Industrialização, Digitalização, Desempenho

5º Simpósio Brasileiro de Tecnologia da Informação e Comunicação na Construção e 5º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivos

FLORIANÓPOLIS-SC | 20 a 22 de agosto

[1]VERIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DE REQUISITOS DE GEOMETRIA EM PROJETOS DE NOVAS FERROVIAS COM UTILIZAÇÃO DE IA GENERATIVA

David Gurion Tiago
Vale | São Luís, Maranhão | david.gurion@vale.com

Dalila Carvalho de Almeida Filippetto Pires
Vale | Belo Horizonte, Minas Gerais | dalila.filippetto@vale.com

Raiane da Costa Virgilio
Vale | Belo Horizonte, Minas Gerais | raiane.virgilio@vale.com

Jorge Augusto Azevedo Diniz
Vale | Belo Horizonte, Minas Gerais | jorge.azevedo2@vale.com

RESUMO

A verificação da geometria das curvas horizontais em Projetos Ferroviários inclui a análise e cálculo de requisitos como raio, desenvolvimento da curva circular, ângulo central, superelevação, dentre outros de forma manual, morosa e amostral. A baixa produtividade compromete os prazos de Engenharia e implantação das ferrovias. Outro impacto relevante consiste na baixa qualidade do projeto e retrabalhos materializados em revisões e mão de obra parada durante a obra. Esse trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida para verificação automatizada de parâmetros de geometria em Projetos Ferroviários visando otimizar o tempo de avaliação e aumentar sua produtividade. A metodologia consiste na extração dos parâmetros de geometria a partir da ferramenta AutoCAD Civil 3D e posterior verificação pelo Copilot utilizando prompts de comando desenvolvidos. A análise compara os parâmetros do projeto desenvolvido pela projetista com os requisitos estabelecidos em normas e/ou regulamentos internos da Vale e, ao final, indica as violações, caso ocorram. Os principais ganhos consistem na otimização do tempo de análise dos parâmetros de em média 2 horas para 5 minutos, no aumento da qualidade do projeto, uma vez que a análise deixa de ser amostral e passa a ser completa, e na maior disponibilidade da equipe para estudos inovadores.

Palavras-chave: IA generativa. Copilot. Ferrovias. Geometria. Projetos.

ABSTRACT

The verification of the geometry of horizontal curves in Railway Designs includes the analysis and calculation of requirements such as radius, development of the circular curve, central angle, superelevation, among others, in a manual, time-consuming and sample-based manner. Low productivity compromises the engineering and implementation deadlines of railways. Another relevant impact is the low quality of the project and rework materialized in revisions and downtime during the construction. This work presents a methodology developed for the automated verification of geometry parameters in Railway Projects, aiming to optimize the evaluation time and increase its productivity. The methodology consists of extracting the geometry parameters from the AutoCAD Civil 3D tool and subsequent verification by Copilot using developed command prompts. The analysis compares the parameters of the project developed by the designer with the requirements established in Vale's internal standards and/or regulations and, at the end, indicates the violations, if any. The main benefits consist of optimizing the time taken to analyze parameters from an average of 2 hours to 5 minutes, increasing the quality of the project, since the analysis is no longer sample-based and becomes complete, and increasing the team's availability for innovative studies.

Keywords: *Generative AI. Copilot. Railway. Geometry. Design.*

1 INTRODUÇÃO

A verificação de parâmetros de geometria em projetos de novas ferrovias é uma etapa essencial para garantir a viabilidade técnica, conformidade com as normas, segurança e eficiência. A complexidade e criticidade dos projetos de infraestrutura ferroviária exigem processos rigorosos de verificação e análise que demandam tempo substancial até a aprovação final. Durante a verificação, são analisados parâmetros como raio mínimo, desenvolvimento da curva circular, ângulo central, superelevação, comprimento de transição, superlargura, raio vertical, rampas máximas, dentre outros.

A morosidade na análise compromete diretamente os cronogramas de engenharia e implantação, gerando atrasos que impactam toda a cadeia de execução do projeto. Adicionalmente, a geometria do traçado ferroviário é um dos elementos mais críticos no desempenho e na segurança de uma ferrovia. Falhas no projeto geométrico — como erros na definição de raios de curva, superelevação, transições e alinhamentos

[1]TIAGO, D. G.; PIRES, D. C. A. F.; VIRGILIO, R. C.; DINIZ, J. A. A. Verificação Automatizada de Requisitos de Geometria em Projetos de Novas Ferrovias com Utilização de IA Generativa. In: 5º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 4., 2025, Florianópolis. **Anais [...].** Porto Alegre: ANTAC, 2025.

— podem gerar consequências significativas tanto na fase de implantação quanto na operação conforme descrito a seguir:

1.1 Impactos na Implantação de Obras

- Retrabalhos e atrasos: Projetos com erros geométricos exigem correções em campo, o que pode demandar reescavações, reposicionamento de infraestrutura e ajustes em obras de arte especiais (pontes, túneis), gerando atrasos e aumento de custos;
- Paralisações de equipes e equipamentos: A incompatibilidade entre o projeto e as condições reais de execução pode levar à interrupção de frentes de trabalho, ociosidade de máquinas e desperdício de materiais;
- Aumento de custos indiretos: Além dos custos diretos com retrabalho, há impactos indiretos como multas contratuais, perda de produtividade e necessidade de renegociação com fornecedores e empreiteiras;

1.2 Impactos na Operação Ferroviária

- Redução da segurança operacional: Curvas mal projetadas podem comprometer a estabilidade dos trens, aumentando o risco de descarrilamentos, especialmente em trechos com alta velocidade ou carga elevada;
- Desgaste prematuro da via permanente: Geometrias inadequadas geram esforços dinâmicos excessivos sobre trilhos, dormentes e lastro, acelerando o desgaste e exigindo manutenção mais frequente.
- Limitação de desempenho: Um traçado mal dimensionado pode impor restrições operacionais, como redução de velocidade, aumento do consumo energético e menor capacidade de transporte.
- Impacto na confiabilidade e regularidade: A necessidade de intervenções corretivas frequentes compromete a regularidade dos serviços e a confiabilidade da malha ferroviária

O presente estudo tem como objetivo desenvolver e validar uma metodologia automatizada para a verificação de parâmetros geométricos em projetos de novas ferrovias, com foco na análise da geometria horizontal. A proposta visa substituir o processo tradicional, manual e amostral, por uma abordagem digital e sistematizada, capaz de realizar verificações completas, com maior agilidade, precisão e aderência às normas técnicas e regulamentos internos.

