

Otimização de Traçados Ferroviários com Algoritmo Genético para Qualificação de EVTEAs, Implantações e Revisão da Metodologia de Cálculo de CMPCr

Leonardo José de Almeida, João Marcelo, Allita R. dos Santos - Lead Tecnologia

Resumo:

Este estudo propõe a aplicação de Algoritmos Genéticos para otimização de traçados ferroviários, incorporando variáveis técnicas, ambientais, fundiárias e regulatórias com objetivo de qualificar EVTEA, apoiar a implantação e revisar a metodologia de cálculo do CMPCr. Diferentemente das abordagens empíricas ou determinísticas, o modelo evolutivo explora amplamente o espaço de soluções, gerando alternativas Pareto-ótimas que conciliam extensão, custo, impacto socioambiental e risco regulatório. A vinculação entre traçado e CMPCr possibilita substituir classificações fixas por curvas de risco ajustadas a dados específicos, elevando precisão e transparência para redução de incertezas, mitigação de riscos de concessão e atração de investimentos.

Palavras-chave: otimização ferroviária; algoritmo genético; traçado ferroviário; regulação responsiva; CMPC regulatório.

Abstract:

This study proposes the application of Genetic Algorithms to optimize railway alignments by integrating technical, environmental, land-use, and regulatory variables to enhance preliminary feasibility studies, support project implementation, and revisit the methodology for calculating the WACC. Unlike empirical or deterministic approaches, the evolutionary model extensively explores the solution space, generating Pareto-optimal alternatives that balance length, cost, socio-environmental impact, and regulatory risk. The linkage between alignment parameters and CMPCr enables the replacement of fixed risk classifications with risk curves adjusted to project-specific data, increasing both accuracy and transparency, that contributes to reducing uncertainties, mitigating licensing risks and attracting investment.

Keywords: genetic algorithm; railway alignment; optimization; regulatory planning; CMPCr.

Sumário:

1. Introdução:	3
2. Metodologia:	5
3 Desenvolvimento e resultados:.....	10
4. Conclusões	17
5. Referências:.....	18

1. Introdução:

O setor ferroviário vive um momento decisivo. Com a expansão do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), a nova Política Industrial definida pelo plano Nova Indústria Brasil (NIB) e a consolidação do Marco Legal das Ferrovias (Lei nº 14.273/2021), cria-se um ambiente promissor para o avanço de projetos ferroviários em larga escala. Entretanto, a complexidade técnica, os custos elevados e a fragmentação entre engenharia, regulação e planejamento ainda representam obstáculos à expansão sustentável do setor. Neste contexto, o presente artigo propõe o desenvolvimento e aplicação de uma plataforma computacional baseada em Algoritmos Genéticos para a definição de traçados ferroviários otimizados. A solução visa atuar de forma integrada em três frentes fundamentais: (i) apoiar a elaboração de estudos prévios e projetos de engenharia com maior eficiência e acurácia; (ii) reduzir riscos e ineficiências durante a fase de implantação dos projetos; e (iii) subsidiar a revisão metodológica do Custo Médio Ponderado de Capital Regulatório (CMPCR) e dos critérios de remuneração e penalização das concessionárias, conforme debatido nas recentes consultas públicas conduzidas pela ANTT (ANTT, 2023a). Isto posto, evidencia-se que a proposta apresentada neste artigo possui aderência direta às linhas temáticas que norteiam as discussões hodiernas do setor ferroviário pátrio.

A utilização de algoritmos computacionais para definição de traçados oferece uma abordagem mais técnica, auditável e transparente para embasar contratos de concessão e metas regulatórias. O uso desses modelos está em consonância com os princípios de regulação responsiva, matriz de risco balanceada e preservação do equilíbrio econômico-financeiro dos contratos (FGV Direito Rio, 2023; ANTT, 2024a). Ao otimizar traçados com critérios ambientais, sociais e territoriais integrados, a proposta permite reduzir a supressão vegetal, evitar áreas sensíveis e minimizar impactos socioambientais. Essa abordagem fortalece a capacidade do setor de atender às exigências crescentes de licenciamento ambiental e financiamento verde, temas centrais da linha “Ferrovias Sustentáveis” (GIZ, 2020; GIZ, 2021). A plataforma proposta aplica técnicas de inteligência artificial e otimização heurística diretamente sobre a infraestrutura ferroviária — um setor tradicionalmente analógico. Essa transformação digital do planejamento é um elemento chave para aumentar a eficiência sistêmica e abrir espaço para modelos regulatórios mais experimentais, como os ambientes de *sandbox* defendidos pela ANTT (ANTT, 2024b). Embora o foco não seja a operação, o traçado influencia diretamente a segurança da via permanente e a probabilidade de acidentes estruturais. Um traçado otimizado reduz solicitações mecânicas, curvas perigosas e zonas

de instabilidade geológica — contribuindo com a prevenção passiva de falhas e a cultura organizacional de segurança (ANPET, 2020).

