

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
BACHARELADO EM ENGENHARIA COMPUTACIONAL

Gustavo Carvalhaes da Fonseca Ferreira

Meta-heurística de Otimização por Colônia de Formigas para Otimizar
Manobras Ferroviárias em Pátios de Classificação

Juiz de Fora

2025

Carvalhaes da Fonseca Ferreira, Gustavo.

Meta-heurística de Otimização por Colônia de Formigas para Otimizar Manobras Ferroviárias em Pátios de Classificação / Gustavo Carvalhaes da Fonseca Ferreira. - 2025.

58 f.

Orientador: Luciana Brugiolo Gonçalves

Coorientador: Lorenza Leão Oliveira Moreno

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, . Bacharelado em Engenharia Computacional, 2025.

1. Pátios de Classificação Ferroviária. 2. Formação de Trens. 3. Otimização Combinatória. 4. ACO. 5. Otimização por Colônia de Formigas. 6. Heurísticas Construtivas. I. Brugiolo Gonçalves, Luciana, orient. II. Leão Oliveira Moreno, Lorenza, coorient. III. Título.

Gustavo Carvalhaes da Fonseca Ferreira

**Meta-heurística de Otimização por Colônia de Formigas para Otimizar
Manobras Ferroviárias em Pátios de Classificação**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao corpo docente do curso de graduação
em Engenharia Computacional da da
Universidade Federal de Juiz de Fora como
requisito parcial à obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Computacional.

Orientador: Prof. D.Sc. Luciana Brugiolo Gonçalves

Coorientador: Prof. D.Sc. Lorenza Leão Oliveira Moreno

Juiz de Fora

2025

*Este trabalho é dedicado à minha
mãe*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pai e a Jesus, pelo dom da vida e por tantas bênçãos que tenho.

À minha mãe, Luciana, ao meu pai, Aroldo, ao meu irmão, Guilherme, à minha vó, Ruth, e aos familiares pelo amor, apoio e confiança que depositam em mim.

Às minhas orientadoras Luciana e Lorenza pela paciência, conselhos e parceria ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Aos amigos que trabalham na MRS, Renata e Rael, pelas informações e contribuições, além da boa vontade e confiança.

Também agradeço aos demais professores e funcionários da UFJF, que contribuíram com a minha vida e a minha graduação nos últimos anos.

*“E conhecereis a verdade e a
verdade vos libertará.”*

Jesus Cristo

RESUMO

O transporte ferroviário de cargas depende fortemente da eficiência dos pátios de classificação, onde composições são desmembradas e os conjuntos de vagões são rearranjados para formar as novas composições que sairão do pátio. O reposicionamento desses conjuntos é realizado por meio de manobras, e planejar a sequência de manobras que forma todos os trens com o menor esforço operacional configura um problema de otimização combinatória de elevada complexidade. Este trabalho aborda o Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação Ferroviária, cujo objetivo é minimizar o número de manobras necessárias para colocar cada bloco de vagões na linha, na ordem e na posição exigidas pelo seu trem de saída, respeitando restrições de acessibilidade, zonas proibidas, conexões físicas entre linhas e janelas temporais. É proposta uma heurística construtiva gulosa aleatória que, a cada passo, gera manobras candidatas para os blocos acessíveis e seleciona uma delas por um sorteio simples entre as candidatas de menor custo, avaliadas por uma função de custo ponderada que combina proximidade da linha de saída, ordem de embarque, urgência e penalização de repetições. A heurística é guiada por uma meta-heurística de Otimização por Colônia de Formigas (*Ant Colony Optimization*), na qual o feromônio reforça as decisões associadas às melhores soluções encontradas. Experimentos computacionais sobre instâncias sintéticas e reais de diferentes portes mostram que a abordagem proposta produz soluções válidas para todas elas, com baixo tempo de processamento, evidenciando o potencial do método para o problema considerado.

Palavras-chave: Pátios de Classificação Ferroviária. Formação de Trens. Otimização Combinatória. ACO. Otimização por Colônia de Formigas. Heurísticas Construtivas.

ABSTRACT

Rail freight transportation relies heavily on the efficiency of classification yards, where trains are broken down and groups of wagons are rearranged to form the new trains that will leave the yard. The repositioning of these groups is carried out through maneuvers, and planning the maneuver sequence that forms all trains with the least operational effort constitutes a highly complex combinatorial optimization problem. This work addresses the Train Formation Problem in Railway Classification Yards, whose goal is to minimize the number of maneuvers required to place each wagon block on the line, in the order, and at the position demanded by its outbound train, subject to accessibility, forbidden zones, physical connections between lines, and time-window constraints. A greedy-stochastic constructive heuristic is proposed which, at each step, generates candidate maneuvers for the accessible blocks and selects one through a simple random draw among the lowest-cost candidates, where the cost combines proximity to the departure line, boarding order, urgency, and a repetition penalty. The heuristic is guided by an Ant Colony Optimization metaheuristic (elitist *Ant System*), in which pheromone reinforces the (block, destination line) decisions associated with the best solutions found. Computational experiments on thirteen instances (four synthetic and nine real-world) show that the proposed approach yields valid solutions for all of them, highlighting the method's potential for the problem considered.

Keywords: Railway Classification Yards. Train Formation. Combinatorial Optimization. ACO. Ant Colony Optimization. Constructive Heuristics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	Representação esquemática de um pátio de classificação com linhas, trechos e blocos de vagões.	16
4.1	Representação simplificada de um pátio e das manobras descritas.	27
5.1	Representação esquemática, em vista superior, das topologias de pátio utilizadas nos experimentos: (a) o pátio “desafio”, que serve de topologia tanto às quatro instâncias sintéticas quanto às instâncias reais IMRSDesafio; (b) o pátio real P1 e (c) o pátio real P2. Os três são derivados de dados de operação da MRS Logística.	36
5.2	Quadro da animação gerada pela ferramenta auxiliar de visualização, mostrando as linhas do pátio (fileiras de trechos) e os blocos de vagões posicionados, cada um com cor distinta.	39
5.3	Número médio de manobras (10 execuções) em função do número de candidatas no sorteio, para 200 construções (20 formigas $\times$ 10 gerações). O símbolo “ $\times$ ” indica configuração sem solução válida em nenhuma das execuções. . .	41
5.4	Número médio de manobras (10 execuções) em função do número de candidatas no sorteio, para 5000 construções (100 formigas $\times$ 50 gerações). O símbolo “ $\times$ ” indica configuração sem solução válida em nenhuma das execuções. . .	42
5.5	Número médio de manobras (10 execuções) em função do número de candidatas no sorteio, para 20000 construções (200 formigas $\times$ 100 gerações). O símbolo “ $\times$ ” indica configuração sem solução válida em nenhuma das execuções.	43
5.6	Número de manobras em função do número de candidatas no sorteio, para 200 construções: média (azul, círculos) e melhor (verde, quadrados) das 10 execuções, para as quatro instâncias em que média e melhor divergem. . .	46
5.7	Número de manobras em função do número de candidatas no sorteio, para 5 000 construções: média (azul, círculos) e melhor (verde, quadrados) das 10 execuções, para as quatro instâncias em que média e melhor divergem. .	47
5.8	Número de manobras em função do número de candidatas no sorteio, para 20 000 construções: média (azul, círculos) e melhor (verde, quadrados) das 10 execuções, para as quatro instâncias em que média e melhor divergem. .	48

5.9	Manobras vs. candidatas para os pátios P1 e P2 com 200 construções. Linha tracejada para sorteio simples e contínua para o sorteio ponderado. . . .	50
-----	---	----

LISTA DE TABELAS

2.1	Síntese comparativa dos principais trabalhos relacionados.	21
4.1	Componentes da função de custo de uma manobra candidata e seus pesos. . .	30
5.1	Instâncias utilizadas nos experimentos.	37
5.2	Parâmetros utilizados nos experimentos.	38

SUMÁRIO

1	Introdução.....	12
2	O Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação...	15
2.1	Pátios de classificação ferroviária	15
2.2	Manobras e direções	16
2.3	Zonas proibidas e adjacências	17
2.4	Descrição formal do problema	18
2.4.1	Entrada.....	18
2.4.2	Saída	18
2.4.3	Função objetivo.....	18
2.4.4	Restrições de validade	18
2.5	Complexidade	19
2.6	Trabalhos relacionados	20
3	Fundamentação Teórica.....	22
3.1	Meta-heurísticas	22
3.2	Heurísticas construtivas	22
3.3	Otimização por Colônia de Formigas	23
3.4	Seleção aleatória entre candidatas	24
4	Abordagem Proposta	25
4.1	Visão geral	25
4.2	Representação da solução e do estado do pátio	26
4.3	Heurística construtiva	28
4.3.1	Blocos acessíveis.....	28
4.3.2	Geração de manobras candidatas.....	29
4.3.3	Função de custo	30
4.3.4	Seleção aleatória e integração com o ACO.....	31
4.3.5	Cache incremental e critério de parada.....	31
4.4	Integração com a Otimização por Colônia de Formigas	32
4.5	Validação da solução	34

