

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola**

**Modelo multicritério utilizando-se Lógica *Fuzzy* como ferramenta
de análise de viabilidade e tomada de decisão em obras
rodoviárias.**

GUTH HALLEY

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2023

Modelo multicritério utilizando-se Lógica *Fuzzy* como ferramenta de análise de viabilidade e tomada de decisão em obras rodoviárias.

GUTH HALLEY
ENGENHEIRO CIVIL

Orientador: Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Grande Dourados, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de Mestre.

DOURADOS
MATO GROSSO DO SUL
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S586m Silva, Guth Halley Nogueira
Modelo multicritério utilizando-se lógica fuzzy como ferramenta de análise de viabilidade e tomada de decisão em obras rodoviárias. [recurso eletrônico] / Guth Halley Nogueira Silva. -- 2024.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: LUCIANO OLIVEIRA GEISENHOFF.

Coorientador: RODRIGO COUTO SANTOS.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2024.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. INFRAESTRUTURA RODOVIÁRIA. 2. TOMADA DE DECISÃO. 3. VIABILIDADE ECONÔMICA. 4. SIMULAÇÃO. 5. ENGENHARIA 4.0. I. Geisenhoff, Luciano Oliveira. II. Santos, Rodrigo Couto. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

Modelo multicritério utilizando-se Lógica *Fuzzy* como ferramenta de análise de viabilidade e tomada de decisão em obras rodoviárias.

por

GUTH HALLEY

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de MESTRE EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Aprovado em: 02/08/2023

Prof. Dr. Luciano Oliveira Geisenhoff
Orientador – UFGD/FCA

Prof. Dr. Rodrigo Couto Santos
Coorientador – UFGD/FCA

Prof. Dr. Carlos Alberto Chuba Machado
Examinador – UFGD/FCA

Prof. Dr. Flavio Rooney Evangelista Barbosa
Examinador – IFTO

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Maria Florisbela, pelo conhecimento
que me ensinou e pelo amor que me deu.

À memória de meu pai, Antonio Nogueira, que com
o suor do seu trabalho me proporcionou uma vida
com dignidade e me ensinou o significado das palavras
esforço e fé.

Aos meus irmãos, Cleres Nogueira, Iris nogueira,
Claudio Nogueira e Josi Nogueira, por me ajudarem
em momentos difíceis.

Às minhas sobrinhas queridas, com quem sempre
compartilho momentos felizes e experiências.

Aos verdadeiros amigos.

Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, agradeço por todas as oportunidades que me concedeu na vida.

À minha família, sobretudo aos meus pais, Antonio e Maria, aos meus irmãos e cunhados, que sempre me incentivaram e me apoiaram na minha trajetória de estudos até o mestrado, e que sem o seu apoio cheguei até aqui, meu obrigado.

Agradeço também ao meu orientador, Dr. Luciano Oliveira, que trouxe importantes contribuições a minha formação e a concretização desta tese, e me inspira a buscar melhorar sempre como pesquisador.

Também agradeço ao meu coorientador, Dr. Rodrigo Couto Santos, que participou diretamente comigo nessa jornada, e contribuiu para a melhoria da versão final desta dissertação.

Por fim, a todos os mestres com os quais tive aulas e ensinamentos ao longo desta trajetória, dedico a minha gratidão.

RESUMO

HALLEY, G. **Modelo multicritério utilizando-se Lógica *Fuzzy* como ferramenta de análise de viabilidade e tomada de decisão em obras rodoviárias**. Dourados, 2023. 80f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal da Grande Dourados.

Com a globalização da economia nas últimas décadas, o investimento na infraestrutura de transporte tem sido alvo de estudo devido ao seu papel de importância e alto valor agregado. No Brasil, o modal rodoviário se destaca entre os demais e, como influencia diretamente em todo custo da cadeia produtiva, está em constante análise visando maior qualidade e menor custo. Assim, este estudo teve como objetivo propor um modelo multicritério para auxiliar na tomada de decisão sobre processos construtivos de obras de infraestrutura, especificamente no setor rodoviário. Para tal, foi utilizada a Lógica *Fuzzy*, construindo um modelo de simulação, onde as variáveis de entrada são a quantidade de fatores que agregam custo à rodovia, a complexidade causada conforme o comprimento do trecho a ser construído e os níveis de estresse térmico ambiental a que os trabalhadores estiverem submetidos durante a execução da obra. A variável de saída é a viabilidade econômica de projeto proporcionada pela combinação dos termos linguísticos de entrada. Por meio da revisão de literatura e experiência do especialista foram empregadas metodologias consistentes para apoiar as decisões na etapa de teste do modelo, a fim de se ter um sistema real que otimize os recursos disponíveis e maximize o valor dos projetos. Para a construção da base de regras ativadas, foram geradas 45 regras utilizando as preposições E, Se e ENTÃO, interagidas pelo método de Mandani. Após a construção do modelo, foram utilizadas informações de vinte projetos rodoviários do DNIT, no teste, tendo sido verificado o retorno condizente com as informações reais documentadas. Os resultados mostraram o disposto a seguir: 1) o IDH desempenha papel significativo na viabilidade da obra em diferentes contextos ambientais: trechos com comprimentos críticos estão suscetíveis a problemas de segurança e ao aumento dos custos operacionais e trechos com comprimento intermediário na transição devem ser analisados em conjunto com outras variáveis; 2) o IDH, isoladamente, não exerce uma influência significativa na Viabilidade Econômica quando são atendidos até 5,5 quesitos; no entanto, se no projeto são atendidos em torno de 8 quesitos, o IDH passa a ser fator de alto impacto na viabilidade, pois, se está na região de conforto, a viabilidade é considerada ideal e, se está nas regiões de estresse por calor ou frio, retornam uma viabilidade do projeto rodoviário normal; 3) verifica-se a existência de relações diretas entre o Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos quando estão na faixa "Ruim", o que significa que a Viabilidade Econômica de projeto está bem fora do ideal, com aproximadamente 9%; 4) quando o Comprimento do Trecho é classificado como "Ideal" e os Quesitos Atendidos estão no nível "Bom", a Viabilidade Econômica alcança o patamar mais elevado de 92,4%, indicando uma condição de projeto muito lucrativa; e 5) Considerando as simulações fuzzy que abrangeram as três variáveis de entrada em diferentes cenários, com valores ótimos e extremos, os resultados obtidos demonstraram coerência com a variável de saída, a Viabilidade Econômica. Após a calibração do modelo, foi obtido um simulador com alto grau de precisão refazendo as situações reais incluindo suas limitações, que poderá ser utilizado como ferramenta de apoio na gestão e tomada de decisões, visando minimizar custos e buscar qualidade construtiva de rodovias.

Palavras-Chave: Infraestrutura rodoviária; Tomada de Decisão; Viabilidade econômica; Simulação; Engenharia 4.0.

ABSTRACT

HALLEY, G. "Multicriteria Model using *Fuzzy* logic for Feasibility Analysis and Decision Making in Road Works." Dourados, 2023. 80p. Dissertation (Master's) - Postgraduate Program in Agricultural Engineering, Federal University of Grande Dourados.

With the globalization of the economy in recent decades, investment in transportation infrastructure has been the subject of study due to its important role and high added value. In Brazil, the road transport mode stands out among others and its direct influence on the entire cost of the production chain is constantly analyzed in order to achieve higher quality and lower cost. Thus, this study aimed to propose a multicriteria model to assist in decision-making regarding construction processes of infrastructure works, specifically in the road sector. For this, Fuzzy Logic was used, building a simulation model, where the input variables are the quantity of factors that add cost to the road, the complexity caused by the length of the section to be built, and the levels of environmental thermal stress to which the workers are subjected during the execution of the work. The output variable is the economic viability of the project provided by the combination of linguistic terms of input. Through literature review and expert experience, consistent methodologies were employed to support decisions in the model testing stage, in order to have a real system that optimizes available resources and maximizes project value. For the construction of the activated rule base, 45 rules were generated using the propositions AND, IF, and THEN, interacted by the Mandani method. After the construction of the model, information from twenty road projects of the DNIT was used in the test, with the return being verified consistent with the documented real information. The results showed the following: 1) HDI plays a significant role in the viability of the work in different environmental contexts: sections with critical lengths are susceptible to safety problems and increased operational costs, and sections with intermediate length in transition should be analyzed in conjunction with other variables; 2) HDI, alone, does not exert a significant influence on Viability when up to 5.5 criteria are met; however, if around 8 criteria are met in the project, the HDI becomes a high-impact factor on viability, because if it is in the comfort region, the viability is considered ideal, and if it is in the stress regions due to heat or cold, it returns a normal viability of the road project; 3) there are direct relationships between Section-Length and Criteria-Met when they are in the "Poor" range, which means that the Economic Viability of the project is well below ideal, at approximately 9%; 4) when the Section Length is classified as "Ideal" and the Criteria Met are at the "Good" level, Economic Viability reaches the highest level of 92.4%, indicating a very profitable project condition; and 5) Considering fuzzy simulations that encompassed the three input variables in different scenarios, with optimal and extreme values, the results obtained demonstrated coherence with the output variable, Economic Viability. After calibrating the model, a simulator with a high degree of precision was obtained by redoing real situations including their limitations, which can be used as a support tool in management and decision-making, aiming to minimize costs and seek constructive quality of highways.

Keywords: Road infrastructure; Decision-making; Economic viability; Simulation; Engineering 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modal ferroviário Granel	16
Figura 2	Modal ferroviário Containers	17
Figura 3	Modelo de um neurônio artificial	28
Figura 4	Fluxograma geral de execução da Pesquisa	40
Figura 5	Variável de entrada Quesitos-Atendidos	44
Figura 6	Variável de entrada Comprimento-Trecho.....	45
Figura 7	Variável de entrada IDH	46
Figura 8	Variável de saída Viabilidade	47
Figura 9	Configuração básica do fuzzy logic toolbox	48
Figura 10	Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy com Quesito-Atendidos médios (A) e ruins (B).....	51
Figura 11	Representação da Viabilidade Econômica em função do comprimento do trecho e IDH	53
Figura 12	Representação da Viabilidade Econômica em função dos Quesitos-Atendidos e IDH	54
Figura 13	Representação da Viabilidade Econômica em função do Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos	56
Figura 14	Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy considerando todas Inputs e Output em valores ideais	58
Figura 15	Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy com IDH no estresse por calor (A) e estresse por frio (B).....	59
Figura 16	Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy com Comprimento-Trecho intermediário (A) e crítico (B)	60
Figura 17	Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy com Quesito-Atendidos médios (A) e ruins (B)	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Intervalos e respectivos efeitos na aplicação do IDH	22
Tabela 2	Velocidades médias de pistas molhadas em função da velocidade diretriz.	33
Tabela 3	Distância de visibilidade de parada para greide nulo	34
Tabela 4	Distância de visibilidade de parada para tomada de decisão	34
Tabela 5	Inclinação máxima de rampas	36
Tabela 6	Variáveis que interferem no custo e viabilidade de uma rodovia	42
Tabela 7	Viabilidade estimada de projeto para rodovias	43
Tabela 8	Funções de Pertinência para Quesitos Atendidos	43
Tabela 9	Velocidade Diretriz em função da classe da rodovia para diferentes perfis de terreno	44
Tabela 10	Distâncias mínimas e recomendadas para projetos em função da Velocidade Diretriz	45
Tabela 11	Funções de Pertinência para Comprimento-Trecho	45
Tabela 12	Funções de Pertinência para o IDH	46
Tabela 13	Funções de Pertinência para Viabilidade	47
Tabela 14	Banco de Regras para o sistema fuzzy Viabilidade de projeto rodoviário ...	48

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBUQ	Concreto betuminoso usinado a quente
CC	Coeficiente de correlação
CUB	Custo unitário básico
CWa	Clima Subtropical (chuvas no verão)
DMT	Distância média de transporte
DMT	Distâncias médias de materiais
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
Du	Distância de ultrapassagem
EAP	Estrutura analítica de projetos
EMA	Erro médio absoluto
EVTEA	Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental
FCA	Faculdade de Ciências Agrárias
IBEH	Índice de bem estar humano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDH	Índice de desconforto humano
ITU	Índice de temperatura e umidade
MR	Módulo resiliente dos solos
NBR	Norma brasileira
OEA	Quantidade de obras de artes especiais
PET	Temperatura equivalente fisiológica
PMV	Voto médio estimado
RNA	Redes neurais artificiais
SICRO	Sistema de Custos Rodoviários
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TIC	Tecnologias da informação e comunicação
UFGD	Universidade Federal da Grande Dourados

SUMÁRIO

RESUMO	07
ABSTRACT	08
LISTA DE FIGURAS	09
LISTA DE TABELAS	10
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	11
1. INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. Modais Terrestres de Transportes de Carga	15
2.1.1. Modal Ferroviário	15
2.1.2. Modal Rodoviário	18
2.2. Conservação das Rodovias	19
2.3. O Trabalhador envolvido na construção e manutenção de Rodovias	19
2.4. Índice de Desconforto Humano (IDH)	20
2.5. Custos de Obras Rodoviárias	22
2.5.1. Estimativas Determinísticas	24
2.5.1.1. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)	24
2.5.1.2. Sistema de Custos Rodoviários (SICRO)	25
2.5.2. Estimativas Probabilísticas	25
2.5.3. Estimativas com Sistemas Especialistas	26
2.5.3.1. Redes Neurais Artificiais (RNA)	27
2.5.3.2. Lógica <i>Fuzzy</i>	28
2.5.3.3. Visão Computacional	31
2.6. Variáveis envolvidas na Estimativa de Custos	32
2.6.1. Velocidade diretriz de projeto e Extensão da rodovia	32
2.6.2. Distância de Ultrapassagem (Du)	33
2.6.3. Prazo de execução de obras rodoviárias	34
2.6.4. Distância média de transporte (DMT) de areia, cimento e aço	35
2.6.5. Volume de escavação e Volume de aterro	35
2.6.6. Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)	36
2.6.7. Quantidade de obras de artes especiais (OAE)	37
2.6.8. Cobertura do terreno a ser trabalhado (classificação do SOLO)	38
3. MATERIAL E MÉTODOS	39
3.1. Visão Geral do Experimento	39
3.2. Revisão Sistemática de Literatura	40
3.3. Seleção e Tabulação das Variáveis de entrada (input)	41
3.3.1. Fatores que agregam custo direto à rodovia	41
3.3.2. Comprimento do trecho construído	44
3.3.3. Estresse térmico de trabalhadores em rodovias	46
3.4. Seleção e Tabulação da Variável de saída (output)	46
3.4.1. Viabilidade econômica de projeto	47

3.4.2. Sistema de regras	48
3.5. Teste do Modelo	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Modelagem em Planilha eletrônica	50
4.2. Modelagem Multicritério baseado em Lógica <i>Fuzzy</i>	52
4.3. Teste e Validação do Simulador de Viabilidade	57
5. CONCLUSÕES	63
6. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	64
6.1. Proposta de Aplicativo de Viabilidade Econômica para Obras Rodoviárias	64
6.1.1. Interface do Aplicativo	64
6.1.2. Escolha da Tecnologia	65
6.1.3. Arquitetura do Aplicativo	65
6.1.4. Front-End: Interface do Usuário	65
6.1.5. Back-End: Lógica de Cálculo.....	66
6.1.6. Responsividade e Adaptabilidade	66
6.1.7. Testes e Validação	66
6.1.8. Propriedade Intelectual	66
6.1.9. Modelo de Negócio	66
6.1.10. Hospedagem e Requisitos de Conectividade	66
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
8. APÊNDICE	80

1. INTRODUÇÃO

Em levantamento realizado por Oliveira e Araújo (2023), o transporte rodoviário é o modal mais utilizado no Brasil, respondendo por mais de 58% da carga trafegada no país. Segundo os autores, a malha rodoviária brasileira tem 1,72 milhão de quilômetros de extensão, sendo que apenas 12,4% das estradas são pavimentadas.

A expansão da malha rodoviária tem sido insuficiente para aumentar a disponibilidade de rodovias pavimentadas, reduzir a discrepância com outros países e atender de forma eficiente às demandas de transporte de cargas e passageiros (VALENÇA e KRUGER, 2022).

A pavimentação de vias decorre da necessidade básica de movimentação de pessoas e veículos. Quando se trata do setor público, normalmente ocorrem licitações que envolvem variáveis como custos de construção ou manutenção, capacidade de produção, prazos, equipamentos, entre outros fatores. A efetividade de uma obra está relacionada à escolha do material certo, equipamento adequado, prazos a serem cumpridos e técnico capacitado (KASSA, 2020)

Investimentos em infraestrutura de transporte visando aumento da eficiência e sustentabilidade são objeto de estudos intensos, visto que a população mundial está crescendo exponencialmente com o passar dos anos. Pesquisa envolvendo o modal rodoviário têm impacto positivo na produtividade, acessibilidade, fluxo de pessoas e materiais, e nos laços inter-regionais (ACHEAMPONG et al., 2022).

Jahani et al (2021) apontam que a aplicação de sistemas inteligentes no planejamento de obras rodoviárias pode resultar em significativa redução dos custos de construção, que refletem diretamente no custo do frete da produção de bens de consumo, estimulando o crescimento e progresso no mercado.

Além dos investimentos em infraestrutura, é importante considerar os custos associados à manutenção, conservação e restauração de rodovias ao longo de sua vida útil. Esses tendem a aumentar com o passar do tempo devido à deterioração do pavimento. Palit et al. (2022) apontam para a importância de se manter a qualidade do sistema rodoviário desde sua execução de forma a garantir uma infraestrutura duradoura e adequada.

Segundo Patcharachavalit et al. (2023) o uso de modelagem computacional em projetos de construção de rodovias pavimentadas é uma ferramenta de suporte nova que visa otimizar o processo, aumentar a eficiência e, conseqüentemente, reduzir custos. A modelagem permite simular e testar diferentes cenários de construção antes da execução física,

identificando possíveis problemas possam acontecer, permitindo sua correção antecipada, eficiente e econômica.

Além disso, a utilização de tecnologias avançadas na construção pode aumentar a qualidade do projeto e a sua durabilidade, diminuindo os custos com manutenção e reparos futuros. Com a construção de rodovias melhor projetadas, é possível melhorar a produção e logística, contribuindo para o desenvolvimento regional e nacional. Assim, pesquisas envolvendo a utilização da modelagem computacional são importantes para garantir projetos de alta qualidade e eficiência econômica, o que justifica sua realização.

O modelo proposto nesta pesquisa visa auxiliar a seleção de estudos de viabilidade por meio de uma estruturação e sistematização racional de decisão multicritério. A estimativa conceitual de custo, nos estágios iniciais do projeto, é importante para a decisão da viabilidade financeira, estabelecimento do orçamento e previsão de orçamento real. Contudo, a precisão da estimativa é afetada pela falta de informações e dificuldades de predição.

Chen; Zheng (2021) identificaram que o alto nível de incerteza na construção de rodovias aumenta o risco de prejuízo e dificulta a produção de orçamentos confiáveis. Afirmam ainda que o excesso de custos pode ser causado por mudanças de escopo, condições imprevistas, mudanças de mercado, entre outras. O perfil de um projeto engloba componentes como custos com materiais, equipamentos, administração da equipe e da construção, entre outros. Todos são determinados por estimativa e afetados por fatores externos, como mudanças de escopo, clima e condições imprevistas.

Neste contexto, este estudo avaliou as variáveis relacionadas aos custos iniciais envolvidos no orçamento de rodovias pavimentadas, especificamente a parte estrutural, analisando os principais parâmetros de projeto, a fim de se construir um sistema de modelagem inteligente capaz de estimar com maior precisão a viabilidade de construção de rodovias segundo suas características de projeto.

Objetivo Geral

Construir um sistema especialista baseado em Lógica *Fuzzy* que envolva as principais variáveis consideradas na construção de rodovias pavimentadas, e como resultado auxiliar em tomadas de decisões sobre viabilidade ou inviabilidade financeira dessas obras.

Objetivos específicos

- Construir modelo em planilha eletrônica que identifique graus de viabilidade de Projetos Rodoviários;
- Construir um modelo fuzzy que represente a variação de viabilidade econômica de uma rodovia pavimentada;
- Testar o sistema especialista com situações reais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Modais Terrestres de Transportes de Carga

Os modais terrestres de transporte de carga compreendem meios de condução em terra firme, tais como caminhões, trens e ônibus, amplamente utilizados em todo o mundo para logística de mercadorias e bens de consumo, tanto em pequena quanto em grande escala.

Os caminhões, trens e ônibus são meios de transporte terrestre de carga amplamente utilizados para deslocar diversos tipos de mercadorias, oferecendo vantagens específicas para cada tipo de carga e trecho a ser percorrido. Os caminhões são os mais utilizados oferecendo flexibilidade e personalização segundo a cadeia produtiva que estão inseridos, seguidos pelos trens para cargas de grande porte e longas distâncias, enquanto os ônibus são mais adequados para pequenas distâncias e áreas urbanas (FLODÉN e WOXENIUS, 2021).

A escolha do modal adequado depende de diversos fatores, incluindo as características da carga, a distância a ser percorrida, o prazo de entrega, o orçamento disponível e também as condições onde o modal será inserido. Cada estrutura de utilização do transporte possui suas características construtivas e de conservação próprias, vantagens e desvantagens, que devem ser cuidadosamente analisadas antes de escolher o mais adequado (CAVALLARO e NOCERA, 2023).

2.1.1. Modal Ferroviário

Segundo Gerhátová et al (2021) o modal ferroviário é uma das opções mais eficientes e econômicas para o transporte de cargas em longas distâncias. Tem como principal vantagem a capacidade de transportar grandes volumes de carga em um único trem, o que reduz os custos com mão de obra e combustível. Além disso, deslocamento de cargas utilizando ferrovias é considerado uma opção mais sustentável e ecologicamente correta do que outras modalidades

de transporte, sendo capaz de reduzir significativamente as emissões de CO₂, o que contribui para a preservação do meio ambiente.

No entanto, é importante destacar que o transporte ferroviário de cargas apresenta algumas desvantagens sendo elencadas como principais pontos negativos sua limitação geográfica, já que as ferrovias são menos abrangentes do que as rodovias e a falta de flexibilidade, uma vez que os trens não podem ser direcionados para cada local de entrega, como acontece no transporte rodoviário (DA ROSA e VIEIRA, 2020).

Em relação à importância do modal ferroviário para a economia, é importante destacar que esse modal se destaca para o transporte de cargas a granel, como minérios, combustíveis e grãos, que são responsáveis por boa parte das exportações brasileiras.