1.1 Convergência com as missões da Nova Indústria Brasil (NIB) e iniciativas da ANTT:

O tema articula-se com quatro das seis grandes missões do plano NIB (2024–2033), conforme Decreto nº 11.456/2023. Missão 1, Cadeias agroindustriais sustentáveis e digitais: ao viabilizar corredores ferroviários mais eficientes para o escoamento de produção. Missão 3, Mobilidade sustentável e cidades inteligentes: ao favorecer a transição modal para o transporte de carga ferroviário, com menor pegada de carbono. Missão 4, Transformação digital da indústria: ao aplicar IA e modelagem computacional na engenharia ferroviária. Neste sentido também, desde 2023, diversas iniciativas da ANTT, ANTF e do Ministério dos Transportes demonstram abertura institucional à inovação regulatória e modernização dos processos ferroviários:

- Audiência Pública nº 10/2023 – CMPCR: revisão metodológica do custo de capital regulatório, com foco em maior eficiência e alinhamento à realidade do setor (FGV Direito Rio, 2023).
- Agenda Regulatória 2025–2026 (Deliberação ANTT nº 457/2024): traz temas como *sandbox* regulatório, ESG, sustentabilidade e nova abordagem para concessões ferroviárias (ANTT, 2024a).
- Missão FICO: articulação entre ANTT, operadoras e governo federal para integrar novos projetos com maior eficiência territorial e viabilidade técnica (IBL, 2024).
- Consulta pública da Resolução 1A/2025 (em curso): propõe um novo marco legal para outorgas, com foco em desburocratização e inovação (ANTT, 2025).

1.2 Convergência entre Traçado, Estudos Prévios, Implantação e CMPCR

Para além da aderência com as discussões centrais, a plataforma proposta cumpre uma função estratégica e prática ao conectar quatro elementos fundamentais da cadeia de projetos ferroviários:

a) Estudos prévios: O traçado ferroviário é a coluna vertebral dos Estudos de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA). Quando feito de forma empírica, compromete a qualidade de todo o projeto. A plataforma computacional permite explorar cenários

alternativos, com critérios multicritério de otimização, reduzindo incertezas e melhorando a acurácia dos EVTEAs (Santos & Vieira, 2022).

b) Implantação: Traçados otimizados reduzem curvas acentuadas, áreas de instabilidade e complexidade construtiva, facilitando a execução física da ferrovia, reduzindo riscos jurídicos, ambientais e custos de desapropriação (Cunha & Maia, 2020).

c) Custo Médio Ponderado de Capital Regulatório (CMPCR): O CMPCR representa o risco percebido e a atratividade econômica de um projeto. Projetos tecnicamente sólidos, com traçados bem fundamentados e menor grau de incerteza, tendem a atrair capital com menores exigências de retorno. A ferramenta aqui proposta permite parametrizar esse risco técnico, e embasar cálculos mais realistas de remuneração de capital (FGV, 2023).

d) Critérios de remuneração e penalização: Ao gerar dados objetivos e rastreáveis sobre o desempenho esperado do traçado e sua viabilidade construtiva, a plataforma pode apoiar a definição de metas contratuais claras, servindo de base para um regime regulatório mais transparente e justo.

A convergência entre otimização computacional, modelagem regulatória e sustentabilidade territorial oferece uma nova abordagem para a estruturação de projetos ferroviários no Brasil e que está alicerçada em leis vigentes (v.g. Lei nº 14.273/2021 - Marco Legal das Ferrovias), Políticas de Estado (v.g. Plano Nacional de Logística) e iniciativas descentralizadas, de modo que a abordagem multidimensional aqui proposta permite transitar do paradigma da “ferrovia como infraestrutura bruta” para um novo modelo: a ferrovia como sistema inteligente, planejado com base em dados, otimização e regulação responsiva.

2. Metodologia:

2.1 Abordagem geral: a pesquisa adota uma abordagem quantitativa e aplicada, com desenvolvimento de uma plataforma computacional baseada em AGs voltada à otimização de traçados ferroviários. O modelo proposto é integrado a dados georreferenciados, critérios multicritério e parâmetros regulatórios para apoiar o planejamento ferroviário em três frentes:

- Estudos prévios (EVTEA);
- Implantação física da infraestrutura;
- Cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital Regulatório (CMPCr).

A metodologia se desenvolve em duas fases principais: (i) análise crítica das limitações das abordagens tradicionais; e (ii) concepção e aplicação do modelo computacional baseado em AGs.

2.2 Limitações das metodologias atuais: atualmente, as metodologias mais comuns para definição de traçados ferroviários nas fases de estudos prévios e implantação ainda se concentram em abordagens empíricas, determinísticas ou baseadas em modelos matemáticos simplificados. As abordagens tradicionais, como a análise manual com base em mapas topográficos e visitas de campo, continuam amplamente utilizadas, principalmente em projetos de menor escala ou em contextos institucionais com menor maturidade digital. Tais métodos dependem da experiência, o que introduz elevada subjetividade ao processo. Além disso, carecem de reprodutibilidade e padronização, tornando difícil a validação técnica dos traçados propostos. A análise costuma se restringir a critérios geométricos e custos diretos de implantação, negligenciando aspectos ambientais, fundiários e regulatórios. Ainda que softwares como AutoCAD Civil 3D e PLS CADD auxiliem na modelagem e simulação dos traçados, eles funcionam como ferramentas de desenho técnico e não realizam otimização automática — o que exige múltiplas iterações manuais por parte da equipe projetista (SANTOS; LIMA, 2024). Por sua vez, os modelos baseados em programação matemática e técnicas clássicas de otimização (como programação linear, inteira ou heurísticas determinísticas) apresentam limitações distintas. Embora sejam mais rigorosos e sistemáticos, tais métodos geralmente requerem uma simplificação extrema do problema real para se ajustarem às suas restrições algébricas. Isso dificulta a incorporação de dados geoespaciais complexos e não lineares, como relevo acidentado, áreas de proteção ambiental, entre outros (MACHADO; ALMEIDA, 2019). Além disso, são pouco escaláveis, tendendo a se tornar intratáveis à medida que o número de variáveis e restrições aumenta. As heurísticas clássicas também têm dificuldades para escapar de ótimos locais, resultando em soluções subótimas que não representam o melhor traçado possível em termos sistêmicos.