5	Experimentos e Resultados	35
5.1	Ambiente de testes	35
5.2	Instâncias	35
5.3	Configuração de parâmetros	37
5.4	Visualização das soluções	37
5.5	Resultados e análise	39
5.5.1	Impacto do número de candidatas.....	40
5.5.2	Influência do número de construções	44
5.5.3	Consistência entre execuções: média versus melhor solução.....	44
5.5.4	Efeito da ponderação do sorteio.....	49
5.5.5	Discussão	51
6	Conclusão	52
6.1	Limitações	53
6.2	Trabalhos futuros	54

1 Introdução

O transporte ferroviário desempenha papel central na movimentação de cargas em grandes distâncias, sendo reconhecido por sua eficiência energética e por sua capacidade de transportar elevados volumes a custos competitivos (Wildo *et al.*, 2025). Em sistemas ferroviários reais, a eficiência operacional depende diretamente da forma como as composições são montadas e desmontadas ao longo da malha, atividade que ocorre, majoritariamente, em instalações especializadas denominadas *pátios de classificação*, que são estruturas compostas por um conjunto de linhas nas quais os trens que chegam são desmembrados e seus vagões reorganizados para formar novos trens de saída.

A classificação de vagões nesses pátios é uma atividade essencial para a operação ferroviária de carga. Em pátios do tipo plano, amplamente utilizados no Brasil, a reorganização dos vagões entre os trens de chegada e de partida é realizada por meio de sucessivas manobras tracionadas por locomotivas: cada bloco de vagões deve ser direcionado a uma linha específica e posicionado na composição correta do trem de saída, obedecendo regras operacionais, restrições de segurança e a infraestrutura disponível. Esse processo é inerentemente complexo, pois a infraestrutura é fisicamente limitada (um conjunto finito de linhas e conexões), há ordens relativas que precisam ser mantidas entre os blocos, o número de sequências de manobras possíveis é elevado e existem múltiplas soluções viáveis que diferem significativamente em eficiência. A decisão sobre qual manobra executar, quando e para qual linha direcionar cada bloco afeta diretamente o esforço total de processamento, o número de movimentações e, em última instância, a capacidade operacional do pátio.

Do ponto de vista computacional, o problema pertence à família dos problemas de rearranjo de vagões (*shunting*), cujas variantes são, em geral, NP-difíceis. Modelos matemáticos exatos representam fielmente a operação, mas apresentam crescimento combinatório acentuado e, na prática, tempos de execução proibitivos para pátios de médio e grande porte. Esse comportamento foi observado, no contexto brasileiro, por Sá (2021), que modelou a avaliação de capacidade de pátios planos de classificação por programação linear inteira mista e constatou que o alto custo computacional inviabiliza sua aplicação imediata na prática. Tal limitação motiva o emprego de heurísticas e meta-heurísticas, capazes de produzir soluções de boa qualidade em tempo reduzido e com maior escalabilidade. A relevância prática do tema é ainda reforçada por

iniciativas de aproximação entre indústria e academia, como o desafio de otimização de pátios ferroviários promovido junto à comunidade brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO, 2022).

Motivado por esse cenário, este trabalho aborda o **Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação Ferroviária**, cujo objetivo é determinar uma sequência válida de manobras que conduza cada bloco de vagões à linha, à ordem e à posição exigidas pelo seu trem de saída, **minimizando o número total de manobras** realizadas. Para tratá-lo, propõe-se uma *heurística construtiva gulosa e aleatória* que, a cada passo, identifica os blocos acessíveis, gera manobras candidatas e seleciona uma delas por um sorteio simples entre as candidatas de menor custo, avaliadas por uma função de custo ponderada que combina proximidade da linha de saída, ordem de embarque, urgência e penalização de movimentos repetidos. A construção é guiada por uma meta-heurística de *Otimização por Colônia de Formigas* (*Ant Colony Optimization* – ACO), na variante *Ant System* elitista, na qual o feromônio reforça progressivamente as decisões (bloco, linha de destino) associadas às melhores soluções encontradas.

As principais contribuições deste trabalho são a modelagem computacional de um pátio de classificação com manobras direcionais e verificação explícita de acessibilidade, zonas proibidas e conexões físicas entre linhas; a proposta de uma heurística construtiva gulosa aleatória, baseada em uma função de custo multicritério com pesos ajustáveis e em um sorteio aleatório sobre um conjunto de candidatas; a integração dessa heurística a uma meta-heurística ACO elitista, incluindo o mecanismo que faz a colônia considerar apenas soluções completas e evitando que soluções parciais, interrompidas por bloqueio, sejam indevidamente premiadas por terem menos manobras; e uma avaliação experimental sobre treze instâncias (quatro sintéticas e nove reais, derivadas de dados de operação da MRS Logística), que investiga o impacto do número de candidatas no sorteio, do número de construções e da forma de ponderação da seleção sobre a qualidade das soluções.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 apresenta o Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação Ferroviária, percorrendo os conceitos do domínio, a modelagem adotada, a definição formal, as restrições de validade, a discussão de complexidade e a revisão dos trabalhos relacionados, que encerra o capítulo. O Capítulo 3 apresenta a fundamentação teórica, com ênfase em meta-heurísticas, heurísticas construtivas e na Otimização por Colônia de Formigas. O Capítulo 4 detalha

a abordagem proposta, descrevendo a representação da solução, a heurística construtiva e a integração com o ACO. O Capítulo 5 apresenta os experimentos computacionais e a análise dos resultados. Por fim, o Capítulo 6 traz as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

2 O Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação

Este capítulo descreve o problema tratado neste trabalho. Inicialmente, são apresentados os conceitos do domínio ferroviário e a modelagem computacional adotada (Seções 2.1 a 2.3). Em seguida, a Seção 2.4 formaliza a entrada, a saída, a função objetivo e as restrições de validade, e a Seção 2.5 discute a complexidade do problema. Por fim, a Seção 2.6 revisa os trabalhos relacionados e posiciona a contribuição desta monografia frente à literatura.

2.1 PÁTIOS DE CLASSIFICAÇÃO FERROVIÁRIA

Um **pátio de classificação** é uma instalação ferroviária composta por um conjunto de linhas, na qual os vagões de trens que chegam são reorganizados para compor os trens que partem. Neste trabalho, o pátio é modelado pelos seguintes elementos:

Linha : uma via física do pátio onde os vagões ficam estacionados. Cada linha possui um identificador, um comprimento (em metros) e zonas proibidas em suas extremidades (detalhadas na Seção 2.3).

Trecho : uma discretização da linha em segmentos de comprimento fixo (tipicamente 20 metros). O comprimento da linha dividido pelo comprimento do trecho determina o número de trechos disponíveis. Cada vagão ocupa exatamente um trecho, de modo que a posição de um bloco em uma linha é dada por um intervalo de trechos contíguos.

Bloco de vagões : um conjunto de vagões contíguos que se desloca como uma unidade indivisível. Um bloco é caracterizado por um identificador, pelo número de vagões que o compõe, pela linha e pelo trecho atual que ocupa, e pelo trem de saída ao qual pertence. A posição corrente de um bloco é representada pelo par (linha, trecho atual).

Trem de chegada : a composição que ingressa no pátio e é desmembrada em blocos de vagões, fornecendo o estado inicial do problema.

Trem de saída : a composição que deve ser formada. Cada trem de saída exige uma sequência de blocos de vagões, em uma **linha de destino** específica, respeitando

uma **ordem** e **posições** determinadas, além de uma **janela temporal** de partida (datas mínima e máxima de saída).

Manobra : o movimento que retira um bloco de uma linha de origem e o reposiciona em uma linha de destino. A sequência de manobras é a saída do problema.

Configuração ou estado do pátio : a descrição do posicionamento de cada bloco de vagões existentes no pátio em um determinado momento.

A Figura 5.9 ilustra, esquematicamente, um pátio com algumas linhas, blocos de vagões posicionados em seus trechos e a formação de um trem de saída.



Figura 2.1: Representação esquemática de um pátio de classificação com linhas, trechos e blocos de vagões.