De acordo com Cunha et al. (2022), o transporte ferroviário representa cerca de 20,7% da matriz de transporte de carga do Brasil. Os principais estados com ferrovias são Minas Gerais, Rio Grande do Sul e São Paulo. No setor agrícola, o transporte ferroviário de grãos chega a 40% das cargas. Porém um dos maiores desafios do setor é sua integração com outros modais, principalmente rodoviário, visto que este tem locais de utilização restritos.

Xia et al (2022) citam que os meios de transportes ferroviários são classificados em transportes em vagões, containers ferroviários e semirreboques rodoviários (piggyback). Detalham como segue:

No transporte em vagões (Figura 1), estes podem ser abertos ou fechados e são adaptados para transportar diferentes tipos de carga, incluindo grãos, minério de ferro, produtos químicos e contêineres graneleiros. É uma opção viável para se deslocar grandes volumes de carga em longas distâncias, pois é mais eficiente em termos de consumo de combustível e emissões de gases de efeito estufa.



Figura 1 - Modal ferroviário Granel

Os containers ferroviários são aqueles, segundo o próprio nome, transportados por trens (Figura 2). Podem carregar diferentes tipos de carga, incluindo alimentos, produtos farmacêuticos, eletrônicos e produtos manufaturados. São carregados e descarregados usando equipamentos específicos, como guindastes e empilhadeiras, e podem ser facilmente transferidos para caminhões ou navios para transporte adicional. É uma opção conveniente e econômica para o transporte de cargas internacionais.



Fonte: Imagem de aleksandarlittlewolf - Freepik (2023)

Figura 2 - Modal ferroviário Containers

Já os semirreboques rodoviários (piggyback) (Figura 3) envolvem o uso de caminhões, que carregam unidades que podem ser facilmente carregadas e descarregadas de vagões de carga ferroviários. O transporte piggyback é uma opção conveniente para transportar cargas em longas distâncias, permitindo a transição suave entre diferentes modos de transporte e aproveitando a eficiência do transporte ferroviário para a maior parte da jornada. No entanto, o transporte piggyback é limitado em termos de tamanho de carga e pode ser afetado por restrições de altura e peso na rede ferroviária.

2.1.2. Modal Rodoviário

Segundo Do Nascimento et al. (2022) o modal rodoviário é o mais utilizado no transporte de cargas no Brasil, sendo responsável por cerca de 61,1% do volume transportado. Isso se deve à sua flexibilidade e capilaridade, já que as rodovias estão presentes em praticamente todo o país. Além disso, o uso de rodovias permite o transporte de cargas de diversos tipos e tamanhos, o que torna esta opção versátil para as empresas que necessitam fazer entregas pelo país.

Entre as principais vantagens deste transporte de cargas, destacam-se a Flexibilidade, pois trata-se de uma categoria que permite a coleta e entrega de cargas em praticamente qualquer lugar, já que as rodovias estão presentes em todo o território nacional; a Rapidez, visto que este possui maior velocidade entre os principais utilizados para o transporte de cargas em distâncias curtas e médias; e Custo, sendo mais competitivo em relação a outros modais em distâncias curtas e médias, já que não exige a transbordo (FAUGÈRE et al., 2020).

Porém, Gupta et al. (2021) destacam que apesar das vantagens, o modal rodoviário apresenta algumas limitações importantes, como Custo para longas distâncias, sendo menos competitivo que o ferroviário e o aquaviário, devido ao consumo elevado de combustível e ao desgaste do veículo; Capacidade de carga, visto que apresenta limitações quanto a quantidade transportada segundo tamanho do veículo; e Segurança, já que apresenta riscos de acidentes e roubo de cargas maior que os outros modais.

Conforme documentado por Barreto e Ribeiro (2020), os veículos utilizados no transporte rodoviário são classificados por sua capacidade, quantidade de carga e distância entre eixos, como a seguir:

- Caminhão plataforma – Transporte de containers e cargas de grande volume ou peso unitário.
 - Caminhão baú – Sua carroceria possui uma estrutura semelhante à dos containers, que protegem das intempéries toda a carga transportada.
 - Caminhão caçamba – Transporte de cargas a granel, este veículo descarrega suas mercadorias por gravidade, pela basculação da caçamba.
 - Caminhão aberto – Transporte de mercadorias não perecíveis e pequenos volumes. Em caso de chuva são cobertos com lonas.
 - Caminhão refrigerado – Transporte de gêneros perecíveis. Semelhante ao caminhão baú, possui mecanismos próprios para a refrigeração e manutenção da temperatura no compartimento de carga.
 - Caminhão tanque – Sua carroceria é um reservatório dividido em tanques, destinado ao transporte de derivados de petróleo e outros líquidos a granel.
 - Caminhão graneleiro ou silo – Possui carroceria adequada para transporte de granéis sólidos. Descarregam por gravidade, através de portinholas que se abrem.
- Ainda segundo os Autores, também devem ser classificados os caminhões especiais:
- Rebaixados e reforçados: Para o transporte de carga pesada: (carreta heavy);

- Possuir guindaste sobre a carroceria (munck);
- Cegonhas, projetadas para o transporte de automóveis;
- Semi-reboques: Carrocerias, de diversos tipos e tamanhos, sem propulsão própria, para acoplamento a caminhões-trator ou cavalo mecânico, formando os conjuntos articulados, conhecidos como carretas.

2.2. Conservação das Rodovias

A conservação das rodovias é tema sempre evidenciado no transporte de mercadorias em todo o mundo. Quando as estradas não estão bem conservadas, os veículos enfrentam uma série de problemas que podem aumentar o custo do frete e, conseqüentemente, o preço final do produto para o consumidor (CHO e LEE, 2020).

Segundo Iliashenko et al. (2021) um dos principais problemas causados pela má conservação das rodovias é o aumento do desgaste dos veículos e tempo de transporte. Além dos prejuízos diretos aos caminhões também pode haver danos às cargas transportadas.

Outro problema causado pela má conservação das rodovias, conforme relata Salomão et al. (2019) é o aumento do consumo de combustível, que pode exceder a 40%. Isso tem um impacto significativo no custo final, já que o combustível representa uma parcela significativa na composição do custo.

Além disso, rodovias necessitando de manutenção aumentam os riscos de acidentes. Estradas irregulares podem ocasionar perda do controle dos veículos e direção perigosa, comprometendo a integridade dos motoristas e cargas transportadas (ILIASHENKO et al., 2021).

Por fim, fica evidenciado que se feito de forma coerente, o investimento na manutenção e construção de rodovias de qualidade traz benefícios diretos à economia, pois contribui para a redução dos custos com frete, uma vez que permitem que os veículos circulem com maior eficiência e segurança, reduzindo seu desgaste e o consumo de combustível (KADYRALIEV et al., 2022).

2.3. O Trabalhador envolvido na construção e manutenção de Rodovias

As rodovias são uma parte fundamental da infraestrutura de transporte de um país. No entanto, sua construção e manutenção é tarefa que exige um grande esforço e dedicação dos envolvidos. Envolvem diversas etapas, desde o planejamento e projeto até a execução e operação. Dependendo do tamanho da obra são necessários o trabalho de engenheiros, arquitetos, topógrafos, operadores de máquinas, entre outros profissionais (MORAIS, 2022).

Segundo Markolf et al. (2019) o trabalho na construção e manutenção de rodovias é geralmente realizado em ambientes externos, expostos às intempéries e às condições climáticas adversas. Além disso, o trabalho envolve riscos, uma vez que usa equipamentos pesados. Assim, é necessário que os trabalhadores envolvidos tenham treinamento e equipamentos de segurança adequados.

Deve-se dar atenção especial para a mão-de-obra envolvida, pois rodovias bem construídas refletem na qualidade do transporte de mercadorias e pessoas, acesso a serviços básicos, como hospitais, escolas e comércio, e geram empregos que movimentam a economia local (MARCUSO, 2021).

Na construção ou manutenção de rodovias, conforme afirmam Ortega et al (2022), é considerado produto a mão-de-obra utilizada, seja na forma da quantidade necessária de pessoal, multiplicada pelo salário médio, incluindo encargos sociais, sejam dos contratados de forma direta ou suplementar. A contratação pode ser por hora, dia ou mês, e deve ser considerada no orçamento inicial da obra, junto ao Sindicato da categoria.

Os pisos salariais das categorias ligadas à construção de estradas, são definidos em convenção e acordo coletivo nos Sindicatos da Categoria. Existem tabelas para o cálculo dos diversos itens remuneratórios, como preços unitários de horas trabalhadas para pedreiros, serventes, motoristas de caminhão fora de estrada, operadores de máquinas automotoras, de trator de lâmina, motoniveladoras, acabadora de asfalto, entre outros. Também são considerados os Encargos Sociais em função das condições de serviço (ANDRADE, 2021).

2.4. Índice de Desconforto Humano (IDH)

O corpo humano é um sistema termodinâmico, que produz calor e interage com o ambiente para conseguir o balanço térmico, indispensável para a vida. Em locais quentes, como o proporcionado no ambiente de trabalho na construção rodoviária, o organismo aciona continuamente os diferentes meios adaptativos que dispõe contra o calor (UMAR e EGBU, 2020).

De acordo com Sharma; Mehdi (2023) para tentar reequilibrar o balanço térmico regido pelas leis da física e influenciado por mecanismos de adaptação, o organismo reage essencialmente por meio de sobrecargas fisiológicas (termostática, circulatória e sudção) que muitas vezes levam o indivíduo ao estresse ou fadiga.

O estresse térmico afeta o desempenho do trabalhador a ponto de interferir em sua saúde, e de acordo com Patel et al. (2022a) existem relações diretas entre o estresse e doenças

agudas e crônicas. Por esse motivo, os autores concluem que o bom desempenho no trabalho e função do ambiente e muitas vezes ocorre afastamento decorrente de variações climáticas extremas que causam fadiga. Ambiente inadequado afeta também relacionamento interpessoal e o rendimento do trabalho.

Segundo Zheng et al. (2022), são importantes os estudos voltados para o conforto térmico, já que um ambiente favorável é necessário para melhor produtividade, principalmente em locais com exposição ao clima, e entendimento de formas de mitigar efeitos ambientais no trabalhador aumentam seu rendimento.

O conforto térmico de uma pessoa num determinado ambiente é definido como resultado de uma combinação satisfatória nesse ambiente, da temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa do ar, com a atividade desenvolvida (metabolismo) e o isolamento térmico da vestimenta em níveis qualificados como confortáveis (KANG et al., 2023).

A temperatura, umidade relativa do ar, radiação térmica e a movimentação do ar são os principais fatores que afetam os níveis de conforto, sendo qualificados pela Ambiência na forma de índices térmicos (NI et al., 2023). Segundo Faria (2022) existem vários índices utilizados para caracterizar o ambiente em termos de conforto e bem-estar, podendo ser citados o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), Voto Médio Estimado (PMV), Temperatura Equivalente Fisiológica (PET), Índice de Desconforto Térmico (IDT), o Índice de Bem Estar Humano (IBEH) e o Índice de Desconforto Humano (IDH).

O IDH é um dos índices mais utilizados para se analisar a influência climática sobre indivíduos expostos a ambientes externos, por ser de fácil determinação, fácil interpretação da resposta e relacionar somente as variáveis temperatura do ar e temperatura do ponto de orvalho. Pode ser calculado pela Equação 1 descrita por ONO e KAWAMURA (1991):

$$IDH=0,99T_a+0,36T_d+41,5 \quad (1)$$

em que:

T_a = temperatura do ar, °C;

T_d = temperatura de orvalho, °C.

Sendo T_d calculada pela Equação 2:

$$T_d = \frac{b \cdot a(T_a, U_R)}{a - \alpha(T_a, U_R)} \alpha(T_a, U_R) = \frac{a \cdot T_a}{b + T_a} + \ln(U_R) \quad (2)$$

em que:

$$a = 17,27$$

$$b = 237,7$$

T_a = Temperatura Ambiental, °C;

U_R = umidade relativa dividida por 100 (cem).

O IDH relativo às condições de conforto térmico foi classificado por da Silva et al. (2020b) segundo Tabela 1.

Tabela 1 - Intervalos e respectivos efeitos na aplicação do IDH.

INTERVALO DE IDH	EFEITO
IDH > 80	Estresse Calor
75 > IDH > 80	Desconfortável Calor
60 > IDH > 75	Confortável
55 > IDH > 60	Desconfortável Frio
IDH < 55	Estresse Frio

Fonte: Adaptado de da Silva et al. (2020b).

2.5. Custos de Obras Rodoviárias

Para que medidas de segurança possam ser aplicadas na construção de estradas e rodovias são necessárias a compreensão das características envolvidas nas operações deste ramo. Concluída a execução dos serviços de terraplanagem, das obras de drenagem e de proteção contra a erosão, uma rodovia pavimentada está pronta para ser implantada. Esse conjunto constitui a infraestrutura básica e após essa etapa, vem a etapa de revestimento (PETROUTSATOUE et al., 2021).

No ramo da construção civil, conforme descrito por Patcharachavalit et al. (2023), o sucesso de qualquer projeto está diretamente ligado ao seu orçamento, pois nele estão contidos os custos prováveis para a execução da obra. Com uma estimativa mais precisa dos valores necessários as empresas que empreendem na construção de rodovias podem gerenciar os recursos de forma mais eficiente.

A elaboração de um orçamento confiável para uma rodovia só é possível quando o profissional responsável tem em mãos informações bem definidas sobre a obra, juntamente com suas especificações técnicas. A proximidade entre os custos orçados e os valores reais do empreendimento é diretamente proporcional à complexidade dos fatores envolvidos (BAETA, 2012).

Segundo Abuaddous et al. (2020), orçamentos de obras rodoviárias têm algumas diferenças em relação a outros realizados na construção civil, pois normalmente incluem logística e transporte diferenciado, exigindo assim conhecimento do orçamentista ao simular as etapas executivas.

Como o orçamento é feito antes do início da obra, há certa margem de incerteza quanto aos seus valores e os que ocorrerão na fase executiva, relacionadas diretamente a especificidade local, temporalidade entre orçamento início e prazo de execução e a aproximação.

Mesmo que duas ou mais obras tenham projetos executivos idênticos, sempre haverá diferenças entre elas, segundo suas especificidades, pois muitos são os fatores que influenciarão suas execuções, como o quadro de funcionários e as condições locais (clima, relevo, facilidade de acesso de matéria-prima). Então, a especificidade local considera que todas essas particularidades devem ser consideradas na estimativa dos preços (BAETA, 2012).

Quanto à temporalidade, se a orçamentação e o início da obra são muito grandes, alguns ajustes são necessários. Os impostos e preços de insumos no setor da construção oscilam constantemente. Em obras de grande extensão os projetos iniciais podem ter valores desatualizados antes de seu término (SQUISATTI et al., 2022).

Como é baseado em previsões realistas, segundo Mohammadi et al. (2022) o orçamento rodoviário segue o princípio da aproximação. Este consiste em estimar os custos utilizando valores aproximados, considerando as particularidades do projeto e referências de mercado, definindo desde o planejamento estratégias para otimizar os recursos e tempo, porém de forma aproximada. Como as variações do que foi estimado e executado podem ser grandes, quanto mais apurada e criteriosa for a orçamentação, menor será sua margem de erro.

Visto que o orçamento de uma rodovia é tarefa singular no projeto de construção ou manutenção de estradas, este deve envolver estimativa de custos precisos e realistas de forma a garantir sua viabilidade financeira. Segundo Petroutsatou et al (2023) são três as principais abordagens utilizadas para elaboração de orçamentos de rodovias: estimativas determinísticas, probabilísticas e com sistemas especialistas.

2.5.1. Estimativas Determinísticas

Segundo Barros et al. (2018) os custos de um projeto podem ser obtidos por meio de orçamentos descritivos, considerados métodos determinísticos. Nesta forma de composição de valores calcula-se os quantitativos dos elementos da Estrutura Analítica de Projetos (EAP).

Uma abordagem determinística é considerada apropriada para itens com valores equilibrados em determinado orçamento e inadequada para aqueles onde possa haver variações significativas nas quantidades e preços unitários (PRADO LIMA et al., 2022). A maioria das informações, no estágio de estudo para composição de uma obra rodoviária, como afirma Macedo (2019) são resultantes de interpretações de dados feitas por especialistas, e normalmente se utiliza como referência custos e legislações publicadas a serem referenciadas, como o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) e Sistema de Custos Rodoviários (SICRO).

2.5.1.1. Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI)

O Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) foi criado para padronizar os orçamentos determinísticos de obras públicas, baseados em quantitativos provenientes de projetos executivos. As composições dos serviços e os valores dos insumos ficam disponíveis na base do SINAPI, considerando os serviços e valores dos insumos característicos de cada região do país (DNIT, 2010b).

A manutenção do SINAPI é de responsabilidade de dois órgãos, a Caixa Econômica Federal, responsável pela parte técnica de especificação dos insumos e composição dos serviços, e o IBGE, responsável pela coleta periódica de preços e definição dos coeficientes de representatividade.

A estimativa baseada no orçamento descritivo é capaz de produzir alto grau de precisão, porém consome mais tempo e maior custo. Esse tipo de estimativa exige uma pesquisa quantitativa (take-off de material) que lista cada operação e item de custo direto do trabalho, com a quantidade de cada um. Estes são então estimados pelo custo unitário de mão de obra, material e equipamento para cada um. Em seguida, os custos são computados e resumidos para obter o custo direto do trabalho (AL-ZWAINY, 2018).

Em 2013, por meio do Decreto 7.983/2013 ficou estabelecido que obras rodoviárias devem ser balizadas pelo Sistema de Custos Referenciais de Obras – SICRO, de responsabilidade do DNIT (MT, 2013).

2.5.1.2 Sistema de Custos Rodoviários (SICRO)

Desde a publicação do decreto nº 7983:2013, ao qual definiu-se que o Sistema de Custos Referencias de Obras – SICRO como referência pela determinação de custos dos serviços de obras de infraestrutura de transportes, as informações sobre este tipo de obra passaram envolver o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (da Silva et al., 2020a).

O SICRO constitui referência oficial para elaboração de orçamentos que envolvam infraestrutura de transportes e serão objeto de licitações no setor público, conforme art. 4º do vigente Decreto 7.983/13 (MT, 2013).

Esse sistema apresenta custos unitários de insumos e serviços necessários à execução de serviços e obras não só do modal rodoviário, como também do ferroviário e do aquaviário, incluindo metodologias e premissas para o cálculo dos custos de referência dos serviços necessários à execução das obras e suas consequentes estruturas auxiliares (DAER, 2023).

Além disso, assim como os custos horários dos equipamentos, os custos dos materiais no SICRO também são resultados de pesquisas de preços de mercado, realizadas em todas as unidades da federação. Esses insumos são precificados levando-se em conta o tipo de pagamento à vista e contemplado a carga tributária incidente total (CNT, 2021).

Assim como o SINAPI, a manutenção dos insumos utilizados nos serviços apontados pelo SICRO é realizada por meio de pesquisas regulares de preços. De acordo com Almeida et al. (2022), o uso deste material de referência tem como principal objetivo servir de parâmetro à tomada de decisões.

O orçamento de uma rodovia inclui uma série de itens, da terraplanagem a entrega da obra, que são estimados com base em critérios técnicos e tabelas de referências, como a SINAPI e SICRO. Neste contexto destaca-se o CUB (Custo Unitário Básico) que representa o valor médio por unidade de medida de uma obra rodoviária. O CUB é importante para o planejamento e controle de custos, utilizado por órgãos públicos, empresas privadas e profissionais responsáveis por orçamentos (DE OLIVEIRA, et al. 2022).

2.5.2. Estimativas Probabilísticas

Os métodos estatísticos de estimativas orçamentárias exigem dados para avaliação de tendências, seja nos custos, prazos ou outras variáveis analisadas. A partir dos dados coletados é possível criar funções que representem o comportamento de determinada variável.

A probabilidade é a linguagem matemática para quantificar a incerteza que o resultado de um experimento ocorrerá. Este é controlado total ou parcialmente por um mecanismo de casualidade. Inicialmente deve-se especificar o espaço amostral, refletindo no conjunto de resultados possíveis. (LIANG et al., 2023).

Segundo Fauzi et al. (2023) as funções de probabilidade e distribuição acumulada são comumente usadas pela engenharia para descrever sistemas físicos. Sendo X uma variável aleatória contínua, o comportamento probabilístico de um fenômeno dependente de X pode ser descrito por funções de distribuição acumulada.

Os parâmetros envolvidos no projeto de uma rodovia são de natureza probabilística, pois não possuem valor único determinístico, de modo que o tratamento estatístico não pode ser dispensado. Afolayan et al. (2022) afirmam que o método de dimensionamento determinístico atribui um fator de segurança para os parâmetros incertos ou que tem influência significativa artificial no dimensionamento final.

O método probabilístico para dimensionamento de rodovias aplica para cada projeto uma distribuição na qual permite que a confiabilidade do projeto seja avaliada de forma real, porém que nem sempre retorna resultados confiáveis devido à incerteza atribuída às variáveis envolvidas (ESTEVEZ et al., 2021).

2.5.3. Estimativas com Sistemas Especialistas

A definição de inteligência artificial está relacionada à capacidade das máquinas pensarem, havendo grandes avanços em sua utilização como ferramenta de apoio à construção e na tomada de decisão envolvendo materiais e composição de custos (GUO et al., 2021).

Segundo da Silva (2020), sistemas especialistas são programas de computador que procuram reproduzir processos através do qual especialistas humanos empregam conhecimentos para analisar e solucionar problemas em áreas específicas. Essa tecnologia de software tem grande potencial e relevância para a atividade econômica envolvida na construção de rodovias, por considerarem graus de segurança para cada variável envolvida no processo.

Ao se direcionarem sistemas especialistas para a estimativa de custos e composição de orçamentos, Patcharachavalit et al. (2023) afirmam que vantagens como a redução do tempo, maior precisão e menor investimento necessário para gerar um orçamento passam a se evidenciar. Ainda segundo os autores, os sistemas especialistas também contribuem para uma melhor visualização do conjunto da obra, embasando decisões que devam ser tomadas, tornando o contexto mais sustentável.

As Redes Neurais Artificiais (RNA) e Lógica *Fuzzy* são exemplos de Sistemas Especialistas estudados para servirem de ferramenta de apoio na construção de rodovias. A RNA é capaz de aprender a partir de dados e identificar padrões, permitindo prever custos e gastos de materiais, enquanto a Lógica *Fuzzy* pode lidar com as incertezas e imprecisões existentes, permitindo a tomada de decisões baseada em informações parciais (SURUCU et al., 2023).

