistência analítica interna para atuar como alerta. A responsividade do modelo aos cenários de estresse mostra que o Sistema Hierárquico Neuro-Fuzzy pode atuar como um sistema de alerta antecipado (*Early Warning System*).

4.4. Simulações Exploratórias em Municípios

O modelo HANFIS foi aplicado, de forma simulada, a dados extraídos de STPOs de SC, PR e RS. Ressalta-se que prescrições de redução ou aumento da oferta de serviços, assim como, de aumento ou redução de frotas, precisam ser acompanhadas de indicadores operacionais, de acessibilidade e headway.

4.4.1. Configuração do modelo HANFIS para Avaliar o Estado Geral do Projeto

A seguir apresenta-se uma aplicação do HANFIS na avaliação do Estado Geral de um dado Projeto.

Tabela 9 – Gestão e Monitoramento de Projeto – Licitação do STPO-Joinville – C9.

Cenário:	**Projeto:**	
C9	**Gestão e Monitoramento – Projeto para Licitação do STPO-Joinville.**	
Objeto: Gestão e monitoramento. Análise visando apurar o estado geral do projeto para a licitação do STPO-Joinville.		
Escopo: Engenharia de racionalização e qualificação complexa, alta complexidade técnica, escopo claro e objetivo bem definido, maturidade na gestão de projetos de R&Q gerenciável, boa qualidade dos dados e planejamento bem estabelecido, situação financeira no plano, cronograma com atraso leve, fatores institucionais e políticos em estado neutro e risco sistêmico em crise.		
V1	Clareza de Escopo	9,00
V2	Complexidade Técnica	9,30
V3	Maturidade na Gestão de Projeto	8,00
V4	Qualidade dos Dados e Planejamento	7,10
V5	Índice de Desempenho de Custos (CPI - Cost Performance Index).	1,02
V6	Índice de Desempenho de Cronograma (SPI - Schedule Performance Index)	0,86
V7	Fatores Institucionais e Políticos	7,76
V8	Risco sistêmico	3,60

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Sub-rede	Nível 1	Medida
Bloco A	Dimensão da Engenharia e Escopo	4,7685
Bloco B	Dimensão da Governança e Maturidade (PMBOK)	6,7619
Bloco C	Dimensão de Performance Determinística (EVM)	4,5562
Bloco D	Dimensão Exógena (Incontrolável)	3,2060
Sub-rede	**Nível 2**	**Medida**
Bloco E	Viabilidade Interna	5,2536
Bloco F	Trajetória Real X Ambiente	3,0214
Sub-rede	**Nível 3**	**Medida**
Bloco G	Estado Geral do Projeto	49,5559

Fonte: Gerada pelo autor, 2026.

A Tabela 9 mostra os elementos de entrada e saída da aplicação do modelo HANFIS treinado com dados sintéticos, objetivando simular a avaliação o Estado Geral do Projeto de licitação para a concessão dos serviços de transporte público por ônibus na cidade de Joinville. Os dados de entrada foram obtidos junto aos elementos públicos do processo licitatório do STPO de Joinville. O projeto apresentou escore simulado de 49,55% (Faixa de Atenção), alavancado por Risco Sistêmico (V8=3,60), demandando foco no ambiente exógeno (Bloco D=3,2060).

4.4.2. Configuração do modelo HANFIS para Avaliar o Grau de Adequação do STPO

A seguir apresenta-se uma aplicação do HANFIS modelada para avaliar o Grau de Adequação de um dado STPO. Avaliar o grau de adequação de um sistema de transporte público por ônibus, significa simular o raciocínio heurístico de um planejador de transportes.

A metodologia desta aplicação baseia-se na modelagem do Oráculo Mamdani (FIS-M) (MAMDANI & ASSILIAN, 1975), estruturado em cascata hierárquica de dois níveis e três sub-redes, capaz de gerar uma base de dados sintética contínua e não-linear que sirva de referência para o treinamento e uso simulado do HANFIS. O desenho do sistema foi focado no desempenho computacional e na explicabilidade dos resultados.

