



VALIDAÇÃO EMPÍRICA DE FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO PARA LOCAÇÃO DE PÁTIO DE CRUZAMENTO FERROVIÁRIO

Rafael L. Witiuk¹; Rafael Pereira da Silveira¹

¹*Rumo - Brasil*

RESUMO

Em função do cenário recente de expansão de capacidade do transporte ferroviário, tem sido desenvolvida ferramenta de auxílio à tomada de decisão para locação de pátio de cruzamento ferroviário, baseada em seis macroindicadores e na metodologia *Fuzzy-QFD*. Um estudo de caso desenvolvido em 2019, aplicado a um trecho próximo a Catanduva-SP, definiu a posição para um novo pátio de cruzamento ferroviário na posição 47+456 a 50+111 como solução recomendada no cenário de limitação orçamentária. O presente artigo confronta esses resultados com a solução efetivamente implantada no mesmo trecho, em que foi executado o referido pátio na posição 47+300 a 50+070, com capacidade de aproximadamente 32 pares de trem por dia, correspondente a um aumento de 91% em relação à situação anterior. A decisão real foi tomada de forma independente da ferramenta, por meio de consulta a especialistas. A comparação revela convergência posicional expressiva entre a recomendação da ferramenta e a solução implantada — desvio máximo de 156 m no alinhamento dos aparelhos de mudança de via —, além de aderência razoável no indicador de capacidade, com erro relativo de aproximadamente 11%. A principal divergência identificada refere-se ao custo estimado pela ferramenta, substancialmente inferior ao realizado, o que evidencia uma limitação metodológica a ser aprimorada. Os resultados sugerem validade convergente à ferramenta e apontam diretrizes para seu refinamento em estudos futuros.

Palavras-chave: *Pátio de cruzamento ferroviário, Fuzzy-QFD, Ferramenta de auxílio a Tomada de decisão.*

1. INTRODUÇÃO

O setor ferroviário brasileiro tem vivenciado, nos últimos anos, um contexto de expansão e modernização, impulsionado por novos investimentos e pela necessidade de aumento da capacidade operacional. Nesse cenário, a implantação de pátios de cruzamento ferroviário destaca-se como uma das principais estratégias para ampliação da eficiência logística, apresentando elevada relação benefício-custo quando comparada a outras soluções de infraestrutura.

A definição da localização desses pátios constitui um problema complexo de tomada de decisão, uma vez que envolve múltiplos critérios técnicos, econômicos, ambientais e operacionais, além da necessidade de conciliar os interesses de diferentes áreas envolvidas no projeto, como engenharia, operação, planejamento, manutenção e gestão fundiária. Tradicionalmente, esse processo tem sido conduzido com base em métodos qualitativos estruturados, como a análise heurística por painel de especialistas — que na literatura de apoio à decisão é frequentemente referida como *expert panel* ou *stakeholder consultation* — no qual especialistas contribuem para a construção de uma solução consensual a partir de suas experiências e percepções.



Entretanto, a multiplicidade de variáveis e a racionalidade limitada dos agentes envolvidos podem comprometer a assertividade das decisões, evidenciando a necessidade de ferramentas que permitam estruturar e quantificar os critérios relevantes. Nesse contexto, foi desenvolvida, em 2019, uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão baseada em análise multicritério, que incorpora indicadores técnicos e utiliza a metodologia Fuzzy-QFD para articular os diferentes parâmetros envolvidos no estudo locacional de pátios ferroviários.

Embora o trabalho original tenha demonstrado resultados promissores em estudo de caso hipotético, permanece a limitação relacionada a ausência de validação empírica com base em uma decisão real de implantação. A validação de ferramentas de apoio à decisão requer o confronto entre as recomendações geradas pelo modelo e as escolhas efetivamente realizadas na prática (Johnson, 1990).