2.5.3.1. Redes Neurais Artificiais (RNA)

As redes neurais artificiais são precursoras do *Deep Learning*. Em uma rede neural, basicamente, o neurônio recebe diferentes dados na camada de entrada, processam esses dados e liberam um resultado na camada de saída. (BIHL et. Al., 2023).

Sun; Chen (2022) explicam, que as redes neurais artificiais são sistemas paralelos distribuídos, compostos por unidades de processamento simples (nós), que calculam funções matemáticas (normalmente não-lineares). As redes neurais artificiais (RNAs) são uma terminologia genérica que abrangem uma grande quantidade de arquiteturas, tendo como objetivo compreender o funcionamento do cérebro humano, tentando reproduzir a atividade de um neurônio artificial.

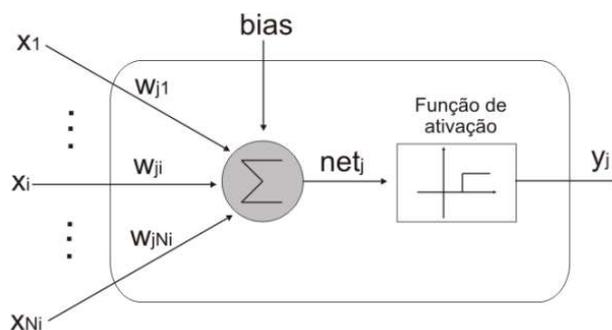
Matematicamente Alatoon; Al-Suleiman (2022) descrevem que um neurônio j de uma RNA (Figura 3) com N_i entradas é expresso por:

$$net_j = \sum_{i=1}^{N_i} X_j W_{ji} + b \quad (3)$$

$$y_i = \emptyset (net_j) \quad (4)$$

Em que, x_1, x_2, \dots, x_{n_i} são os sinais de entrada; w_1, w_2, \dots, w_{j_i} são os pesos sináptico entre o neurônio i e neurônio j ; b é um valor de polarização (bias); net_j é o potencial de ativação; \emptyset é a função de ativação, e y_j é o sinal de saída do neurônio. Várias são as funções de ativação que podem ser empregadas na formulação de um neurônio. Os autores relatam que de uma maneira geral a função de ativação mais comumente utilizada é a função sigmóide, dado pela Equação 5.

$$\emptyset net_j = \frac{1}{1 + \exp(-net_j)} \quad (5)$$



Fonte: Alatoon e Al-Suleiman, 2022 (adaptado)

Figura 3 - Modelo de um neurônio artificial.

O conjunto $\{X_1, X_i, \dots, X_{Ni}\}$ são os sinais de entrada advindos do meio externo e representam cada aplicação específica. Os pesos sinápticos são representados pelo conjunto $\{W_{j1}, W_{ji}, \dots, W_{jNi}\}$ e servem para ponderar as entradas da rede. O combinador linear $\{\Sigma\}$ tem a função de agregar os sinais ponderados de entrada. O bias é uma variável que especifica qual o patamar apropriado pelo combinador linear $\{\Sigma\}$ para a saída do neurônio. A função de ativação \emptyset , vinda do potencial net_j resulta na saída do neurônio y_i dentro de um intervalo de valores definidos (ALATOOM e AL-SULEIMAN, 2022).

A utilização de técnicas de RNA em problemas de orçamento de rodovias, segundo Ranyal et al. (2022) é uma abordagem recente e promissora. Visto que este serviço é complexo e com múltiplas variáveis, a aplicação de modelos matemáticos convencionais pode ser limitada em capturar detalhes do problema. Nesse sentido, as RNAs são capazes de aprender e generalizar, a partir de exemplos, padrões e relações não-lineares, tornando esta ferramenta foco de pesquisas, cada vez mais aprofundadas para torna-la eficiente ao uso prático (XIE et al., 2020; BARROS, et al. 2018).

2.5.3.2. Lógica *Fuzzy*

De acordo com Santos et al. (2017), as Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), aplicadas às construções rurais, evidenciam esta nova era das ferramentas de gestão de obras com vistas ao futuro.

A Lógica *Fuzzy* surge como uma alternativa da Lógica Clássica, para trabalhar questões vagas, incertas ou mal definidas, como os presentes no raciocínio humano e interações

espaciais. Ela envolve sistema especialista que se bem projetados auxiliam na tomada de decisão (MAUÉS et al., 2019).

Formas de cruzamento de informações são constantemente criadas com a finalidade de se obter um melhor gerenciamento das informações. Atualmente, vários sistemas automatizados de suporte à decisão vêm sendo desenvolvidos com a finalidade de auxiliar na gestão de situações incertas, sendo que grande parte deles utilizam como base a lógica fuzzy (SRIVASTAVA et al., 2020).

Segundo Arboleda et al. (2023), o maior avanço no desenvolvimento dos sistemas de suporte à tomada de decisão, como o que utiliza Lógica *Fuzzy*, é a inclusão de um especialista que tem a tarefa de desenvolver escalas de confiabilidade aos dados utilizados no programa, indicando assim, o grau de segurança das respostas.

Ao contrário da Lógica Clássica, que se baseia em combinações binárias de "verdadeiro" ou "falso", os conjuntos *fuzzy* permitem que as variáveis assumam valores em um intervalo contínuo de possibilidades, atribuídos pelo programador especialista.

Na Lógica *Fuzzy*, tanto o x_1 quanto o x_2 têm funções de pertinência definidos, que podem variar de 0 a 1, considerando um intervalo unitário fechado. Ou seja, enquanto a tomada de decisão na teoria clássica seria como na função (1), na Lógica *Fuzzy* seria acompanhando a função (2), para um conjunto A e um elemento x qualquer (YADAV, 2023).

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

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in A \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin A \\ 0 \leq \mu(x) \leq 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a } A \end{cases} \quad (2)$$

Dessa forma, a Lógica *Fuzzy* é considerada um conjunto de princípios matemáticos que representam conhecimento baseado na função de pertinência dos termos. Assim, um elemento pertencente a um conjunto fuzzy possui certo grau de interação entre as funções, podendo ter mais de uma resposta verdadeira e pesos distintos.

Ainda segundo Yadav (2023) a função de pertinência pode ser descrita por vários perfis, porém os mais comuns são a triangular que evidenciam um ponto único em destaque, trapezoidal onde um intervalo ocupa mesmo peso e gaussiana que tem forma de sino e segue distribuição normal.

As regras *fuzzy* são usadas para definir o comportamento de um sistema fuzzy. Cada regra é uma declaração do tipo "se X é A e Y é B, então Z é C", onde X, Y e Z são variáveis e A, B e C são conjuntos *fuzzy*.

Como na teoria clássica, os conjuntos fuzzy obedecem a propriedades matemáticas e podem ser operados de diversas maneiras. Segundo por Zadeh (1965), os conjuntos estão definidos segundo a lógica matemática a seguir, considerando A e B do universo U:

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) / x \in U \}, \mu_A(x) \in [0, 1]$$

$$B = \{ (x, \mu_B(x)) / x \in U \}, \mu_B(x) \in [0, 1]$$

Igualdade:

$$A = B \leftrightarrow (\mu_A(x) = \mu_B(x)), \forall x \in U$$

Inclusão:

$$A \subseteq B \leftrightarrow (\mu_A(x) \leq \mu_B(x)), \forall x \in U$$

A é, então, um subconjunto fuzzy de B.

União:

$$A \text{ OR } B = A \cup B = \{ (x, \text{máx}(\mu_A(x); \mu_B(x))) / x \in U$$

Interseção:

$$A \text{ AND } B = A \cap B = \{ (x, \text{mín}(\mu_A(x); \mu_B(x))) / x \in U$$

Complemento:

$$\text{NOT } A = \neg A = \{ (x, \mu_{\neg A}(x)) / x \in U \text{ e } \mu_{\neg A}(x) = 1 - \mu_A(x) \}$$

Diferença:

$$A - B = (x, (\mu_A \cap B)(x)) / x \in U$$

Existindo ainda, segundo Zadeh (1965) as operações de Idempotência, Identidade, Absorção, Comutatividade, Associatividade, Distributividade, Complemento duplo, Lei transitiva e Leis de Morgan.

A inferência *fuzzy* é um processo de avaliação de entradas com o objetivo de, por meio das regras previamente definidas, se obter conclusões com o sistema especialista. O método Mandani é o mais comum e utilizado em modelagem de sistemas complexos que envolvam a

tomada de decisão. Ele utiliza regras do tipo "se-e-então" para mapear entradas e obter saídas. Já o método Takagi-Sugeno é uma extensão do método Mandani que envolve múltiplas entradas e saídas. Também usa regras do tipo "se-e-então", e tem como diferença a saída que é do tipo função linear das variáveis de entrada (MANDANI, 1996).

Olowosulu et al. (2022) desenvolveram um sistema especialista com informações limitadas disponíveis utilizando a técnica da Lógica *Fuzzy* para prever o desempenho de pavimentos rodoviários na Nigéria, levando em consideração características do pavimento, sua idade, e variáveis climáticas. O modelo foi ajustado com informações de literatura e experiência da engenharia. Ao final concluíram que foi desenvolvida com êxito um modelo que preveja o desempenho de pavimentos rodoviários.

No planejamento de projetos rodoviários é importante considerar tempo, qualidade e custo de forma a equilibrar esses fatores. Assim, Nguyen et al. (2022) utilizaram a Lógica *Fuzzy* para modelar a incorporação da incerteza relacionada a esses aspectos em projetos de construção rodoviária. Na pesquisa, foram realizados dois estudos de caso para validar o modelo. Os resultados mostraram que o sistema proposto representa bem as incertezas, permitindo encontrar soluções que reduzam o período da obra, com menor custo e maior qualidade possível.

2.5.3.3. Visão Computacional

A Visão Computacional é um outro campo da Inteligência Artificial que começa a ser estudada e empregada geralmente de forma conjunta a RNA e Lógica *Fuzzy*. Ela permite que computadores e sistemas de informação derivem resultados de maneira significativa sobre imagens digitais e vídeos. Enquanto a IA se expressa na forma de textos, a visão computacional proporciona análise de imagens e vídeos (PANERU e JEELANI, 2021).

Para Ruane et al. (2023) o processo da visão computacional necessita passar pela aquisição de imagens, posteriormente selecionadas, analisadas, identificadas e compiladas para extração de informações. Os dados são então transformados em linguagem lógico-matemática por computador para auxiliar no processo de tomada de decisão.

Alayue et al. (2022) dividem a ordem de atuação da visão computacional em 5 etapas:

Pré-processamento – Preparação realizada antes de se obter uma imagem, como marcação de contornos, bordas e/ou figuras geométricas.

Aquisição de imagem – Processo de aquisição de uma imagem ou o conjunto delas a partir de sensores de câmeras. As imagens podem ser bidimensionais ou tridimensionais.

Detecção e segmentação – Processo realizado para destacar regiões relevantes da imagem, segmentando-as para processamento posterior.

Extração de características – Extração de características matemáticas que compõem a imagem, como bordas, textura, formatos, movimentos.

Processamento em alto nível – Processo de validação dos dados obtidos, confirmação da qualidade, salvamento final ou descarte com reinício do processo.

2.6. Variáveis envolvidas na Estimativa de Custos

Os princípios da logística, se aplicados à construção rodoviária podem reduzir os custos das obras através do planejamento, com a utilização racional dos recursos. Em geral a programação é função do orçamento, cronograma e projeto previamente conhecido. O dimensionamento do recurso pessoal, máquinas e equipamentos necessários são estabelecidos conforme a disponibilidade destes recursos (MORAIS, 2022).

Segundo DNIT (2010b) são variáveis incertas que interferem diretamente na qualidade e custo de uma Rodovia a velocidade diretriz de projeto, distância de ultrapassagem (Du), prazo para execução, distância média de transporte (DMT), volumes de escavação e aterro, volume de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), quantidade de obras de artes especiais (OAE) e classificação do solo.

2.6.1. Velocidade diretriz de projeto e Extensão da rodovia

O projeto geométrico de rodovias é uma das principais etapas de sua construção. Uma série de fatores devem ser analisados e ponderados quanto aos impactos da construção e operação. Devem ser relacionados o projeto a condições de segurança, eficiência e conforto de rodovias (CHEN et al., 2023)

Segundo Barreno et al. (2022) a velocidade operacional é considerada pela maior parte dos pesquisadores como a informação mais representativa do tipo de utilização das condições geométricas da via pelos condutores e deve refletir na qualidade e segurança construtiva e operacional.

A conformação espacial de uma rodovia é definida na etapa de estudo e elaboração de seu projeto geométrico. A definição de curvas horizontais no projeto planimétrico é orientada a partir de parâmetros pré-estabelecidos, como a velocidade diretriz, que é função da geometria e extensão rodoviária (TEIXEIRA et al., 2023).

A utilização de estimativa da velocidade operacional permite a identificação da mesma para o conhecimento da velocidade diretriz de um projeto viário e determinação da velocidade

operacional. Fernandes et al. (2022) consideram a classificação de projetos em três níveis distintos, conforme a velocidade de projeto e velocidade operacional:

1. Bom Projeto: é a condição ideal entre o projeto e utilização da via, com uma diferença entre velocidade operacional de curvas sucessivas inferior ou igual a 10 km/h ($\Delta V_{85} \leq 10$ km/h). Nestes casos, o projeto apresenta alinhamento horizontal, não ocasionando problemas aos veículos;

2. Projeto Regular: quando a diferença entre a velocidade operacional de curvas sucessivas está entre 10 a 20 km/h ($10 \text{ km/h} < \Delta V_{85} \leq 20 \text{ km/h}$). As curvas que se encontram neste intervalo apresentam pequenos problemas de inconsistência geométrica que poderão ser resolvidos com sinalização.

3. Projeto Fraco: a diferença de velocidade operacional é superior em 20 km/h ($\Delta V_{85} > 20$ km/h). Nestes segmentos viários recomenda-se que se refaça o projeto sempre que possível, de forma a restabelecer a consistência dos elementos geométricos.

2.6.2. Distância de Ultrapassagem (Du)

As distâncias de visibilidade indicam parâmetros que devem ser garantidos ao motorista, a fim de que este tenha tempo de reagir em prol de sua segurança. São consideradas três distâncias de visibilidade básicas em um projeto: visibilidade de parada; tomada de decisão e; ultrapassagem (DNIT, 2010a). No cálculo destas distâncias são consideradas a velocidade diretriz e a velocidade média de viagem em tempo chuvoso (Tabela 2).

Tabela 2. Velocidades médias de pistas molhadas em função da velocidade diretriz

Velocidade Diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Velocidade Média (km/h)	30	38	46	54	62	71	79	86	92	98

Fonte: BRASIL, 1999.

Como a distância de visibilidade de parada assegura margem de segurança o suficiente, pode-se, para fins de projeto, desprezar os greides não-nulos. A Tabela 3 apresenta os valores mínimos e desejáveis para essas distâncias em função da velocidade diretriz e considerando a inclinação de rampa nula (BRASIL, 1999).

Tabela 3. Distância de visibilidade de parada para greide nulo

Velocidade Diretriz (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Mínima (m)	30	45	60	75	90	110	130	155	180	205
Desejável (m)	30	45	65	85	110	140	175	210	255	310

Fonte: Adaptado de BRASIL (1999).

As distâncias de visibilidade para tomada de decisão não são obrigatórias, mas a sua aplicação pode ajudar a evitar acidentes. A Tabela 4 apresenta os valores destas distâncias, em função da velocidade diretriz, para as duas possibilidades de ação do motorista (BRASIL, 1999).

Tabela 4. Distância de visibilidade de parada para tomada de decisão

Velocidade Diretriz (km/h)	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Distância para parar (m)	50	75	95	125	155	185	225	265	305
Distância para desviar (m)	115	145	175	200	230	275	315	335	375

Fonte: BRASIL, 1999.

O alinhamento horizontal é composto, basicamente, pelas partes retas da rodovia e curvas, elemento em forma de arco ou espiral, que objetiva dar a concordância a duas tangentes. Esses elementos são adotados assim para tornar a rodovia economicamente viável e enquadrá-la esteticamente ao padrão construtivo geral (DNIT, 2010a).

2.6.3. Prazo de execução de obras rodoviárias

Mesmo não sendo uma imposição normativa, o dimensionamento de projetos de pavimentos rodoviários tem considerado um período de 10 anos, no caso de pavimentos flexíveis ou semirrígidos e 20 anos para pavimentos rígidos (DA SILVA e SANTOS, 2021).

Segundo Oreto et al. (2023) o limite temporal definido pelos projetistas está diretamente relacionado aos estudos de viabilidade econômica e ambiental realizados antes do início da obra. Nesse contexto, insere-se o impacto relativo aos custos construtivos para diferentes cenários de vida útil.

Salvo alguns casos envolvendo processos inesperados, a fadiga e ruptura em obras recém construídas, permite interpretação de que o pavimento foi mal executado ou que os materiais escolhidos são de baixa qualidade. Isso pode ocorrer em projetos que não adotam de

forma correta conceitos determinísticos, critérios estatísticos ou novas ferramentas que auxiliem o projetista (ANWAR et al., 2022).

2.6.4. Distância média de transporte (DMT) de areia, cimento e aço

As distâncias médias de transporte que mais interferem no custo se referem aos principais materiais da curva ABC, assim como os volumes de escavação, aterro, concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ), e quantidade de obras de arte especiais (LYRA, 2022).

Um diferencial dos custos de obras rodoviárias é que os materiais necessários normalmente não estão disponíveis próximos ou no local da obra. Assim sendo, para elaboração do orçamento, os dados de Projeto devem indicar as Distâncias Médias de Transportes (DMT) do que será usado, considerando sua aquisição (origem) e local de utilização (destino). Também é recomendado indicar a distância máxima aceitável para aquisição dos materiais (PEDROZO, 2001)

O Município onde uma obra rodoviária será executada deve fazer uma avaliação dos volumes e distâncias das usinas existentes, calculando de forma ponderada, para compor o orçamento. Se alguma empresa mais distante tiver como objetivo participar e vencer a licitação, deverá apresentar preço inferior a menor DMT. O Município também poderá solicitar licitação específica para o transporte da massa asfáltica, pois, caso possua caminhões para transportá-lo, este custo pode ser considerado reduzido (MATTOS, 2019).

2.6.5. Volume de escavação e Volume de aterro

O planejamento das rampas e suas inclinações tem relevante aspecto financeiro na construção ou recuperação de uma rodovia, já que a quantidade de terra que precisará ser movimentada é elemento primário no projeto. Brasil (1999) estabelece valores de inclinações máximas para rampas, classificando-as em função do relevo e classe, a fim de se estabelecer padrões operacionais entre veículos para situações distintas (Tabela 5).

Tabela 5. Inclinação máxima de rampas

CLASSE DE PROJETO	RELEVO		
	PLANO	ONDULADO	MONTANHOSO
Classe 0	3%	4%	5%
Classe I	3%	4,5%	6%
Classe II	3%	5%	7%
Classe III	4%	6%	8%
Classe IV – A	4%	6%	8%
Classe IV - B	6%	8%	8%

Fonte: Adaptado de BRASIL (1999).

Segundo de Luna; Freitas (2021) os serviços de Escavação, carga e descarga de materiais são classificados em 1ª, 2ª e 3ª categorias, conforme o tipo de material a ser escavado. A 1ª CATEGORIA refere-se a escavação em solo; 2ª CATEGORIA escavação em solo com maior dificuldade; e 3ª CATEGORIA escavação em rocha, com uso de explosivos. Para os serviços de terraplenagem o responsável pelos orçamentos avalia o que há de ser executado para atribuir valor.

Utiliza-se o critério de economia de escala. Se o somatório de determinados itens tiver volume menor que 100.000m³, usa os preços de terraplenagem com caminhão, e se maior considera a motoscaper. Para extensões inferiores a 1200 metros é calculada a Produção de Equipe Mecânica (PEM), utilizando motoscaper e caminhão. Os valores passaram a ser tabelados desde 1997 pelo DNIT (GONÇALVES et al., 2020)

Segundo Bieliatynskyi et al. (2020) em todos os orçamentos de escavação é considerada uma motoniveladora, para, no final espalhar o material, somente com o objetivo de abrir caminho e se executar o serviço, sendo que geralmente esse valor é considerado junto a compactação do terreno.

2.6.6. Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ)

O Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) é o resultado de uma mistura realizada em usina apropriada. Tanto o agregado como ligante são previamente aquecidos para depois serem misturados. A granulometria dos agregados influencia no tempo de aquecimento (PEREIRA et al, 2022).

Segundo a norma 031/2010-ES-P (DNIT, 2010a) e de Aguiar et al (2022) a diferença granulométrica encontrada na mistura a quente de agregados está relacionada com os valores de diâmetros dos minerais e o enchimento do material ligante para os tipos de CBUQ, sendo assim classificados:

•**CBUQ Faixa C:** ideais para a fabricação da camada de rolamento, chamada de “capa asfáltica”, em vias urbanas e rodovias destinadas ao tráfego de veículos leves, como carros de passeio e motocicletas. A mistura empregada nesse tipo de concreto betuminoso precisa ser resistente, estável e flexível, compatível com o funcionamento elástico da estrutura e condições de rugosidade que proporcionem segurança no tráfego em maior velocidade.

•**CBUQ Faixa B:** com espessura mais grossa, é um tipo de pavimento ideal para a fabricação da camada de ligação, também chamada de “binder”, em vias urbanas e rodovias. Mais indicado para locais de trânsito pesado sujeitos a esforços, como os destinados ao tráfego de veículos de carga e ônibus.

•**CBUQ Faixa F:** possui uma espessura mais fina, é mais utilizada em estacionamentos, ruas de baixa velocidade, garagens e condomínios. A qualidade somente é garantida se mantida as condições de uso da Faixa F.

De forma a se ter rodovias/ruas de qualidade, o Município onde a obra será executada deve apresentar de forma clara no Edital as exigências técnicas, limites de distância e Faixa a ser contratada (CARDOSO, 2021).

De acordo com a Lei nº 8.666/93, é obrigatório que o órgão ou entidade responsável pela obra realize análise prévia das distâncias médias de materiais (DMT), a fim de avaliar a necessidade de terceirizar serviços ou utilizar veículos próprios. Quando a empresa contratada assume tal responsabilidade, essa obrigação deve ser estabelecida em contrato, a fim de garantir a execução adequada da obra (BRASIL, 1993).

2.6.7. Quantidade de obras de artes especiais (OAE)

Embora a quantidade de obras de arte especiais (OAE) tenha um impacto muito alto no custo de construção da rodovia, geralmente, possuem projeto específico, que podem resultar em licitações diferentes, uma vez que são executadas por empresas especializadas nesse tipo de serviço (ZAROR e MIURA 2020).