A revisão bibliográfica constitui uma ferramenta estratégica e rigorosa para compreender a evolução do conhecimento científico em áreas emergentes, como a utilização de IA generativa em verificação automatizada de requisitos de engenharia. Por meio da quantificação e avaliação da produção acadêmica, essa abordagem permite identificar tendências de pesquisa, principais autores, instituições de destaque, redes de colaboração e áreas temáticas em expansão.

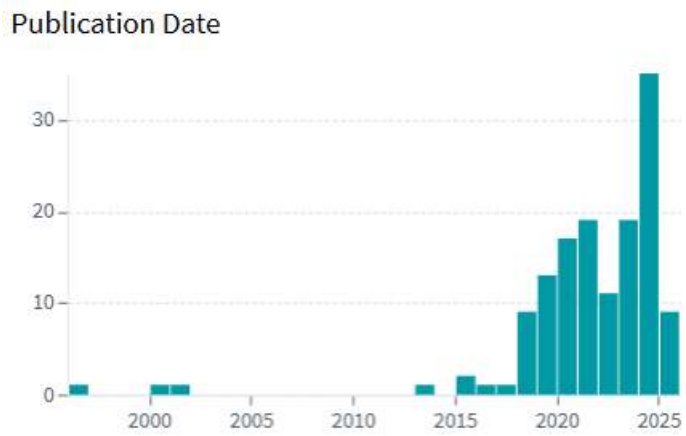
Para garantir a abrangência e a relevância dos dados coletados, foram realizadas buscas em base de dados científica reconhecida. A pesquisa foi realizada utilizando combinações de palavras-chave (em inglês) relacionadas ao tema central, tais como: “geometria”, “projeto”, “inteligência artificial” e “ferrovia”. Foi utilizado operador booleano (AND) para ampliar ou refinar os resultados conforme necessário, assegurando a inclusão de artigos relevantes mesmo com variações terminológicas.

A análise foi baseada em dados extraídos das bases de dados Lens.org, reconhecida pela ampla cobertura de literatura científica multidisciplinar. Essa plataforma foi selecionada por oferecer acesso a metadados relevantes, como número de citações, coautorias, instituições de afiliação e redes de colaboração científica.

Como resultado, a primeira busca contemplando todas as expressões acima destacadas retornou zero artigos. A segunda busca, excluindo-se a palavra “projeto” também retornou zero artigos. A terceira busca mantendo apenas “inteligência artificial” e “ferrovia” retornou 140 publicações.

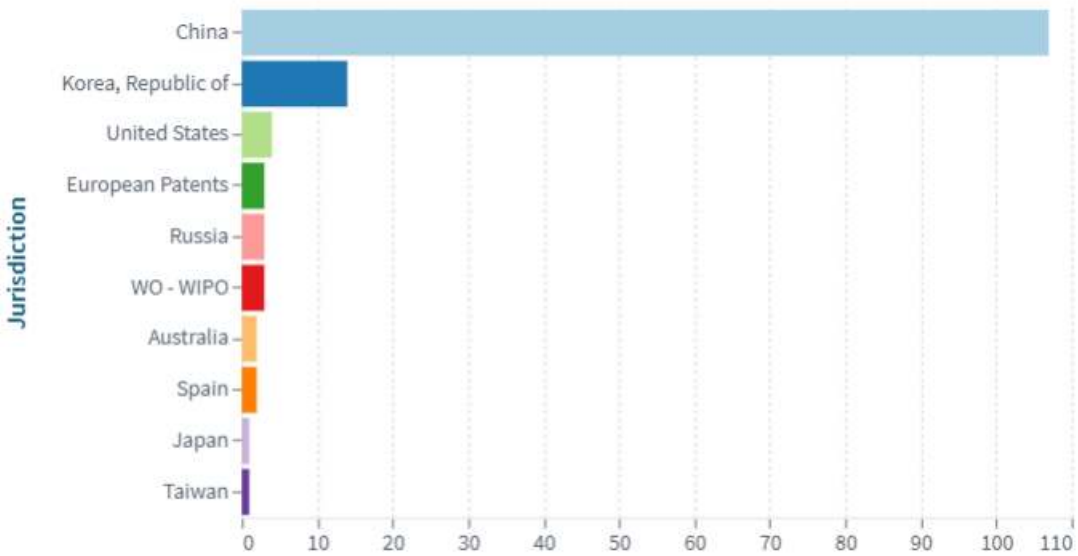
Com base na Figura 1, é possível observar uma evolução significativa no número de publicações ao longo do período de 2015 a 2025. O ano 2025, apresenta o maior pico de publicações na base Lens.org, chegando a 35 artigos, o que evidencia um interesse crescente e consolidado no tema. Essa tendência de crescimento demonstra o avanço do conhecimento científico na área, reforçando a relevância atual do tema no campo da engenharia civil.

Figura 1 - Publicações por ano



Considerando a jurisdição, a Figura 2 destaca a relevante contribuição da China no tema, seguida da Korea e Estados Unidos. Observa-se que o Brasil não possui publicações no tema demonstrando o caráter inovador e pioneiro desse trabalho.

Figura 2 - Jurisdição



Com base na análise dos artigos sobre o uso de inteligência artificial generativa em ferrovias, observa-se que aproximadamente 77% dos trabalhos abordam temáticas associadas à operação ferroviária. Outros 13,6% tratam de assuntos relacionados à inspeção e/ou gerenciamento de ativos para apoio na tomada de decisão quanto à manutenção preventiva e ou corretiva. Por fim, 8,5% dos resultados associam-se a outros temas diversos como gestão de riscos, sustentabilidade, invasão, dentre outros.

Percebe-se, ao final da busca por referências semelhantes a esse trabalho, que as publicações identificadas não possuem relação direta com o desenvolvimento da engenharia em projetos de novas ferrovias, mas estão relacionadas à utilização da IA generativa em contextos operacionais visando melhorar a operação e/ou manutenção dos ativos ferroviários.

É possível notar também, que a literatura técnica tem destacado a adoção de tecnologias digitais e a automação de processos para reduzir significativamente o tempo de análises, aumentar a confiabilidade dos resultados e mitigar riscos associados a falhas de projeto (Zhang et al., 2020; Silva & Andrade, 2018). Nesse contexto, a automação da verificação geométrica surge como uma solução estratégica para transformar um processo crítico — porém tradicionalmente ineficiente — em uma atividade mais robusta, rastreável e alinhada

às exigências normativas.