2.2 MANOBRAS E DIREÇÕES

Cada linha do pátio possui duas extremidades, às quais correspondem dois sentidos de acesso. Diz-se que uma manobra ocorre **à esquerda** quando o bloco é retirado (e, no destino, inserido) pela extremidade de menor numeração de trechos, e **à direita** quando o movimento ocorre pela extremidade de maior numeração de trechos. A direção de uma manobra impõe restrições de **acessibilidade**. Um bloco só pode ser retirado de sua linha de origem em determinada direção se nenhum outro bloco estiver entre ele e a extremidade correspondente, ou seja:

- para uma manobra à esquerda, não pode existir outro bloco mais à esquerda que o do bloco a ser movido;
- para uma manobra à direita, não pode existir outro bloco mais à direita que o do bloco a ser movido.

Por consequência, em cada linha apenas dois blocos são imediatamente acessíveis: o primeiro bloco da linha (acessível à esquerda) e o último bloco da linha (acessível à direita). Restrições análogas valem no destino: ao inserir um bloco, nenhum outro bloco já posicionado pode ser ultrapassado, o que também depende da direção de entrada. Essa característica aproxima o problema de estruturas de pilha/fila e está na raiz de sua dificuldade combinatória. A formação dos trens de saída ocorre empilhando os blocos a partir da extremidade final útil da linha de destino: o primeiro bloco a embarcar (a partir pela direita) ocupa o trecho de maior numeração, e os blocos subsequentes são posicionados em sequência decrescente. A posição correta de cada bloco na linha de saída é, portanto, determinada pela ordem desejada e pela soma dos comprimentos dos blocos que o antecedem.

2.3 ZONAS PROIBIDAS E ADJACÊNCIAS

Duas características adicionais completam a modelagem do pátio:

Zonas proibidas cada linha reserva, em suas duas extremidades, faixas nas quais nenhum bloco pode ficar estacionado, pois são necessárias à própria movimentação. Uma manobra cujo destino sobreponha uma zona proibida é inválida.

Adjacências as linhas do pátio não estão todas diretamente conectadas. As conexões físicas são descritas por uma relação de adjacência entre trechos de pares de linhas. Uma manobra entre duas linhas só é fisicamente possível se existir uma adjacência compatível com a direção do movimento e com a posição do bloco. Quando a linha de destino não é diretamente alcançável, um bloco pode precisar percorrer linhas intermediárias, caracterizando um roteamento de múltiplos saltos.

2.4 DESCRIÇÃO FORMAL DO PROBLEMA

2.4.1 Entrada

Uma instância do problema é definida por:

- o horário de início das manobras e a velocidade média de deslocamento dos blocos;
- o conjunto de linhas do pátio, cada qual com seu comprimento e suas zonas proibidas, e o comprimento do trecho;
- o estado inicial: o conjunto de blocos de vagões, cada um com seu número de vagões, sua posição (linha, trecho inicial) e o trem de saída ao qual pertence;
- o conjunto de trens de saída, cada qual com sua linha de destino, sua janela temporal (datas mínima e máxima de saída) e a sequência desejada de blocos (ordem e posições alvo);
- a relação de adjacência entre trechos das linhas.

2.4.2 Saída

A saída é uma **sequência de manobras** $M = \langle m_1, m_2, \dots, m_k \rangle$. Cada manobra m_i especifica o bloco movido, a linha e o trecho de origem, a linha e o trecho de destino, a direção (esquerda ou direita) e os instantes de início e fim. A aplicação sucessiva de M ao estado inicial deve conduzir o pátio a um estado em que todos os trens de saída, definidos na instância, estejam corretamente formados.

2.4.3 Função objetivo

O objetivo é minimizar o número de manobras necessárias para formar todos os trens de saída:

$$\min |M| = k. \quad (2.1)$$

2.4.4 Restrições de validade

Uma solução é considerada válida se, e somente se, todas as condições a seguir forem satisfeitas. Essas condições correspondem às verificações realizadas pelo validador da solução implementado neste trabalho.

1. **Ordem cronológica:** cada manobra deve iniciar somente após o término da manobra anterior.
2. **Origem correta:** no instante de sua execução, cada bloco deve estar efetivamente na linha e no trecho declarados como origem.
3. **Cabimento no destino:** o destino deve dispor de trechos contíguos livres em quantidade suficiente para o bloco, dentro dos limites da linha.
4. **Ausência de colisão:** os trechos de destino não podem se sobrepor a blocos já presentes na linha de destino.
5. **Acessibilidade:** o bloco deve poder sair da linha de origem na direção declarada, sem que outro bloco o impeça, conforme a Seção 2.2.
6. **Zonas proibidas:** o destino do bloco não pode recair sobre as zonas proibidas da linha.
7. **Ausência de conflito simultâneo:** manobras que se sobrepõem no tempo não podem disputar a mesma região de uma linha (origem ou destino).
8. **Formação correta dos trens:** ao final, todos os blocos de cada trem de saída devem estar em sua linha de destino, na ordem correta (ordenados pelo trecho) e nas posições exatas exigidas.

2.5 COMPLEXIDADE

O problema de formação de trens em pátios pertence à família dos problemas de rearranjo de vagões (*shunting*), reconhecidamente difíceis do ponto de vista computacional. Diversas de suas variantes são NP-difíceis (Dahlhaus *et al.*, 2000), em razão da natureza combinatória do espaço de sequências de manobras e do forte acoplamento entre as restrições de acessibilidade, ordem e conexões físicas. Tal dificuldade justifica a adoção de métodos heurísticos e meta-heurísticos, capazes de produzir soluções de boa qualidade em tempo computacional viável, como os descritos nos capítulos seguintes.

2.6 TRABALHOS RELACIONADOS

Os problemas de rearranjo de vagões em pátios ferroviários, conhecidos como *shunting* ou *train classification problems*, são amplamente estudados na literatura de Pesquisa Operacional, dada sua relevância para a operação ferroviária. Sua dificuldade computacional está bem estabelecida: Dahlhaus *et al.* (2000) formalizaram o *train marshalling problem* e demonstraram sua NP-completude, resultado posteriormente reforçado por Eggermont *et al.* (2009), que analisaram a dificuldade de diferentes formulações de rearranjo de composições. Essa intratabilidade explica por que métodos exatos raramente escalam para instâncias de porte realista.

A literatura abrange diversas variantes do problema, que se distinguem pela topologia do pátio, pelo objetivo otimizado e pelas restrições operacionais consideradas. Di Stefano e Koči (2004) propuseram uma modelagem baseada em teoria dos grafos para o rearranjo de composições; Hansmann e Zimmermann (2008) trataram a ordenação ótima do material rodante em pátios de gravidade (*hump yards*) por meio de otimização combinatória; e Boysen *et al.* (2016) estudaram o *train makeup problem*, voltado à formação econômica dos trens de saída. Uma visão organizada desse panorama é oferecida pelos *surveys* de Boysen *et al.* (2012) e Gatto *et al.* (2009), que sistematizam as variantes, os modelos e os algoritmos da área.

No contexto brasileiro e como base direta deste trabalho, Sá (2021) modelou a avaliação da capacidade de processamento de pátios planos de classificação por programação linear inteira mista (MILP), reproduzindo movimentações reais de vagões. Embora o modelo avalie adequadamente diferentes *layouts*, a própria autora aponta seu elevado tempo de execução como fator que inviabiliza a aplicação imediata na prática. Essa limitação motiva justamente a busca por uma abordagem heurística mais escalável, como a proposta nesta monografia. A relevância prática do tema é ainda reforçada por iniciativas de aproximação entre indústria e academia, como o desafio de otimização de operações ferroviárias proposto no âmbito da comunidade brasileira de Pesquisa Operacional (SOBRAPO, 2022).

A Tabela 2.1 sintetiza os principais trabalhos discutidos, contrastando o problema ou variante tratado, a abordagem adotada e o objetivo principal de cada um, e posicionando a presente proposta frente a eles.

Como evidencia a Tabela 2.1, predominam, de um lado, estudos de natureza teórica ou voltados à modelagem exata e, de outro, *surveys* que organizam a área. Observa-se,

Tabela 2.1: Síntese comparativa dos principais trabalhos relacionados.