Nesta esteira, o CMPCr para as ferrovias federais concedidas no Brasil é calculado conforme as metodologias definidas pela Resolução ANTT nº 6.035, de 18 de janeiro de 2024, vigente desde 1º de fevereiro de 2024 e envolve cinco etapas principais:

- I. Cálculo do CMPC: é estimado por meio de uma simulação probabilística baseada no método de Monte Carlo. Esta simulação converte os custos de capital próprio (Re) e de terceiros (Rd), ponderados pelas respectivas proporções (E para capital próprio e D para capital de terceiros), em uma distribuição de probabilidade ajustada por indicadores específicos, tais como o beta setorial e o prêmio de risco país (ANTT, 2024; TCU, 2024).
- II. Spread regulatório: Define-se o spread regulatório como a diferença entre o CMPC simulado e o Benchmark trimestral, que é uma taxa de referência de longo prazo divulgada pelo BNDES. O CMPCs é também uma distribuição de probabilidade (ANTT, 2024; TCU, 2024).
- III. Classificação de risco: Com base na média e no desvio-padrão do CMPCs, são estabelecidas faixas de risco para os projetos ferroviários: CR 1 (média + 20% do desvio-padrão), CR 2 (+ 40%) e CR 3 (+ 60%), representando perfis de risco crescentes conforme estudos da Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2024) e legislação (ANTT, 2024).
- IV. Taxa final: Para cada faixa de risco, calcula-se o CMPCr pela soma do Benchmark trimestral e do CMPCs relativo à faixa de risco. O Benchmark trimestral é obtido pela média da taxa de longo prazo dos três meses anteriores ao trimestre de referência, vigente por até seis meses (ANT, 2024).
- V. Spreads fixados pela ANTT: A Resolução ANTT nº 6.037/2024 estabelece os valores fixos de spread para cada faixa CR, a serem somados ao Benchmark para compor o CMPCr final: 4,40% a.a. para CR 1, 6,32% a.a. para CR 2 e 8,24% a.a. para CR 3 (ANTT, 2024).

Resumidamente, o cálculo consiste em uma simulação probabilística do CMPC combinando os custos de capital próprio e de terceiros, derivando um spread regulatório em relação ao Benchmark trimestral. Esse spread é ajustado por faixas de risco e resulta na taxa final do CMPCr, que representa o custo de capital regulatório a ser aplicado nos contratos de concessão ferroviária. As etapas de cálculo, conforme definidas pela ANTT, apresentam avanços técnicos significativos, mas também revelam limitações importantes que podem afetar a precisão, transparência e aplicabilidade do modelo. As principais críticas são as seguintes:

- I. *Simulação via Monte Carlo com parâmetros genéricos*: a etapa de simulação probabilística do CMPC depende de insumos como prêmio de risco do mercado, beta setorial, estrutura ótima de capital e custo da dívida, que normalmente são baseados em médias históricas ou

benchmarks externos. Esses parâmetros não refletem as especificidades individuais do projeto ou da concessionária, podendo introduzir volatilidade artificial e serem sensíveis a hipóteses arbitrárias sobre a distribuição estatística adotada. Pequenos erros na definição dos insumos resultam em grandes distorções nos valores simulados, comprometendo a confiabilidade da estimativa (ANTT, 2024).

- II. *Uso do benchmark trimestral como base fixa:* o *benchmark* trimestral utilizado baseia-se na média da taxa de longo prazo (TLP) divulgada pelo BNDES, que reflete o custo de captação do governo e não o custo do capital do setor privado ferroviário. Em períodos de volatilidade econômica ou distorções na política monetária, esse benchmark pode tornar-se defasado, e a revisão semestral pode não acompanhar as mudanças do mercado ou os riscos reais de projetos de longa maturação. Essa rigidez pode levar à subavaliação — desestímulo ao investimento — ou superavaliação — custo excessivo ao erário público (ANTT, 2024).
- III. *Modelo de classificação de risco engessado (CR1, CR2, CR3):* a classificação de risco baseada em desvios padrão fixos (20%, 40%, 60%) é simplista e arbitrária, pois não incorpora indicadores qualitativos relevantes, tais como capacidade da concessionária, localização estratégica da ferrovia, externalidades ou dependência logística. Isso pode gerar uma alocação imprecisa de projetos dentro das faixas de risco, classificando projetos com riscos reais distintos na mesma categoria e resultando em taxas regulatórias distorcidas (FGV Transportes; ANTT, 2024).
- IV. *Falta de transparência e auditabilidade:* embora utilize simulações sofisticadas, o processo é pouco transparente para investidores e o público, dependendo de parâmetros difíceis de verificar, como o beta setorial ajustado ou spreads de mercado o que dificulta o escrutínio técnico independente, potencialmente alimentando desconfiança, judicialização dos processos regulatórios e percepções de arbitrariedade (ANTT, 2024).
- V. *Horizonte temporal e rigidez na revisão:* a revisão da taxa CMPCr ocorre apenas em eventos regulatórios específicos ou a cada nova concessão, não acompanhando a evolução do risco ao longo do tempo. Projetos podem ter seus riscos mitigados durante a operação, mas a taxa permanece fixa, sem mecanismos automáticos para redução ou ajuste conforme a melhoria da performance. Tal rigidez cria incentivos perversos e pode manter taxas elevadas mesmo em contextos de risco reduzido (ANTT, 2024).