Especificamente, o estudo de caráter inovador e pioneiro no mundo, propõe o uso de um prompt de comando integrado ao Copilot para analisar dados extraídos do AutoCAD Civil 3D, comparando-os com os requisitos estabelecidos. O objetivo final é contribuir para a melhoria da qualidade dos projetos ferroviários, a otimização do tempo de análise e o aumento da produtividade das equipes técnicas. Ao integrar técnicas de IA generativa aos processos tradicionais de verificação, busca-se não apenas identificar possíveis inconsistências, mas também estabelecer um novo paradigma de precisão, agilidade e confiabilidade.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da verificação automatizada de requisitos de geometria em Projetos de Novas Ferrovias, foi utilizado o método *Design Science Research (DSR)*, cujo objetivo é criar e avaliar artefatos (como modelos, métodos, sistemas ou frameworks) que resolvam problemas práticos e relevantes.

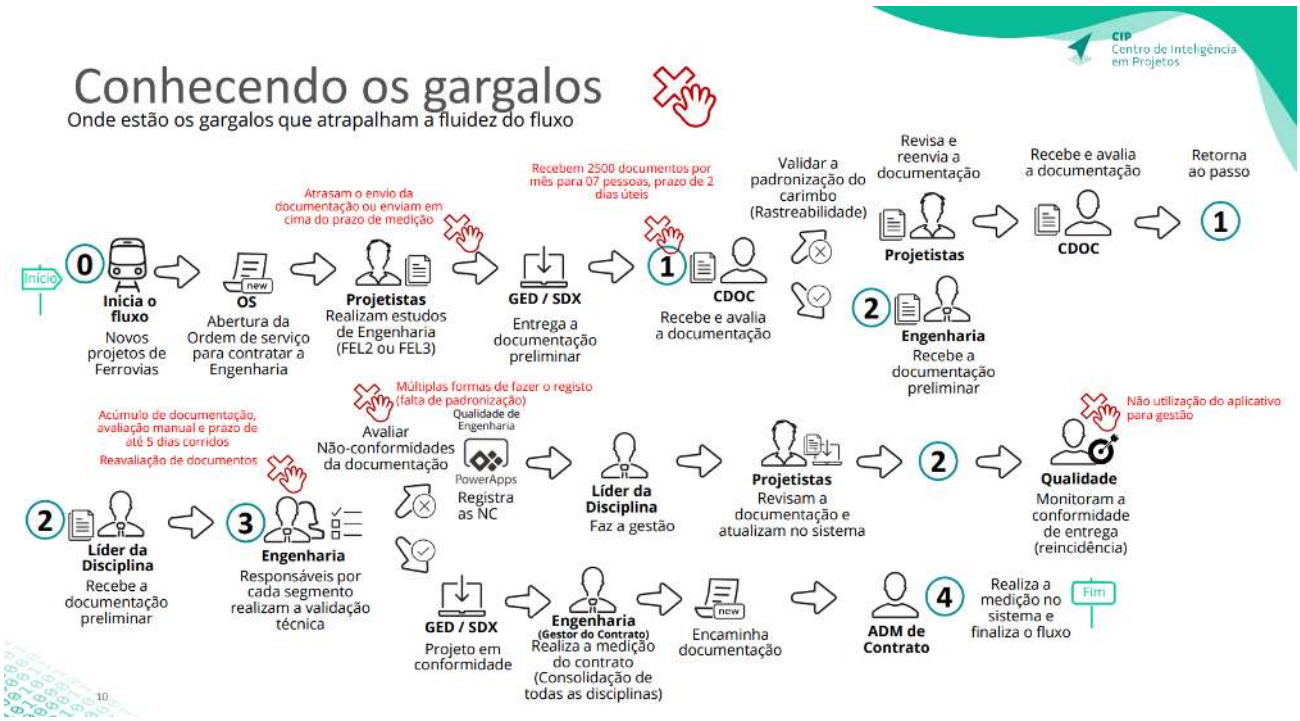
Embora existam variações, uma estrutura bastante aceita é a proposta por Hevner et al. (2004), que define sete diretrizes e um processo cíclico conforme descrito a seguir.

2.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

O primeiro passo consistiu na definição clara do problema a ser resolvido, o que envolveu entender o contexto do problema, suas causas e suas consequências. Nessa etapa foi realizado um workshop para entendimento e detalhamento do problema.

A Figura 3 detalha o fluxo atual de abertura da Ordem de Serviço (OS) junto à projetista, a realização das entregas dos projetos pelas projetistas, a avaliação pela equipe multidisciplinar de engenheiros e analistas da Vale, e a medição dos serviços. Em vermelho, são destacados os gargalos do processo. É possível observar que, em razão do elevado número de documentos a serem analisados em um curto espaço de tempo, a verificação é um momento crítico dentro do fluxo completo.

Figura 3 - Conhecendo o problema e os gargalos



Para curvas horizontais, a verificação dos parâmetros é manual, demorada, e suscetível a erros. Os engenheiros abrem os arquivos no software Autodesk Civil 3D, analisam os 14 parâmetros de cada curva

horizontal existentes na tabela de curvas e validam os parâmetros calculados pela projetista. O número de curvas horizontais de cada traçado é variável em função da topografia local, entretanto, cada segmento de 20km normalmente apresenta pelo menos 8 curvas e, consequentemente, cerca de 112 parâmetros a serem verificados.

O fluxo de entrada de projetos inclui a verificação de outros parâmetros. São vários documentos a serem verificados, podendo chegar a picos de 2.500 documentos por mês. O prazo para avaliação é curto, em média 5 dias corridos, o pode culminar na realização da verificação de forma amostral e, consequentemente, na baixa qualidade da avaliação.

2.2 DESENVOLVIMENTO DO ARTEFATO

Nessa etapa foi desenvolvida a concepção do artefato que pudesse resolver o problema identificado. O processo de automatização sugerido, incluiu a extração dos parâmetros de geometria horizontal (curvas, tangentes e transições) de forma automatizada diretamente do software AutoCAD Civil 3D a partir da exportação do relatório de alinhamento horizontal (Figura 5) disponível no Country Kit Brasil (existente no site da Autodesk), na Toolspace conforme Figura 4, garantindo precisão e eficiência na coleta dos dados do projeto em desenvolvimento.