Silva et al. (2021) afirmam que o aumento de número de OAEs em estado de degradação avançado gera uma grande preocupação com a necessidade de manutenção e conservação das estruturas. Além disso, os danos sempre comprometem a estética e causam

colapso parcial ou total da estrutura, devendo por estes motivos serem bem dimensionados e considerados de forma correta na fase de orçamento da rodovia (RAMOS, 2020).

A Norma NBR 9452 (ABNT, 2019) informa os requisitos exigíveis para realização de inspeções em pontes, viadutos e passarelas de concreto, como também a apresentação dos resultados das inspeções. As construções que contenham OAE, segundo a NBR são classificados em elemento principal, secundário e complementar de acordo com os parâmetros estruturais, funcionais e de durabilidade. Assim, qualquer construção que tenha OAE deve ser considerada segundo a NBR já na fase de orçamentação.

2.6.8. Cobertura do terreno a ser trabalhado (classificação do SOLO)

A Classificação Resiliente ou Módulo Resiliente dos solos (MR), utilizado em projetos rodoviários está determinado conforme procedimentos descritos na norma 134/2010-ME (DNIT, 2010a). Segundo este documento, os solos se enquadram em:

Grupo A-1: Inclui uma mistura bem graduada de fragmentos de rocha e pedregulho, areia grossa, areia média e areia fina com ou sem material fino, não plástico ou pouco plástico. Este grupo ainda é subdividido em Subgrupos A-1-A, A-1-B, de acordo com a predominância de fragmentos de rocha ou areias.

Grupo A-3: Composto por areias finas de praia ou de deserto, com ausência de material silteoso ou argiloso, ou com pequena quantidade de silte não plástico. Também incluem areia fina fluvial mal graduada, com pouca areia grossa e pedregulho;

Grupo A-2: Grupo intermediário que inclui uma grande variedade de materiais com graduação irregular e pouco material fino que não se enquadram nas classes A-1 e A-3. Este grupo ainda é subdividido em Subgrupos A-2-4, A-2-5, A-2-6 e A-2-7, conforme o material passante na peneira N° 40.

Grupo A-4: Reúne solos silteosos não plásticos ou moderadamente plásticos;

Grupo A-5: Inclui material similar ao descrito no grupo A-4, com presença de material diatomáceo ou micáceo;

Grupo A-6: Apresenta predominância de solos argilosos plásticos sujeitos a grandes variações volumétricas entre os estados seco e úmido;

Grupo A-7: Reúne materiais semelhantes aos solos do grupo A-6, porém mais elásticos, com alto limite de liquidez variações volumétricas. Este grupo ainda é subdividido em Subgrupo A-7-5 e A-7-6 de acordo com a relação entre o índice de plasticidade e limite de liquidez.

Segundo Santos; Parreira (2015) o material escavado é classificado em categorias conforme sua dificuldade de extração e deve ser considerado no orçamento. São elas:

Material de 1ª categoria: compreendem os solos em geral, cuja escavação envolve o emprego de equipamentos convencionais de terraplenagem.

Material de 2ª categoria: compreendem as pedras soltas, rochas fraturadas em blocos maciços de volume inferior a $0,50\text{m}^3$ e rochas em decomposição não incluídas em 1ª categoria que exijam o emprego de escarificador pesado (riper).

Material de 3ª categoria: compreendem a rocha sã, fraturada, maciços e blocos de volume igual ou superior a $2,0\text{m}^3$, que só possam ser extraídos com emprego de explosivos ou equipamentos e dispositivos especiais (marteletes).

Material brejoso: compreende os solos que não apresentam, em seu estado natural, capacidade de suporte para apoio direto dos equipamentos de escavação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Visão Geral do Experimento

A finalidade deste trabalho é construir um simulador que estime a possibilidade de lucro ou prejuízo na construção de rodoviárias utilizando Lógica *Fuzzy*, tendo no modelo informações reais que indiquem viabilidade, concepção e dificuldades já apontados no projeto. Para tal, a metodologia utilizada foi composta de parâmetros de projeto que impactam no custo, confrontando-os no modelo retornando a viabilidade de implantação da obra.

A pesquisa foi realizada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), localizado no município de Dourados – MS, coordenadas, Lat $22^{\circ}11'38.66''\text{S}$, Long $54^{\circ}55'53.26''\text{O}$, Altitude média 464 metros, precipitação média anual de 1400mm e clima classificado como Cwa, mesotérmico úmido com verões quentes e invernos secos, conforme classificação de Köppen (ALVARES et al, 2013).

A metodologia desta investigação está apresentada na Figura 4 de forma a se visualizar de forma concisa a descrição da pesquisa.

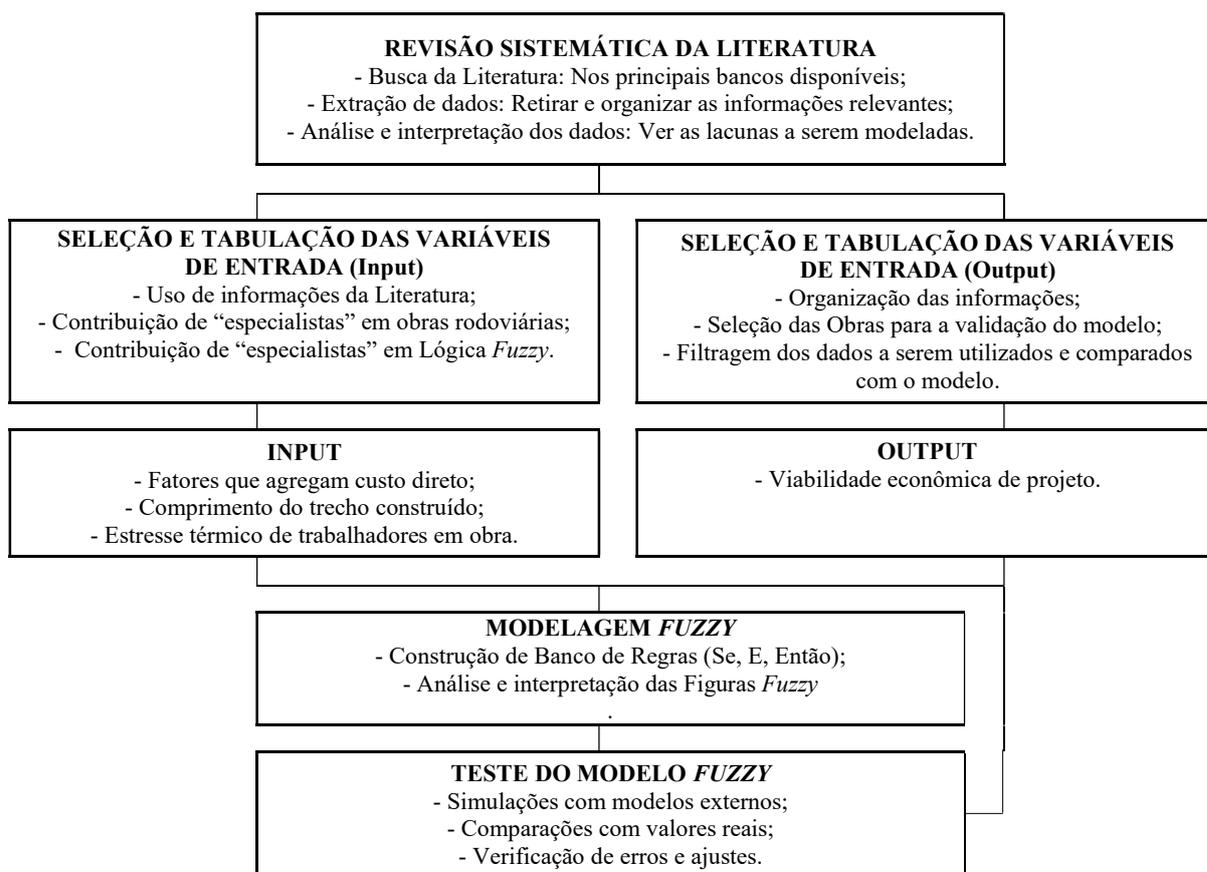


Figura 4 - Fluxograma geral de execução da Pesquisa

3.2.Revisão Sistemática de Literatura

Para construção do banco de dados foi realizada revisão sistemática da literatura nas plataformas Google Scholar, Science Direct, Web of Science, Scopus, além de registros disponibilizados diretamente pelo DNIT. A busca foi realizada com base em palavras chave diretamente relacionadas ao objetivo da investigação, de forma a encontrar resultados relacionadas ao tema. O material foi extraído e organizado em tabelas e planilhas eletrônicas apresentadas de forma sintética nos resultados.

A pesquisa filtrou material bibliográfico a partir de 2010 principalmente pelas palavras-chave: "*Fuzzy logic highway costs*" nas bases Science Direct, Web of Science e Scopus. E os termos "*Fuzzy construção rodovias*", "*legislação construção rodovias*", "*custos construção rodovias*" no Google Scholar.

Foram encontrados mais de 2400 artigos nas bases de dados, e ao analisa-los em ordem decrescente de publicação, relevância e filtrar mais os resultados para a sólida construção e discussão desta pesquisa separou-se 79 trabalhos, sendo que 45 utilizaram Lógica *Fuzzy* e outras formas de modelagem contribuindo com este trabalho

3.3. Seleção e Tabulação das Variáveis de entrada (input)

Após a revisão bibliográfica foram agrupados os fatores que influenciam diretamente no custo de uma rodovia e 3 (três) variáveis principais que se interagem, sendo elas a quantidade de fatores que agregam custo direto à rodovia, a complexidade causada conforme o comprimento do trecho a ser construído e os níveis de estresse térmico ambiental que os trabalhadores são submetidos durante a execução da obra.

3.3.1. Fatores que agregam custo direto à rodovia

Lanzaro; Andrade. (2023) propuseram um método de modelagem que auxiliasse na construção de projetos geométricos de estradas para países em desenvolvimento usando Lógica *Fuzzy*, onde foram incluídas nas variáveis de entrada fatores como topografia, classe de estrada, largura, comprimento, velocidade diretriz, materiais e serviços envolvidos, a fim de se obter um projeto mais eficiente em termos de custo.

Já em pesquisa realizada por Gardner et al. (2016), ficou documentado que o custo para a construção de estradas nos Estados Unidos é influenciado por diversos fatores. Entre eles são destacadas a localização da rodovia, existência de matas e desvios, prazo para execução, velocidade diretriz, topografia do terreno, extensão e largura da via, quantidade de pontes e obras de arte, complexidade de deslocamento dos serviços e mão de obra, clima local e os volumes de escavação e aterro.

A Lógica *Fuzzy* foi utilizada como ferramenta de tomada de decisão para modelagem envolvendo projetos de otimização de pavimentação de estradas. Nesse estudo Eddula et al. (2023), consideraram fatores incertos que interferem no custo, como topografia, tipo de solo, espessura da camada asfáltica e clima de exposição dos trabalhadores, entre outras.

Pesquisa realizada por Jomnonkwao et al. (2020) mostra que o volume de corte e aterro e o volume asfáltico são as variáveis mais significativas que influenciam no custo da construção de rodovias de países em desenvolvimento. O estudo utilizou análise de regressão múltipla para chegar a esta conclusão.

Já Li et al. (2019) verificaram que a cobertura do terreno a ser trabalhado teve impacto

menor no custo de construção de rodovias em comparação às outras variáveis analisadas, se destacando como as mais importantes o volume de terra movimentada e asfalto utilizado.

Nesta investigação as variáveis encontradas na literatura foram analisadas por especialistas que trabalham com obras rodoviárias e no Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para entender e identificar os parâmetros mais importantes a se considerar na previsão de custos.

A seleção das variáveis foi realizada com base na bibliografia disponível, de acordo com a curva ABC do projeto de construção da estrada. Após a análise dos especialistas, foram selecionadas 11 variáveis (Tabela 6), usando pesos para cada uma.

Tabela 6 - Variáveis que interferem no custo e viabilidade de uma rodovia.

OBRA	PESO
1 - Prazo de execução	1
2 - Distância média de transporte (DMT) de areia	1
3 - Distância média de transporte (DMT) de cimento	1
4 - Distância média de transporte (DMT) de aço	1
5 - Volume de escavação	1,5
6 - Volume de aterro	1,5
7 - Volume de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)	2,5
8 - Quantidade de obras de artes especiais	1
9 - Equipe execução	2
10 - Máquinas e equipamentos	2
11 - Cobertura do terreno a ser trabalhado	0,5

É importante destacar que a atribuição de valores para cada critério, conforme indicado na Tabela 6, é uma prática subjetiva que varia de acordo com o contexto, os objetivos da investigação e a expertise do profissional responsável pela elaboração do modelo. Diferentes especialistas podem ter diversas interpretações e ênfases ao considerar a relevância de cada elemento na análise da viabilidade de uma obra rodoviária. Por isso, a definição dos valores deve ser embasada em experiência anterior e pesquisa em fontes documentais.

Inicialmente a planilha foi projetada para que o usuário pudesse atribuir nota de 0 a 10 para cada variável segundo seu projeto, tendo como parâmetro Ótimo = 10; Médio = 5; Péssimo = 0. Segundo a Tabela 7, que na planilha foi programada com expressões do tipo =SE(E(nota média<10;nota média>=0);"Viabilidade";0).

Tabela 7 - Viabilidade estimada de projeto para rodovias

CONCEITO	VIABILIDADE
≥ 9	Muito Lucrativa
entre 7 e 9	Lucrativa
entre 6 e 7	Normal
entre 4 e 6	Risco Prejuízo
≤ 4	Prejuízo

Garantindo a simplicidade para uso primário em simulação por planilha eletrônica, os possíveis retornos de simulação na planilha eletrônica foram agrupadas no modelo desenvolvido de forma que gerassem a variável linguística de entrada do modelo *Fuzzy* “Quesitos-Atendidos”. Para tal, o especialista recomendou agrupar a viabilidade estimada em três intervalos, visto que é importante que uma obra rodoviária seja lucrativa e muito lucrativa (Bom), o mercado apresenta uma região intermediária decorrente de oscilações econômicas normais (Médio) e deve ser desconsiderada a possibilidade do risco ao prejuízo ou prejuízo (Ruim).

Assim, a função de pertinência com as faixas de valores dos Quesitos-Atendidos seguiram a Tabela 8.

Tabela 8 - Funções de Pertinência para Quesitos Atendidos.

INTERVALO	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	CURVA
Bom	[7 7,5 10 10]	Trapezoidal
Médio	[6 6,5 7 7,5]	Trapezoidal
Ruim	[0 0 6 6,5]	Trapezoidal

No simulador *Fuzzy* do Matlab (2017) esta variável de entrada com suas funções de pertinências ficam representadas como na Figura 5.

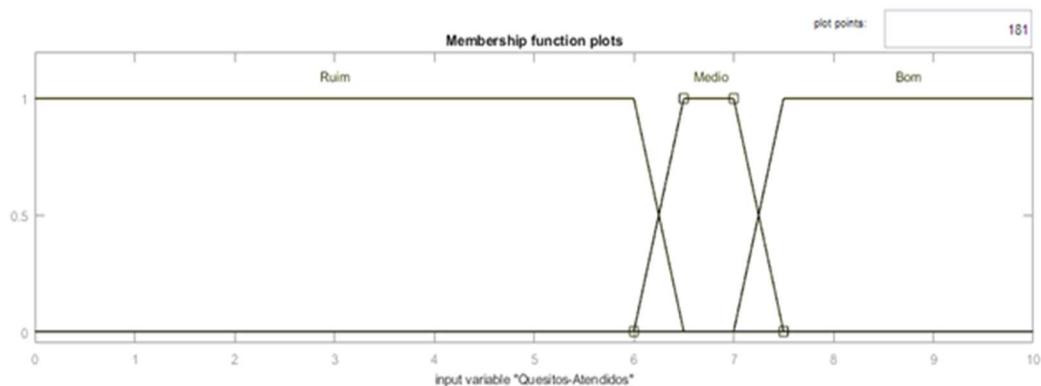


Figura 5 - Variável de entrada Quesitos-Atendidos

3.3.2. Comprimento do trecho construído

A extensão do trecho construído é um parâmetro importante a ser considerado no projeto rodoviário, pois determina o custo por quilômetro construído. O terreno da área onde a estrada é construída, seja plano, ondulado ou montanhoso, afeta o projeto e orçamento total. Segundo DNIT (2010b), a velocidade diretriz é determinada para cada área construída, bem como sua classe, que juntas definem o conjunto de condições técnicas destinadas a garantir a trafegabilidade, segurança e conforto da obra e resultado final esperado.

Assim, foi variável de entrada neste modelo a combinação da Tabela 9 da Classe da rodovia em função da Velocidade Diretriz para terrenos planos, ondulados e montanhosos e Tabela 10, que propõe distâncias mínimas e distâncias ideais para que sejam realizados desvios com segurança entre veículos segundo a Velocidade Diretriz.

Tabela 9 - Velocidade Diretriz em função da classe da rodovia para diferentes perfis de terreno

VELOCIDADE DIRETRIZ (km/h)			
CLASSE	PLANA	ONDULADA	MONTANHOSA
IV	60	40	30
III	80	60	40
II	100	70	50
I	100	80	60
0	120	100	80

Tabela 10 - Distâncias mínimas e recomendadas para projetos em função da Velocidade Diretriz.

VEL. DIRETRIZ	DIST. MÍNIMA	DIST. RECOMENDADA
30	-	-
40	50	115
50	75	145
60	95	175
70	125	200
80	155	230
90	185	275
100	225	315
110	265	335
120	305	375

Com estas informações definiu-se os intervalos linguísticos da função de pertinência “Comprimento-Trecho” que seguiram a Tabela 11:

Tabela 11 - Funções de Pertinência para Comprimento-Trecho.

INTERVALO	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	CURVA
Crítico	[0 0 145 175]	Trapezoidal
Intermediário	[145 175 275 315]	Trapezoidal
Ideal	[275 315 400 400]	Trapezoidal

No simulador *Fuzzy* do Matlab (2017) esta variável de entrada com suas funções de pertinências ficam representadas como na Figura 6.

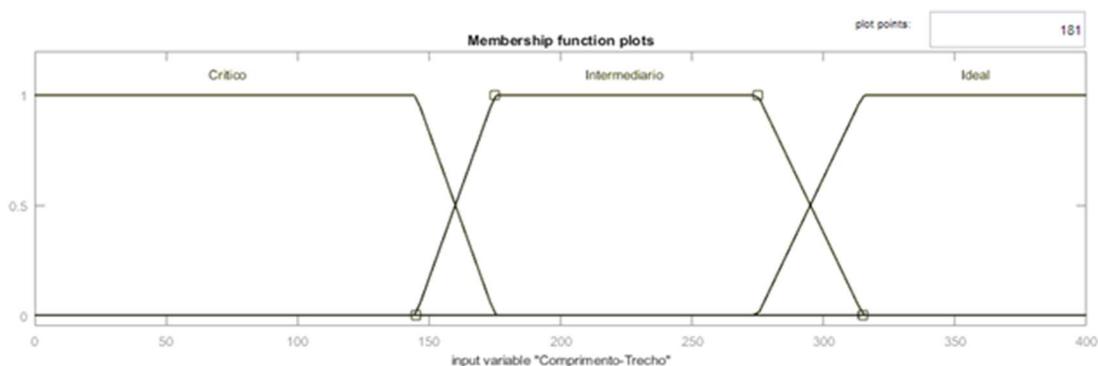


Figura 6 - Variável de entrada Comprimento-Trecho

3.3.3. Estresse térmico de trabalhadores em rodovias

Segundo Cesca et al (2021) em um ambiente com exposição térmica, as variações de temperatura estão diretamente relacionadas à umidade relativa, por isso optou-se em usar o IDH como variável de entrada, e assim ter um indicador que contemple ambas as variáveis e expresse os níveis de estresse por calor e frio dos trabalhadores. A função de pertinência para o Índice de Desconforto Humano (IDH) associada às condições de conforto térmico segue a Tabela 12.

Tabela 12 - Funções de Pertinência para o IDH.

INTERVALO DE IDH	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	EFEITO
IDH > 80	[79 81 100 100]	Estresse Calor
75 > IDH > 80	[74 76 79 81]	Desconfortável Calor
60 > IDH > 75	[59 61 74 76]	Confortável
55 > IDH > 60	[54 56 59 61]	Desconfortável Frio
IDH < 55	[40 40 54 56]	Estresse Frio

Fonte: Adaptado de da Silva et al. (2020b).

Os termos linguísticos seguiram a função de pertinência trapezoidal e no simulador *Fuzzy* do Matlab (2017) esta variável ficou representadas como na Figura 7.

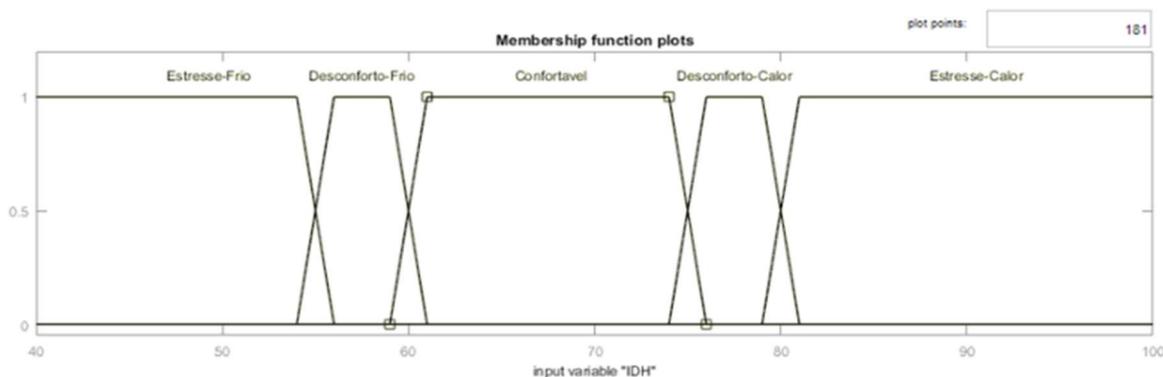


Figura 7 - Variável de entrada IDH

3.4. Seleção e Tabulação da Variável de Saída (output)

Para a composição da variável saída, foram utilizadas informações disponibilizadas por especialistas do DNIT (DNIT, 2022), agrupadas em planilha contendo dados técnicos de obras, com especificação do tipo de projeto, inclusive valores finais contratados já com aditivos.

Para este estudo foram separados 20 projetos que possuíam as informações disponíveis necessárias para construção e avaliação do modelo. A Planilha com as informações disponibilizadas pelo DNIT estão no Apêndice 1.