Trabalho	Problema variante	/	Abordagem	Objetivo principal
Dahlhaus <i>et al.</i> (2000)	<i>Train marshalling</i> em pátio de classificação		Análise teórica de complexidade	Provar a NP-completude; minimizar trilhos de classificação
Di Stefano e Koči (2004)	Rearranjo de composições (<i>shunting</i>)		Modelagem por teoria dos grafos	Minimizar movimentos/trilhos de rearranjo
Hansmann e Zimmermann (2008)	Pátios de gravidade (<i>hump yards</i>)		Otimização combinatória (modelo exato)	Ordenação ótima do material rodante
Boysen <i>et al.</i> (2016)	<i>Train makeup</i> em pátios de manobra		Programação matemática	Formar trens de saída minimizando custo de manobra
Boysen <i>et al.</i> (2012)	Operações de pátio (visão geral)		<i>Survey</i> de problemas e métodos	Organizar e relacionar variantes e modelos
Gatto <i>et al.</i> (2009)	Rearranjo de vagões (<i>shunting</i>)		<i>Survey</i> algorítmico introdutório	Apresentar problemas e algoritmos fundamentais
Sá (2021)	Pátios planos de classificação (Brasil)		MILP exata	Avaliar a capacidade de processamento do pátio
Este trabalho	Formação de trens em pátios planos de classificação		Heurística construtiva gulosa aleatória guiada por ACO	Minimizar o número de manobras

contudo, espaço para investigar a integração entre uma heurística construtiva específica do domínio que incorpore explicitamente as restrições de acessibilidade direcional, zonas proibidas e conexões físicas entre linhas e uma meta-heurística populacional que guie a construção. Este trabalho posiciona-se nessa direção, ao propor uma heurística construtiva gulosa aleatória guiada por Otimização por Colônia de Formigas, cuja fundamentação é detalhada no Capítulo 3 e cujo funcionamento é descrito no Capítulo 4.

3 Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta os conceitos que fundamentam a abordagem proposta. A Seção 3.1 discute as meta-heurísticas; a Seção 3.2 trata das heurísticas construtivas; a Seção 3.3 detalha a Otimização por Colônia de Formigas; e a Seção 3.4 descreve a seleção aleatória entre candidatas.

3.1 META-HEURÍSTICAS

Meta-heurísticas são estratégias gerais de busca projetadas para resolver, de forma aproximada, problemas de otimização combinatória de elevada complexidade (Talbi, 2009). Diferentemente dos métodos exatos, elas não garantem a obtenção da solução ótima, mas são capazes de produzir soluções de boa qualidade em tempo computacional reduzido. Seu aspecto central é o equilíbrio entre *intensificação* (exploração aprofundada de regiões promissoras do espaço de busca) e *diversificação* (exploração de novas regiões), reduzindo o risco de estagnação em ótimos locais. Em problemas de agendamento, sequenciamento e roteamento, as meta-heurísticas são amplamente empregadas, frequentemente incorporando conhecimento específico do problema por meio de operadores e heurísticas construtivas especializadas.

3.2 HEURÍSTICAS CONSTRUTIVAS

Heurísticas construtivas constroem uma solução de forma incremental, adicionando um elemento por vez segundo um critério de seleção (Talbi, 2009; Feo e Resende, 1995). Em uma heurística *gulosa*, escolhe-se, a cada passo, o elemento de menor custo (ou maior benefício) imediato. Embora computacionalmente eficientes, heurísticas puramente gulosas tendem a ficar presas em decisões localmente ótimas. Por isso, é comum adotar variantes *gulosas-randomizadas*, nas quais a escolha é feita de forma parcialmente aleatória entre os melhores candidatos, aumentando a diversidade das soluções geradas. Heurísticas construtivas são frequentemente utilizadas como componentes internos de meta-heurísticas, fornecendo soluções iniciais ou guiando a busca.

3.3 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

A Otimização por Colônia de Formigas (ACO) é uma meta-heurística populacional inspirada no comportamento coletivo de formigas reais na busca por alimento (Dorigo *et al.*, 1996). Ao se deslocarem, formigas depositam uma substância química, o *feromônio*, sobre o caminho percorrido; caminhos mais curtos tendem a acumular mais feromônio, atraindo um número crescente de formigas. Esse mecanismo de realimentação positiva, combinado à evaporação gradual do feromônio, permite que a colônia convirja, de forma distribuída, para boas soluções.

Computacionalmente, uma colônia de N formigas constrói soluções ao longo de um número de gerações. Cada formiga constrói uma solução percorrendo decisões; a probabilidade de tomar a decisão i combina dois fatores: o *feromônio* τ_i acumulado naquela decisão e uma informação *heurística* η_i (tipicamente o inverso de um custo), conforme a regra de transição

$$P(i) \propto \tau_i^\alpha \cdot \eta_i^\beta, \quad (3.1)$$

em que α e β controlam, respectivamente, a influência do feromônio e da heurística. Ao final de cada geração, o feromônio é *evaporado* por um fator $\rho \in (0, 1)$,

$$\tau_i \leftarrow (1 - \rho) \tau_i, \quad (3.2)$$

e, em seguida, *reforçado* nas decisões pertencentes às melhores soluções, por meio de um *depósito* proporcional à qualidade da solução.

Diferentes variantes do ACO distinguem-se, principalmente, pela política de depósito e pelo controle de estagnação. No *Ant System* elitista, apenas a melhor solução (da geração ou global) deposita feromônio, evitando que soluções medianas dispersem reforço por muitas arestas. No *Max-Min Ant System*, os valores de feromônio são limitados a um intervalo $[\tau_{min}, \tau_{max}]$, prevenindo a convergência prematura. A abordagem proposta neste trabalho adota uma variante elitista com limite superior de feromônio, descrita no Capítulo 4.

3.4 SELEÇÃO ALEATÓRIA ENTRE CANDIDATAS

Em heurísticas gulosas-aleatórias, a escolha da próxima decisão entre um conjunto de candidatos pode ser feita por um *sorteio*, em vez de uma escolha estritamente gulosa pelo menor custo. A forma mais direta é o **sorteio simples**, no qual todos os candidatos do conjunto têm a mesma probabilidade de serem escolhidos. Esse mecanismo introduz diversidade no processo construtivo, permitindo escapar de decisões localmente ótimas, sem privilegiar nenhuma candidata do conjunto em particular.

Uma alternativa é o **sorteio proporcional ao custo**, no qual as candidatas de menor custo recebem maior probabilidade de seleção. Nesse caso, atribui-se a cada candidato um peso que decresce com o seu custo; uma forma usual de obtê-lo, a partir de custos $c_1, c_2, \dots, c_n$, é

$$\eta_i = \exp\left(-\frac{c_i - c_{\min}}{T}\right), \quad (3.3)$$

em que $c_{\min} = \min_j c_j$ (subtraído por estabilidade numérica) e T é uma *temperatura* que controla o grau de aleatoriedade: valores baixos de T aproximam a seleção de uma escolha gulosa (o candidato de menor custo domina), ao passo que valores altos a aproximam de um sorteio uniforme. A escolha final é então realizada por um sorteio proporcional aos pesos η_i . As duas formas de sorteio são comparadas experimentalmente no Capítulo 5. Quando qualquer uma delas é combinada ao ACO, a seleção mistura o feromônio à informação heurística conforme a Equação (3.1), ponderando por τ_i^α e η_i^β .

4 Abordagem Proposta

Este capítulo descreve, em detalhe, a abordagem proposta para o Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação. A Seção 4.1 apresenta uma visão geral do método e a intuição que o sustenta. A Seção 4.2 mostra como representamos tanto o estado corrente do pátio quanto a solução que se deseja construir. A Seção 4.3 detalha a heurística construtiva, que é o núcleo do método. A Seção 4.4 descreve como essa heurística é guiada pela Otimização por Colônia de Formigas. Por fim, a Seção 4.5 explica como cada solução produzida é validada.

4.1 VISÃO GERAL

A abordagem proposta parte de uma ideia simples. Em vez de tentar enxergar, de uma só vez, toda a sequência de manobras que forma os trens de saída, algo inviável em razão da explosão combinatória discutida no Capítulo 2, a solução é construída aos poucos, uma manobra de cada vez. A cada passo, decisões locais bem informadas vão conduzindo, gradualmente, a um bom resultado global.

Para colocar essa ideia em prática, combinam-se dois componentes que se complementam. O primeiro é uma **heurística construtiva gulosa aleatória**: a partir do estado inicial do pátio, ela examina quais blocos podem ser movidos, analisa as manobras possíveis para eles, atribui a cada uma um custo que mede o quanto ela aproxima o pátio da configuração desejada e escolhe uma manobra para executar. Repetindo esse ciclo até que todos os trens estejam formados, obtém-se uma solução completa. A escolha, contudo, não é estritamente gulosa: em vez de tomar sempre a manobra de menor custo, sorteia-se uma entre as melhores candidatas, o que introduz variedade que uma decisão puramente gulosa não permitiria.