Figura 4 – Extração do Relatório de Alinhamento Horizontal

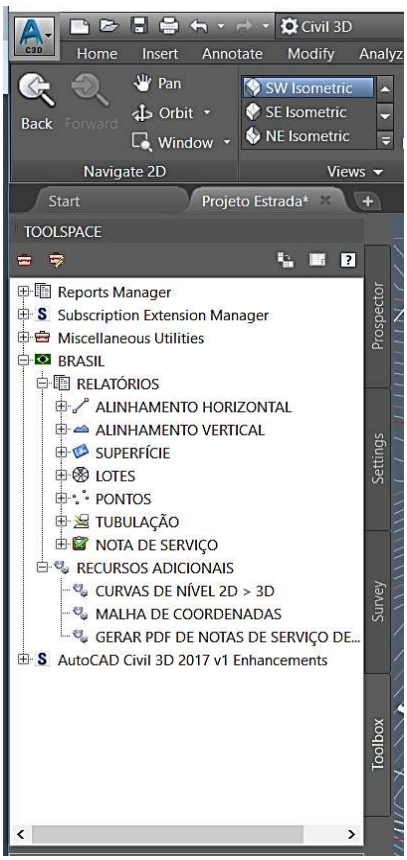


Figura 5 - Relatório de Alinhamento Horizontal

Relatório de Alinhamento Horizontal Complementar

Curva Nº	Deflexão	Curva de Transição							Curva Circular			
		Lc	Ang. Espiral	Xc	Yc	TI	Tc	Ts	R	Ac	T	D
1	147°04'09,99"	80	2°39'59,78"	79,982673	1,240903	53,339386	26,672169	26,61437	859,456000	32°55'50,0"	254,016024	493,969434
2	167°58'35,77"	80	2°39'59,78"	79,982673	1,240903	53,339386	26,672169	26,61437	3437,752000	12°01'24,22"	362,031898	721,404765

O desenho da metodologia incluiu, a partir da obtenção das informações do Projeto, o desenvolvimento de um prompt de comando para ser utilizado junto ao Copilot (assistente de IA generativa da Microsoft, disponível para todos os funcionários da empresa, integrado com segurança aos sistemas internos da empresa, baseado na arquitetura GPT-4, desenvolvida pela OpenAI). Isso significa que os dados da empresa não são usados para treinar os modelos da OpenAI. Em sua concepção, a ferramenta compara os parâmetros do projeto extraídos do software com aqueles normativos definidos e/ou calculados pela IA generativa a partir de metodologias consolidadas.

Os prompts de comando consistem em textos, distribuídos em 6 passos padronizados, para que qualquer usuário copie e cole no Copilot e realize a avaliação dos requisitos de geometria horizontal do seu projeto.

O passo 1 apresenta o contexto a ser estudado pela ferramenta de forma com que ela identifique o conhecimento a ser utilizado nas análises, entenda melhor os detalhes específicos da consulta e forneça respostas mais precisas e relevantes, alinhadas com as necessidades do usuário. Ao fornecer contexto, a análise da IA generativa é direcionada para os aspectos mais importantes do problema ou questão, evitando respostas genéricas e garantindo que a IA generativa se concentre nos pontos críticos que precisam ser abordados. Contextualizar o assunto permite que a IA generativa identifique rapidamente as informações relevantes e aplique os algoritmos mais adequados para a análise aumentando a eficiência na resolução de problemas e na geração de resultados. A falta de contexto pode levar a interpretações ambíguas ou erradas por parte da IA generativa. Exemplo: Se você disser “quero um resumo técnico para engenheiros da Vale”, a resposta será diferente de “quero um resumo simples para o público geral”. Abaixo o passo 1 desenvolvido:

“Daqui em diante trataremos de assuntos Ferroviários. Portanto, você deverá acessar banco de dados contendo informações técnicas sobre este assunto, em nível nacional (Brasil) e internacional (todo o mundo).

As seguintes palavras-chave estão atreladas ao nosso diálogo: projeto geométrico de ferrovias, geometria ferroviária, notas de serviço de geometria, normas técnicas ferroviárias, traçado horizontal, traçado vertical, superelevação.”

O passo 2 informa os requisitos normativos para que a IA generativa guarde e utilize na verificação com os parâmetros extraídos do projeto. A base de referência deve incluir todos os normativos e regulamentos relevantes para permitir que a IA generativa compare os parâmetros do projeto com os requisitos estabelecidos. Adicionalmente, a base de dados deve ser atualizada regularmente para refletir quaisquer mudanças nos normativos e regulamentos. Dados desatualizados podem comprometer a precisão da análise. Abaixo o passo 2 desenvolvido:

“Está sendo projetada Ferrovia de Carga pesada e para tanto possuem as seguintes características preliminares as quais você deverá guardar com todo rigor para comparar com os valores adotados de fato no projeto:

a. Velocidade máxima normativa = 60km/h;

b. Raio mínimo da curva horizontal circular (R)= 687,574m se transição (Lc)>= 100,00m

c. Raio mínimo da curva horizontal circular (R)= 859,456m se transição (Lc)>= 80,00m

d. Raio mínimo da curva horizontal circular (R)= 1145,930m se transição (Lc)>= 60,00m

e. Raio mínimo da curva horizontal circular normativa (R)= 3437,752m se transição (Lc) < 60,00 m”

O passo 3 fornece à IA generativa o relatório de alinhamento horizontal extraído com os parâmetros do projeto, para que a IA generativa armazene para as análises a serem solicitadas nos passos subsequentes. Os dados fornecidos devem ser precisos e livres de erros pois dados incorretos podem levar a análises erradas e conclusões equivocadas. Os dados também devem ser consistentes em termos de formato e estrutura para facilitar a análise e evitar problemas de interpretação. É muito importante que os dados sejam completos, contendo todas as informações necessárias para a análise evitando lacunas na análise. Abaixo o passo 3 desenvolvido:

“Seguem elementos de curvas horizontais circulares com transição de ferrovia.

Por favor, guarde esses valores.”

O passo 4 inicia a verificação dos parâmetros do projeto fornecidos no passo 3 com os requisitos normativos estabelecidos no passo 2 e estabelece os limites de tolerância aceitáveis. Como saída, solicita-se a apresentação de uma tabela com o resumo da análise destacando as divergências de forma que o feedback da IA generativa seja claro e detalhado sobre os resultados da análise, facilitando a interpretação e correção das anomalias identificadas. Buscou-se que a ferramenta fosse de fácil de utilização, permitindo que os engenheiros carregassem e processassem os dados sem dificuldades. Abaixo o passo 4 desenvolvido:

“Por favor, compare os valores de R e Lc entre as tabelas do PASSO 3 e os requisitos do PASSO 2. Verifique se cada valor atende aos requisitos especificados e justifique qualquer discrepância. Apresente uma tabela resumo desta análise, destacando onde houve diferença.

O desvio máximo entre o que está prescrito no PASSO 2 e o que foi de fato utilizado no projeto é de até 0,015m, acima deste valor ou inferior a zero significa que não atende normativamente.”