3.4.1. Viabilidade econômica de projeto

A variável de saída, Viabilidade, permite ao usuário verificar a interferência da combinação das variáveis de entrada na possibilidade de lucro ou prejuízo de uma obra rodoviária. Seu conjunto ficou estabelecido em um domínio de $[0,100]$, com intervalos que abrangessem as funções de pertinência como apresentadas na Tabela 13, igualmente distribuídas. Segundo Bektaş et al. (2023), a saída de um sistema *Fuzzy* pode ser representada pelo intervalo 0 a 100, com funções igualmente distribuídas, permitindo assim uma maior precisão na representação do resultado do sistema.

Tabela 13 – Funções de Pertinência para Viabilidade.

INTERVALO	FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	CURVA
Muito Lucrativa	[76.9 96.2 100 100]	Trapezoidal
Ideal	[51.9 73.1 76.9 96.2]	Trapezoidal
Normal	[26.9 48.1 51.9 73.1]	Trapezoidal
Risco Prejuízo	[3.8 23.1 26.9 48.1]	Trapezoidal
Inviável	[0 0 3.8 23.1]	Trapezoidal

No simulador *Fuzzy* do Matlab (2017) a variável de saída com suas funções de pertinências ficaram representadas como na Figura 8.

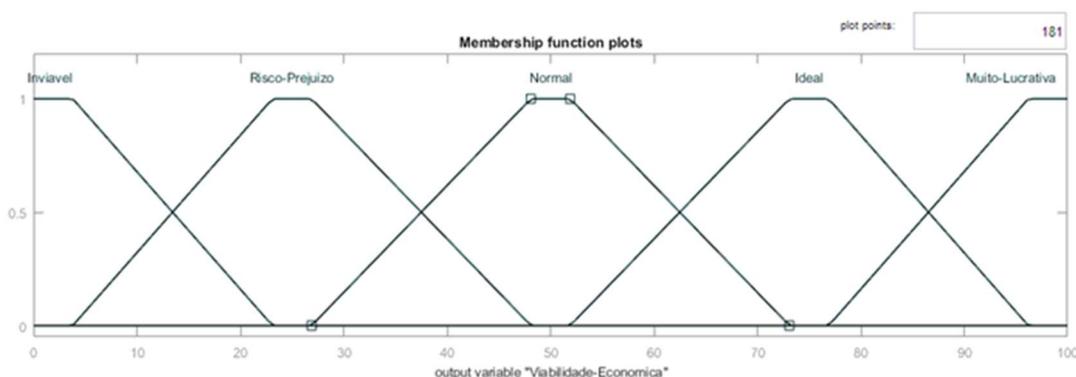
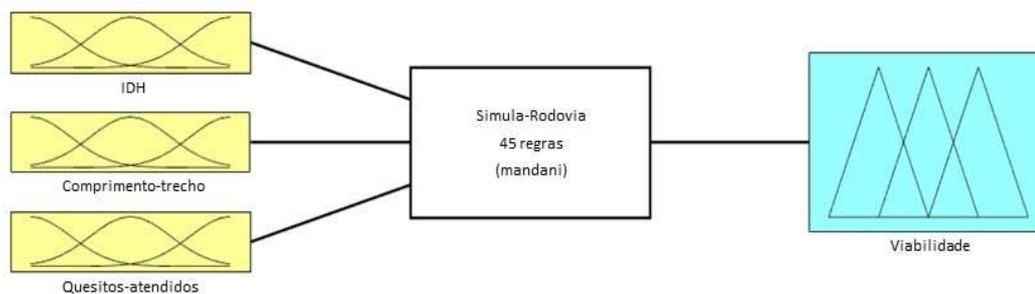


Figura 8 – Variável de saída Viabilidade

3.4.2. Sistema de regras

A ferramenta computacional utilizada foi o *Fuzzy* que está inserido no ambiente do MATLAB R2017a® (Matlab, 2017). O programa fornece ferramentas para composição das regras, visualização e simulação de diferentes cenários do algoritmo utilizado, processando os dados e funções de ativação. A Figura 9 representa a tela inicial com a estrutura do simulador construído.



Fonte: MATLAB R2017a®.

Figura 9 – Configuração básica do *Fuzzy logic toolbox*.

Na investigação, utilizou-se o método de inferência de Mamdani, que traz como resposta um conjunto *Fuzzy* originado da combinação dos valores de entrada com os seus respectivos graus de pertinência, através do operador mínimo, e, em seguida, pela superposição das regras por meio do operador máximo. A *defuzificação* foi feita utilizando o método do Centro de Gravidade, que considerou todas as possibilidades de saída, transformando o conjunto *Fuzzy* originado pela inferência em conjunto numérico (ZHANG et al., 2021).

O banco de regras *Fuzzy* (Tabela 14) foi gerado utilizando as preposições Se, E e Então, tendo sentenças montadas seguindo a literatura, e ponderadas de acordo com conhecimento do especialista. Foram definidas 45 regras que constituíram o banco de regras *Fuzzy*.

Tabela 14 – Banco de Regras para o sistema *Fuzzy* Viabilidade de projeto rodoviário.

	Se	IDH	E	Comprimento-Trecho	E	Quesitos-Atendidos	Então	Viabilidade
1	Se	Estresse Calor	E	Ideal	E	Bom	Então	Normal
2	Se	Estresse Calor	E	Ideal	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
3	Se	Estresse Calor	E	Ideal	E	Ruim	Então	Inviável
4	Se	Estresse Calor	E	Intermediária	E	Bom	Então	Normal
5	Se	Estresse Calor	E	Intermediária	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
6	Se	Estresse Calor	E	Intermediária	E	Ruim	Então	Inviável

7	Se	Estresse Calor	E	Crítico	E	Bom	Então	Normal
8	Se	Estresse Calor	E	Crítico	E	Médio	Então	Inviável
9	Se	Estresse Calor	E	Crítico	E	Ruim	Então	Inviável
10	Se	Desconfortável Calor	E	Ideal	E	Bom	Então	Ideal
11	Se	Desconfortável Calor	E	Ideal	E	Médio	Então	Normal
12	Se	Desconfortável Calor	E	Ideal	E	Ruim	Então	Inviável
13	Se	Desconfortável Calor	E	Intermediária	E	Bom	Então	Normal
14	Se	Desconfortável Calor	E	Intermediária	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
15	Se	Desconfortável Calor	E	Intermediária	E	Ruim	Então	Inviável
16	Se	Desconfortável Calor	E	Crítico	E	Bom	Então	Normal
17	Se	Desconfortável Calor	E	Crítico	E	Médio	Então	Inviável
18	Se	Desconfortável Calor	E	Crítico	E	Ruim	Então	Inviável
19	Se	Confortável	E	Ideal	E	Bom	Então	Muito Lucrativa
20	Se	Confortável	E	Ideal	E	Médio	Então	Ideal
21	Se	Confortável	E	Ideal	E	Ruim	Então	Inviável
22	Se	Confortável	E	Intermediária	E	Bom	Então	Ideal
23	Se	Confortável	E	Intermediária	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
24	Se	Confortável	E	Intermediária	E	Ruim	Então	Inviável
25	Se	Confortável	E	Crítico	E	Bom	Então	Ideal
26	Se	Confortável	E	Crítico	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
27	Se	Confortável	E	Crítico	E	Ruim	Então	Inviável
28	Se	Desconfortável Frio	E	Ideal	E	Bom	Então	Ideal
29	Se	Desconfortável Frio	E	Ideal	E	Médio	Então	Normal
30	Se	Desconfortável Frio	E	Ideal	E	Ruim	Então	Inviável
31	Se	Desconfortável Frio	E	Intermediária	E	Bom	Então	Normal
32	Se	Desconfortável Frio	E	Intermediária	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
33	Se	Desconfortável Frio	E	Intermediária	E	Ruim	Então	Inviável
34	Se	Desconfortável Frio	E	Crítico	E	Bom	Então	Normal
35	Se	Desconfortável Frio	E	Crítico	E	Médio	Então	Inviável
36	Se	Desconfortável Frio	E	Crítico	E	Ruim	Então	Inviável
37	Se	Estresse Frio	E	Ideal	E	Bom	Então	Normal
38	Se	Estresse Frio	E	Ideal	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
39	Se	Estresse Frio	E	Ideal	E	Ruim	Então	Inviável
40	Se	Estresse Frio	E	Intermediária	E	Bom	Então	Normal
41	Se	Estresse Frio	E	Intermediária	E	Médio	Então	Risco Prejuízo
42	Se	Estresse Frio	E	Intermediária	E	Ruim	Então	Inviável
43	Se	Estresse Frio	E	Crítico	E	Bom	Então	Normal
44	Se	Estresse Frio	E	Crítico	E	Médio	Então	Inviável

45	Se	Estresse Frio	E	Crítico	E	Ruim	Então	Inviável
----	----	---------------	---	---------	---	------	-------	----------

3.5. Teste do Modelo

A avaliação e ajuste do modelo construído se baseou nas recomendações de Olowosulu et al. (2022), que propôs, para validação de um modelo *Fuzzy*, a comparação entre o simulador construído e as observações reais registradas. Assim, as informações disponibilizadas pelo DNIT, como prazo de execução, tamanho da obra, distâncias médias de areia, cimento e aço, volumes de escavação e aterro, CBUQ, OAE e cobertura do terreno, somadas as possibilidades de conforto e estresse possibilitadas pelo IDH, foram confrontadas ao custo das obras e discutidas com especialistas para confirmação do retorno.

O ajuste de validação de um modelo *Fuzzy* pode ser feito comparando o modelo com informações reais observadas a campo, determinando-se inclusive a diferença entre os resultados e o grau de precisão da resposta.

A avaliação da qualidade do sistema *Fuzzy* foi realizada como proposto por Patel et al. (2022b), utilizando o erro médio absoluto (EMA) e o coeficiente de correlação (CC), calculados no próprio software MATLAB R2017a® (MATLAB, 2017).

O EMA é calculado pela média dos valores absolutos das diferenças entre os valores previstos e observados. Já o CC mede a relação linear entre os valores previstos e observados, variando entre -1 e 1. Um valor próximo de 1 indica forte correlação positiva, enquanto um valor próximo de -1 indica forte correlação negativa. Um valor próximo de zero indica ausência de correlação. Assim, o CC é calculado pela covariância entre os valores previstos e observados dividido pelo produto dos desvios padrão.

Com os resultados gerados foi possível aplicar conceitos de Engenharia e Construções, discutir o cenário existente e propor soluções sustentáveis que mitiguem os custos de obras rodoviárias tornando-as mais viáveis.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultados desta investigação foram gerados modelos de análise probabilística de viabilidade econômica para implantação de rodovias com Planilhas eletrônicas e modelos multicritérios baseados em Lógica *Fuzzy*, finalizando com a proposição de construção de aplicativos baseados em IA como trabalhos futuros.

4.1. Modelagem em Planilha eletrônica

Ao analisar os resultados da pesquisa elencados na Figura 10, é fundamental considerar a importância dos pesos atribuídos a cada quesito. Os pesos refletem a relevância relativa de cada aspecto para a viabilidade geral da rodovia. Quesitos com pesos mais altos exercem uma influência maior na nota final (Conceito) e, conseqüentemente, na classificação da Viabilidade.

A		B	C	D	E	F	G	H
Obra	Peso	Nota atribuída	Nota individual	Viabilidade	Conceito	Viabilidade		
1 - Prazo de execução	1	9	9	Muito Lucrativa	>=9	Muito Lucrativa		
2 - Distância média de transporte (DMT) de areia	1	9	9	0	entre 7 e 9	Ideal		
3 - Distância média de transporte (DMT) de cimento	1	9	9	0	entre 6 e 7	Normal		
4 - Distância média de transporte (DMT) de aço	1	9	9	0	entre 4 e 6	Risco Prejuízo		
5 - Volume de escavação	1,5	9	13,5	0	<=4	Inviável		
6 - Volume de aterro	1,5	9	13,5					
7 - Volume de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)	2,5	9	22,5					
8 - Quantidade de obras de artes especiais	1	9	9					
9 - Equipe execução	2	9	18					
10 - Máquinas e equipamentos	2	9	18					
11 - Cobertura do terreno a ser trabalhado	0,5	9	4,5					
Peso Total de Obras	15	Nota final da Obra	9					
Ótimo = 10 Médio = 6 Péssimo <= 4								
ATRIBUIR notas de 0 a 10 para cada Quesito								

B		B	C	D	E	F	G	H
Obra	Peso	Nota atribuída	Nota individual	Viabilidade	Conceito	Viabilidade		
1 - Prazo de execução	1	4	4	0	>=9	Muito Lucrativa		
2 - Distância média de transporte (DMT) de areia	1	4	4	0	entre 7 e 9	Ideal		
3 - Distância média de transporte (DMT) de cimento	1	4	4	0	entre 6 e 7	Normal		
4 - Distância média de transporte (DMT) de aço	1	4	4	0	entre 4 e 6	Risco Prejuízo		
5 - Volume de escavação	1,5	4	6	Prejuízo	<=4	Inviável		
6 - Volume de aterro	1,5	4	6					
7 - Volume de concreto betuminoso usinado a quente (CBUQ)	2,5	4	10					
8 - Quantidade de obras de artes especiais	1	4	4					
9 - Equipe execução	2	4	8					
10 - Máquinas e equipamentos	2	4	8					
11 - Cobertura do terreno a ser trabalhado	0,5	4	2					
Peso Total de Obras	15	Nota final da Obra	4					
Ótimo = 10 Médio = 6 Péssimo <= 4								
ATRIBUIR notas de 0 a 10 para cada Quesito								

Figura 10 - Simulador de viabilidade em Planilha eletrônica. (A) Conceito Muito Lucrativa
(B) Conceito Prejuízo.

Com os diferentes pesos atribuídos a cada Quesito, é possível afirmar sua relevância na Viabilidade da obra. Os quesitos que possuem peso 1, como prazo de execução, distâncias médias de transporte de areia, cimento e aço, e quantidade de obras de artes especiais, são tem relevância integral para se determinar a viabilidade de uma rodovia. Por outro lado, o volume de escavação e de aterro, o volume de concreto betuminoso usinado a quente, a equipe de execução e as máquinas e equipamentos possuem peso 1,5 ou 2, indicando importância orçamentária superior que os demais quesitos no projeto. Já a cobertura do terreno a ser trabalhado é importante, porém com menor relevância que os demais quesitos.

Uma abordagem comum para a definição dos pesos é basear-se em estudos anteriores e experiências práticas. Diversos pesquisadores têm se dedicado a investigar a influência de diversos fatores na viabilidade econômica de obras rodoviárias. Neste sentido pode ser citado estudo conduzido por Al-Nuaimi et al. (2019), onde foram identificados que prazo de execução, distâncias médias de transporte de areia, cimento e aço, e quantidade de obras de artes especiais afetam a lucratividade de projetos rodoviários.

Já a pesquisa de Pilger et al. (2019), mostraram entre seus resultados que volume de concreto betuminoso usinado a quente, a equipe de execução e as máquinas e equipamentos são de extrema importância nos custos de uma obra rodoviária.

A partir da nota final obtida pela média ponderada dos quesitos (Conceito), é possível classificar a viabilidade para execução de uma rodovia. Ao se projetar de forma correta, espera-se que a rodovia se enquadre nos intervalos "Muito Lucrativa" ou "Lucrativa", indicando maior rentabilidade da construção. Porém, se em nível de projeto a rodovia for enquadrada como "Normal", valores e procedimentos precisam ser revistos, pois é um intervalo arriscado de se trabalhar, visto que imprevistos podem acontecer. Por outro lado, se o projeto inicial for categorizado como "Risco de Prejuízo" ou "Prejuízo", fica indicada situação desfavorável em termos financeiros, não devendo a construtora assumir obras nestas condições.

Segundo Duarte; Silva (2023) a determinação dos intervalos de classificação de viabilidade deve basear-se na análise comparativa de diversos projetos rodoviários, levando em consideração os resultados financeiros e o retorno sobre o investimento obtido em estudos anteriores.

Visto que a questão orçamentária de rodovias envolve variáveis incertas, como orçamentos, prazos, avaliação de ambientes e obras de construção civil, a Lógica *Fuzzy* permite atribuir graus de pertinência ou probabilidade de ocorrência a diferentes quesitos, possibilitando uma modelagem realista. Além disso, modelos *Fuzzy* conseguem tratar com mais exatidão imprecisões e ambiguidades, pois possuem limites flexíveis (ZITOUNI et al., 2023). Assim, esta pesquisa além de mostrar que é possível se gerar uma programação básica com planilha eletrônica, aprofundou sua investigação em modelos multicritérios, com a Lógica *Fuzzy*, oferecendo uma abordagem robusta e precisa com o problema de determinação precisa da viabilidade econômica de rodovias.

4.2. Modelagem Multicritério baseado em Lógica *Fuzzy*

A Figura 11 apresenta a visualização gráfica da relação entre as variáveis de entrada Comprimento do trecho (expresso em Km) e IDH, tendo como função de saída a Viabilidade Econômica do modelo *Fuzzy* proposto na pesquisa.

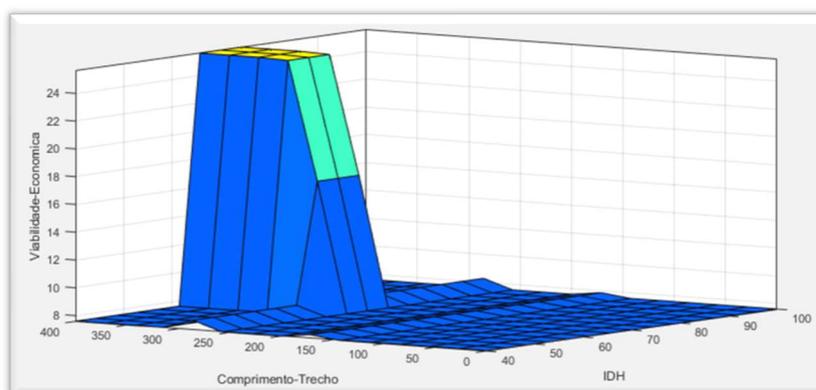


Figura 11 - Representação da Viabilidade Econômica em função do comprimento do trecho (expresso em Km) e IDH

É possível observar na Figura 11 que o IDH desempenha papel significativo na avaliação do conforto e desconforto humano em diferentes contextos ambientais. Conforme Moghbel (2020) um IDH acima de 80 está associado a um nível elevado de estresse por calor, enquanto um IDH abaixo de 55 indica a presença de estresse devido ao frio. Essas conclusões são consistentes com as funções de pertinência apresentadas, as quais indicam os diferentes níveis de IDH para o modelo.

Quanto ao Comprimento-Trecho, estudos como o de Broniewicz; Ogrodnik (2020), destacaram a teoria dos conjuntos *Fuzzy* como ferramenta importante de análise multicritério moderna. Os autores recomendam que os trechos de uma obra devam ser cuidadosamente avaliados pois espaços menores podem compor paisagens mais complexas e influenciar mais a viabilidade de projetos.

Na Figura 11, entende-se que os trechos com comprimentos críticos estão suscetíveis a problemas de segurança e ao aumento dos custos operacionais. Já o comprimento intermediário fica na transição devendo assim ser analisado em conjunto com outras variáveis. Essas relações são relevantes para os resultados apresentados, sugerindo que a Viabilidade pode ser comprometida quando o Comprimento-Trecho não está na faixa ideal.

É possível observar que o IDH por si só não influencia a Viabilidade quando o Comprimento-Trecho é crítico. O mesmo ocorre com o Comprimento-Trecho que não exerce influência na viabilidade se IDH estiver fora da zona de conforto térmico. Isto demonstra a importância de se considerar o binômico IDH x Comprimento-Trecho na Viabilidade da obra, que chega a 25 se consideradas em conjunto e nas melhores condições. Porém, estas variáveis

de entrada não exercem muita influência na Viabilidade, de forma que não superam o Risco de Prejuízo no modelo.

Quando o Comprimento-Trecho está na faixa de 0 a 250 Km, independentemente do valor do IDH, a Viabilidade é inviável, sendo atribuído um valor de 8. Essa observação ressalta a importância crítica do Comprimento-Trecho na determinação da Viabilidade. Aspectos, como a capacidade de suporte da infraestrutura existente, a acessibilidade ou a complexidade do terreno, podem estar desempenhando papel significativo nesse resultado (ZHAO et al., 2022).

A interação entre o IDH, Comprimento-Trecho e Viabilidade é complexa e dependente do contexto específico do projeto. Conforme discutido por Harbiankova; Gertsberg (2022), uma abordagem integrada e multidisciplinar é essencial para uma avaliação abrangente da Viabilidade de uma obra rodoviária. Isso envolve a consideração de aspectos técnicos, ambientais, sociais e econômicos.

A Figura 12 é uma visualização gráfica da relação entre as variáveis de entrada Quesitos-Atendidos e IDH, tendo como função a saída Viabilidade Econômica do modelo Fuzzy proposto na pesquisa.

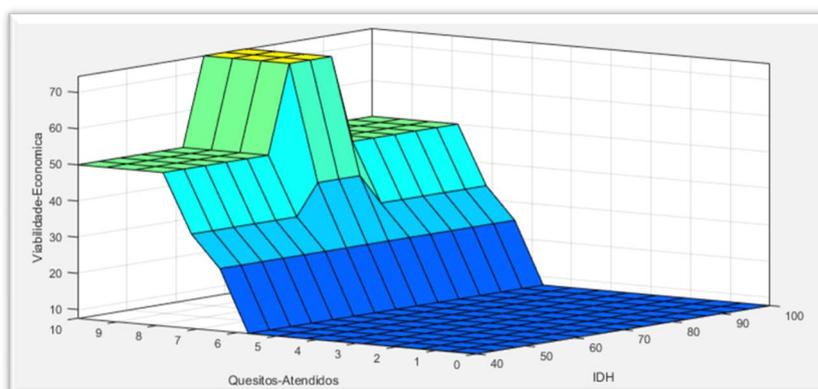


Figura 12 - Representação da Viabilidade Econômica em função dos Quesitos-Atendidos e IDH

Ao analisar dos resultados da Figura 12 de simulação *Fuzzy* verifica-se relações complexas entre os quesitos atendidos, Índice de Desconforto Humano (IDH) e a Viabilidade de projeto de uma rodovia. Inicialmente é possível observar que o IDH isoladamente não exerce uma influência significativa na Viabilidade quando até 5,5 quesitos são atendidos. No entanto, se no projeto são atendidos próximo a 8 quesitos, o IDH passa a ser fator de alto impacto na viabilidade, pois se está na região de conforto a viabilidade é considerada ideal e se está nas regiões de estresse por calor ou frio, retornam uma viabilidade do projeto rodoviário normal.