O segundo componente é a meta-heurística **ACO** (*Ant Colony Optimization*, na variante *Ant System* elitista), que aprende com a experiência acumulada. Várias formigas, sendo que cada uma nada mais é que uma execução da heurística, constroem soluções ao longo de sucessivas gerações. As melhores soluções encontradas depositam *feromônio* sobre as decisões que as compuseram, tornando essas decisões mais prováveis para as formigas seguintes. Assim, a heurística fornece o *como construir*, enquanto o ACO fornece o *que aprender*: à medida que as gerações avançam, a colônia concentra a busca nas regiões

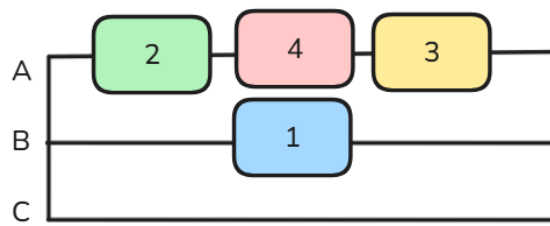
mais promissoras do espaço de soluções.

4.2 REPRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO E DO ESTADO DO PÁTIO

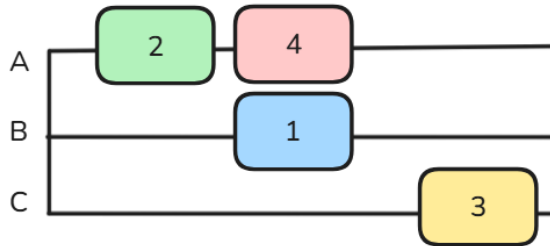
Antes de descrever como representamos uma solução, é útil fixar como representamos o próprio pátio em um dado instante, pois é dessa informação que todo o resto decorre. A configuração do pátio é a informação central manipulada pela heurística, porque é a partir dela que se determina, a cada passo, quais blocos estão acessíveis e quais manobras são possíveis. Cada vez que uma manobra é executada, a configuração é atualizada fazendo com que o bloco movido passe a ocupar a nova posição, e é sobre essa nova configuração que o passo seguinte tomará suas decisões.

Uma **solução**, por sua vez, é a sequência de manobras que transforma a configuração inicial (com os trens de chegada já desmembrados) na configuração final desejada (com todos os trens de saída formados). Cada **manobra** registra: o bloco principal movido; a linha e o trecho de origem; a linha e o trecho de destino; a direção do movimento (à esquerda ou à direita); e os instantes de início e fim.

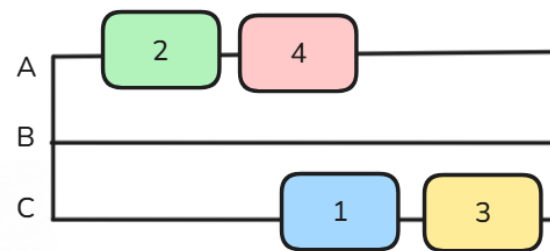
A Figura 4.1 ilustra esses conceitos por meio de um pequeno exemplo, com três linhas (A, B e C) e quatro blocos de vagões (numerados de 1 a 4, cada um com uma cor). O painel (a) mostra a configuração inicial; o painel (b), a configuração após a primeira manobra; e o painel (c), a configuração após a segunda manobra. Essa mesma figura será retomada nas seções seguintes para exemplificar os conceitos de blocos acessíveis e de manobras candidatas.



(a) Configuração inicial do pátio.



(b) Após a Manobra 1: o bloco 3 vai da linha A para a linha C, pela direita.



(c) Após a Manobra 2: o bloco 1 vai da linha B para a linha C, pela esquerda, completando o trem.

Figura 4.1: Representação simplificada de um pátio e das manobras descritas.

Tomando a Figura 4.1 como exemplo, cada manobra fica completamente descrita pelos itens registrados acima. A **Manobra 1** move o *bloco 3* (bloco principal), que sai da *linha A*, trechos 4–5 (*origem*), e passa a ocupar a *linha C*, trechos 5–6 (*destino*), entrando pela *direita*; supondo início das manobras às 8h, ela ocorre, digamos, entre 8:00 (*início*) e 8:06 (*fim*). Em seguida, a **Manobra 2** move o *bloco 1*, que sai da *linha B*, trechos 3–4, e vai para a *linha C*, trechos 3–4, entrando pela *esquerda*, entre 8:06 e 8:12, já que, pela restrição de ordem cronológica, cada manobra só começa após o término da anterior. Ao final, o trem de saída da linha C está formado: o bloco 3, que embarca primeiro, ocupa os trechos de maior numeração, e o bloco 1 posiciona-se imediatamente à sua esquerda.

Vale observar, por fim, o que a representação de uma manobra deliberadamente *não*

inclui. Em particular, não se registra a **locomotiva** responsável pelo movimento nem a sua posição corrente, nem o seu comprimento, nem o seu deslocamento pelo pátio. Na operação real, essa é uma informação relevante: a posição da locomotiva pode tornar uma manobra mais custosa (por exigir um longo deslocamento até o bloco) ou até inviabilizá-la. No presente trabalho, contudo, optou-se por não modelar a locomotiva, mantendo o foco no rearranjo dos blocos de vagões; as implicações dessa simplificação são retomadas entre as limitações discutidas no Capítulo 6.

4.3 HEURÍSTICA CONSTRUTIVA

Esta seção detalha o núcleo da abordagem: a heurística que constrói uma solução manobra a manobra. Ela é apresentada na ordem em que suas etapas ocorrem a cada passo da construção. Primeiro, identificam-se os blocos que podem ser movidos naquele instante (Seção 4.3.1); em seguida, enumeram-se as manobras possíveis para esses blocos (Seção 4.3.2); cada manobra é então avaliada por uma função de custo (Seção 4.3.3); escolhe-se uma entre as melhores candidatas, etapa em que o ACO passa a interferir (Seção 4.3.4); por fim, descrevem-se os mecanismos que tornam a construção eficiente e determinam o seu término (Seção 4.3.5).

4.3.1 Blocos acessíveis

O primeiro passo de cada iteração é descobrir quais blocos podem, de fato, ser movidos. Como visto na Seção 2.2, um bloco só é acessível se nenhum outro estiver entre ele e a extremidade pela qual seria retirado. Disso decorre que, em cada linha, apenas dois blocos são acessíveis: o de menor trecho (acessível à esquerda) e o de maior trecho (acessível à direita). Chamamos esses blocos de *acessíveis* (ou livres), e apenas eles são candidatos a se mover no passo corrente. Um bloco cercado por outros dos dois lados fica temporariamente inacessível.

Retomando a configuração inicial da Figura 4.1(a): na linha A, o bloco 2 está acessível à esquerda e o bloco 3, à direita; o bloco 3 não pode sair à esquerda porque os blocos 2 e 4 lhe barram a passagem e, simetricamente, o bloco 2 não pode sair à direita porque os blocos 3 e 4 o impedem, além disso, o bloco 4 não é acessível em nenhuma das direções, pois está impedido pelo bloco 2 à esquerda e pelo bloco 3 à direita. Na linha B, o bloco 1, por ser o único da linha, está acessível pelos dois lados. A linha C, vazia, não oferece

nenhum bloco a mover. Portanto, nessa configuração, os blocos acessíveis são o 1, o 2 e o 3.

4.3.2 Geração de manobras candidatas

Dada uma determinada configuração do pátio, e observando cada bloco acessível, é possível enumerar quais manobras podem ser realizadas, considerando as diferentes direções e linhas de destino. O conjunto de todas as manobras viáveis para os blocos acessíveis constitui o **conjunto de manobras candidatas** daquela configuração. A viabilidade de uma manobra depende de um conjunto de verificações: a acessibilidade do bloco na direção considerada; a existência de uma adjacência física válida entre a linha de origem e a de destino; o cabimento do bloco no destino, sem colisão com blocos já presentes; e o respeito às zonas proibidas.

Para a configuração da Figura ??(a), as manobras candidatas são:

1. Bloco 3 da linha A para a linha B, pela direita;
2. Bloco 3 da linha A para a linha C, pela direita;
3. Bloco 1 da linha B para a linha C, pela esquerda;
4. Bloco 1 da linha B para a linha A, pela direita.

Observe que não há, por exemplo, manobra viável para o bloco 3 pela esquerda, uma vez que o bloco 2 impede a passagem. Tampouco há candidatas para o bloco 2: embora ele esteja acessível pela esquerda, desse lado não existe, na relação de adjacência da instância, nenhuma conexão física compatível, o que ilustra que a acessibilidade é necessária, mas não suficiente para gerar uma candidata, sendo também preciso uma adjacência válida. Da mesma forma, blocos que não são acessíveis nunca geram manobras candidatas.