O treinamento baseou-se em amostra de dados sintéticos gerados com a aplicação do modelo FIS-M, empregando-se o método LHS, gerando uma base de dados com 5.000 (cinco mil) amostras, sedo 80% das amostras destinadas para treinamento e 20% para teste cego. Para a mensuração das variáveis basais, levou-se em consideração informações obtidas nos respectivos projetos básicos do STPO do município de Lages e do município de Jaraguá do Sul, consultando-se as informações públicas disponibilizadas nos sites das empresas concessionárias e dos órgãos gestores destes dois municípios. A licitação para a concessão do STPO de Lages foi realizada na data de 21 de julho de 2016 (Edital de Concorrência Pública Nº 17/2012 –

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Republicado), enquanto a licitação do STPO de Jaraguá do Sul foi realizada em 15 de outubro de 2018 (Edital 129-2018).

A estatística resultante do teste cego realizado durante o treinamento do modelo ANFIS baseado em amostras sintéticas, mostrou que a rede registrou métricas excepcionais. O Bloco C (Grau de Adequação do Serviço) alcançou Coeficiente de Determinação (R^2) com escore de 0,9625 e Correlação de Pearson *(R)* de 0,9812, capturando mais de 96,25% da variabilidade não-linear dos dados sintéticos. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) limitou-se ao escore 4,334245, muito próxima ao MAE com escore de 3,709526, mostrando a inexistência de *outliers* ruidosos. O Erro Médio de Viés (MBE) marcou o escore de -0,114869 e o Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) aferiu 4,334891, justificando a imparcialidade preditiva da IA. Os testes de Akaike (AIC = 5.820,97) e Bayesiano (BIC = 5.943,67) atestaram a vantagem inequívoca e parcimoniosa dos hiperparâmetros da árvore binária frente a redes planas incomputáveis.

A análise do Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) confirmou a precisão da simulação a que foi submetido o modelo, ao apresentar um valor de erro quase idêntico ao RMSE. Isto mostra que o erro médio ($\bar{e}$) tende a zero, indicando a ausência de viés sistemático nas inferências da aplicação do modelo HANFIS. Ressalta-se que o Grau de Adequação é o indicador final que atesta o quão bem o STPO atende a sociedade, cruzando a disponibilidade física com a experiência a bordo, para um Universo de Discurso variando no intervalo de [0, 100%], utilizando-se funções de pertinência contínuas do tipo Gaussian com 4 termos linguísticos: Inadequado (IN), Parcialmente Adequado (PA), Adequado (AD), Plenamente Adequado (PL).

As redes do STPO de Lages e Jaraguá do Sul, municípios do Estado de Santa Catarina, foram submetidas ao modelo de aplicação HANFIS que simulou a avaliação do Grau de Adequação dos respectivos municípios, ao apontar escores seguros de 69,06% para Lages, isto significa que o STPO de Lages se encontra no patamar adequado e, o escore de 66,56% para Jaraguá do Sul, também indicando que o STPO se encontra no patamar adequado. Assim, o resultado da simulação aponta que os dois STPO podem estar livres de intervenções estruturais agudas.

4.4.3. Configuração do modelo HANFIS para Simulação de R&Q: Fator de Ajuste de Viagem

A seguir apresenta-se uma aplicação do HANFIS modelada para simular a racionalização e qualificação de linhas dos STPO dos Municípios de Criciúma, Chapecó e Caxias do Sul, modelado com o propósito de simular o Fator de Ajuste de Viagens em Linhas selecionadas nos respectivos STPO.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

A metodologia desta aplicação baseia-se na modelagem do Oráculo Mamdani (FIS-M) (MAMDANI & ASSILIAN, 1975), estruturado em cascata hierárquica de 3 níveis (Nível 1, Nível 2 e Nível 3) e 7 sub-redes, com oito variáveis basais de entrada, capaz de gerar uma base de dados sintética contínua e não-linear que sirva de referência para o treinamento e uso simulado do modelo HANFIS. O desenho do sistema foi focado no desempenho computacional e na explicabilidade dos resultados. Para mensuração das variáveis basais, utilizou-se de informações obtidas diretamente nas empresas concessionárias do STPO dos municípios de Criciúma, Chapecó e Caxias do Sul, juntamente com informações obtidas nos respectivos projetos básicos que integram cada um dos processos licitatórios realizados para a concessão do STPO destes municípios.