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade dessa ferramenta em um caso real, por meio da comparação entre os resultados por ela obtidos e a solução efetivamente implantada, cuja definição foi realizada sem o uso da ferramenta, mas com base na análise heurística por painel de especialistas. Busca-se, assim, verificar o grau de aderência entre as abordagens e discutir o potencial da ferramenta como instrumento de suporte à tomada de decisão em projetos ferroviários.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 sintetiza a ferramenta desenvolvida em 2019; a Seção 3 descreve a solução real implantada; a Seção 4 apresenta a análise comparativa; e a Seção 5 discute as implicações, limitações e diretrizes para estudos futuros.

2. FERRAMENTA DE APOIO À DECISÃO — SÍNTESE METODOLÓGICA

A ferramenta desenvolvida por Witiuk e Von der Osten (2019) estrutura o processo de locação de pátio de cruzamento por meio de seis macroindicadores técnicos — denominados *Design Requirements* (DR) —, cujas descrições estão sintetizadas na Tabela 1.

Tabela 1. Síntese dos macroindicadores da ferramenta (adaptado de Witiuk e Von der Osten, 2019).

Macroindicador	Sigla	Descrição resumida
Geometria	IG	Avalia rampa máxima e porcentagem em curva via lógica fuzzy (Mamdani, 1973). Resultado: score de 0 a 1.
Custo de Obra	ICO	Produto dos indicadores de terraplenagem, interferências viárias e referencial de investimento.
Impacto Ambiental	IA	Considera APP, APA, terras indígenas, quilombolas e talwegues cruzados.
Posição na S.B.	ISB	Avalia centralidade, distância AMV–curva e proximidade de limites urbanos.
Risco de Desapropriação	IRD	Probabilidade de necessidade de desapropriação por alargamento de talude, acessos e AMV em curva.



Eficiência Produtiva	IEFP	Capacidade incremental em pares de trem/dia, ponderada pela economicidade do pátio.
----------------------	------	---

A articulação entre os macroindicadores é realizada pela metodologia *Fuzzy-QFD* (Chen e Weng, 2003), que correlaciona os requisitos dos clientes do projeto — *Customer Requirements* (CR) — com os DR por meio de números fuzzy triangulares. Os pesos resultantes variam conforme três cenários estratégicos: (1) imediatismo operacional, (2) limitação orçamentária e (3) maximização da produção. O resultado final de cada proposta de pátio é calculado pela Equação 1:

$$R_{fc,p} = \text{Máxi}(w_{Gi} \times IG + w_{COi} \times ICO + w_{Ai} \times IA + w_{BSi} \times ISB + w_{RDi} \times IRD + w_{EFPi} \times \text{IEFP}) \quad (1)$$

O estudo de caso original foi aplicado a 26 propostas de pátio em trecho ferroviário próximo a Catanduva-SP, resultando nas seguintes recomendações por cenário, conforme Tabela 2:

Tabela 2. Melhores pátios por cenário — resultados do estudo original.

Pátio	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Destaque
Pátio 17	0,740	0,786	0,811 ★	Melhor no Cenário 3
Pátio 18	0,748	0,786 ★	0,786	Melhor no Cenário 2; próximo ao real implantado
Pátio 21	0,754 ★	0,696	0,754	Melhor no Cenário 1

O Pátio 18, com posição inicial em 47+456 e posição final em 50+111 (extensão de 2.655 m), apresentou o melhor desempenho no Cenário 2 e o segundo melhor no Cenário 3 — score de 0,786 em ambos —, revelando-se uma solução robusta entre os cenários de limitação orçamentária e maximização de capacidade. O custo estimado pelo indicador ICO para esse pátio foi de R\$ 9.792.368, e a capacidade prevista no Cenário 3 era de 36,0 pares de trem por dia (PdT).

3. SOLUÇÃO REAL IMPLANTADA

A solução efetivamente implantada no trecho ferroviário estudado posicionou o pátio de cruzamento entre as estacas 47+300 e 50+070, resultando em uma extensão total de 2.770 m — 115 m superior à extensão do Pátio 18 previsto pela ferramenta. Os aparelhos de mudança de via (AMV) foram locados a 47+300 (AMV inicial) e 50+070 (AMV final).