Nem todas as candidatas, porém, são igualmente convenientes. Uma manobra que simplesmente desfaz a manobra imediatamente anterior devolve o pátio ao estado de onde ele acabara de sair e não faz muito sentido. Em contrapartida, uma manobra que leva o último bloco que falta à sua posição-alvo, completando um trem de saída, deve ser fortemente priorizada. É justamente essa noção de conveniência que a função de custo, apresentada na Seção 4.3.3, procura capturar.

Dois casos merecem tratamento especial, por serem sempre desejáveis. Quando um bloco está na sua linha de saída e chegou a sua vez de ser posicionado, a manobra que

o coloca na posição-alvo correta é tratada como **obrigatória**: a ela se atribui um custo fortemente negativo (-1000), de modo que seja sempre escolhida em detrimento das demais. E quando a linha de saída de um bloco não é diretamente alcançável a partir de sua linha atual, recorre-se a um **roteamento de múltiplos saltos**: por meio de uma busca em largura (*Breadth-First Search* – BFS) sobre o grafo de adjacência entre linhas, calcula-se a distância, em número de saltos, de cada linha até a linha de saída do bloco. Um movimento que aproxima o bloco de sua linha de saída em exatamente um salto é chamado de **passo de progresso** e também é priorizado, ainda que não conclua, por si só, a formação do trem.

4.3.3 Função de custo

Salvo nos casos obrigatórios e de progresso, uma manobra candidata precisa ser avaliada para que se saiba o quanto ela é conveniente. Essa avaliação é feita por uma função de custo que combina quatro critérios, apresentados na Tabela 4.1, cada qual com um peso. Os pesos foram calibrados de modo que a proximidade da linha de saída e a ordem de embarque guiem a construção, a urgência module a pressão temporal, e a frequência iniba a repetição de movimentos improdutivos.

Tabela 4.1: Componentes da função de custo de uma manobra candidata e seus pesos.

Componente	Peso	Significado
Distância à linha de saída	5,0	$ \ell_{saida} - \ell_{dest} \times 100$; penaliza destinos distantes da linha de saída do bloco.
Ordem na linha de saída	5,0	penaliza blocos que embarcam por último ocupando trechos altos.
Urgência	2,0	$\max(0, \text{minutos até a data máxima de saída})$; menor folga, maior prioridade.
Frequência	80,0	número de vezes que o bloco já visitou a linha de destino; inibe repetições.
Distância percorrida / Tempo de manobra	0,0	desativados nesta configuração.

O custo total de uma candidata m é a soma dos componentes ponderados:

$$c(m) = 5 \delta_{saida}(m) + 5 \omega_{ordem}(m) + 2 u(m) + 80 f(m), \quad (4.1)$$

em que δ_{saida} , ω_{ordem} , u e f denotam, respectivamente, a distância à linha de saída, a ordem na linha de saída, a urgência e a frequência. Quanto menor o custo, mais conveniente a manobra: o peso elevado da frequência, por exemplo, faz com que uma manobra que reconduz um bloco a uma linha já visitada, o que pode ser um movimento improdutivo, receba custo alto e, com isso, seja preterida.

4.3.4 Seleção aleatória e integração com o ACO

De posse dos custos, resta escolher qual manobra executar. Pode-se simplesmente tomar a de menor custo, mas, como se discutirá no Capítulo 5, essa escolha puramente gulosa é frágil: ela tende a conduzir a colônia sempre ao mesmo bloqueio. Por isso, entre as candidatas de menor custo, a escolha é feita por um **sorteio simples**, no qual todas as candidatas desse conjunto têm a mesma probabilidade de serem selecionadas, independentemente do seu custo. A função de custo (Equação 4.1) atua, assim, apenas na formação do conjunto das melhores candidatas, e não na ponderação do sorteio entre elas. Essa opção decorre da avaliação experimental do Capítulo 5, na qual o sorteio simples alcançou resultados equivalentes ou ligeiramente superiores a um sorteio ponderado pelo custo.

É nesse ponto que o ACO passa a interferir na construção. Quando o feromônio está ativo, ele enviesa o sorteio: a probabilidade de cada candidata é ponderada por τ^α , conforme a regra de transição da Equação (3.1). Dessa forma, as decisões associadas às melhores soluções já encontradas acumulam mais feromônio, e, portanto, tornam-se progressivamente mais prováveis, sem que se abra mão da diversidade que o sorteio garante.

4.3.5 Cache incremental e critério de parada

Recalcular todo o conjunto de manobras candidatas a cada iteração seria dispendioso, já que uma única manobra altera apenas uma pequena parte da configuração. Para ganhar eficiência, a lista de candidatas é mantida entre iterações por meio de um *cache incremental*: após cada manobra, invalidam-se seletivamente apenas as candidatas afetadas pela mudança, isto é, as que envolvem o bloco movido e os blocos das linhas de origem e de destino, regenerando somente essas.

A construção termina com **sucesso** quando todos os trens de saída estão formados.

Há, porém, situações em que a conectividade restrita do pátio leva a colônia a um bloqueio, sem manobras úteis disponíveis. Para conter esses casos, adota-se um **critério de aborto**: após um número-limite de iterações sem progresso, a construção é interrompida e a solução resultante é marcada como incompleta. O Pseudocódigo 1 resume todo o procedimento.

Pseudocódigo 1: Heurística construtiva gulosa aleatória

Input: Estado inicial dos blocos; pátio; (opcional) feromônio do ACO

Output: Solução M (sequência de manobras) e indicador de completude

```

1  $M \leftarrow \langle \rangle$ ;
2 while os trens de saída não estão todos formados e há progresso do
3    $L \leftarrow$  blocos acessíveis do pátio;
4    $C \leftarrow$  manobras candidatas para  $L$ ;
5   if existe candidata obrigatória ou passo de progresso then
6      $m^* \leftarrow$  candidata obrigatória/progresso de menor custo;
7   else
8     avaliar custo de cada candidata em  $C$  (Eq. 4.1);
9      $m^* \leftarrow$  sorteio simples entre as de menor custo (com feromônio, se ativo);
10  end if
11  aplicar  $m^*$ ; atualizar posições dos blocos;
12   $M \leftarrow M \parallel m^*$ ;
13  atualizar cache de candidatas;
14 end while
15 return  $M$  e completa (verdadeiro se os trens foram formados);
```

4.4 INTEGRAÇÃO COM A OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

A heurística construtiva, sozinha, já produz soluções válidas; o papel do ACO é fazer com que a experiência de construções anteriores melhore as construções seguintes. Adota-se a variante *Ant System* elitista, cujo funcionamento é descrito a seguir.

O **feromônio** é indexado por pares (bloco, linha de destino): o valor $\tau[b, \ell]$ representa a tendência acumulada de mover o bloco b para a linha ℓ . A cada geração, cada uma das N formigas constrói uma solução completa por meio do Pseudocódigo 1, com o feromônio injetado na seleção por sorteio (Eq. 3.1). Ou seja, quanto mais o par (bloco, linha) tiver figurado em boas soluções, mais provável será que uma formiga volte a tomar aquela mesma decisão.

Ao final de cada geração, o feromônio é primeiro evaporado globalmente por um fator ρ (Eq. 3.2), o que faz esquecer, aos poucos, reforços antigos e, em seguida, reforçado apenas pela **melhor solução global** encontrada até então, o que caracteriza a política elitista.

O depósito em cada aresta (bloco, linha de destino) do caminho da melhor solução é

$$\tau[b, \ell] \leftarrow \min\left(\tau_{max}, \tau[b, \ell] + \frac{Q}{|M^*|}\right), \quad (4.2)$$

em que Q é uma constante de escala, $|M^*|$ é o número de manobras da melhor solução, e τ_{max} é um limite superior que previne a estagnação. Reforçar sempre o melhor caminho global em vez de deixar cada geração distribuir reforço fraco por muitas arestas concentra o aprendizado nas decisões efetivamente boas.

Um cuidado importante nessa integração diz respeito a *quais* soluções a colônia considera. Formigas que abortam por bloqueio retornam soluções parciais, que são, em geral curtas e inválidas, por não formarem todos os trens. Se a busca simplesmente premiasse a solução de menor número de manobras, essas soluções incompletas venceriam justamente por serem curtas, envenenando o feromônio com decisões que levam a bloqueios. Por isso, a colônia considera apenas soluções **completas**: a melhor solução é a de menor número de manobras *entre aquelas que formaram todos os trens*. O Pseudocódigo 2 resume o procedimento.