O treinamento foi baseado em amostra de dados gerados a partir da aplicação do modelo determinístico FIS-M, empregando-se o método LHS, gerando uma base de dados com 13.000 (treze mil) amostras, sedo 80% das amostras destinadas para treinamento e 20% para teste cego, de modo a constatar a precisão interna da aplicação do modelo HANFIS.

A estatística resultante do teste cego realizado durante o treinamento do modelo ANFIS baseado em amostras sintéticas, também mostrou que a rede registrou métricas excepcionais. O Bloco G (*Fator de Ajuste de Viagens*) alcançou Coeficiente de Determinação (R^2) com escore de 0,9927 e Correlação de Pearson *(R)* com escore de 0,9964, capturando mais de 99,27% da variabilidade não-linear dos dados sintéticos. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) limitou-se ao escore de 2,001999, muito próxima ao MAE com escore de 1,279382, mostrando a inexistência de *outliers* ruidosos. O Erro Médio de Viés (MBE) marcou o escore -0,206125 e o Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) aferiu 1,991742, chancelando a imparcialidade preditiva da IA. Os testes de Akaike (AIC = 11.038,04) e Bayesiano (BIC = 11.184,62) atestaram a vantagem inequívoca e parcimoniosa dos hiperparâmetros da árvore binária frente a redes planas incomputáveis.

A análise do Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) confirmou a precisão dos dados sintéticos utilizados no treinamento do modelo, ao apresentar um valor de erro quase idêntico ao RMSE. Isto mostra que o erro médio ($\bar{e}$) tende a zero, indicando ausência de viés sistemático nas inferências da aplicação do modelo HANFIS. Ressalta-se que o *Fator de Ajuste de Viagens* é o indicador final que pondera o déficit físico de ônibus (Bloco E) com a pressão estratégica/trânsito (Bloco F) para decidir se acrescenta ou reduz o número de viagens. A saída é desfuzzificada pelo método do Centro de Gravidade (Centroid), calculando a área sob a curva resultante. O Universo de Discurso variando no intervalo percentual de [-50, 50] e com a utilização de funções de

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

pertinência contínua do tipo Gaussian com 4 termos linguísticos: Redução Drástica (RD), Redução Leve (RL), Aumento Leve (AL), Aumento Drástico (AD).

- ***Estudo de Caso – Criciúma (SC).***

Caso simulado com a aplicação do modelo HANFIS configurado para avaliar o fator de ajuste de viagens. O ensaio foi realizado visando simular a necessidade de racionalização ou qualificação da Linha Troncal do STPO – Criciúma. Trata-se de Linha Tronco-alimentadora com um itinerário de 16,20 km, com 19 veículos alocados na operação da Linha e programados para realizar 179 viagens por dia útil, transportando em média 8.055 passageiros por dia útil e realizando 80 viagens no horário de pico. A Linha interliga Três Hubs de Integração (Terminal do Pinheirinho, Terminal Central e Terminal da Próspera), operando em sistema de canaleta exclusiva, com um Indice de passageiros por quilômetro (IPK) médio de 2,77.

Em Criciúma (SC), o fator simulado sugeriu -7,27% de redução de viagens para adequação de custo. Na prática, isso elevaria a média de 45,0 para 48,3 passageiros por viagem.