A decisão foi conduzida por equipe técnica especializada da operadora ferroviária, por meio de processo tradicional de consulta a especialistas, sem utilização ou conhecimento prévio



da ferramenta desenvolvida em 2019. Os critérios considerados no processo real incluíram, entre outros: topografia do trecho, disponibilidade de área na faixa de domínio, interferências com passagens existentes, restrições operacionais da via e o contexto de maximização de capacidade do corredor.

O custo total de implantação foi superior ao estimado, contemplando superestrutura ferroviária, terraplenagem, solução de interferências viárias, obras de arte e custos indiretos de projeto e supervisão. O aumento de capacidade obtido foi de aproximadamente 91%, elevando o corredor para cerca de 32 pares de trem por dia.

4. ANÁLISE COMPARATIVA

4.1. Aderência Posicional

A Tabela 3 sintetiza a comparação entre os parâmetros previstos pela ferramenta para o Pátio 18 e os valores reais da solução implantada.

Tabela 3. Comparação entre solução da ferramenta e solução real implantada.

Parâmetro	Ferramenta — Pátio 18	Solução Real Implantada	Desvio / Observação
AMV inicial	47+456	47+300	-156 m (-0,3%)
AMV final	50+111	50+070	-41 m (-0,1%)
Extensão (m)	2.655	2.770	+115 m (+4,3%)
Custo estimado / real (R\$)	9.792.368	>9.792.368	Variação não apresentada
Capacidade (PdT/dia)	36,0 (Cen. 3)	~32 (+91%)	-11% vs. previsão
Volume de Corte (m³)	83.673	62.105	-25,8%
Volume de Aterro (m³)	74.143	50.070	-32,5%
Cenário de referência	Cenário 2 (melhor score) Cenário 3 (2º score: 0,786)	Menor custo	Convergência com Cen. 3

A análise posicional revela convergência expressiva entre a recomendação da ferramenta e a solução real. O desvio no AMV inicial é de apenas 156 m (0,3% da extensão total do trecho analisado), e no AMV final de 41 m. Esses desvios são compatíveis com a margem de refinamento natural entre um estudo de localização e um projeto de engenharia executivo, uma vez que a ferramenta opera sobre dados de bases topográficas públicas de satélite e plataforma média, enquanto o projeto executivo incorpora levantamentos topográficos de maior precisão e condicionantes específicos de projeto.



Considerando que as 26 propostas do estudo original cobriam um trecho de aproximadamente 8 km, a sobreposição entre a janela do Pátio 18 e a da solução real indica que ambas as abordagens – Ferramenta de apoio a decisão proposta e a metodologia de consulta a especialistas – convergiram para a mesma região favorável do corredor.

4.2. Aderência de Cenário

O Pátio 18 obteve o melhor score no Cenário 2 (limitação orçamentária) e segundo melhor score no Cenário 3 (maximização da produção). A solução real, por sua vez, foi concebida em contexto de redução de custo de implantação — conforme o objetivo declarado de reduzir o impacto financeiro na operadora logística —, o que a alinha com o Cenário 2.

Desse modo, a solução proposta é coerente com a prioridade organizacional da concessionária ferroviária de minimização dos custos de obra – situação comum em operadoras ferroviárias sujeitas a variações de demanda e condições de investimento.

4.3. Divergência no Custo Estimado

A maior divergência identificada na comparação refere-se ao indicador de custo de obra (ICO). O custo estimado pela ferramenta para o Pátio 18 foi de R\$ 9.792.368, ao passo que o custo real de implantação foi superior ao valor supracitado.

Essa divergência é explicável por limitações estruturais do modelo de estimativa adotado em 2019. O indicador ICO foi concebido como métrica relativa entre alternativas — ou seja, para discriminar propostas de maior ou menor custo dentro de um mesmo corredor —, e não como ferramenta de orçamentação. O custo de referência adotado (US\$ 1.000.000,00/km para linha brownfield) corresponde apenas à superestrutura ferroviária básica, excluindo custos de projeto, desapropriação efetiva, obras de arte especiais, interferências complexas, supervisão e encargos financeiros, que em conjunto representam a maior parcela do custo real de projetos desta natureza.