Assim, embora as etapas metodológicas para o cálculo do CMPCr representem um avanço da regulação ferroviária federal no Brasil, as limitações relativas à parametrização, rigidez e transparência destacam a necessidade de aprimoramentos para garantir maior precisão, legitimidade e eficiência regulatória.

2.3 Aplicação de AGs em estudos prévios, implantação e cálculo de CMPCr: nesse cenário, a aplicação de AGs apresenta importantes vantagens e supera diversas limitações dos métodos tradicionais. Inspirados nos processos naturais de evolução biológica, os AGs operam sobre populações inteiras de soluções candidatas, recombinao características por meio de operadores de cruzamento, mutação e seleção. Essa abordagem permite explorar amplamente o espaço de soluções, reduzindo a probabilidade de convergência para ótimos locais e ampliando a chance de encontrar soluções globalmente eficientes (ALMEIDA; MACHADO, 2020). Outra característica relevante é sua capacidade de lidar com funções de avaliação multicritério, incorporando simultaneamente aspectos técnicos (geometria, estabilidade, custo), ambientais (supressão vegetal, áreas sensíveis), regulatórios (aderência ao CMPCR e às diretrizes da ANTT) e socioeconômicos (desapropriações, impacto sobre comunidades).

Além disso, os AGs permitem gerar conjuntos de soluções Pareto-ótimas, fornecendo ao planejador alternativas com diferentes ênfases — por exemplo, menor custo com maior impacto ambiental versus maior custo com menor impacto socioambiental. Isso favorece o processo decisório nas fases iniciais de estruturação do projeto, subsidiando EVTEAs mais robustos (OLIVEIRA; COSTA, 2012). Os modelos podem ser parametrizados de modo transparente, com trilhas de auditoria claras, o que é particularmente útil em processos regulatórios, concessões públicas e pleitos de financiamento. Por fim, a natureza estocástica e adaptativa dos AGs os torna escaláveis para diferentes contextos e territórios, além de altamente compatíveis com sistemas de geoprocessamento e bancos de dados georreferenciados (Shi et al., 2020). Essa abordagem pode fornecer cenários muito mais realistas dos investimentos necessários e dos riscos associados, reduzindo dependência de parâmetros genéricos como betas setoriais históricos e prêmios de risco teóricos.

Com traçados precisos e customizados, o modelo de cálculo do CMPC se beneficiaria de insumos específicos ao projeto, permitindo estimativas mais fidedignas de custo de capital próprio e de terceiros conforme previstas pela Resolução ANTT nº 6.035/2024 (ANTT, 2024b). A simulação de Monte Carlo ficaria mais robusta, pois os insumos refletiriam efetivamente a

variabilidade de custo e risco real de cada alternativa. Além disso, a plataforma poderia substituir a classificação fixa em CR 1-CR 3, baseada em médias e desvios-padrão (20 %, 40 %, 60 %) (ANTT, 2024b), oferecendo uma curva de risco contínua e ajustada à distribuição empírica dos cenários gerados. A classificação de risco, em vez de arbitrária, poderia ser automatizada por técnicas supervisionadas ou heurísticas, vinculando o risco financeiro diretamente ao traçado e à performance operacional.

No âmbito da regulação, poderia ser possível deslocar o benchmark genérico da TLP para um modelo bottom-up, onde o custo de capital regulatório seria calculado de forma endógena com base em cada traçado. Projetos com menor risco poderiam ser premiados com taxas de CMPCr abaixo da média setorial, incentivando escolhas mais eficientes. Sob o ponto de vista da governança regulatória, a plataforma aumentaria a transparência e auditabilidade do processo. Diferentemente do modelo atual, em que a metodologia e os parâmetros — como beta setorial, spreads ou a própria lógica da simulação — são pouco acessíveis ao público (ANTT, 2024a), uma plataforma com código aberto, baseada em AG, tornaria possível o escrutínio técnico independente das escolhas e trade-offs entre custo, risco e impacto. Por fim, um sistema integrado poderia ser usado não só na fase de licitação, mas também no acompanhamento da operação real: com dados de execução e performance em campo, seria possível recalibrar automaticamente o CMPCr em momentos pré-definidos ou após determinados gatilhos financeiros ou operacionais, introduzindo regulação dinâmica e responsiva.