O passo 5 solicita à IA generativa, a realização do cálculo de parâmetros de geometria utilizando equações fornecidas que foram extraídas de metodologias consolidadas e ou existentes em normas, e a apresentação dos resultados em forma de tabela. Abaixo o passo 5 desenvolvido:

“Por favor, calcule todos os elementos de uma curva horizontal circular com transição apresentados no PASSO 3 tendo como base somente os valores de R e AC. Converta o ângulo central para radianos antes de realizar os cálculos.

Ângulo Central (AC): [AC = I].

Desenvolvimento da Curva Circular (D): [D = \frac{\pi \cdot R \cdot AC}{180}] onde (AC) está em graus.

Tangente Externa (T): [T = R \cdot \tan\left(\frac{AC \cdot \pi}{360}\right)] onde (AC) está em graus.

Ângulo Central da Espiral (Sc): [Sc = \frac{Lc}{2 \cdot R}].

Ângulo Central do Trecho Circular (θ): [\theta = AC - 2 \cdot Sc] onde (AC) e (Sc) estão em radianos.

Abscissa da Extremidade da Espiral (Xc): [Xc = \frac{Lc \cdot Sc}{3} \cdot \left(1 - \frac{Sc^2}{14} + \frac{Sc^4}{440}\right)] onde (Sc) está em radianos.

Coordenada da Extremidade da Espiral (Yc): [Yc = Lc \cdot \left(1 - \frac{Sc^2}{10} + \frac{Sc^4}{216}\right)] onde (Sc) está em radianos.

Afastamento da Curva Circular (p): [p = Xc - R \cdot \left(1 - \cos(Sc)\right)] onde (Sc) está em radianos.

Ordenada da Extremidade (q): [q = Yc - R \cdot \sin(Sc)] onde (Sc) está em radianos.

Tangente Exterior (Ts): [Ts = q + (p + R) \cdot \tan\left(\frac{AC \cdot \pi}{360}\right)] onde (AC) está em graus.

Desenvolvimento da Curva no Trecho Circular (Dc): [Dc = \frac{\pi \cdot R \cdot \theta}{180}] onde (\theta) está em graus.

Desenvolvimento Total (Dt): [Dt = Dc + 2 \cdot Lc]

Apresente os resultados em uma tabela contendo as seguintes colunas com os respectivos resultados para cada curva: CURVA Nº, AC, R, T, D, Lc, Sc, θ, Xc, Yc, p, q, Ts, Dc, Dt.

Unidades métricas devem ter 3 casas decimais após a vírgula. Apresente os resultados dos ângulos AC, Sc e θ em graus sexagesimais com 5 casas decimais após a vírgula."

O passo 6 conclui a verificação dos parâmetros do projeto através da comparação entre os valores extraídos do software e aqueles calculados no passo 5. Como saída, solicita-se a apresentação de uma tabela com o resumo da análise destacando as divergências. Abaixo o passo 6 desenvolvido:

"Por favor, subtraia cada valor de AC, R, T, D, Lc, Sc, θ, Xc, Yc, p, q, Ts, Dc, Dt contido na tabela do PASSO 4 por cada valor contido na tabela do PASSO 3. Converta os ângulos AC, Sc e θ de graus sexagesimais para graus decimais antes de fazer a subtração. Apresente uma tabela contendo somente as diferenças encontradas. Destaque em negrito o texto onde foram identificadas diferenças."

2.3 AVALIAÇÃO DO ARTEFATO

Durante a fase de avaliação, foram analisados critérios de usabilidade, desempenho e eficiência.

A usabilidade refere-se à facilidade com que os engenheiros podem utilizar a ferramenta para realizar a verificação dos parâmetros de geometria e leva em consideração aspectos como interface do usuário, facilidade de uso e feedback ao usuário.

A verificação automatizada dos parâmetros de geometria utiliza o Copilot, um assistente virtual inteligente desenvolvido pela Microsoft em colaboração com a OpenAI que utiliza modelos de linguagem avançados, como o GPT-4, para fornecer uma ampla gama de funcionalidades automatizadas e inteligentes permitindo que os usuários realizem tarefas complexas de maneira mais eficiente.

Sua interface intuitiva, um chat, possui design claro e organizado permitindo que os usuários encontrem rapidamente as funcionalidades desejadas. Quanto à facilidade de uso, ele permite o carregamento de arquivos em diversos formatos (csv, txt, html, pdf, excel) de maneira simples e rápida, e possibilita a análise e extração dos parâmetros com reduzida intervenção manual.

O Copilot é baseado na arquitetura Transformer, introduzida pela Google em 2017, que revolucionou o campo de processamento de linguagem natural (NLP) por permitir o processamento paralelo de palavras, a atenção contextual (mecanismo de self-attention), e o aprendizado de relações complexas entre palavras e frases. A partir de uma pergunta, o texto é convertido em tokens. Posteriormente, o modelo processa esses tokens com base no contexto da conversa e gera uma resposta token por token, com base nas probabilidades mais coerentes. Adicionalmente, é realizado ajuste do comportamento com base em feedback humano. Tudo isso acontece em milissegundos, em servidores da Microsoft com segurança empresarial.

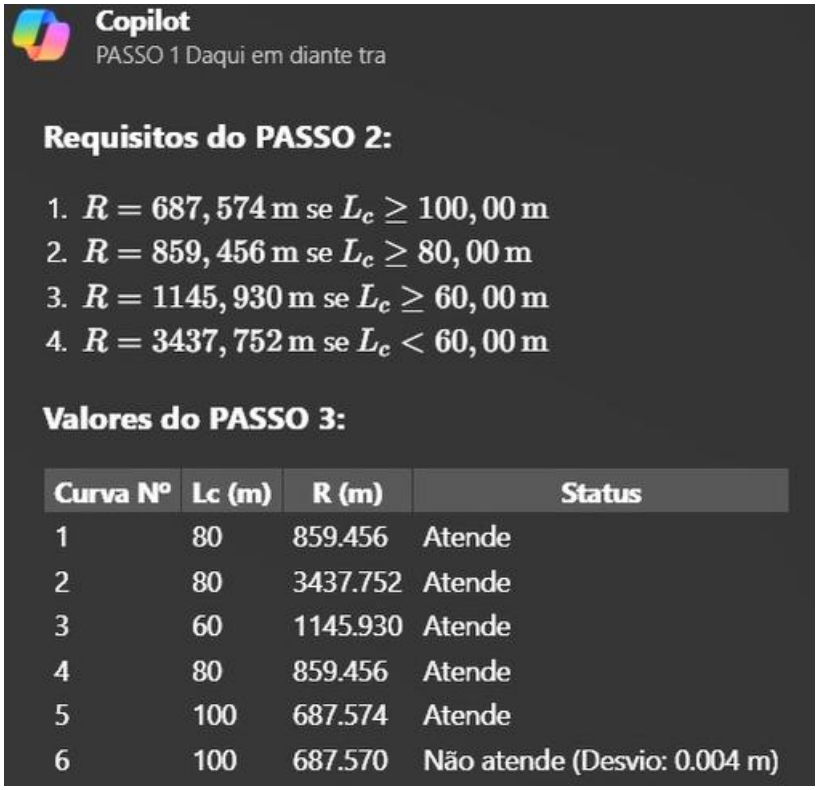
O feedback fornecido pela ferramenta, a partir dos prompts desenvolvidos, ficou claro e detalhado, ajudando os usuários a entenderem os resultados da análise e permitindo que eles façam ajustes e refinamentos nas consultas conforme necessário.