Pseudocódigo 2: Otimização por Colônia de Formigas (*Ant System* elitista)

Input: Instância; parâmetros $N, G, \alpha, \beta, \rho, Q, \tau_{max}$
Output: Melhor solução completa encontrada M^*

```

1 inicializar  $\tau[b, \ell] \leftarrow \tau_0$  para todas as arestas;
2  $M^* \leftarrow$  indefinida;  $|M^*| \leftarrow \infty$ ;
3 for  $g \leftarrow 1$  to  $G$  do
4   for  $k \leftarrow 1$  to  $N$  do
5      $M_k \leftarrow$  construir solução (Pseud. 1) com feromônio  $\tau$ ;
6     if  $M_k$  é completa e  $|M_k| < |M^*|$  then
7        $M^* \leftarrow M_k$ ;
8     end if
9   end for
10   $\tau \leftarrow (1 - \rho) \tau$ ; // evaporação
11  for cada aresta  $(b, \ell)$  do caminho de  $M^*$  do
12     $\tau[b, \ell] \leftarrow \min(\tau_{max}, \tau[b, \ell] + Q/|M^*|)$ ; // depósito elitista
13  end for
14 end for
15 return  $M^*$ ;

```

4.5 VALIDAÇÃO DA SOLUÇÃO

Como a construção é guiada por heurísticas, convém verificar, de forma independente, que a solução produzida é de fato válida. Por isso, toda solução retornada é submetida a um **validador** que reexecuta a sequência de manobras a partir do estado inicial e confere, uma a uma, todas as restrições de validade enumeradas na Seção 2.4.4: ordem cronológica, origem correta, cabimento no destino, ausência de colisão, acessibilidade, respeito às zonas proibidas, ausência de conflito simultâneo e formação correta dos trens. Esse procedimento funciona como uma última linha de defesa, garantindo que apenas soluções efetivamente válidas sejam reportadas como resultado.

5 Experimentos e Resultados

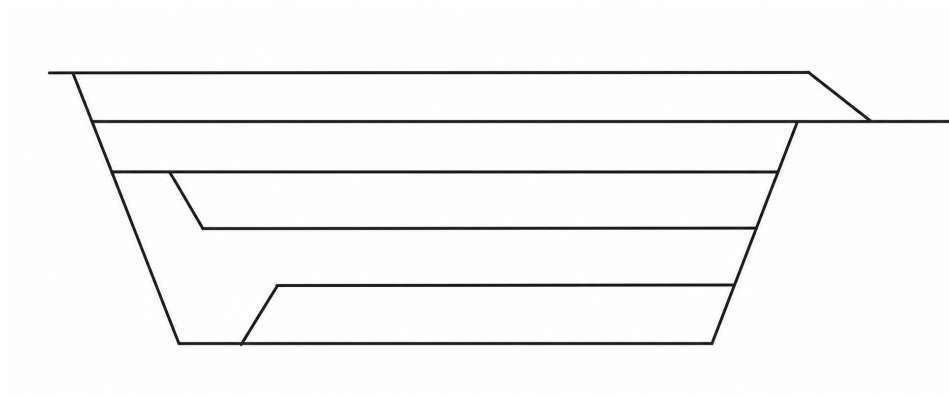
Este capítulo apresenta a avaliação experimental da abordagem proposta. A Seção 5.1 descreve o ambiente de testes; a Seção 5.2, as instâncias; a Seção 5.3, a configuração de parâmetros; e a Seção 5.5, os resultados e sua análise.

5.1 AMBIENTE DE TESTES

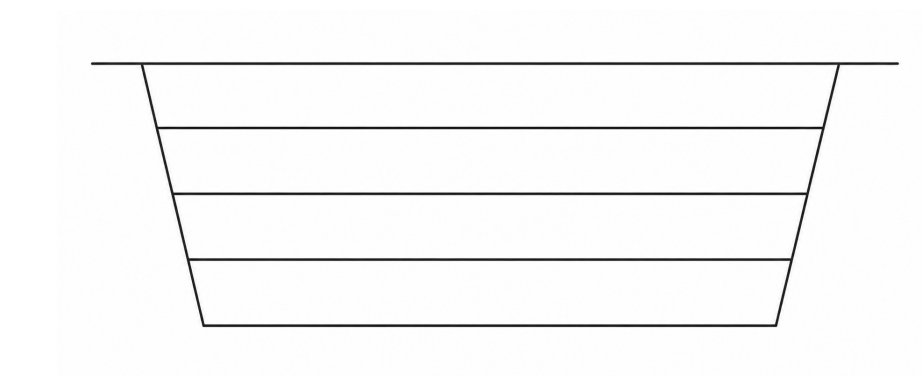
A abordagem foi implementada em **C++ (padrão C++17)** e compilada com o compilador **g++** da cadeia de ferramentas **MSYS2 (ucrt64)**, com gerência de *build* por **CMake**. Os experimentos foram executados em um computador com processador Intel Core i5-13450HX (13^a geração, 2,40 GHz), 16 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11.

5.2 INSTÂNCIAS

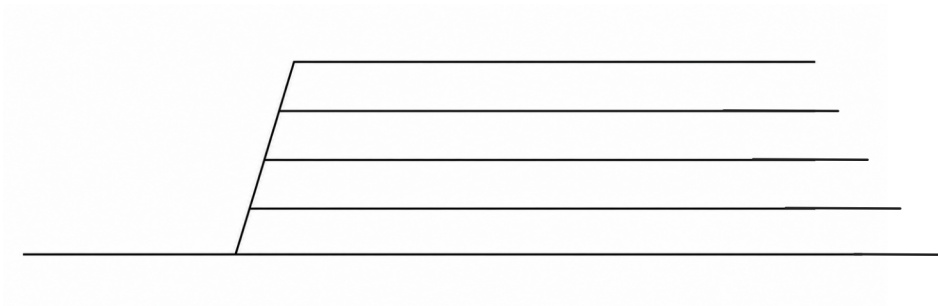
A avaliação foi conduzida sobre **treze instâncias**, organizadas em dois grupos (Tabela 5.1). O primeiro reúne **quatro instâncias sintéticas** de portes crescentes, que diferem no número de trens de saída a formar de um até quatro trens, ampliando progressivamente a dificuldade do rearranjo; todas são construídas sobre a topologia do pátio “desafio” (Figura 5.1a). O segundo grupo reúne **nove instâncias reais**, derivadas de dados de operação fornecidos pela MRS Logística, referentes a três pátios (P1, P2 e o pátio “desafio”): para cada pátio, há instâncias que formam um único trem (**-Trem1**, **-Trem2**) e uma instância que forma dois trens simultaneamente (**-Trens1E2**). As instâncias reais permitem avaliar o método em configurações de pátio efetivamente praticadas na operação ferroviária.



(a) Pátio “desafio”, comum às instâncias sintéticas e às reais **IMRSDesafio**.



(b) Pátio real P1.



(c) Pátio real P2.

Figura 5.1: Representação esquemática, em vista superior, das topologias de pátio utilizadas nos experimentos: (a) o pátio “desafio”, que serve de topologia tanto às quatro instâncias sintéticas quanto às instâncias reais **IMRSDesafio**; (b) o pátio real P1 e (c) o pátio real P2. Os três são derivados de dados de operação da MRS Logística.

Cada instância é descrita em um arquivo-texto com o seguinte formato: o horário de início das manobras e a velocidade média dos blocos; o número de linhas e, para cada linha, seu identificador, comprimento e zonas proibidas (esquerda e direita); o comprimento do

trecho; o número de blocos iniciais e, para cada um, sua linha, trecho inicial, número de vagões e trem de saída; o número de trens de saída e, para cada um, sua linha de destino, janela temporal e a sequência desejada de blocos (com posições alvo); e, por fim, a relação de adjacência entre trechos das linhas.

Tabela 5.1: Instâncias utilizadas nos experimentos.