- ***Estudo de Caso – Caxias do Sul (RS).***

Caso simulado com a aplicação do modelo HANFIS configurado para avaliar o fator de ajuste de viagens. O ensaio foi realizado visando simular a necessidade de racionalização ou qualificação da Linha 13 do STPO – Caxias do Sul. com um itinerário de 22,12 km, com 4 veículos alocados na operação da Linha e programados para realizar 54 viagens por dia útil, transportando em média 1.942 passageiros por dia e realizando 6 viagens no horário de pico. Trata-se da Linha Alimentadora do sistema de transporte público por ônibus da cidade de Caxias do Sul (RS), que executa a captação e distribuição de passageiros que convergem ao centro de Caxias do Sul e retorna ao Bairro Século XX, pela BR-116. A Linha apresenta um IPK médio de 1,63 passageiros por quilômetro.

Em Caxias do Sul (RS), o fator simulado sugeriu -12,79% de redução de viagens para adequação de custo. Na prática, isso elevaria a média de 36,0 para 40,6 passageiros por viagem.

- ***Estudo de Caso – Chapecó (SC).***

Caso simulado com a aplicação do modelo HANFIS configurado para avaliar o fator de ajuste de viagens. O ensaio foi realizado visando simular a necessidade de racionalização ou qualificação da Linha Tomazelli do STPO – Chapecó. Trata-se de Linha de característica operacional radial, que realiza a captação e distribuição de passageiros ao longo do Itinerário que conecta o polo industrial EFAPI com o Hub-Central (Terminal Central). Com um itinerário de 21,24 km, com 20 veículos alocados na operação da Linha e programados para realizar 159 viagens diárias, transportando em média 14.553 passageiros por dia e realizando 64 viagens no horário de pico, resultando num IPK de 4,91 passageiros por quilômetro.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Em Chapecó (SC) o fator simulado sugeriu a ampliação do número de viagens para a Linha Tomazelli em +8,79%, mostrando atuar na qualificação ao reduzir a lotação dos ônibus em prol do conforto dos usuários frente a alta demanda. Na prática, isso baixaria a média de 91,4 para 84,0 passageiros por viagem.

4.4.4. Configuração do modelo HANFIS para Simulação R&Q: Fator de Ajuste de Frota

A seguir apresenta-se uma aplicação do HANFIS modelada para simular a racionalização e qualificação de linhas dos STPO dos Municípios de Florianópolis, capital do Estado de Santa Catarina e Curitiba, capital do Estado do Paraná, modelado com o propósito de simular o Fator de Ajuste de Frota em Linhas selecionadas nos respectivos STPO. Esta aplicação condiz com o gerenciamento de ativos vinculados ao STPO.

Assim como no modelo anterior, esta aplicação baseia-se na modelagem do FIS-M (MAMDANI & ASSILIAN, 1975), estruturado em cascata hierárquica de 3 níveis (Nível 1, Nível 2 e Nível 3) e 7 sub-redes, com oito variáveis basais de entrada, capaz de gerar uma base de dados sintética contínua e não-linear que sirva de referência para o treinamento e uso simulado do modelo HANFIS.

A metodologia desta aplicação baseia-se na modelagem do Oráculo Mamdani (FIS-M) (MAMDANI & ASSILIAN, 1975), estruturado em cascata hierárquica de 3 níveis (Nível 1, Nível 2 e Nível 3) e 7 sub-redes, com oito variáveis basais de entrada, capaz de gerar uma base de dados sintética contínua e não-linear que sirva de referência para o treinamento e uso simulado do modelo HANFIS. O desenho do sistema foi focado no desempenho computacional e na explicabilidade dos resultados. Para mensuração das variáveis basais, utilizou-se de informações obtidas diretamente nas empresas concessionárias e nos órgãos gestores do STPO dos municípios de Florianópolis e Curitiba.

O treinamento foi baseado em amostra de dados sintéticos gerados a partir da aplicação do modelo determinístico FIS-M, empregando-se o método LHS, gerando uma base de dados com 13.000 (treze mil) amostras, sedo 80% das amostras destinadas para treinamento e 20% para teste cego, de modo a constatar a precisão interna da aplicação do modelo HANFIS.