O resultado de destaque na Figura 13 é o que indica a Viabilidade com valor máximo próximo a 75% (ideal), quando o IDH se encontra em uma faixa correspondente a um nível de conforto e aproximadamente 78% dos quesitos são atendidos. Essa relação indica que ambos os fatores são importantes para se obter uma viabilidade ideal. Apoiando essa conclusão, Wang et al. (2019) desenvolveram uma ferramenta de previsão de risco para reduzir o impacto climático em estradas, onde destacou a importância de considerar o ambiente térmico no planejamento e na viabilidade de projetos rodoviários.

Quando o IDH está em um nível de conforto térmico, mas são atendidos até 5,5 quesitos, a Viabilidade é drasticamente reduzida, a aproximadamente 9%. Esse resultado enfatiza a importância de um número adequado de quesitos atendidos no projeto rodoviário para garantir sua Viabilidade, mesmo em condições favoráveis de conforto térmico. Esse resultado corrobora com os estudos de Fernandes et al. (2022), que ressaltam a necessidade de considerar variáveis adequadas no dimensionamento dos trechos rodoviários para garantir sua viabilidade.

No entanto, ainda na Figura 12, quando o IDH está fora da zona de conforto térmico e os quesitos estão no valor ideal, a Viabilidade é reduzida a 50%. Isso indica que projetos rodoviários que não levam em consideração o conforto térmico dos trabalhadores, mesmo com quesitos ideais atendidos, podem ter sua Viabilidade comprometida. Nesse contexto, estudos de Karthick et al. (2023) destacaram a importância de considerar as condições térmicas de exposição dos trabalhadores em projetos rodoviários, visando menor impacto decorrente de afastamentos e doenças proporcionadas por climas adversos.

A Figura 13 é uma visualização gráfica da relação entre as variáveis de entrada Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos, tendo como função de saída Viabilidade Econômica do modelo *Fuzzy* proposto na pesquisa.

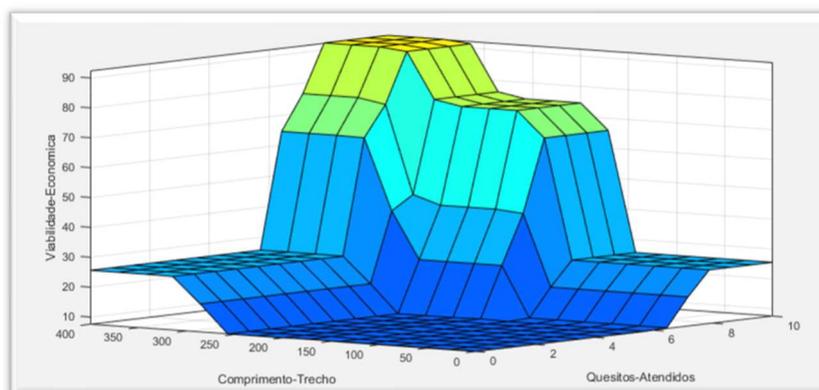


Figura 13 - Representação da Viabilidade Econômica em função do Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos

Ao analisar dos resultados da Figura 13 de simulação *Fuzzy* verifica-se a existência de relações diretas entre o Comprimento-Trecho e Quesitos-Atendidos estão na faixa “Ruim, isto significa que a viabilidade econômica de projeto está bem fora do ideal, com aproximadamente 9%. Este resultado indica a importância de atender tanto aos elementos relacionados ao comprimento do trecho quanto aos quesitos técnicos para obter uma viabilidade satisfatória.

Por outro lado, quando o Comprimento do Trecho é classificado como "Ideal" e os Quesitos Atendidos estão no nível "Bom", a Viabilidade Econômica alcança o patamar mais elevado de 92,4%, indicando uma condição de projeto muito lucrativa. Essa relação positiva entre o Comprimento do Trecho, Quesitos Atendidos e a Viabilidade Econômica do projeto demonstra a importância de considerar esses fatores em conjunto durante a fase de planejamento de uma rodovia.

Barros et al. (2018) estudaram a utilização de redes neurais para estimativa orçamentárias de rodovias e verificaram que uma maior precisão na fase de desenvolvimento de um projeto rodoviário depende de estudos minuciosos de viabilidade e devem incluir características específicas relacionadas ao tamanho do trecho construído e número de elementos considerados no orçamento (quesitos).

É importante ressaltar que se apenas uma das variáveis de entrada, seja o Comprimento do Trecho ou Quesitos Atendidos, for avaliada de forma satisfatória, enquanto a outra permanecer em níveis baixos, a Viabilidade Econômica resultante é próxima a 26%. Esse resultado destaca a necessidade de um equilíbrio adequado na atenção dada ao comprimento do trecho e quesitos técnicos, de forma a alcançar a melhor viabilidade do projeto.

Essa conclusão está em linha com estudos anteriores que destacam a importância da integração de múltiplos fatores na avaliação de projetos de infraestrutura rodoviária. A consideração simultânea do comprimento do trecho e dos quesitos técnicos é essencial para obter uma visão abrangente e precisa da viabilidade econômica de um projeto.

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2016), por intermédio do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) de infraestrutura rodoviária estudou os benefícios sociais e econômicos decorrentes dos investimentos em implantação e pavimentação de novas rodovias, ou melhoramentos nas rodovias já existentes, registrando a relação entre as Diretrizes Básicas utilizadas no projeto rodoviário e sua viabilidade.

4.3. Teste do Simulador de Viabilidade

O teste do modelo *Fuzzy* construído envolveu a realização de simulações com base em informações disponíveis na literatura e as situações reais verificadas por especialistas. A análise do comportamento da variável de saída "Viabilidade-Econômica" da rodovia envolveu a exploração de diferentes configurações das variáveis de entrada, incluindo posições ideais e extremas.

Essa abordagem de teste seguiu o protocolo proposto pelos especialistas em modelagem *Fuzzy* Jetter; Kok (2014), Agrawal et al. (2022) e Wang et al. (2022), que recomendam a combinação de valores ótimos e extremos, em simulações com sistemas inteligentes visando sua validação, após superadas possíveis limitações apresentadas pelo modelo.

A Figura 14 apresenta a base de regras ativadas do modelo *Fuzzy*, considerando três variáveis de entrada (Input): Índice de Desconforto Humano (IDH), Comprimento do Trecho e Quesitos Atendidos. Ao analisar as informações fornecidas pelo Figura, observa-se que quando todas essas variáveis estão dentro de seus melhores intervalos, o modelo *Fuzzy* retorna uma viabilidade econômica de projeto (Output) de 92,4%, classificada como "Muito Lucrativa".

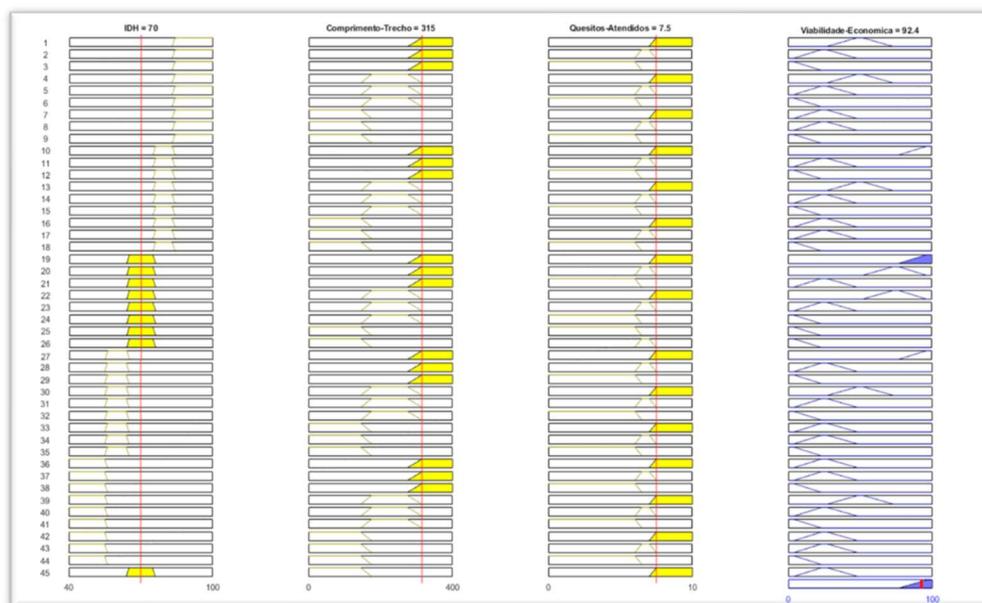


Figura 14 - Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy considerando todas Inputs e Output em valores ideais.

Elmousalami (2020) estudou práticas e procedimentos de modelagem com IA para identificar a melhor forma de prever custos de construção de rodovias com base em dados de literatura. Das 20 técnicas de IA testadas, os resultados mostraram que o método mais preciso e adequado proporcionou erro percentual médio absoluto de 9,091% e precisão de 92,9%. Este resultado mostra que o simulador aqui construído apresenta alta precisão, de 92,4% (Figura 14), podendo assim ser recomendado para estimativa de viabilidade de rodovias quando envolver as mesmas variáveis utilizadas no modelo.

É importante ressaltar que, embora a literatura científica forneça um embasamento teórico e prático para avaliar a viabilidade econômica de projetos, cada estudo possui suas particularidades e contextos específicos. Portanto, é essencial realizar análises complementares e considerar o máximo de fatores relevantes para uma tomada de decisão.

Segundo Khanani et al. (2021), a análise de viabilidade econômica de projetos de infraestrutura e construção de estradas é um processo complexo que envolve a avaliação de múltiplos fatores. O orçamento pode ser comprometido se apenas uma das variáveis estiver em níveis inadequados ou sofrer alteração durante o prazo de execução da obra. Feng; Zhang. (2022), estudaram o retorno financeiro de avaliação de investimentos em rodovias e afirmam que se este indicador já no projeto estiver acima de 90% de viabilidade, é alta a probabilidade de retorno financeiro e sucesso do empreendimento.

A Figura 15 apresenta a base de regras ativadas do modelo *Fuzzy*, considerando que a variável de entrada IDH está no estresse por calor (A) e estresse por frio (B), as demais variáveis de entrada Comprimento do Trecho e Quesitos Atendidos se mantêm em seus melhores intervalos. Como resposta a estas duas simulações, a Viabilidade econômica retornada pelo simulador é de 25,6% (risco de prejuízo) se considerar estresse por frio (A) e a Viabilidade é de 50% (Normal) no estresse por calor (B).

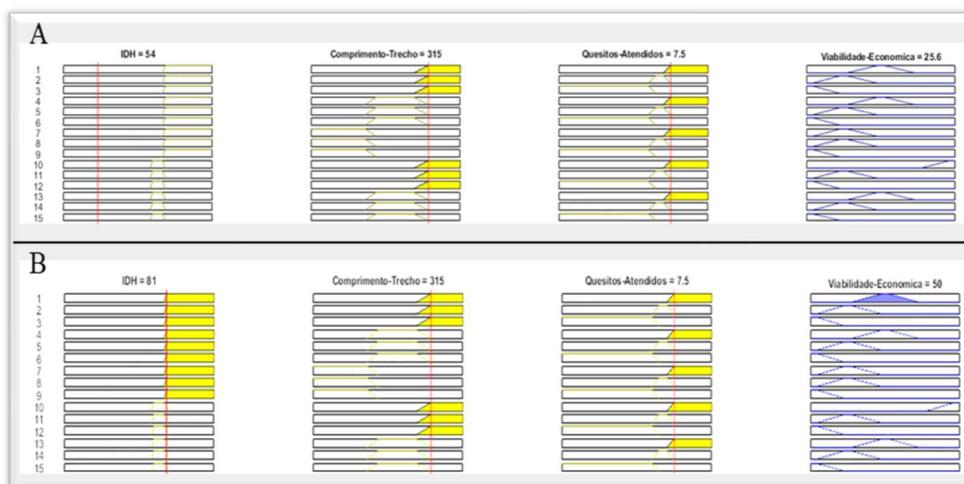


Figura 15 - Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy com IDH no estresse por calor (A) e estresse por frio (B).

Os resultados da Figura 15 indicam que o desconforto pelo frio é fator mais agressivo ao se projetar a viabilidade de uma rodovia que o calor. Segundo Yan et al. (2021) e Rahman et al. (2022) o estresse térmico pode ter um impacto significativo na produtividade das obras rodoviárias, tornando-as mais desafiadoras e aumentando o risco de problemas de saúde entre os trabalhadores sendo que o estresse por frio é mais grave, causa mais doenças e afastamentos por problemas de saúde que o estresse por calor. Essa consistência entre o resultado do modelo e observações reais registradas em pesquisas científicas confirma a eficácia do Simulador *Fuzzy* em avaliar a viabilidade da rodovia com base nas variáveis consideradas.

Esses achados (Figura 15) estão alinhados com estudos científicos anteriores. De acordo com pesquisa realizada por Karthick et al. (2023), o frio pode ter um impacto significativo na produtividade das obras, tornando-as mais desafiadoras e aumentando o risco de problemas de saúde entre os trabalhadores. No estudo, foi observado que o estresse por frio está associado a uma maior incidência de afastamento por doenças respiratórias e musculoesqueléticas, resultando na diminuição na produtividade e eficiência da equipe de

execução. Esses efeitos negativos além de resultar na diminuição da mão-de-obra ativa, ocasiona necessidade de adoção de roupas e equipamentos de proteção mais pesados que dificultam o trabalho, além da própria capacidade laboral que é reduzida pela baixa temperatura.

Por outro lado, ao analisar a influência do calor na viabilidade das obras na Figura 16, os resultados indicaram uma classificação Normal, com um valor numérico de 50. Essa classificação sugere que o calor também não deve ser desprezado, visto que a classificação ainda não é interessante para o projetista. De acordo com o estudo de Pisaniello e Di Corleto. (2023), a exposição excessiva ao calor pode causar sobrecarga térmica e danos à saúde do trabalhador na indústria da construção. Já Amorim et al. (2019), investigaram o impacto do estresse térmico em ambientes de trabalho ao ar livre e verificou que temperaturas elevadas podem levar a um aumento do estresse fisiológico e psicológico entre os trabalhadores, resultando em fadiga, desidratação e diminuição do desempenho.

A Figura 16 apresenta a base de regras ativadas do modelo *Fuzzy*, considerando que a variável de entrada comprimento-trecho está com valor 225, intermediário (A) e 70, crítico (B), mantidas as demais variáveis de entrada IDH e Quesitos Atendidos em seus melhores intervalos. Como resposta a estas duas simulações, a Viabilidade econômica retornada pelo simulador é de 74,4% (ideal) se considerar intermediária (A) e a Viabilidade é de 25,6% (risco de prejuízo) no comprimento crítico (B).



Figura 16 - Base de Regas ativadas do modelo *Fuzzy* com Comprimento-Trecho intermediário (A) e crítico (B).

Esses resultados corroboram com pesquisa de LAURANCE et al. (2014) e DE BORTOLI et al. (2022). Os autores realizaram análises abrangentes de diferentes fatores que influenciam a viabilidade de obras rodoviárias, incluindo o Comprimento do trecho. Os

resultados mostraram que trechos com Comprimento intermediário, como observado neste estudo, tendem a apresentar uma viabilidade mais favorável em comparação com trechos muito curtos ou muito longos. Segundo as pesquisas, trechos curtos costumam ter muitos detalhes a considerar e trechos longos demoram para serem concluídos, podendo ser influenciados por este fator. Essa consistência científica reforça a importância de manter um Comprimento do trecho adequado para garantir a viabilidade do projeto rodoviário.

Outro estudo relevante a ser considerado nessa análise foi o realizado por Štilić; Puška (2023), que exploraram diferentes modelos de decisão utilizados para avaliação de obras. Os pesquisadores discutiram a aplicação de técnicas de análise multicritério, como a Lógica *Fuzzy*, para lidar com a incerteza e a subjetividade inerentes à análise de viabilidade dos fatores envolvidos na viabilidade econômica. Com este estudo afirmaram que variáveis complexas como a distância e local da obra podem ser melhor avaliados conhecendo uma quantidade relevante de quesitos que influenciam na construção.

A Figura 17 apresenta a base de regras ativadas do modelo *Fuzzy*, considerando que a variável de entrada Quesitos-Atendidos está na faixa classificada com média (A) e ruim (B), com as demais variáveis de entrada IDH e Comprimento do Trecho sendo mantidas em seus melhores intervalos. A importância dos Quesitos é verificada na redução drástica da Viabilidade da rodovia ao se reduzir uma única unidade de Quesito, de 7 para 6, o que resulta de forma qualitativa no Output Viabilidade em (A) 74,4 - Ideal e em (B) 25,6 – Risco Prejuízo, respectivamente.

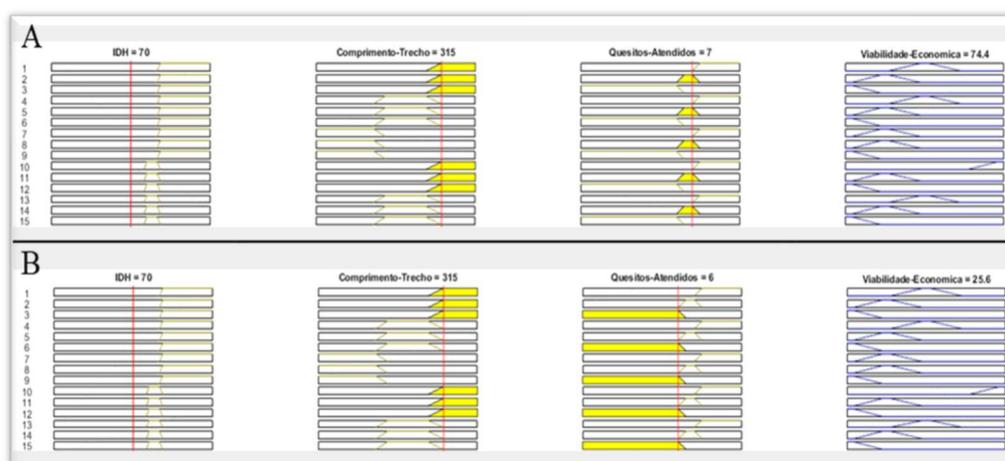


Figura 17 - Base de Regas ativadas do modelo Fuzzy com Quesito-Atendidos médios (A) e ruins (B).

Para compreender plenamente a importância dos Quesitos na Viabilidade econômica do projeto é importante interpretar seus pesos e relacionar com estudos realizados sobre o tema. Ao considerar que "Quesitos atendidos" possui um peso significativo de 7 na escala de 0 a 10, essa ponderação reforça a importância atribuída a essa variável na avaliação global da viabilidade do projeto. Além disso, é relevante registrar que volumes de escavação, de aterro, de CBUQ, equipe de execução e máquinas e equipamentos tem maior relevância (1,5 a 2,5) entre os Quesitos, podendo passar por uma avaliação mais refinada caso sejam atendidas, porém não se atinja o total de 7, de forma a tornar o resultado mais satisfatório.

Esta análise tem sua discussão enriquecida com artigos científicos que abordam a relação entre o atendimento aos quesitos e a viabilidade de projetos de infraestrutura rodoviária. Pesquisas realizadas por Grigg (2018) e Costa et al. (2023) demonstraram a influência de quesitos considerados em nível de projeto para se determinar a viabilidade econômica e técnica de obras rodoviárias. Os resultados obtidos por estes Autores demonstram que para cada obra deve-se considerar as características específicas da construção, porém, verificaram que a maior influência nos custos sempre é decorrente dos volumes de escavação, volumes de aterro e volumes de concreto betuminoso.

Outra pesquisa relevante foi a desenvolvida por Kuruvachalil et al. (2022), onde avaliaram diversos fatores que influenciam nos custos de uma obra rodoviária tendo ficado em destaque o tipo de projeto, condições geográficas, dificuldade para aquisição e transporte do material utilizado na pavimentação e qualidade dos equipamentos utilizados na construção.

Vários pesquisadores têm utilizado modelos baseados em Lógica *Fuzzy* para ponderar quesitos envolvidos na construção civil. Nautiyal; Sharma (2022) selecionaram tratamentos de manutenção de pavimentos com base em modelos *Fuzzy* de forma a mostrar como esta ferramenta pode ser usada para melhorar a eficiência dos projetos rodoviários. Khodabakhshian et al. (2023) apresentaram um modelo baseado em Lógica *Fuzzy* para avaliar projetos de construções usando técnicas de tomada de decisão multicritério. Ao final concluíram que a Lógica *Fuzzy* pode ser usada para reduzir as incertezas que impactam negativamente no sucesso do projeto.

Considerando as simulações *Fuzzy* que abrangeram as três variáveis de entrada - Índice de Desconforto Humano (IDH), Comprimento do Trecho e Quesitos Atendidos - em diferentes cenários, com valores ótimos e extremos, os resultados obtidos demonstraram coerência com a variável de saída "Viabilidade Econômica". Diante da consistência e coerência entre os resultados simulados e os objetivos do modelo, é possível afirmar este foi devidamente testado

e aprovado, revelando-se confiável como ferramenta de apoio à tomada de decisões em projetos de construção rodoviária que pode contribuir significativamente com a logística do agronegócio do Brasil.

5. CONCLUSÕES

Nesta pesquisa, a metodologia aplicada foi verificada e foi observado que existe significativa falta de investimentos em tecnologias que tornem mais sustentáveis o processo de orçamentação rodoviária já que os modelos utilizados são baseados em legislações antigas e sem a introdução de modelagem como ferramenta auxiliar. As técnicas de orçamentação utilizando planilhas eletrônicas, neste trabalho apresentadas, demonstraram ser importante ferramenta de aplicação na área de custos de infraestrutura rodoviária, uma vez que organiza os parâmetros que afetam diretamente ou indiretamente os custos das obras. Fica claro que o trabalho acima desenvolvido apresenta consistente contribuição no processo de tomada de decisão em obras de infraestrutura rodoviária.

O trabalho desenvolvido mostrou a necessidade de serem feitas análises complementares sobre a viabilidade econômica de projetos de infraestrutura rodoviária, devendo ser considerado o máximo de fatores envolvidos no cômputo, uma vez que os parâmetros e suas respectivas importâncias variam segundo o contexto espaço - temporal. Nesse sentido, é preciso destacar a importância do papel do especialista nesse tipo de análise, porque a dependência espacial e temporal das variáveis requer a habilidade do especialista na atribuição dos pesos de cada parâmetro.