A variação negativa do volume de terraplenagem também corrobora com a necessidade de rever métrica de custo adotada. Vale salientar que a variação apresentada, da ordem de 25% e 32%, é resultado das imprecisões topográficas do terreno resultantes da comparação de um modelo digital de superfície público e uma topografia detalhada.

Para estudos futuros, recomenda-se ampliar a base de cálculo do ICO para incluir estimativas de custo total de projeto (CAPEX completo), incorporando dados históricos de obras ferroviárias similares como referência paramétrica. A utilização de curvas ABC de obras ferroviárias com maior desagregação de itens, disponíveis em bases como o SICRO (DNIT), pode contribuir significativamente para a precisão das estimativas.

4.4. Aderência no Indicador de Capacidade

A capacidade prevista pela ferramenta para o Pátio 18 no Cenário 3 era de 36,0 PdT por dia. A capacidade real obtida após a implantação foi de aproximadamente 32 PdT por dia, correspondendo a um aumento de 91% sobre a situação anterior. O erro relativo entre previsão e resultado real é de aproximadamente 11%.



Esse nível de precisão é considerado aceitável para estimativas de planejamento de capacidade ferroviária, especialmente considerando que o modelo de eficiência produtiva (IEFP) foi calculado com base em parâmetros médios de corredor, sem simulação dinâmica de conflitos de cruzamento. Fatores como o mix real de trens (velocidades distintas, variação de comprimento de composição), janelas de manutenção da via e restrições operacionais específicas contribuem para o desvio observado.

5. DISCUSSÃO

5.1. Validade Convergente da Ferramenta

A convergência entre a recomendação sistemática da ferramenta e a decisão real tomada de forma independente por especialistas constitui evidência de validade convergente do modelo. Segundo Johnson (1990), a validade convergente de um instrumento de decisão é estabelecida quando diferentes métodos de avaliação chegam a resultados similares para o mesmo objeto. No presente caso, o modelo quantitativo e o julgamento especializado — cada qual operando com suas premissas e informações — identificaram a mesma região do corredor como localização preferencial para o pátio.

Essa convergência é particularmente relevante porque demonstra que os seis macroindicadores da ferramenta capturam, de forma sistematizada, os mesmos fatores que profissionais experientes consideram intuitivamente em seu processo decisório. A lógica fuzzy aplicada ao indicador de geometria se mostrou especialmente adequada tendo em vista que não há levantamento topográfico detalhado para fornecimento de informações precisas para a geometria nesta etapa do projeto. Ademais, é possível implementar soluções para ajuste da geometria da linha férrea existente, ainda que muito custosas e impactantes do ponto de vista operacional – o que é corretamente ponderado na lógica *fuzzy* do artigo de referência.

5.2. Robustez entre cenários

A identificação do Pátio 18 como solução de alto desempenho nos Cenários 2 e 3 simultaneamente sugere que a ferramenta tem capacidade de reconhecer posições que equilibram múltiplos objetivos estratégicos. Essa característica — denominada robustez entre cenários — é especialmente valiosa em contextos organizacionais nos quais as prioridades podem mudar entre o momento do estudo locacional e a efetiva implantação do pátio.

5.3. Limitações e estudos futuros

Além da limitação no modelo de estimativa de custo, discutida na Seção 4.3, o presente estudo aponta duas outras restrições a serem endereçadas em pesquisas futuras. Primeira, a validação empírica aqui apresentada é baseada em um único caso; estudos com múltiplos casos em corredores de diferentes características operacionais são necessários para generalizar os achados. Segunda, a metodologia fuzzy foi aplicada apenas ao indicador de geometria no modelo original; a extensão da lógica fuzzy a todos os macroindicadores, como sugerido pelos próprios autores, poderá aumentar a capacidade de articulação do modelo diante de variáveis com elevado grau de incerteza.