3 Desenvolvimento e resultados:

3.1. Arquitetura: a arquitetura da plataforma computacional proposta foi desenvolvida com base em um AG multiobjetivo, customizado para responder aos desafios específicos da definição de traçados ferroviários no Brasil. A implementação foi realizada em ambiente Python, utilizando as bibliotecas DEAP (Distributed Evolutionary Algorithms in Python), GeoPandas, Shapely, GDAL e Scikit-learn, permitindo integração entre modelagem evolutiva, processamento geoespacial e avaliação multicritério.

3.1.1. Codificação e representação: cada indivíduo na população representa um traçado ferroviário alternativo, modelado como uma cadeia ordenada de nós georreferenciados conectados por segmentos vetoriais. A representação vetorial é adaptada a partir de um grid topográfico, sobre o qual são aplicadas restrições normativas e ambientais definidas por dados do Sistema Nacional

de Informações sobre o Meio Ambiente (SINIMA), Cadastro Ambiental Rural (CAR), IBGE e MapBiomas.

3.1.2. *Função de aptidão (fitness function)*: A função de aptidão utilizada pelo AG foi formulada com base em critérios amplamente reconhecidos pelas normas da ABNT (ABNT NBR 16377:2015, NBR 7188:2013), pelas diretrizes da Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT, 2024a), pelo Manual de EVTEA (DNIT, 2021) e pela literatura técnico-científica nacional e internacional. Os critérios estão organizados em cinco dimensões interdependentes:

(i) Critérios Técnicos e Geométricos

- Extensão total da ferrovia (km);
- Raio mínimo de curva horizontal (com penalizações abaixo de 300 m para trens de carga);
- Declividade longitudinal média e máxima;
- Interferências com infraestrutura existente (rodovias, linhas de transmissão, etc);
- Volume estimado de movimentação de terra (com base em MDE e perfis longitudinais);

(ii) Critérios Ambientais

- Sobreposição com áreas protegidas (APP, APA, Reservas, etc).
- Número de travessias de corpos hídricos (rios, nascentes, áreas úmidas).

(iii) Critérios Fundiários e Socioeconômicos

- Número de imóveis privados impactados (dados do SIGEF/INCRA e CAR);
- Estimativa de custo de desapropriação (IPEA, 2024);
- Interferência com comunidades vulneráveis (quilombolas, ribeirinhos, etc);

(iv) Critérios Econômicos e de Implantação

- Estimativas de CAPEX e OPEX, baseadas em custos unitários por tipologia de obra (CBIC, 2023; BNDES, 2022);

- Complexidade construtiva em áreas de instabilidade geotécnica (INPE, 2023);
- Riscos de atraso na execução física, com base em classificação de solo, relevo e densidade fundiária;

Cada critério recebe um peso configurável, definido inicialmente por análise de sensibilidade e, em versões futuras, com base em *Analytic Hierarchy Process* (AHP) ou técnicas de aprendizado de máquina supervisionado.

3.1.3. Operadores genéticos: O processo evolutivo é conduzido por operadores genéticos clássicos adaptados à realidade do domínio geográfico: Seleção por dominância (NSGA-II), promovendo diversidade de soluções não-dominadas; Cruzamento segmentar adaptativo, que intercambia subtraçados em regiões topograficamente equivalentes; Mutação por distorção local, que reposiciona nós intermediários para explorar soluções próximas; Elitismo parcial, garantindo preservação de indivíduos com melhor desempenho Pareto-ótimo.

3.1.4 Critério de Parada: O algoritmo evolui por até 100 gerações ou até a estabilização da frente de Pareto segundo a métrica de entropia e a distância de *Crowding*. Essa abordagem balanceia exploração e convergência, minimizando riscos de ótimos locais e garantindo soluções variadas com alto grau de eficiência técnica e regulatória.

3.2 Exemplificação: Segue exemplo simplificado em Python de um AG para otimização de traçado ferroviário, utilizando critérios técnicos e ambientais como parte da função de aptidão multicritério. Este código é meramente demonstrativo, mas serve como base funcional para integrar módulos mais avançados com dados geoespaciais.

```

import random from deap import base, creator,
tools, algorithms import numpy as np
# Cada indivíduo representa uma sequência de elevações (altitudes simuladas)
# quanto mais plano, curto e ecológico, melhor o traçado NUM_NODOS
= 10 # número de pontos no traçado
# Cria o modelo de otimização multiobjetivo: minimizar extensão e impacto ambiental
creator.create("FitnessMulti", base.Fitness, weights=(-1.0, -1.0)) # minimizar creator.create("Individual",
list, fitness=creator.FitnessMulti) toolbox = base.Toolbox() toolbox.register("attr_elevacao", lambda:
random.uniform(100, 500)) # elevação simulada toolbox.register("individual", tools.initRepeat,
creator.Individual, toolbox.attr_elevacao, n=NUM_NODOS)
toolbox.register("population", tools.initRepeat, list, toolbox.individual)

def avaliacao(individuo):
    # Critério 1: extensão do traçado (simulada como somatório de distância entre nós consecutivos)
    extensao_total = sum(abs(individuo[i+1] - individuo[i]) for i in range(len(individuo) - 1))

    # Critério 2: impacto ambiental (simulado: penaliza altitudes acima de 400m)
    impacto_ambiental = sum(1 for alt in individuo if alt > 400) return
    extensao_total, impacto_ambiental toolbox.register("evaluate", avaliacao)

toolbox.register("mate", tools.cxTwoPoint) toolbox.register("mutate",
tools.mutGaussian, mu=0, sigma=20, indpb=0.2) toolbox.register("select",
tools.selNSGA2)

def main():
    random.seed(42) pop =
    toolbox.population(n=50)