Mediante o conjunto de variáveis que interferem diretamente ou indiretamente no custo final da obra, é possível inferir que, isoladamente, alguns parâmetros não têm influência determinante no custo total da obra. No entanto, quando analisadas as correlações entre elas, fica demonstrado o grau de interferência na Viabilidade Econômica da obra.

Ao analisar o binômio IDH x Comprimento-Trecho na determinação da Viabilidade Econômica, ainda que analisados de forma conjugada, em melhores condições, o valor da associação a interferir na Viabilidade não supera o Risco de Prejuízo. Isso quer dizer que, num patamar crítico para o Comprimento-Trecho, seja qual for o valor de IDH, o valor da Viabilidade será baixo, refletindo prejuízo na obra, o que nos permite inferir que a influência mútua entre o IDH, Comprimento-Trecho e Viabilidade é complexa e está condicionada ao recorte espacial e temporal do projeto. Essa dependência espacial ocorre porque cada valor para

Comprimento-Trecho engloba fatores como acessibilidade, suporte da infraestrutura existente ou complexidade do terreno, entre outros. Esses fatores podem variar no espaço.

Nessa esteira, modelos multicritérios - baseados em Lógica *Fuzzy* - mostram-se alternativa coerente, face à possibilidade de se trabalhar com simulações e representação em intervalos, além da precisão na determinação da viabilidade econômica de rodovias. Portanto, o modelo construído contribui significativamente para a tomada de decisão mais assertiva e eficiente na composição de custos e verificação de viabilidade antes da construção de rodovias.

Outro fator importante a considerar é que os resultados, ao mostrarem que o desconforto pelo frio ser um fator mais impactante na Viabilidade econômica do que o desconforto pelo calor, corroboram com estudos anteriores e demonstram a consistência do modelo construído. Por sua vez, a precisão satisfatória do modelo *Fuzzy* apresentado indica, desta forma, sua aplicabilidade prática, ao testar resultados obtidos por meio de comparação com outras pesquisas publicadas.

Diante do exposto, está patente a importância do aprofundamento de estudos sobre custos rodoviários, visto que é um dos principais fatores elencados à tomada de decisão em todas as etapas construtivas - desde a concepção, projeto, implantação, operação, o controle e manutenção de uma rodovia - e a contribuição que o presente trabalho oferece para a facilitação no processo de tomada de decisão.

6. PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

6.1. Proposta de Aplicativo de Viabilidade Econômica para Obras Rodoviárias

Por meio da metodologia e resultados gerados nesta investigação é possível considerar a Viabilidade Estimada para uma obra rodoviária segundo parâmetros predeterminados. Considerando que o usuário tem experiência em obras rodoviárias ele atribui pesos para cada variável e o cálculo da viabilidade econômica é realizado ponderando as notas pelos respectivos pesos. Com o resultado obtido no modelo, é possível classificar a viabilidade do projeto rodoviário dentro de categorias: de "Muito Lucrativa" a "Prejuízo".

6.1.1. Interface do Aplicativo

O aplicativo será projetado com uma interface simples e didática, compatível com dispositivos móveis e computadores pessoais. Os usuários serão convidados a atribuir notas às variáveis mencionadas, e o aplicativo calculará a viabilidade estimada do projeto de forma

automática. Além disso, o aplicativo fornecerá informações claras sobre as implicações de cada intervalo de viabilidade estimada, auxiliando os usuários na interpretação dos resultados e tomada de decisões.

6.1.2. Escolha da Tecnologia

Para criar o aplicativo interativo e multiplataforma, propõe-se a utilização de tecnologias web, como HTML, CSS e JavaScript. Essa abordagem permite que o software seja acessado através de navegadores web em diferentes dispositivos, como PCs, tablets e smartphones, sem a necessidade de desenvolver versões específicas para cada plataforma.

6.1.3. Arquitetura do Aplicativo

O aplicativo poderá ser desenvolvido seguindo uma arquitetura de cliente-servidor, onde o cliente é responsável pela interação com o usuário e a exibição dos resultados, e o servidor realiza os cálculos da viabilidade econômica com base nas notas atribuídas pelo usuário. Essa abordagem permite separar a lógica de negócios da interface do usuário, facilitando a manutenção e possível evolução do sistema.

6.1.4. Front-End: Interface do Usuário

No front-end, poderá ser utilizado HTML, CSS e JavaScript para criar a interface do usuário do aplicativo. Assim, a interface será composta por uma série de elementos interativos, como botões e campos de entrada, que permitirão ao usuário atribuir notas às variáveis e observar a resposta e orientação final. Também poderá contar com a funcionalidade de exibir resultados parciais da viabilidade estimada e um atalho para possíveis sugestões de como melhorar cada nota atribuída.

6.1.5. Back-End: Lógica de Cálculo

No back-end, o especialista utilizará linguagem de programação para implementar a lógica de cálculo da viabilidade econômica. Essa parte do aplicativo será responsável por receber as notas enviadas pelo front-end e retornar os resultados para exibição ao usuário.

É importante considerar a integração entre o front-end e o back-end realizada por meio de requisições HTTP, a ser exibida ao usuário de forma clara e compreensível.

6.1.6 Responsividade e Adaptabilidade

Visto que o aplicativo proposto será projetado para ser usado tanto em dispositivos móveis quanto computador pessoal, é importante garantir que sua interface seja responsiva e se adapte a diferentes tamanhos de tela.

6.1.7. Testes e Validação

Até seu desenvolvimento final, o aplicativo deverá ser constantemente testado e validado para garantir seu funcionamento adequado e com precisão dos cálculos de viabilidade econômica. Deverão ser feitos testes unitários para verificar a corretude da lógica de cálculo e testes de integração para garantir a comunicação adequada entre o front-end e o back-end.

6.1.8. Propriedade Intelectual

A propriedade intelectual e patenteabilidade do aplicativo dependerá das leis de propriedade intelectual vigentes quando do seu desenvolvimento. Aspectos específicos e inovadores resultantes da implementação do aplicativo, como algoritmos ou processos técnicos, poderão ser protegidos por patente, desde que cumpram os requisitos de novidade, atividade inventiva e aplicação industrial.

6.1.9. Modelo de Negócio

Ao construir este aplicativo este também poderá compor um modelo de negócio, podendo ser ao final um Aplicativo Gratuito, com possibilidade de contribuições espontâneas ou pagamento de "freemium"; Aplicativo Pago, com ou sem "In-App Purchases"; e Modelo de Assinatura com ou sem direito às atualizações contínuas e suporte;

6.1.10. Hospedagem e Requisitos de Conectividade

O aplicativo poderá ser hospedado em diferentes ambientes, dependendo dos requisitos e preferências, destacando-se Nuvem ou Servidor Próprio. Quanto à conectividade, deverá ser considerado já na fase de se o aplicativo exigirá acesso à internet para funcionar ou se poderá ser usado offline.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9452: Inspeção de pontes, viadutos e passarelas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ABUADDOUS, M.; JA'FAR, A.; AL-BTOUSH, M. A. K.; ALKHERRET, A. J. Building information modeling strategy in mitigating variation orders in roads projects. **Civil Engineering Journal**, v. 6, n. 10, p. 1974-1982, 2020. <http://dx.doi.org/10.28991/cej-2020-03091596>.

ACHEAMPONG, A. O.; OPOKU, E. E. O.; DZATOR, J.; KUFUOR, N. K. Enhancing human development in developing regions: Do ICT and transport infrastructure matter? **Technological Forecasting and Social Change**, v. 180, p. 121725, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121725>.

AFOLAYAN, A.; ABIOLA SAMSON, O.; EASA, S.; MODUPE ALAYAKI, F.; FOLORUNSO, O. Reliability-based analysis of highway geometric elements: A systematic review. **Cogent Engineering**, v. 9, n. 1, p. 2004672, 2022. <https://doi.org/10.1080/23311916.2021.2004672>.

AGRAWAL, H. P.; BANSAL, H. O.; KUMAR, R.; SISODIA, Y. S. Design and real-time validation of PI and *Fuzzy* Logic tuned photovoltaic integrated DSTATCOM to improve power quality. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 60, p. 90158-90177, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-21910-7>.

AL-NUAIMI, S.; BANAWI, A. A. A.; AL-GHAMDI, S. G. Environmental and economic life cycle analysis of primary construction materials sourcing under geopolitical uncertainties: A case study of Qatar. **Sustainability**, v. 11, n. 21, p. 6000, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11216000>.

AL-ZWAINY, F. M. A state-of-the-art survey to estimate construction costs in highway and bridge projects: analytical diagnostic study. **International Journal of Civil Engineering and Technology**, v. 9, n. 5, p. 795-821, 2018.

ALATOOM, Y. I.; AL-SULEIMAN, T. I. Development of pavement roughness models using Artificial Neural Network (ANN). **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 13, p. 4622-4637, 2022. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1968396>.

ALAYUE, L. T.; GOSHU, B. S.; TAJU, E. Feature Extraction of Lung Cancer Using Image Analysis Techniques. **Romanian Journal of Biophysics**, v. 32, n. 3, p. 137-154, 2022.

ALMEIDA, C. D. D.; SANTOS, S. C.; GOMES, F. B. R.; CASTRO, S. R. O cenário latino-americano da sustentabilidade na indústria da construção civil: revisão sistemática. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 15, n. 2, p. 872-895.

AMORIM, A. E. B.; LABAKI, L. C.; MAIA, P. A.; BARROS, T. M. S.; MONTEIRO, L. R. Exposição ocupacional ao calor em atividades a céu aberto na construção de estruturas de edifícios. **Ambiente Construído**, v. 20, p. 231-245, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000100371>.

ANDRADE, P. F. Adaptações Adotadas por Sindicatos Laborais, com o Advento da Lei 13.467/2017 e o Fim da Contribuição Sindical Obrigatória e Compulsória. Monografia apresentada como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Direito do Centro Universitário Curitiba, 2021. 71 p.

ANWAR, A. M.; SANI, J. E.; HASSAN, I. I.; SHEHU, A. A.; AHIOME, R. B.; ABDULRAHMAN, B. Effect of defects on highway quality. **World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences**, v. 5, n. 2, p. 103-113, 2022. <https://doi.org/10.30574/wjaets.2022.5.2.0050>.

ARBOLEDA, L. A. B.; HULSE, P.; KRAMBECK, L.; ASCANIO-VILLABONA, J.; LENGERKE, O.; SANDOVAL, C. Development of an expert system based on fuzzy logic as support for heat pipes design. **Periodicals of Engineering and Natural Sciences**, v. 11, n. 1, p. 121-133, 2023. <http://dx.doi.org/10.21533/pen.v11i1.3077>.

BAETA, A. P. **Orçamento e Controle de Preços de Obras Públicas**. São Paulo: Editora Pini, 2012. 460 p.

BARRENO, F.; SANTOS, M.; ROMANA, M. G. A novel adaptive vehicle speed recommender fuzzy system for autonomous vehicles on conventional two-lane roads. **Expert Systems**, e13046, 2022. <https://doi.org/10.1111/exsy.13046>.

BARRETO, R. C. P.; RIBEIRO, A. J. M. Logística no Brasil: uma análise do panorama dos modais rodoviários e ferroviários no cenário nacional demonstrando as vantagens e desvantagens das referidas modalidades. **Revista Livre de Sustentabilidade e Empreendedorismo**, v. 5, n. 3, p. 145-176, 2020. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000100371>.

BARROS, L. B.; MARCY, M.; CARVALHO, M. T. Construction cost estimation of Brazilian highways using artificial neural networks. **International Journal of Structural and Civil Engineering Research**, v. 7, n. 3, p. 283-289, 2018. <https://doi.org/10.18178/ijscer.7.3.283-289>.

BEKTAŞ, N.; KEGYES-BRASSAI, O. Development in Fuzzy Logic-Based Rapid Visual Screening Method for Seismic Vulnerability Assessment of Buildings. **Geosciences**, v. 13, n. 1, p. 6, 2023. <https://doi.org/10.3390/geosciences13010006>.

BIELIATYNSKYI, A. et al. Peculiarities of the use of the cold recycling method for the restoration of asphalt concrete pavements. **Case Studies in Construction Materials**, v. 16, p. e00872, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00872>.

BIHL, T. et al. Artificial Neural Networks and Data Science. **In: Encyclopedia of Data Science and Machine Learning**, IGI Global, 2023, pp. 899-921. <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-9220-5.ch052>.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro, Brasil, 1999. Disponível em: http://ipr.dnit.gov.br/normas-manuais/manuais/documentos/706_manual_de_projeto_geometrico.pdf. Acesso em: 16 fev. 2023.

BRASIL. Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993. Regulamenta o art. 37, inciso XXI, da Constituição Federal - **Normas para licitações e contratos da Administração Pública**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L8666cons.htm. Acesso em: 12 fev. 2023.

BRONIEWICZ, E.; OGRODNIK, K. Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 83, p. 102351, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102351>.

CARDOSO, R. S. **Orçamento de obras em foco**. São Paulo: Oficina de Textos, 2021. 240 p.

CAVALLARO, F.; NOCERA, S. Flexible-route integrated passenger-freight transport in rural areas. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 169, p. 103604, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2023.103604>.

CESCA, R. S.; SANTOS, R. C.; GOES, R. H. T. e; BUSCHINELLI DE, F.; FAVARIM, A. P. C.; OLIVEIRA, M. S. G. de; SILVA, N. C. da. Thermal comfort of beef cattle in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. *Ciência e Agrotecnologia* (Online), v. 45, p. e008321-e008321, 2021. <https://doi.org/10.1590/1413-7054202145008321>.

CHEN, J.; ZHAO, C.; JIANG, S.; ZHANG, X.; LI, Z.; DU, Y. Safe, efficient, and comfortable autonomous driving based on cooperative vehicle infrastructure system. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, n. 1, p. 893, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20010893>.

CHEN, W.; ZHENG, M. Multi-objective optimization for pavement maintenance and rehabilitation decision-making: A critical review and future directions. *Automation in Construction*, v. 130, p. 103840, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103840>.

CHO, H.; LEE, J. Does transportation size matter for competitiveness in the logistics industry? The cases of maritime and air transportation. *The Asian Journal of Shipping and Logistics*, v. 36, n. 4, p. 214-223, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ajsl.2020.04.002>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de rodovias 2021**. Brasília: SEST SENAT, 2021.

COSTA, Á.; CRUZ, C. O.; SARMENTO, J. M.; SOUSA, V. F. Bundling Road and Railway Infrastructure Operators: Analysis of the Impact on Efficiency. *Journal of Infrastructure Systems*, v. 29, n. 1, p. 04023001, 2023. <https://doi.org/10.1061/JITSE4.ISENG-2106>.

CUNHA, A. P.; MACHADO, B. V.; CLAUDIO, F. P.; SILVA, G. L. T.; COSTA, M. P. D. C.; SANTOS, P. D. D. J. Sustentabilidade na ferrovia brasileira: destinação de resíduos como uma abordagem estratégica de negócio. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão do Negócio) - Fundação Dom Cabral; Instituto de Transporte e Logística, Belo Horizonte, 2022. 84p.

DA ROSA, A. M.; VIEIRA, G. B. B. Transporte ferroviário de cargas: estudo comparativo dos modelos existentes e proposições para o caso brasileiro. *Revista Gestão Industrial*, v. 15, n. 2. <https://doi.org/10.3895/gi.v15n2.8823>.

DA SILVA, C. A. B. Sistemas especialistas para economistas rurais: potencial e relevância. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 28, n. 2, p. 155-174, 2020.

DA SILVA, C. R. L.; DA COSTA JÚNIOR, F. R.; DA COSTA, U. L.; ARAÚJO, L. L. F. Comparativo entre os custos orçados com os referenciais de composição SINAPI e o custo executado: estudo de uma obra em João Pessoa-PB. **Revista Mangaio Acadêmico**, v. 5, n. 1, p. 107-136, 2020.

DA SILVA, G. I.; DE SOUZA, S. F. F.; JÚNIOR, J. B. C.; LUCENA, R. L. Influência da arborização na modificação microclimática em cidades de pequeno porte do Semiárido brasileiro: o estudo de caso de Caicó. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 14, n. 1, p. 94-105, 2020.

DA SILVA, L. M.; SANTOS, R. O. G. Estudo comparativo: método empírico do DNIT e mecanístico-empírico (Medina) no dimensionamento de pavimentos flexíveis. **Engineering Sciences**, v. 9, n. 1, p. 114-124, 2021. <https://doi.org/10.6008/CBPC2318-3055.2021.001.0012>.

DAER - Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem. **Instruções de serviço para elaboração de projeto de infraestrutura de transporte**. 2. ed. Porto Alegre, 2023. Disponível em: <https://www.daer.rs.gov.br/upload/arquivos/202302/27144121-2023-02-daer-instrucoes-servico-projeto-rev02.pdf>. Acesso em: 06 fev. 2023.

DE AGUIAR, T. A. S.; DE MELO, Â. C. A.; YOSHI, C. V. H.; CAINZOS, R. L. P. Viabilidade da aplicação do resíduo sólido da construção civil como agregado reciclável em pavimentos asfálticos. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, v. 38, n. especial, p. 82-104, 2022.

DE BORTOLI, A.; FÉRAILLE, A.; LEURENT, F. Towards Road Sustainability—Part I: Principles and Holistic Assessment Method for Pavement Maintenance Policies. **Sustainability**, v. 14, n. 3, p. 1513, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14031513>.

DE LUNA, F. C.; FREITAS, F. B. **Sustentabilidade em Canteiros de Obras**. Epitaya E-books, v. 1, n. 6, p. 311-337, 2021. <https://doi.org/10.47879/ed.ep.2021250p311>.

DE OLIVEIRA, F. A.; DE SOUSA, L. G. A.; GOMES, W. S. Produtividade na orçamentação: estudo da produtividade orçamentária em um edifício residencial com três pavimentos. **PARAMÉTRICA**, v. 14, n. 2, 2022.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. DNIT 031/2010-ES-P e DNIT 134/2010 - ME: **Pavimentação**. Rio de Janeiro, 2010a.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Implantação Básica de Rodovia**. 3. ed. - Rio de Janeiro, (IPR. Publ. 742), 2010b. 617p.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Diretrizes Básicas para Elaboração de Estudos e Projetos Rodoviários**. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/covide-estudos-de-viabilidade>. Acesso em 06 fev 2023.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Custos de Obras Rodoviárias**. (comunicação pessoal, em Brasília, Distrito Federal, out. 2022).

DO NASCIMENTO, V. V. F., SILVA, A. B., SOUZA, C. D., PEREIRA, E. F., GOMES, F. H., & RODRIGUES, G. H. Análise logística na produção de grãos no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 7, p. e47911730597-e47911730597, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.30597>.

DUARTE, N. C.; DA SILVA, O. H. Analysis of the use of solid waste in road asphalt coatings: a literature review: Análise da utilização de resíduos sólidos em revestimentos asfálticos rodoviários: uma revisão da literatura. **Concilium**, v. 23, n. 7, p. 243-261, 2023. <https://doi.org/10.53660/CLM-1195-23E20B>.

EDDULA, S. V.; PERAKA, N. S. P.; BILIGIRI, K. P. Stakeholder-Oriented Optimization of Pavement Maintenance Interventions Using Multi-Criteria Decision-Making Approach. **International Journal of Pavement Research and Technology**, p. 1-13, 2023. <https://doi.org/10.1007/s42947-022-00269-5>.

ELMOUSALAMI, H. H. Artificial intelligence and parametric construction cost estimate modeling: State-of-the-art review. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 146, n. 1, p. 03119008, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001678](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001678).

ESTEVES, A. V. et al. Análise probabilística de estacas metálicas via método FORM: estudo de caso. **South American Journal of Basic Education, Technical and Technological**, v. 8, n. 2, p. 761-799, 2021.

FARIA, R. M. Mapeamento da sensação térmica e da aridez no Estado do Rio Grande do Norte. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia do Centro de Ensino Superior do Seridó, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2022. 80p.

FAUGÈRE, L.; WHITE III, C.; MONTREUIL, B. Mobile access hub deployment for urban parcel logistics. **Sustainability**, v. 12, n. 17, p. 7213, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12177213>.

FAUZI, N. F. M.; ROSLAN, N. N. R.; RIDZUAN, M. I. M. Reliability performance of distribution network by various probability distribution functions. **International Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 13, n. 2, p. 2316, 2023. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i2.pp2316-2325>.

FENG, H.; ZHANG, Y. Research on the Multi-attribute Evaluation Model for the Investment Results of County-level Highways in New Urbanization. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 26, n. 12, p. 4893-4911, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12205-022-1687-8>.

FERNANDES, E. P.; SALATINI, P. C.; BREKAILO, F. Dimensionamento de reforço de pavimento pelo software Medina e seu impacto nos serviços de conservação de rodovias do DER/PR. **Revista Técnico-Científica**, p. 1-13, 2022.

FLODÉN, J.; WOXENIUS, J. A stakeholder analysis of actors and networks for land transport of dangerous goods. **Research in Transportation Business & Management**, v. 41, p. 100629, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2021.100629>.

GARDNER, B. J.; GRANSBERG, D. D.; JEONG, H. D. Reducing Data-Collection Efforts for Conceptual Cost Estimating at a Highway Agency. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 142, n. 11, p. 04016047, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0001174](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001174).

GERHÁTOVÁ, Z.; ZITRICKÝ, V.; K LAPITA, V. Industry 4.0 implementation options in railway transport. **Transportation Research Procedia**, v. 53, p. 23-30, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.003>.

GONÇALVES, B. C. S.; DA SILVA PEREIRA, D.; SPECHT, L. P.; PINHEIRO, R. J. B. Avaliação da centrífuga rotarex na determinação do teor de ligante e granulometria de diferentes concretos asfálticos. **Transportes**, v. 28, n. 3, p. 75-90, 2020. <https://doi.org/10.14295/transportes.v28i1.1841>.

GRIGG, N. S. Unbundling Infrastructures to Identify Attractive Public-Private Infrastructure Partnerships in the United States. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 24, n. 2, p. 04018006, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IS.1943-555X.0000422](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000422).

GUO, K.; YANG, Z.; YU, C. H.; BUEHLER, M. J. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials. **Materials Horizons**, v. 8, n. 4, p. 1153-1172, 2021. <https://doi.org/10.1039/D0MH01451F>.

GUPTA, A.; AFRIN, T.; SCULLY, E.; YODO, N. Advances of UAVs toward future transportation: The state-of-the-art, challenges, and opportunities. **Future transportation**, v. 1, n. 2, p. 326-350, 2021. <https://doi.org/10.3390/futuretransp1020019>.