A estatística resultante do teste cego realizado durante o treinamento do modelo ANFIS baseado em amostras sintéticas, também mostrou que a rede registrou métricas excepcionais. O Bloco G (*Fator de Ajuste de Frota*) alcançou Coeficiente de Determinação (R^2) com escore de 0,9748 e Correlação de Pearson *(R)* com escore de 0,9873, capturando mais de 97,48% da variabilidade não-linear dos dados sintéticos. A Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) limitou-se ao escore de 2,011111, muito próxima ao MAE com escore de 1,440396, mostrando a

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

inexistência de *outliers* ruidosos. O Erro Médio de Viés (MBE) marcou o escore -0,024927 e o Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) aferiu 2,011343, chancelando a imparcialidade preditiva da IA. Os testes de Akaike (AIC = 11.061,65) e Bayesiano (BIC = 11.208,24) atestaram a vantagem inequívoca e parcimoniosa dos hiperparâmetros da árvore binária frente a redes planas incomputáveis.

A análise do Desvio Padrão dos Resíduos (σ_{res}) confirmou a precisão dos dados sintéticos utilizados no treinamento do modelo, ao apresentar um valor de erro quase idêntico ao RMSE. Isto mostra que o erro médio ($\bar{e}$) tende a zero, indicando ausência de viés sistemático nas inferências da aplicação do modelo HANFIS. Ressalta-se que o *Fator de Ajuste de Frota* não é um simples conselho qualitativo. É a simulação de uma diretriz quantitativa que o CCO (Centro de Controle Operacional) poderá usar para alterar a quantidade de frota. O Universo de Discurso varia no intervalo percentual de [-30, 30] e utiliza funções de pertinência contínua do tipo Gaussian com 4 termos linguísticos: Redução Drástica (RD), Redução Leve (RL), Aumento Leve (AL), Aumento Drástico (AD).

- ***Estudo de Caso – Florianópolis (SC).***

Este caso referente ao ensaio simulado do Fator de Ajuste de Frota da Linha N260 do STPO – Florianópolis. Trata-se da Linha Radial N260 que realiza a captação e distribuição de passageiros do sistema de transporte público por ônibus da Capital do Estado de Santa Catarina, executando a captação e distribuição de passageiros que convergem para o polo tecnológico de Florianópolis ou retornam ao Terminal de Integração Canasvieiras (TICAN). Com um itinerário de 19,86 km, com 5 veículos alocados na operação da Linha e programados para realizar 105 viagens diárias, transportando em média 2.085 passageiros por dia e realizando 39 viagens no horário de pico. A Linha apresenta um IPK médio de 1,00 passageiros por quilômetro.

Em Florianópolis o fator simulado sugeriu haver um excesso relativo de 9,72% de frota em uso na Linha. Na prática, isto baixaria o montante de capital investido em ativos.

- ***Estudo de Caso – Curitiba (PR).***

Este caso referente ao ensaio simulado do Fator de Ajuste de Frota da Linha Cabral/Portão do STPO – Curitiba. Trata-se de Linha radial que realiza a captação e distribuição de passageiros do sistema de transporte público por ônibus da Capital do Estado do Paraná, interligando os polos industriais dos Bairros Cabral e Portão. Com um itinerário de 14,89 km, com 14 veículos do tipo articulado e biarticulado, alocados na operação da Linha e programados para realizar 187 viagens diárias, transportando em média 5.504 passageiros por dia e realizando 66 viagens no horário de pico. A Linha registra um IPK médio de 1,98 passageiros por quilômetro.

REMUNOM
ISSN 2178-6925
Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

Em Curitiba a indicação simulada de -6,7% esbarrou no limite estrutural do uso de biarticulados, indicando não ser recomendável intervenção física no número de veículos da frota.