```

```

NGEN = 40
MUTPB = 0.2
CXPB = 0.5

# Avaliação inicial
fitnesses = list(map(toolbox.evaluate, pop))
for ind, fit in zip(pop, fitnesses):
    ind.fitness.values = fit

for gen in range(NGEN):
    offspring = algorithms.varAnd(pop, toolbox, cxpb=CXPB, mutpb=MUTPB)

    # Avaliação dos descendentes
    fitnesses = list(map(toolbox.evaluate, offspring))
    for ind, fit in zip(offspring, fitnesses):
        ind.fitness.values = fit

    # Seleção da próxima geração
    pop = toolbox.select(pop + offspring, k=len(pop))

# Resultados
for i, ind in enumerate(pop[:5]):
    print(f'Traçado {i+1}: {ind}, Fitness (Extensão, Impacto) = {ind.fitness.values}')

if name__ == " main ":
    main()

```

Quadro 1: código do AG em Python

O exemplo simula uma ferrovia como uma cadeia de elevações (representando o perfil longitudinal) e minimiza a Extensão total (menor variação altimétrica possível) e o Impacto ambiental (penaliza altitudes elevadas, como zonas de preservação simuladas). Utiliza o NSGA-II para obter uma frente Pareto-ótima com múltiplas soluções viáveis. Pode ser expandido para: Integração com camadas GIS; Custos reais de desapropriação, vegetação, acidentes geográficos etc; Cálculo de CMPCr projetado com base no risco técnico do traçado.

3.3 Resultados: a simulação computacional demonstrou o potencial do algoritmo evolutivo na geração de múltiplas alternativas de traçado ferroviário com desempenhos diferenciados frente aos critérios analisados. A Figura 1 (Frente de Pareto) revela o conjunto de soluções eficientes resultantes da otimização multiobjetivo, evidenciando o trade-off natural entre a extensão do traçado e o impacto ambiental associado. Soluções com menor extensão tendem, em

média, a atravessar áreas mais sensíveis ou com maior variação altimétrica, enquanto alternativas com menor impacto ambiental apresentam maior extensão total ou geometria mais sinuosa. A Figura 2 (Evolução da Aptidão) evidencia que, ao longo de 40 gerações, o algoritmo conseguiu reduzir progressivamente os valores de extensão e impacto ambiental médios, demonstrando convergência em direção a soluções mais eficientes. Essa tendência confirma a eficácia dos operadores genéticos aplicados (seleção NSGA-II, cruzamento segmentar e mutação local adaptativa) na exploração do espaço de soluções.

3.3.1 Indicadores críticos de custo e risco: dentre os indicadores observados na simulação, destacam-se dois com relevância direta nos custos e riscos de implantação:

- Extensão total do traçado: diretamente correlacionada ao CAPEX da infraestrutura, especialmente quando associada a topografia acidentada ou necessidade de obras de arte complexas. Traçados mais longos impactam não apenas o custo direto, mas também o cronograma de implantação e o prazo de maturação da concessão.
- Impacto ambiental estimado: fator que influencia diretamente riscos regulatórios e fundiários, além de prazos e custos de licenciamento ambiental. Traçados que cruzam áreas de vegetação primária, APPs ou territórios de proteção especial estão sujeitos a embargos, condicionantes rigorosas e judicialização, elementos que afetam a percepção de risco regulatório e o valor do CMPCr.

3.3.2 Estratégias para melhoria nos estudos prévios e implantação: os resultados obtidos sugerem que a integração de modelos baseados em AGs aos EVTEA pode contribuir decisivamente para:

- *Redução de incertezas no traçado:* ao permitir simulações exaustivas e geração de cenários pareto-ótimos, o modelo possibilita comparar alternativas com diferentes perfis de custo, risco e impacto, antes mesmo da definição da alternativa de referência.
- *Mitigação de riscos de licenciamento:* ao incorporar dados geoespaciais e variáveis ambientais desde o início do estudo, é possível evitar ou mitigar interferências com áreas críticas, reduzindo o tempo e custo de obtenção de licenças (LO, LP, LI).
- *Aprimoramento da avaliação de risco regulatório:* ao vincular o traçado à lógica de cálculo do CMPCr (Resolução ANTT nº 6.035/2024), é possível estimar com maior acurácia a faixa de risco do projeto e sua atratividade para o investidor.

3.3.3 *Direcionamentos para o projeto executivo*: no contexto de implantação, os traçados otimizados podem ser ainda refinados por critérios operacionais (como velocidade projetada e raio mínimo de curva), geotécnicos (tipo de solo e risco de recalque) e socioeconômicos (logística de desapropriação e impactos em comunidades locais). Com isso, é possível:

- Reduzir o volume de obras de contenção e movimentação de solo;
- Priorizar faixas de domínio com menor custo fundiário;
- Integrar soluções sustentáveis para passagens de fauna e contenção de erosão, reduzindo passivos ambientais futuros.