HARBIANKOVA, A.; GERTSBERG, L. Information Model for Sustainable Rural Development. **Energies**, v. 15, n. 11, p. 4009, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15114009>.

ILIASHENKO, O.; ILIASHENKO, V.; LUKYANCHENKO, E. Big data in transport modelling and planning. **Transportation Research Procedia**, v. 54, p. 900-908, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.02.145>.

JAHANI, N.; SEPEHRI, A.; VANDCHALI, H. R.; TIRKOLAEI, E. B. Application of industry 4.0 in the procurement processes of supply chains: a systematic literature review. **Sustainability**, v. 13, n. 14, p. 7520, 2021. <https://doi.org/10.3390/su13147520>.

JETTER, A. J.; KOK, K. Fuzzy Cognitive Maps for futures studies - A methodological assessment of concepts and methods. **Futures**, v. 61, p. 45-57, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2014.05.002>.

JOMNONKWAO, S.; UTTRA, S.; RATANAVARAHA, V. Forecasting road traffic deaths in Thailand: Applications of time-series, curve estimation, multiple linear regression, and path analysis models. **Sustainability**, v. 12, n. 1, p. 395, 2020. <https://doi.org/10.3390/su12010395>.

KADYRALIEV, A., SUPAEVA, G., BAKAS, B., DZHOLDOSHEVA, T., DZHOLDOSHEV, N., BALOVA, S., ... KRINICHANSKY, K. Investments in transport infrastructure as a factor of stimulation of economic development. **Transportation Research Procedia**, v. 63, p. 1359-1369, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.146>.

KANG, E., LEE, R., YOON, J., CHO, H., KIM, D. Uncertainty Assessment of Mean Radiant Temperature Estimation for Indoor Thermal Comfort Based on Clustering Analysis of Reduced-Input Surfaces. **Buildings**, v. 13, n. 2, p. 342, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13020342>.

KARTHICK, S., KERMANSHACHI, S., PAMIDIMUKKALA, A., NAMIAN, M. A review of construction workforce health challenges and strategies in extreme weather conditions. **International journal of occupational safety and ergonomics**, v. 29, n. 2, p. 773-784, 2023. <https://doi.org/10.1080/10803548.2022.2082138>.

KASSA, Y. F. Determinants of infrastructure project delays and cost escalations: the cases of federal road and railway construction projects in Ethiopia. **American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)**, v. 63, n. 1, p. 102-136, 2020.

KHANANI, R. S., ADUGBILA, E. J., MARTINEZ, J. A., PFEFFER, K. The impact of road infrastructure development projects on local communities in peri-urban areas: the case of Kisumu, Kenya and Accra, Ghana. **International journal of community well-being**, v. 4, n. 1, p. 33-53, 2021. <https://doi.org/10.1007/s42413-020-00077-4>.

KHODABAKHSHIAN, A., PUOLITAIVAL, T., KESTLE, L. Deterministic and Probabilistic Risk Management Approaches in Construction Projects: A Systematic Literature Review and Comparative Analysis. **Buildings**, v. 13, n. 5, p. 1312, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13051312>.

KURUVACHALIL, L., SANDANAYAKE, M., KUMANAYAKE, R., RADHAKRISHNA. Carbon Emission and Cost Analysis of Using Hybrid Fibre White Topping Overlays - A Road Rehabilitation Feasibility Study. **Future Transportation**, v. 2, n. 1, p. 263-280, 2022. <https://doi.org/10.3390/futuretransp2010014>.

LANZARO, G., ANDRADE, M. A fuzzy expert system for setting Brazilian highway speed limits. **International journal of transportation science and technology**, v. 12, n. 2, p. 505-524, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.05.003>.

LAURANCE, W. F., CLEMENTS, G. R., SLOAN, S., O'CONNELL, C. S., MUELLER, N. D., GOOSEM, M., ... ARREA, I. B. A global strategy for road building. **Nature**, v. 513, n. 7517, p. 229-232, 2014. <https://doi.org/10.1038/nature13717>.

LI, J., XIAO, F., ZHANG, L., AMIRKHANIAN, S. N. Life cycle assessment and life cycle cost analysis of recycled solid waste materials in highway pavement: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 233, p. 1182-1206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.061>.

LIANG, X., LIU, Z., WANG, J., JIN, X., DU, Z. Uncertainty quantification-based robust deep learning for building energy systems considering distribution shift problem. **Applied Energy**, v. 337, p. 120889, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120889>.

LYRA, B. A. S. Roteiro para elaboração de orçamento de conserva de sinalização rodoviária através da metodologia SICRO-DNIT. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – RJ, 2022, 62p.

MACEDO, L. A. A tipificação penal do superfaturamento de obras públicas. **Revista do Instituto de Ciências Penais**, v.4, p.211-251, 2019.

MANDANI, E. H. **Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB**. New York: Springer, 1996. 296p.

MARCUSSO, R. A. **Estigma social do lugar**. Ed. Paco e Littera, 2021. 301p.

MARKOLF, S. A., HOEHNE, C., FRASER, A., CHESTER, M. V., UNDERWOOD, B. S. Transportation resilience to climate change and extreme weather events – Beyond risk and robustness. **Transport policy**, v. 74, p. 174-186, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.003>.

MATLAB [Software de computador]. Versão 9.2. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2017.

MATTOS, A. D. **Como preparar orçamentos de obras**. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 184p.

MAUÉS, L. M. F., SÁ, J. A. S. D., COSTA, C. T. D., KERN, A. P., DUARTE, A. A. A. M. Construction duration predictive model based on factorial analysis and fuzzy logic. **Ambiente Construído**, v. 19, p. 115-133, 2019. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212019000400346>.

MOGHBEL, M. Evaluation of the human thermal discomfort index in different phases of North-Caspian Sea Patterns (NCP) in southern coasts of Caspian Sea, Iran. **Climate Change Research**, v. 1, n. 4, p. 1-9, 2020. <https://doi.org/10.30488/CCR.2020.236996.1007>.

MOHAMMADI, A., IGWE, C., AMADOR-JIMENEZ, L., NASIRI, F. Applying lean construction principles in road maintenance planning and scheduling. **International journal of construction management**, v. 22, n. 12, p. 2364-2374, 2022. <https://doi.org/10.1080/15623599.2020.1788758>.

MORAIS, J. V. D. Efeitos das emendas parlamentares sobre o planejamento orçamentário das políticas de infraestrutura rodoviária federais. Dissertação de Mestrado – FGV: Escola Brasileira de Administração Pública e de Empresas, 2022. 153p.

MT - MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES. Departamento de Planejamento e Avaliação da Política de Transportes. **Sistema de Custos Referenciais de Obras - SICRO**. Versão 2013. Brasília, DF: DECRETO N° 7.983/2013 SICRO.

NAUTIYAL, A., SHARMA, S. Methods and factors of prioritizing roads for maintenance: a review for sustainable flexible pavement maintenance program. **Innovative infrastructure solutions**, v. 7, n. 3, p. 190, 2022. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00771-6>.

NGUYEN, D. T., LE-HOAI, L., TARIGAN, P. B., TRAN, D. H. Tradeoff time cost quality in repetitive construction project using fuzzy logic approach and symbiotic organism search algorithm. **Alexandria Engineering Journal**, v. 61, n. 2, p. 1499-1518, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.058>.

NI, S., ZHU, N., HOU, Y., ZHANG, Z. Research on indoor thermal comfort and energy consumption of zero energy wooden structure buildings in severe cold zone. **Journal of Building Engineering**, v. 67, p. 105965, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.105965>.

OLIVEIRA, A. L., ARAUJO, R. D. C. Estabilização do solo com adição de cimento para fins de pavimentação em vias de baixo volume de tráfego. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 15, n. 1, 2023.

OLOWOSULU, A. T., KAURA, J. M., MURANA, A. A., ADEKE, P. T. Development of framework for performance prediction of flexible road pavement in Nigeria using Fuzzy logic theory. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 23, n. 11, p. 3809-3818, 2022. <https://doi.org/10.1080/10298436.2021.1922907>.

ONO, H. S. P., KAWAMURA, T. Sensible climates in monsoon Asia. **International Journal of Biometeorology**, v. 35, p. 39-47, 1991. <https://doi.org/10.1007/BF01040962>.

ORETO, C., BIANCARDO, S. A., ABBONDATI, F., VEROPALUMBO, R. Leveraging Infrastructure BIM for Life-Cycle-Based Sustainable Road Pavement Management. **Materials**, v. 16, n. 3, p. 1047, 2023. <https://doi.org/10.3390/ma16031047>.

ORTEGA, F. D. P. R., FILLA, J. C., ARREBOLA, D. L. C. C. Comparativo de pavimentação asfáltica flexível e rígida nas rodovias Brasileiras. **Revista Terra & Cultura: Cadernos de Ensino e Pesquisa**, v. 38 (especial), p. 438-459, 2022.

PALIT, T., BARI, A. M., KARMAKER, C. L. An integrated Principal Component Analysis and Interpretive Structural Modeling approach for electric vehicle adoption decisions in sustainable transportation systems. **Decision Analytics Journal**, v. 4, p. 100119, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2022.100119>.

PANERU, S., JEELANI, I. Computer vision applications in construction: Current state, opportunities & challenges. **Automation in Construction**, v. 132, p. 103940, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103940>.

PATCHARACHAVALIT, N., LIMSAWASD, C., ATHIGAKUNAGORN, N. Multiobjective Optimization for Improving Sustainable Equipment Options in Road Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 149, n. 1, p. 04022160, 2023. <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-12544>.

PATEL, V., CHESMORE, A., LEGNER, C. M., PANDEY, S. Trends in workplace wearable technologies and connected-worker solutions for next-generation occupational safety, health, and productivity. **Advanced Intelligent Systems**, v. 4, n. 1, p. 2100099, 2022. <https://doi.org/10.1002/aisy.202100099>.

PATEL, D., PATEL, S., PATEL, P., SHAH, M. Solar radiation and solar energy estimation using ANN and Fuzzy logic concept: A comprehensive and systematic study. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 22, p. 32428-32442, 2022. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19185-z>.

PEDROZO, L. G. Custos da infra-estrutura rodoviária: análise e sistematização. Trabalho Parcial de Conclusão de Curso Mestrado em Engenharia – Ênfase Transportes UFRS, Porto Alegre, 2001.

PEREIRA, J. I. A., SANCHES, A. E., LIMA, J. P., PINHEIRO, É. C. N. M. Tipos de asfalto (CBUQ, AAUQ e RAP): imprimação e pintura de ligação: Types of asphalt (CBUQ, AAUQ and RAP): printing and painting connection. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 11, p. 73916-73933, 2022. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n11-208>.

PETROUTSATOU, K., APOSTOLIDIS, N., ZARKADA, A., NTOKOU, A. Dynamic planning of construction site for linear projects. **Infrastructures**, v. 6, n. 2, p. 21, 2021. <https://doi.org/10.3390/infrastructures6020021>.

PETROUTSATOU, K., VAGDATLI, T., MARAVAS, A. Probabilistic approach of pre-estimating life-cycle costs of road tunnels. **Structure and Infrastructure Engineering**, p. 1-16, 2023. <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2165120>.

PEXELS. As melhores fotos profissionais gratuitas e imagens e vídeos livres de royalties que os criadores compartilharam. Disponível em: <https://www.pexels.com/pt-br/>. Acesso em: 12 fev. 2023.

PILGER, J. D., MACHADO, E. L., DE ASSIS LAWISCH-RODRIGUEZ, A., ZAPPE, A. L., RODRIGUEZ-LOPEZ, D. A. Environmental impacts and cost overrun derived from adjustments of a road construction project setting. **Journal of Cleaner Production**, v. 256, p. 120731, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120731>.

PISANIELLO, D., DI CORLETO, R. **Heat exposure and occupational health**. In Heat Exposure and Human Health in the Context of Climate Change, pp. 109-131. Elsevier, 2023. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819080-7.00004-5>.

PRADO LIMA, J. A., MENDONÇA, W. D., VERGILIO, S. R., ASSUNÇÃO, W. K. Cost-effective learning-based strategies for test case prioritization in continuous integration of highly-configurable software. **Empirical Software Engineering**, v. 27, n. 6, p. 133, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10664-021-10093-3>.

RAHMAN, M. A., FRANCESCHI, E., PATTNAIK, N., MOSER-REISCHL, A., HARTMANN, C., PAETH, H., ... & PAULEIT, S. Spatial and temporal changes of outdoor thermal stress: influence of urban land cover types. **Scientific reports**, v. 12, n. 1, p. 671, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04669-8>.

RAMOS, G. L. A. Levantamento de análise das manifestações patológicas em pontes: Estudo de caso da ponte na avenida NS-03. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil pelo Centro Universitário Luterano de Palmas. Palmas – TO, 2020, 72p.

RANYAL, E., SADHU, A., JAIN, K. Road condition monitoring using smart sensing and artificial intelligence: A review. **Sensors**, v. 22, n. 8, p. 3044, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22083044>.

RUANE, P., WALSH, P., COSGROVE, J. Using Simulation Optimization to Improve the Performance of an Automated Manufacturing Line. **Procedia Computer Science**, v. 217, p. 630-639, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.12.259>.

SALOMÃO, P. E. A., DE MELLO PEREIRA, R., DE CARVALHO, P. H. V., RIBEIRO, P. T. A importância dos serviços de conservação em rodovias pavimentadas. **Research, Society and Development**, v. 8, n. 8, e16881189, 2019. <https://doi.org/10.33448/rsd-v8i8.1189>.

SANTOS, E. F., PARREIRA, A. B. Estudo Comparativo de Diferentes Sistemas de Classificações Geotécnicas Aplicadas aos Solos Tropicais. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. 145p. <https://doi.org/10.11606/D.18.2006.D.18.2006.tde-29052007-163758>.

SANTOS, P. S., AZEVEDO, D. B., ALVES, L. G. S., MAGALHÃES, L. L. K. Modelos tecnológicos aplicados na agropecuária brasileira e suas dimensões sociotécnicas e ambientais. **Desafio Online**, v. 5, n. 2, p. 221-241, 2017.

SHARMA, V., MEHDI, M. M. Oxidative stress, inflammation and hormesis: The role of dietary and lifestyle modifications on aging. **Neurochemistry International**, 105490, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.neuint.2023.105490>.

SILVA, T. E., CÂMARA, M. Y., SOBRINHO, B. E., SILVA, P. C., VIEIRA, J. F., SARKIS, J. M., ... ANHAIA, C. A. Metodologia de Avaliação de Inspeções em Obras de Arte Especiais das Rodovias sob Administração Federal. In: XII Congresso Nacional de Pontes e Estruturas, 2021, 11p.

SQUISATTI, M. F., NISHIYAMA, M. S., SCOARIS, M. R. Obras públicas: uma análise sistêmica de projeto, orçamento, licitação e fiscalização com ênfase em serviços de restauração de pavimentos com revestimento primário. Edição Especial RESTEC POP 2020-2022. **Revista Técnico-Científica**, p. 1-16.

SRIVASTAVA, P., MUSTAFA, A., KHANDUJA, D., CHOWDHARY, S. K., KUMAR, N., SHUKLA, R. K. Prioritizing autonomous maintenance system attributes using fuzzy EDAS approach. **Procedia Computer Science**, v. 167, p. 1941-1949, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.03.217>.

ŠTILIĆ, A., PUŠKA, A. Integrating Multi-Criteria Decision-Making Methods with Sustainable Engineering: A Comprehensive Review of Current Practices. **Eng**, v. 4, n. 2, p. 1536-1549, 2023. <https://doi.org/10.3390/eng4020088>.

SUN, J., CHEN, Q. Optimization of extraction process based on neural network. **Asian Journal of Chemical Sciences**, v. 11, n. 2, p. 19-27, 2022. <https://doi.org/10.9734/ajocs/2022/v11i219117>.

SURUCU, O., GADSDEN, S. A., YAWNEY, J. Condition Monitoring using Machine Learning: A Review of Theory, Applications, and Recent Advances. **Expert Systems with Applications**, v. 221, p. 119738, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.119738>.

TEIXEIRA, N. N., DE JESUS, D. S., VIEIRA, J. R. S. Análise do Traçado Geométrico e Desempenho de Segurança do Trecho Curvo Localizado no Km 448 da Rodovia BR-101. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 1, p. e29612139738-e29612139738, 2023. <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i1.39738>.

UMAR, T., EGBU, C. Heat stress, a hidden cause of accidents in construction. **In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers–Municipal Engineer**, v. 173, p. 49-60, 2020. <https://doi.org/10.1680/jmuen.18.00004>.

VALENÇA, D. V. C.; KRUGER, P. Análise de ferramentas de gestão e compilação de dados no planejamento e na gerência da malha rodoviária do DER/PR. **Revista Técnico-Científica**, p. 1-19, 2022.

WANG, T.; QU, Z.; YANG, Z.; NICHOL, T.; DIMITRIU, D.; CLARKE, G.; BOWDEN, D. How can the UK road system be adapted to the impacts posed by climate change? By creating a climate adaptation framework. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 77, p. 403-424, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.02.007>

WANG, X.; CHEN, Y.; JIN, J.; ZHANG, B. Fuzzy-clustering and fuzzy network based interpretable fuzzy model for prediction. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 16279, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20015-y>

XIA, T.; ZHU, X.; WANG, L. Layout Planning of Container Piggyback Transport Stations Based on Road-Railway Intermodal Transportation. **In: LISS 2020: Proceedings of the 10th International Conference on Logistics, Informatics and Service Sciences** (pp. 231-243). Springer Singapore, 2021. https://doi.org/10.1007/978-981-33-4359-7_17

XIE, S.; LAWNICZAK, A. T.; HAO, J. Modelling Autonomous Agents' Decisions in Learning to Cross a Cellular Automaton-Based Highway via Artificial Neural Networks. **Computation**, v. 8, n. 3, p. 64, 2020. <https://doi.org/10.3390/computation8030064>

YADAV, J. Fuzzy Logic and Fuzzy Set Theory: Overview of Mathematical Preliminaries. **In: Fuzzy Systems Modeling in Environmental and Health Risk Assessment**. p. 11-29, 2023. <https://doi.org/10.1002/9781119569503.ch1>

YAN, Y.; XU, Y.; YUE, S. A high-spatial-resolution dataset of human thermal stress indices over South and East Asia. **Scientific data**, v. 8, n. 1, p. 229, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-01010-w>

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

ZAROR, U. A.; MIURA, M. N. Avaliação financeira das interferências no cronograma durante a execução da obra do viaduto na BR 277, km 585, na cidade de Cascavel-PR. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, v. 7, n. 2, p. 567-581, 2020. <https://doi.org/10.48075/comsus.v7i2.21091>.

ZHANG, W.; LI, B.; LIU, Z.; ZHANG, B. Application of improved fuzzy comprehensive evaluation method in karst groundwater quality evaluation: a case study of Cengong county. **Earth Science Informatics**, v. 14, p. 1101-1109, 2021. <https://doi.org/10.1007/s12145-021-00611-8>

ZHAO, J.; SUN, G.; WEBSTER, C. Does China-Pakistan Economic Corridor improve connectivity in Pakistan? A protocol assessing the planned transport network infrastructure. **Journal of Transport Geography**, v. 100, p. 103327, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103327>

ZHENG, P.; WU, H.; LIU, Y.; DING, Y.; YANG, L. Thermal comfort in temporary buildings: A review. **Building and Environment**, v. 109262, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109262>

ZITOUNI, R.; BEZINE, H.; AROUS, N. Online handwritten scripts classification using fuzzy attributed relational graphs. **International Journal of Machine Learning and Cybernetics**, p. 1-18, 2023. <https://doi.org/10.1007/s13042-023-01772-2>

APÊNCICE 1

Projeto	Extensão (km)	Vel. Diretriz (km/h)	Prazo execução (dias)	DMT CAP (km)	DMT Areia (km)	DMT cimento (km)	DMT aço (km)	Escavação (m3)	Aterro (m3)	CBUQ (t)	SEI DNIT	Quant OAE	Custo real
1	18,1	80	540	739	46	361	344	695.036	558.210	16890	2ª categoria	2	R\$ 50.862.268,00
2	18,7	60	540	509	147	182	57	576.833	466.392	20271	1ª categoria	0	R\$ 48.865.766,00
3	30	60	720	300	310	297	296	824.540	741.900	30300	1ª categoria	0	R\$ 41.389.475,00
4	36,8	80	600	602	218	474	300	943.014	754.789	31723	1ª categoria	0	R\$ 51.257.616,00
5	39,25	60	900	319	60	200	200	585.679	366.243	76630	1ª categoria	1	R\$ 75.122.960,00
6	40,3	80	720	1753	27	1468	1339	501.980	488.418	24167	1ª categoria	0	R\$ 43.654.837,00
7	41,5	100	720	1081	35	397	930	1.062.597	837.273	41832	2ª categoria	0	R\$ 57.079.879,00
8	44,1	100	540	1845	128	113	269	1.273.370	979.516	82492	2ª categoria	0	R\$ 57.243.744,00
9	45,5	80	720	748	51	334	334	664.651	511.270	75296	2ª categoria	2	R\$ 67.211.175,00
10	51,9	120	900	385	50	118	193	2.627.192	1.984.057	123834	3ª categoria	0	R\$ 121.351.789,00
11	60	80	900	1504	26	307	307	1.086.804	839.231	53914	3ª categoria	0	R\$ 37.023.063,00
12	61,4	80	720	313	89	174	800	2.902.033	2.232.333	72260	3ª categoria	3	R\$ 100.307.642,00
13	67,3	80	1080	966	24	513	815	1.304.625	1.003.557	67803	3ª categoria	0	R\$ 95.283.090,00
14	70,9	60	900	1001	38	780	192	917.195	705.534	73225	1ª categoria	0	R\$ 98.036.062,00
15	74,1	80	540	367	17	46	311	2.280.383	1.717.389	79154	3ª categoria	11	R\$ 118.364.357,00
16	79,3	120	360	116	26	356	312	961.849	730.519	2915	2ª categoria	4	R\$ 37.708.925,00
17	79,3	120	1080	1964	165	372	408	2.405.450	1.850.346	156876	3ª categoria	0	R\$ 160.047.200,00
18	81,61	80	1080	1384	2	1516	1408	2.629.173	2.038.516	52737	3ª categoria	0	R\$ 122.268.572,00
19	102,3	60	900	881	61	693	105	2.736.204	2.114.774	116700	3ª categoria	1	R\$ 237.365.367,00
20	117,14	80	900	397	128	265	265	1.169.380	1.478.424	134226	3ª categoria	0	R\$ 304.268.815,00

Fonte: DNIT (Comunicação pessoal, 2022)