Em relação ao desempenho, que se refere à precisão e eficácia da ferramenta na verificação dos parâmetros de geometria, foram avaliados a precisão da análise, a sua comparação com os métodos tradicionais de análise, e o impacto na qualidade dos projetos.

Todos os parâmetros calculados pela IA generativa foram calculados utilizando fórmulas construídas em planilha de excel para conferência, e os resultados foram consistentes e confiáveis permitindo que os engenheiros tomassem decisões baseadas no feedback. Adicionalmente, a ferramenta foi capaz de identificar

e destacar violações dos requisitos normativos com alta precisão demonstrando sua eficácia conforme pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Resultado do passo 4



Copilot

PASSO 1 Daqui em diante tra

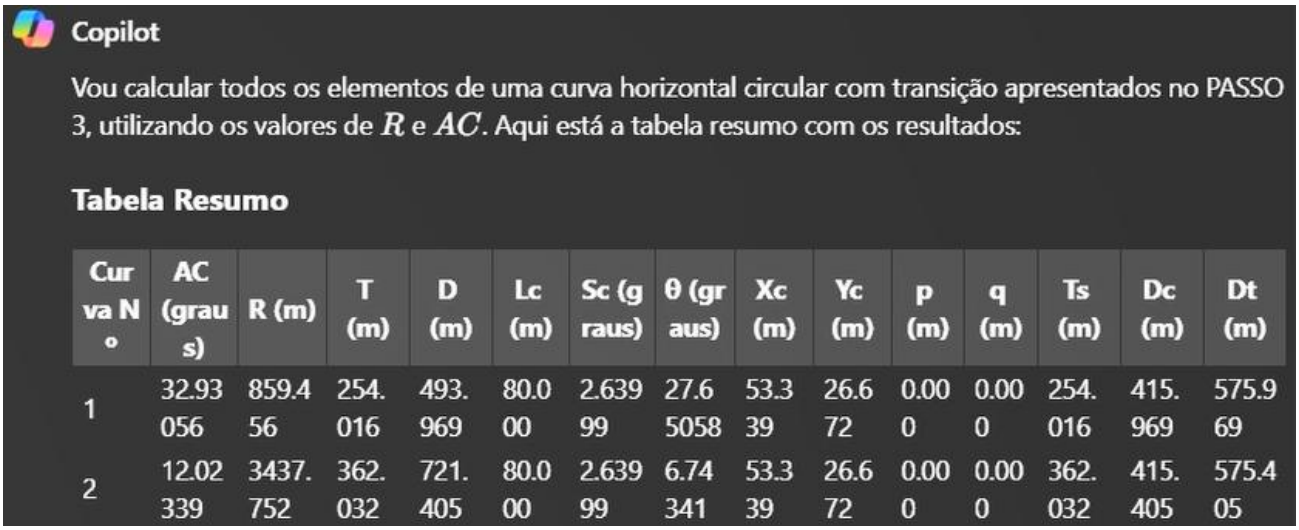
Requisitos do PASSO 2:

1. $R = 687,574\,\text{m}$ se $L_c \geq 100,00\,\text{m}$
2. $R = 859,456\,\text{m}$ se $L_c \geq 80,00\,\text{m}$
3. $R = 1145,930\,\text{m}$ se $L_c \geq 60,00\,\text{m}$
4. $R = 3437,752\,\text{m}$ se $L_c < 60,00\,\text{m}$

Valores do PASSO 3:

Curva Nº	Lc (m)	R (m)	Status
1	80	859.456	Atende
2	80	3437.752	Atende
3	60	1145.930	Atende
4	80	859.456	Atende
5	100	687.574	Atende
6	100	687.570	Não atende (Desvio: 0.004 m)

Figura 7 - Resultado do passo 5



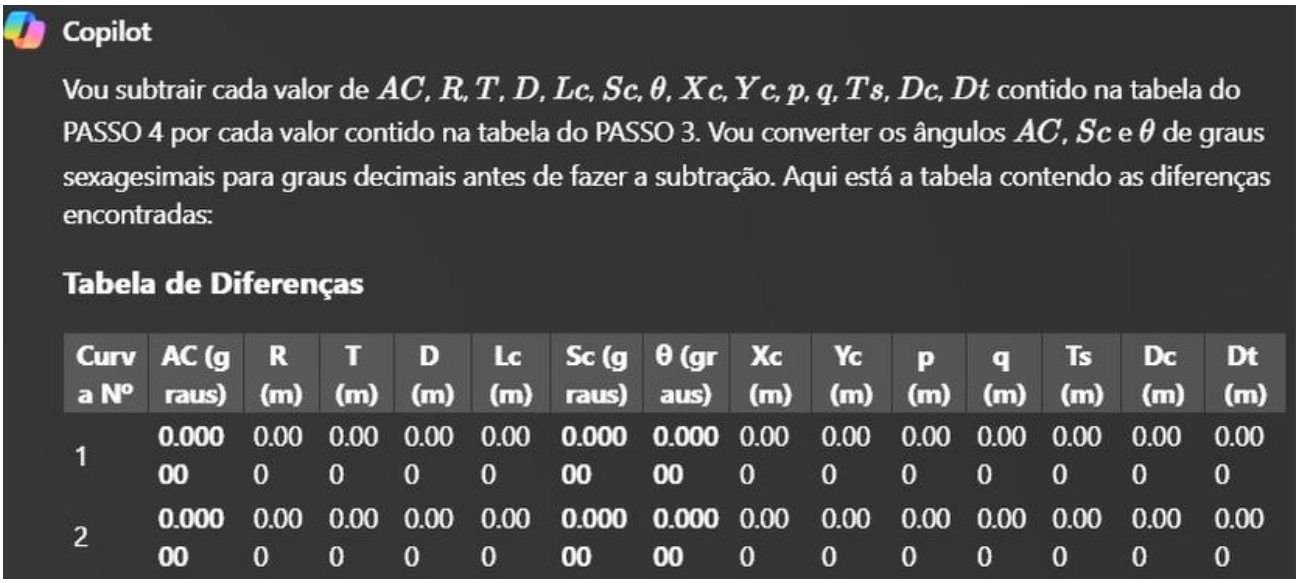
Copilot

Vou calcular todos os elementos de uma curva horizontal circular com transição apresentados no PASSO 3, utilizando os valores de R e AC. Aqui está a tabela resumo com os resultados:

Tabela Resumo

Curva Nº	AC (graus)	R (m)	T (m)	D (m)	Lc (m)	Sc (graus)	θ (graus)	Xc (m)	Yc (m)	p (m)	q (m)	Ts (m)	Dc (m)	Dt (m)
1	32.93056	859.456	254.016	493.969	80.000	2.63999	27.65058	53.339	26.672	0.000	0.000	254.016	415.969	575.969
2	12.02339	3437.752	362.032	721.405	80.000	2.63999	6.74341	53.339	26.672	0.000	0.000	362.032	415.405	575.405

Figura 8 - Resultado do passo 6



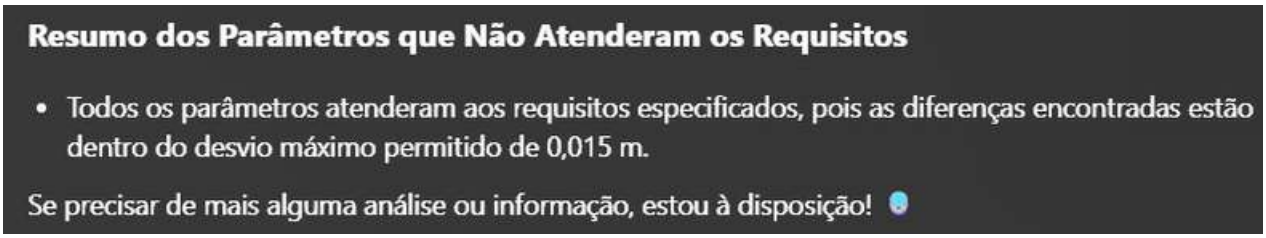
Copilot

Vou subtrair cada valor de $AC, R, T, D, Lc, Sc, \theta, Xc, Yc, p, q, Ts, Dc, Dt$ contido na tabela do PASSO 4 por cada valor contido na tabela do PASSO 3. Vou converter os ângulos AC, Sc e θ de graus sexagesimais para graus decimais antes de fazer a subtração. Aqui está a tabela contendo as diferenças encontradas:

Tabela de Diferenças

Curva Nº	AC (graus)	R (m)	T (m)	D (m)	Lc (m)	Sc (graus)	θ (graus)	Xc (m)	Yc (m)	p (m)	q (m)	Ts (m)	Dc (m)	Dt (m)
1	0.000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2	0.000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000000	0.000000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Figura 9 - Avaliação final



Resumo dos Parâmetros que Não Atenderam os Requisitos

- Todos os parâmetros atenderam aos requisitos especificados, pois as diferenças encontradas estão dentro do desvio máximo permitido de 0,015 m.

Se precisar de mais alguma análise ou informação, estou à disposição!

Conforme pôde ser observado, em comparação com a avaliação manual, os resultados obtidos pela ferramenta trouxeram melhorias na precisão e eficiência pois a conferência visual passou a ser automatizada, minimizando falhas humanas. Houve melhoria na qualidade dos projetos, uma vez que parâmetros anteriormente não avaliados (não calculados manualmente) passaram a ser verificados reduzindo a necessidade de revisões o risco de atrasos nas obras.

A eficiência, associada à capacidade da ferramenta de realizar a verificação dos parâmetros de geometria de maneira rápida e com uso otimizado de recursos trouxe ganhos significativos. O tempo de processamento da análise seguindo os seis passos criados foi de aproximadamente 3 minutos. A produtividade dos engenheiros aumentou mais de 95% para segmentos ferroviários de aproximadamente 20 km, permitindo que eles se concentrem em tarefas mais inovadoras e estratégicas. Esse ganho permitiu ainda, que um maior volume de dados seja processado sem consumo de tempo excessivo, agilizando as análises e emissão dos projetos.

2.4 REFINAMENTO DO ARTEFATO

Após a avaliação inicial do artefato, é essencial analisar os resultados obtidos para identificar pontos fortes e fracos e entender as áreas que necessitam de melhorias. Durante essa etapa foram identificados erros e bugs que afetavam o funcionamento do artefato, e áreas onde o desempenho poderia ser otimizado, como tempo de processamento e uso de recursos.

Tendo sido mapeadas as melhorias, foram resolvidos erros e bugs, e otimizados os prompts para aumentar a eficiência e a precisão da análise. Novos testes iterativos foram realizados para garantir que as mudanças geraram o efeito desejado. Esses testes foram conduzidos em condições reais de uso para verificar a eficácia das melhorias.

Durante todo o processo de refinamento, a coleta de feedback contínuo dos usuários foi essencial. A iteração contínua entre implementação e testes ajudou a refinar o artefato de maneira incremental.

Uma vez que todas as melhorias foram implementadas e testadas, foi realizada uma revisão e validação final do artefato para garantir que ele tenha atendido os requisitos iniciais e esteja pronto para uso em produção.

2.5 COMUNICAÇÃO DOS RESULTADOS

A primeira etapa na comunicação dos resultados foi a elaboração da documentação completa do processo desenvolvido de verificação automatizada de requisitos de geometria em Projetos de Novas Ferrovias. Esta documentação incluiu uma descrição detalhada dos procedimentos realizados e das ferramentas e tecnologias empregadas. A documentação foi estruturada de maneira clara e objetiva, garantindo que todas as informações relevantes fossem facilmente acessíveis e compreensíveis para os stakeholders.

Após a conclusão da documentação, foram realizadas sessões de apresentação para as equipes envolvidas no projeto. Essas sessões tiveram como objetivo divulgar a metodologia desenvolvida e apresentar os resultados alcançados. Durante as apresentações, foram realizadas demonstrações da ferramenta para melhor compreensão por parte da equipe.

As sessões de apresentação também incluíram momentos para perguntas e respostas, permitindo que os participantes esclarecessem dúvidas e oferecessem sugestões. A interação durante essas sessões foi fundamental para garantir que todos os membros das equipes estivessem alinhados com a metodologia e compreendessem os benefícios da verificação automatizada. Além das apresentações, a documentação completa foi disponibilizada na intranet da empresa, garantindo que todos os colaboradores tivessem acesso às informações e pudessem consultar os detalhes do processo e dos resultados alcançados.