Adicionalmente, a integração da ferramenta com dados geoespaciais (SIG) e modelos de simulação de tráfego ferroviário permitiria automatizar a geração e avaliação das propostas de pátio, reduzindo o esforço manual de levantamento e aumentando a escala de aplicação.

6. CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou uma análise a respeito da validação empírica da ferramenta de auxílio à tomada de decisão para locação de novo pátio de cruzamento ferroviário desenvolvida por Witiuk e Von der Osten (2019), por meio da comparação entre a solução recomendada pelo modelo e a posição efetivamente implantada no trecho ferroviário próximo a Catanduva-SP.

Os resultados evidenciam três achados principais. Primeiro, a convergência posicional entre a recomendação da ferramenta (Pátio 18: 47+456 a 50+111) e a solução real (47+300 a 50+070), com desvio máximo de 156 m, confirma a capacidade do modelo de identificar corretamente a região favorável para implantação do pátio. Segundo, a estimativa de capacidade apresentou erro relativo de aproximadamente 11%, considerado aceitável para o estágio de planejamento ao qual a ferramenta se destina. Terceiro, a divergência no custo revela uma limitação metodológica relevante do indicador ICO, que opera como métrica relativa entre alternativas e não como instrumento de orçamentação, demandando aprimoramento em estudos futuros.

A convergência independente entre modelo quantitativo e julgamento especializado confere validade convergente à ferramenta e indica que os seis macroindicadores capturam adequadamente os fatores determinantes da decisão de localização de pátios. Estudos futuros identificados na pesquisa incluem: (i) ampliação da base de estimativa de custo com dados de obras ferroviárias realizadas; (ii) extensão da lógica fuzzy a todos os macroindicadores; (iii) aplicação da ferramenta em múltiplos corredores para generalização dos resultados; e (iv) integração com plataformas SIG e simulação de tráfego.

7. REFERÊNCIAS

- CHEN, Liang-Hsuan; WENG, Ming-Chu. A fuzzy model for exploiting quality function deployment. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 38, n. 5-6, p. 559-570, 2003.
- JOHNSON, Lester W. Discrete choice analysis with ordered alternatives. In: **Spatial Choices and Processes**. Elsevier, 1990. p. 279-289.
- MAMDANI, Ebrahim H. Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. In: **Proceedings of the institution of electrical engineers**. IEE, 1974. p. 1585-1588.
- WITIUK, Rafael L.; VON DER OSTEN, Fabiana B. Ferramenta de auxílio a tomada de decisão para locação de pátio de cruzamento ferroviário. In: **33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**, Balneário Camboriú. Anais. ANPET, 2019.



EMPIRICAL VALIDATION OF A DECISION SUPPORT TOOL FOR RAILWAY CROSSING YARD LOCATION: COMPARISON WITH THE ACTUAL IMPLEMENTED SOLUTION

ABSTRACT

Due to the recent scenario of capacity expansion in railway transportation, a decision-support tool has been developed for the location of railway crossing yards, based on six macro-indicators and the Fuzzy-QFD methodology. A case study conducted in 2019, applied to a railway segment near Catanduva-SP, defined the location for a new crossing yard between km 47+456 and km 50+111 as the recommended solution under a budget-constrained scenario. This paper compares these results with the solution actually implemented on the same segment, where the crossing yard was constructed between km 47+300 and km 50+070, with an operational capacity of approximately 32 train pairs per day, representing a 91% increase compared to the previous condition. The actual decision was made independently of the tool, based on expert consultation. The comparison reveals a significant positional convergence between the tool's recommendation and the implemented solution, with a maximum deviation of 156 m in the alignment of the turnouts, as well as a reasonable agreement in the capacity indicator, with a relative error of approximately 11%. The main divergence identified relates to the cost estimated by the tool, which was substantially lower than the actual cost, highlighting a methodological limitation that requires improvement. The results suggest convergent validity of the tool and indicate directions for its refinement in future studies.

Keywords: *Railway crossing yard, Fuzzy-QFD, decision-support tool*