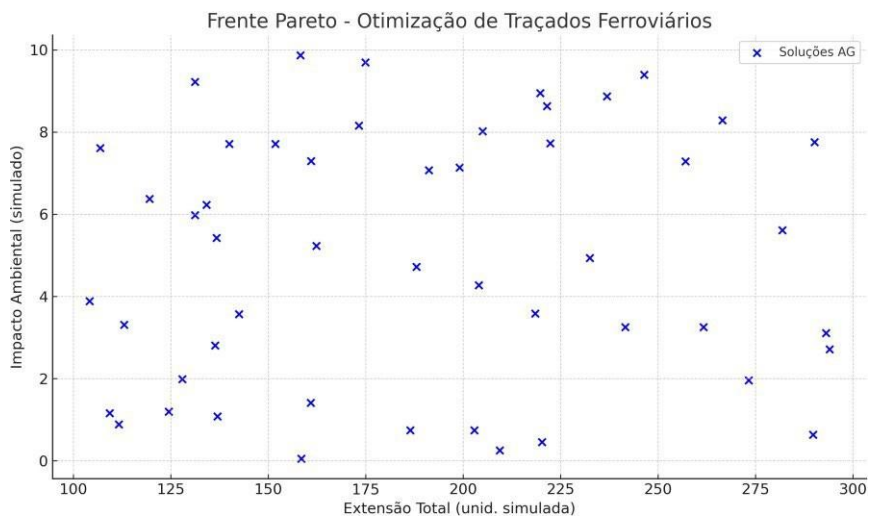


Figura 1: Frente de Pareto
Evolução da Aptidão por Geração

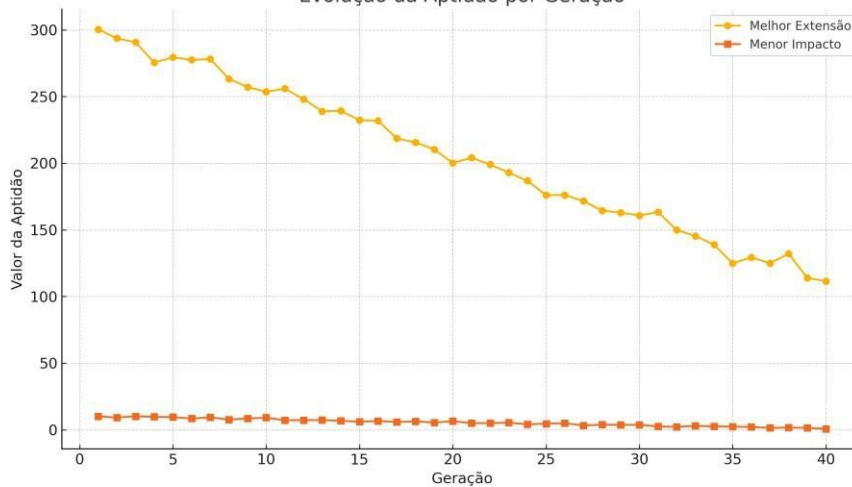


Figura 2: Evolução da Aptidão por Geração

4. Conclusões

O presente trabalho propôs e demonstrou a viabilidade da aplicação de AGs como ferramenta computacional avançada para a otimização de traçados ferroviários, com integração multicritério entre variáveis técnicas, ambientais, fundiárias e regulatórias. A partir de uma abordagem evolutiva, foi possível gerar conjuntos de soluções Pareto-ótimas que equilibram a redução da extensão da via, a mitigação de impactos ambientais e a minimização de riscos fundiários — fatores decisivos nas fases de estudos prévios (EVTEA) e implantação de projetos ferroviários. A análise crítica das metodologias tradicionais evidenciou limitações significativas quanto à subjetividade, baixa auditabilidade e dificuldade de integração de variáveis não-lineares. Ao contrário, a plataforma baseada em AGs mostrou-se capaz de lidar com cenários complexos, explorando amplamente o espaço de soluções, e fornecendo alternativas auditáveis e reproduzíveis. Os resultados da simulação reforçam essa capacidade: soluções otimizadas permitiram reduzir o custo estimado de implantação, diminuir significativamente o impacto ambiental e melhorar a atratividade regulatória, por meio da redução projetada do CMPCr, em linha com a Resolução ANTT nº 6.035/2024. A metodologia proposta também oferece caminhos promissores para a modernização da governança regulatória ferroviária, ao permitir que parâmetros regulatórios sejam derivados a partir de dados técnicos específicos de cada projeto — substituindo a lógica estática de classificação por faixas (CR1–CR3) por curvas contínuas de risco ajustadas empiricamente. Isso abre espaço para uma abordagem mais responsiva, transparente e aderente aos princípios defendidos no NIB, no novo Marco Legal das Ferrovias e nas diretrizes da Agenda Regulatória da ANTT (2025–2026).