4.5. Governança e Accountability Algorítmica

O artefato HANFIS modelado para os ensaios e simulações abordados neste artigo destina-se ao apoio estratégico e não substitui o planejamento técnico. Alterar número de viagens, de frota ou o tempo de headway (tempo ou a distância entre a passagem de dois veículos sucessivos) impacta o tempo de acesso da população e a equidade social. Governança algorítmica rigorosa é exigida para auditar como as recomendações são lidas pelo poder público e concessionárias operadoras de STPO, evitando que racionalizações penalizem usuários cativos em bairros periféricos.

4.6. Implicações Teórico-Práticas

O modelo HANFIS foi dotado de recursos técnicos que podem preencher a lacuna teórica que conecta métodos *Deep Learning* ao escrutínio gerencial (CASTELVECCHI, 2016; FLYVBJERG, 2014). Na prática, entrega simulações que apoiam a tomada de decisão do gerente de projeto e da administração e permite a simulação de gatilhos quantitativos diante da visão estática do "triângulo de ferro" (custo-prazo-escopo) (OLIVEIRA, 2025).

Os resultados, mesmo que simulados, corroboram a tese de FLYVBJERG (2014) de que interações não-lineares, como o “Veto Assimétrico” na dimensão exógena, colapsam portfólios que sob a ótica determinística pareciam saudáveis. Ao integrar a lógica *Fuzzy* (ZADEH, 1965) com Redes Neurais (GOODFELLOW; BENGIO; COURVILLE, 2016), este estudo avança frente à literatura, equacionando o dilema da 'caixa-preta' (CASTELVECCHI, 2016). Diferentemente de arquiteturas ANFIS convencionais paralisadas pela dimensionalidade (YAGER, 1993), o modelo hierárquico construído demonstrou ser uma contribuição prática que exige apenas 112 regras para entregar uma governança de 'caixa-cinza' de alta interpretabilidade para o gerente de projetos e ao administrador público.

5. CONCLUSÃO E LIMITAÇÕES

O Sistema Neuro-Fuzzy Hierárquico Adaptativo (HANFIS) demonstrou forte potencial aplicado, mitigando problemas paramétricos ("Maldição da Dimensionalidade") e processando a integração de incertezas qualitativas e métricas exatas em um hiperespaço comprimido de 112 regras. A transmutação de matrizes qualitativas sugere um caminho de governança preditiva, desde que contextualizado às necessidades e dinâmicas da mobilidade.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

5.1. Limitações e Trabalhos Futuros.

A barreira central do estudo repousa na alta dependência da validação computacional baseada em dados puramente sintéticos (Oráculo Mamdani). A falta de dados longitudinais empíricos atestando a efetividade das operações e dos projetos de R&Q, ao longo dos anos, limita o modelo à sua fase de simulação. Para o biênio futuro, recomenda-se a integração contínua via *Big Data* e Bilhetagem Eletrônica para consolidar uma transição da IA em um verdadeiro *Digital Twin* com sólida auditoria social.

REFERÊNCIAS

ABIODUN, O. I. *et al*. **State-of-the-art in artificial neural network applications:** A survey. Heliyon, v. 4, n. 11, e00938, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00938.

AKAIKE, H. **A new look at the statistical model identification.** IEEE Transactions on Automatic Control, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974. DOI: https://doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS (NTU). **Transporte público por ônibus:** impactos da pandemia de Covid-19. Brasília, DF: NTU, 2023. Clipping de Notícias. Disponível em: https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638168022171830458.pdf.

AUJLA, G. S. *et al*. **Deep neuro-fuzzy analytics for intelligent big data processing in smart ecosystems.** Neural Computing and Applications, v. 35, p. 23667-23669, 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/s00521-023-09102-x.

BANCO INTERAMERICANO DE DESENVOLVIMENTO (BID); MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (MDR). **Qualificação do Sistema de Transporte Público Coletivo por Ônibus no Brasil.** Série Mobilidade Urbana de Baixo Carbono, caderno 4. Financiamento de Global Enviroment Facility (GEF). Brasília: Editora IABS, 2021.