Para garantir que a equipe estivesse completamente familiarizada com a nova ferramenta de verificação automatizada de requisitos de geometria em projetos de novas ferrovias, foram organizadas reuniões individualizadas. Essas reuniões tiveram como objetivo proporcionar uma experiência prática e monitorada, permitindo que cada membro da equipe testasse a ferramenta com suas próprias mãos.

Durante as reuniões individualizadas, cada engenheiro teve a oportunidade de abrir arquivos de projetos no AutoCAD Civil 3D e utilizar a ferramenta. A sessão começou com uma breve introdução sobre a funcionalidade da ferramenta e os principais passos para sua utilização. Em seguida, os engenheiros foram guiados através do processo de exportação da nota de serviço e utilização do prompt para uso no Copilot.

Os testes monitorados permitiram que os engenheiros comparassem os resultados obtidos pela ferramenta com os parâmetros iniciais estabelecidos. Durante essa fase, foram observadas as reações dos engenheiros, suas dúvidas e sugestões. A interação direta com a ferramenta possibilitou a identificação de pontos fortes e áreas que poderiam ser melhoradas.

Cada reunião foi conduzida por um facilitador, que estava disponível para responder perguntas e fornecer assistência técnica. Além de testar a ferramenta, as reuniões individualizadas proporcionaram um ambiente de aprendizado e troca de conhecimentos. Os engenheiros puderam discutir suas experiências e compartilhar melhores práticas, contribuindo para a construção de uma cultura de colaboração e inovação dentro da equipe.

Ao final das reuniões, foi realizada uma sessão de avaliação. As sugestões e críticas foram cuidadosamente analisadas e incorporadas no processo de refinamento, garantindo que a ferramenta evoluísse de acordo com as expectativas dos usuários.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação da metodologia desenvolvida resultou em diversos benefícios significativos para a verificação de parâmetros de geometria em projetos de novas ferrovias. Os principais resultados obtidos estão descritos a seguir:

3.1 AUMENTO DA PRODUTIVIDADE

A metodologia demonstrou uma significativa redução no tempo necessário para a análise dos parâmetros de geometria, passando de aproximadamente 2 horas para 5 minutos, uma redução da ordem de 95% no tempo, permitindo uma avaliação mais rápida e eficiente.

O resumo dos resultados da análise permitiu a fácil localização de cada anomalia, facilitando o trabalho dos engenheiros, e permitindo que eles se concentrassem na solução dos problemas identificados. A automação da verificação de parâmetros de geometria liberou os engenheiros para se concentrarem em outras atividades críticas, aumentando sua produtividade e eficiência no desenvolvimento de projetos

3.2 MELHORIA DA QUALIDADE DO PROJETO

A metodologia foi validada quantitativamente através da análise de 84 verificações individuais (6 curvas horizontais × 14 parâmetros geométricos), demonstrando desempenho excepcional conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 10 - Métricas de Validação da Metodologia Automatizada

Métrica	Fórmula	Resultado
Acurácia	(TP + TN) / Total	100,00%
Precisão	TP / (TP + FP)	100,00%
Especificidade	TN / (TN + FP)	100,00%
Recall (Sensibilidade)	TP / (TP + FN)	100,00%
Taxa de Falsos Positivos	FP / (FP + TN)	0,00%
Precisão dos Cálculos	-	100,00%

Legenda: TP=Verdadeiros Positivos (2); TN=Verdadeiros Negativos (82); FP=Falsos Positivos (0); FN=Falsos Negativos (0)

A ferramenta detectou corretamente 2 desvios sutis (Curva 2: 0,002m; Curva 6: 0,004m) em 84 verificações totais (taxa de detecção de 2,4%), classificando-o adequadamente como conforme à tolerância de 0,015m, e identificou precisamente 82 parâmetros sem desvios. Os cálculos apresentaram exatidão absoluta (diferenças de 0,000 em todas as verificações), demonstrando confiabilidade técnica superior ao processo manual tradicional, que está sujeito a variações interpretativas e erros de cálculo. O desempenho obtido evidencia eliminação total de falsos positivos (alarmes desnecessários) e falsos negativos (problemas não detectados), aspectos críticos para a confiabilidade operacional do sistema de verificação.

Em contraste, a verificação manual tradicional apresentaria limitações significativas, tendo em vista que mesmo engenheiros seniores alcançariam aproximadamente 93% de acurácia com cobertura de apenas 70% dos parâmetros, resultando em 3-4 falsos negativos (problemas não detectados) e 6-7 falsos positivos (retrabalho desnecessário) por análise. A variabilidade entre verificadores (78-93% de acurácia conforme experiência) e a análise amostral deixariam 25-59 parâmetros não verificados, criando vulnerabilidades ocultas no projeto. A metodologia automatizada elimina esses riscos através de cobertura total, consistência absoluta e ausência de fatores humanos degradantes.

4 CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida para a verificação automatizada de parâmetros de geometria em projetos de novas ferrovias demonstrou ser uma ferramenta eficaz para otimizar o tempo de avaliação e aumentar a produtividade dos engenheiros. Análises amostrais de aproximadamente 2 horas puderam ser concluídas integralmente em 5 minutos. Adicionalmente, a automação do processo permitiu a verificação de 100% dos

parâmetros de curvas horizontais com identificação precisa de violações aos requisitos de projeto, facilitando a correção de anomalias e melhorando a qualidade dos projetos.

Os resultados obtidos trouxerem um avanço importante para a engenharia ferroviária, contribuindo para projetos mais eficientes e seguros. A verificação automatizada tem um grande potencial para melhorar a qualidade e a eficiência dos projetos ferroviários. Recomenda-se a continuidade da pesquisa para explorar a aplicação da metodologia em outras áreas da engenharia civil, ampliando seus benefícios para diferentes tipos de projetos.

REFERÊNCIAS

HEVNER, A. R. et al. Design science in information systems research. MIS Quarterly, v. 28, n. 1, p. 75–105, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.2307/25148625. Acesso em: 2 jun. 2025.

SILVA, Chayene Cristina Santos Carvalho da; ANDRADE, Alexandra de. O uso das tecnologias digitais na educação: os desafios frente à pandemia da COVID-19. In: JORNADA IBERO-AMERICANA DE PESQUISAS EM POLÍTICAS EDUCACIONAIS E EXPERIÊNCIAS INTERDISCIPLINARES NA EDUCAÇÃO, 5., 2020. Anais [...]. Disponível em: https://www.academia.edu/44069611. Acesso em: 9 abr. 2025.

ZHANG, Y.; ZHAO, L.; WANG, X. The role of digital technologies in the innovation process: a review. Technological Forecasting and Social Change, [S.l.], v. 155, p. 119-123, 2020.