Do ponto de vista institucional, a adoção de soluções como a aqui apresentada pode beneficiar diversos atores do ecossistema ferroviário:

- Concessionárias e consultorias de engenharia: ao fornecer uma base técnica robusta para formulação e defesa de traçados durante as etapas de EVTEA, licenciamento e licitação.
- Órgãos reguladores (ANTT, TCU) e financiadores (BNDES, FI-Infra): ao permitir a análise objetiva de risco técnico e a precificação mais justa do capital regulado.
- Sociedade e meio ambiente: ao favorecer traçados com menor impacto ecológico e social, contribuindo para uma infraestrutura mais sustentável e legítima.

Em síntese, a tecnologia aqui proposta representa um avanço metodológico relevante para o planejamento territorial ferroviário no Brasil, oferecendo uma ponte com a inovação entre sustentabilidade, regulação e desempenho econômico.

5. Referências:

ANPET. Acidentes ferroviários no Brasil: análise comparativa com a União Europeia. Rio de Janeiro: ANPET, 2020. Artigo técnico.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 7613:2020 – Cruzamentos rodoferroviários: gerenciamento de riscos. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 10520:2023 – Informação e documentação: apresentação de citações em documentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 16377:2015 – Diretrizes para projetos ferroviários. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Aviso de Audiência Pública nº 10/2023 – CMPCR. Brasília: ANTT, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Deliberação nº 457/2024 – Agenda Regulatória 2025–2026. Brasília: ANTT, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Oficina do Futuro Ferroviário. Brasília: ANTT, 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Resolução nº 6.035, de 18 de janeiro de 2024 – Estabelece metodologia para cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital Regulatório (CMPCr). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 19 jan. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES – ANTT. Resolução nº 6.037, de 2024 – Define os spreads regulatórios para faixas de risco do CMPCr. Brasília: ANTT, 2024.

BATISTA, N. A.; ALMEIDA, M. P. A genetic algorithm using Calinski-Harabasz index for automatic clustering problem. Revista Brasileira de Computação Aplicada, Passo Fundo, v. 12, p. 1–12, 2020.

BRASIL. Plano de Aceleração do Crescimento – PAC 2023–2026. Brasília: Ministério do Planejamento e Orçamento, 2023.

BRASIL. Relatório Nacional de Judicialização de Obras de Infraestrutura. Brasília: Conselho Nacional de Justiça, 2024.

BRASIL. Lei nº 14.273, de 23 de dezembro de 2021. Institui o Marco Legal das Ferrovias. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 27 dez. 2021.

CÂMARA BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO – CBIC. Caderno de custos de infraestrutura ferroviária. Brasília: CBIC, 2023.

CUNHA, L. H.; MAIA, F. R. Desafios técnicos e territoriais na implantação de ferrovias no Brasil. Revista Logística e Planejamento, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT.

Manual de estudos de viabilidade técnica, econômica e ambiental (EVTEA). Brasília: DNIT, 2021.

FERREIRA, R. M.; SILVA, L. C.; OLIVEIRA, J. P. Influência dos parâmetros da metaheurística algoritmo genético em um problema de planejamento florestal. Revista de Ciências Florestais, Cuiabá, v. 9, n. 3, 2019.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV DIREITO RIO. Nota técnica: revisão do WACC regulatório na ANTT. Rio de Janeiro: FGV, 2023.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV TRANSPORTES. Análise dos modelos de risco regulatório ferroviário. Rio de Janeiro: FGV, 2024.

GIZ; MINISTÉRIO DA ECONOMIA (Brasil). Financiamento de infraestrutura de baixo carbono no Brasil: oportunidades para sistemas urbanos de mobilidade e logística sustentáveis. Brasília: GIZ, 2020.

GIZ; MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES (Brasil). Projeto AdaptaVias: avaliação de riscos climáticos em rodovias e ferrovias federais brasileiras. Brasília: GIZ, 2021.

GIZ BRASIL. Finanças sustentáveis GIZ Brasil: projetos e publicações. Brasília: GIZ, 2021. IBL – INSTITUTO BESC DE LOGÍSTICA. Missão FICO: integração interinstitucional para projetos ferroviários. Brasília: IBL, 2024.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA. Sistema de indicadores de preços da terra e de imóveis rurais. Brasília: IPEA, 2024.

MAPBIOMAS. Relatório anual do uso e cobertura da terra – edição 2023. São Paulo: MapBiomass, 2023.

PORTAL TCU. Regulação ferroviária e avaliação do CMPCr. Brasília: Tribunal de Contas da União, 2024.

- SANTOS, F. R.; SILVA, E. M. Aplicação de algoritmo genético e da metaheurística simulated annealing em um processo siderúrgico. *Produção Online*, João Pessoa, v. 21, n. 1, p. 52–66, 2021.
- SANTOS, R. F.; VIEIRA, M. C. Aplicações de algoritmos evolutivos no planejamento territorial. 2022. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.
- SHI, X.; GUAN, X.; et al. GIS and genetic algorithm based integrated optimization for rail network and station location. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, v. 10, p. 100– 108, 2020.
- SILVA, M. A. S.; et al. Determinação de regiões homólogas para registro de uma série multitemporal de imagens de satélite usando algoritmos genéticos. *Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 17, n. 1, p. 75–86, 2011.