BELYADI, H.; HAGHIGHAT, A. Fuzzy logic. *In*: BELYADI, H.; HAGHIGHAT, A. **Machine Learning Guide for Oil and Gas Using Python**. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821929-4.00003-2.

CASTELVECCHI, D. **Can we open the black box of AI?** Nature, v. 538, n. 7623, p. 20-23, 2016. DOI: https://doi.org/10.1038/538020a.

CHAI, T.; DRAXLER, R. R. **Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)?** – Arguments against avoiding RMSE in the literature. **Geoscientific Model Development**, v. 7, n. 3, p. 1247-1250, 2014. DOI: https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014.

FLEMING, Q. W.; KOPPELMAN, J. M. **Earned value project management**. 4. ed. Newtown Square: Project Management Institute, 2010.

FLYVBJERG, B. **What you should know about megaprojects and why: an overview.** Project Management Journal, v. 45, n. 2, p. 6-19, 2014. DOI: https://doi.org/10.1002/pmj.21409.

GOODFELLOW, I.; BENGIO, Y.; COURVILLE, A. **Deep learning**. Cambridge: MIT Press, 2016. Disponível em: http://www.deeplearningbook.org.

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 02/05/2026 - **Accepted:** 07/06/2026
Vol: 13.12
DOI: 10.66104/x9snwt45
Pages: 1-34

JANG, J.-S. R. ANFIS: **Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 23, n. 3, p. 665-685, 1993. DOI: https://doi.org/10.1109/21.256541.

KINGMA, D. P.; BA, J. **Adam: A method for stochastic optimization.** arXiv preprint, 2014. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.1412.6980.

LEGATES, D. R.; MCCABE, G. J. **Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation.** Water Resources Research, v. 35, n. 1, p. 233-241, 1999. DOI: https://doi.org/10.1029/1998WR900018.

LIYANAGE, S. *et al*. **AI-based neural network models for bus passenger demand forecasting using smart card data.** Journal of Urban Management, v. 11, n. 3, p. 365-380, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jum.2022.05.002.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. **An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller.** International Journal of Man-Machine Studies, v. 7, n. 1, p. 1-13, 1975. DOI: https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

NAUCK, D.; KLAWONN, F.; KRUSE, R. **Foundations of neuro-fuzzy systems**. Chichester: John Wiley & Sons, 1997.

OLIVEIRA, R. G. de. **Aplicação de sistema neuro-fuzzy na gestão de projetos de qualificação e racionalização de transporte público por ônibus**. 2025. Tese (Doutorado em Projetos) - Universidad Internacional Iberoamericana, Campeche, 2025.

PRECHELT, L. **Early stopping—But when?** *In*: ORR, G. B.; MÜLLER, K.-R. (Ed.). Neural networks: Tricks of the trade. Berlim: Springer, 1998. p. 55-69. DOI: https://doi.org/10.1007/3-540-49430-8_3.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE (PMI). **A guide to the project management body of knowledge (PMBOK® guide)**. 7. ed. Newtown Square: PMI, 2021.

ROSS, Timothy J. **Fuzzy logic with engineering applications**. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2010.

SCHWARZ, G. **Estimating the dimension of a model.** The Annals of Statistics, v. 6, n. 2, p. 461-464, 1978. DOI: https://doi.org/10.1214/aos/1176344136.

TAKAGI, T.; SUGENO, M. **Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control.** IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 15, n. 1, p. 116-132, 1985. DOI: https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399.

VUCHIC, V. R. **Urban transit:** operations, planning, and economics. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

WILLMOTT, C. J.; MATSUURA, K. **Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance.** Climate Research, v. 30, n. 1, p. 79-82, 2005. DOI: https://doi.org/10.3354/cr030079.

YAGER, R. R. **Toward a unified theory of fuzzy logic.** International Journal of General Systems, v. 22, n. 1, p. 1-13, 1993.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets.** Information and Control, v. 8, n. 3, p. 338-353, 1965. DOI: https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X.