Instância	Blocos	Trens de saída	Origem
instancia1Trem	4	1	Sintética
instancia2Trens	6	2	Sintética
instancia3Trens	9	3	Sintética
instancia4Trens	12	4	Sintética
IMRSPati1-Trem1	6	1	Real (MRS) – pátio 1
IMRSPati1-Trem2	6	1	Real (MRS) – pátio 1
IMRSPati1-Trens1E2	12	2	Real (MRS) – pátio 1
IMRSPati2-Trem1	6	1	Real (MRS) – pátio 2
IMRSPati2-Trem2	6	1	Real (MRS) – pátio 2
IMRSPati2-Trens1E2	12	2	Real (MRS) – pátio 2
IMRSDesafio-Trem1	6	1	Real (MRS) – pátio desafio
IMRSDesafio-Trem2	6	1	Real (MRS) – pátio desafio
IMRSDesafio-Trens1E2	12	2	Real (MRS) – pátio desafio

5.3 CONFIGURAÇÃO DE PARÂMETROS

A Tabela 5.2 apresenta os parâmetros do ACO utilizados nos experimentos. Os valores foram definidos de forma manual, a partir da análise dos muitos experimentos feitos e podem ser ajustados conforme o porte da instância e o tempo disponível.

5.4 VISUALIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES

Para apoiar a inspeção e a verificação das soluções produzidas, desenvolveu-se uma ferramenta auxiliar de visualização, implementada em **Python**, que gera uma animação em vídeo do rearranjo do pátio. Diferentemente do núcleo de otimização, implementado em C++ (Seção 5.1), essa ferramenta tem caráter estritamente auxiliar: seu objetivo é

Tabela 5.2: Parâmetros utilizados nos experimentos.

Parâmetro	Descrição	Valor
N	número de formigas por geração	200
G	número de gerações	100
α	expoente do feromônio	1,0
β	expoente da heurística	3,0
ρ	taxa de evaporação por geração	0,1
τ_0	feromônio inicial	1,0
Q	escala de depósito	100,0
τ_{max}	limite superior de feromônio (anti-estagnação)	3,0

tornar visualmente compreensível a sequência de manobras de uma solução, facilitando a depuração e a comunicação dos resultados.

A ferramenta recebe como entrada dois arquivos: a descrição da instância (mesmo formato da Seção 5.2) e o arquivo de solução gerado pelo solver (`solucao_<instância>.txt`), do qual extrai a sequência de manobras (bloco, linha e trecho de destino e direção). O pátio é representado como um grafo, em que cada linha corresponde a uma fileira de nós (os trechos) e as conexões entre linhas refletem a relação de adjacência da instância; cada bloco de vagões é desenhado sobre os trechos que ocupa, com cor própria para distingui-lo dos demais.

A partir do estado inicial, as manobras são aplicadas uma a uma, animando o deslocamento de cada bloco trecho a trecho até sua posição de destino e registrando os quadros intermediários; ao final, são exibidos os estados inicial e final do pátio. O resultado é exportado como um arquivo de vídeo (MP4), cuja velocidade de animação é configurável. A construção do grafo emprega a biblioteca **networkx**, a renderização dos quadros utiliza **matplotlib** e a montagem do vídeo é feita com a biblioteca **imageio**.

Essa visualização complementa o validador automático descrito na Seção 4.5: enquanto o validador garante, de forma programática, que a solução satisfaz todas as restrições, a animação permite a conferência visual do comportamento das manobras e a identificação de eventuais inconsistências de modelagem. A Figura 5.2 apresenta um quadro de uma dessas animações.



Figura 5.2: Quadro da animação gerada pela ferramenta auxiliar de visualização, mostrando as linhas do pátio (fileiras de trechos) e os blocos de vagões posicionados, cada um com cor distinta.

5.5 RESULTADOS E ANÁLISE

Esta seção avalia o impacto do **número de candidatas no sorteio** da heurística construtiva sobre a qualidade das soluções. Para cada instância, o método foi executado **10 vezes de forma independente** para cada valor de candidatas no conjunto $\{1, 3, 5, 7, 10, todas\}$, em que o valor *todas* indica que nenhum limite é imposto ao conjunto de candidatas (todas as manobras candidatas geradas participam do sorteio) e o valor 1 corresponde a uma escolha puramente gulosa (sem sorteio efetivo). Para isolar o efeito do parâmetro do custo computacional, o experimento foi repetido sob três orçamentos de **construções** (formigas $\times$ gerações): um reduzido, de 200 construções (20 formigas $\times$ 10 gerações); um intermediário, de 5 000 construções (100 formigas $\times$ 50 gerações); e um amplo, de 20 000 construções (200 formigas $\times$ 100 gerações). Os demais parâmetros seguem a Tabela 5.2.

Reporta-se, por configuração, a **média do número de manobras sobre as execuções válidas**. Execuções que não conseguiram formar todos os trens, isto é, que abortaram por bloqueio e não retornaram uma solução válida, são excluídas da média e assinaladas separadamente, uma vez que a ausência de solução não representa um valor de manobras pior, mas sim a inexistência de solução.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam o número médio de manobras em função

do número de candidatas, para os orçamentos de 200, 5 000 e 20 000 construções, respectivamente, separando as instâncias sintéticas (painel a) das reais (painel b). As **barras de erro** correspondem a ± 1 desvio-padrão do número de manobras entre as 10 execuções.

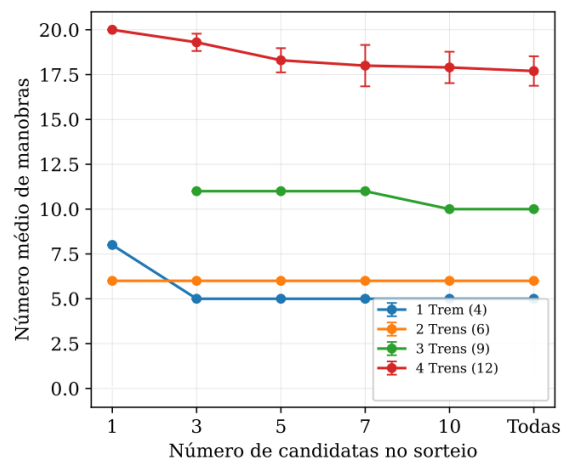
5.5.1 Impacto do número de candidatas

O efeito mais marcante é o do **modo puramente guloso** ($\text{candidatas} = 1$), que se mostra consistentemente o pior em todas as instâncias e em todos os orçamentos. Na instância real `IMRSPati1-Trem1`, ele produz, em média, 28 manobras contra cerca de 7 obtidas com sorteio; e na `IMRSPati1-Trens1E2`, 37 contra cerca de 21. Mais significativo ainda, o modo guloso **falha em formar os trens** da `instancia3Trens` em todas as 10 execuções, sob os três orçamentos de construções (Figuras 5.3, 5.4 e 5.5). Como o aumento do número de construções não corrige essa falha, ela não decorre de orçamento insuficiente, mas da própria rigidez da escolha determinística, que conduz a colônia repetidamente a condição de bloqueio.

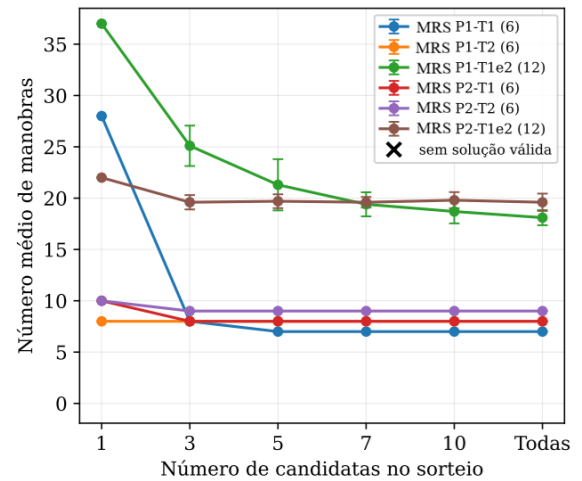
Esse contraste evidencia que o fator decisivo da abordagem é a **introdução de aleatoriedade na construção**, sorteando uma das manobras entre uma lista de candidatas. Tão logo o sorteio passa a operar sobre mais de uma candidata (a partir de 3), a colônia recupera a capacidade de escapar de bloqueios e de produzir soluções válidas e de boa qualidade. A análise específica da *forma* como esse sorteio pondera as candidatas é retomada na Seção 5.5.4.

A partir de 3 candidatas, a qualidade das soluções **estabiliza**, com ganhos marginais decrescentes à medida que o número de candidatas cresce em direção a *todas*. Esses ganhos concentram-se nas instâncias mais difíceis: na `IMRSPati1-Trens1E2` com 20 000 construções, por exemplo, a média cai de 26,7 (com 3 candidatas) para 20,4 (com *todas*), de forma praticamente monotônica; na `instancia3Trens`, de 11,5 para 10,1. Já as instâncias mais simples são praticamente insensíveis ao parâmetro a partir de 3 candidatas: a `instancia2Trens` e a `instancia4Trens` permanecem constantes em 6 e 20 manobras, respectivamente, e a `instancia1Trem` estabiliza em 5.

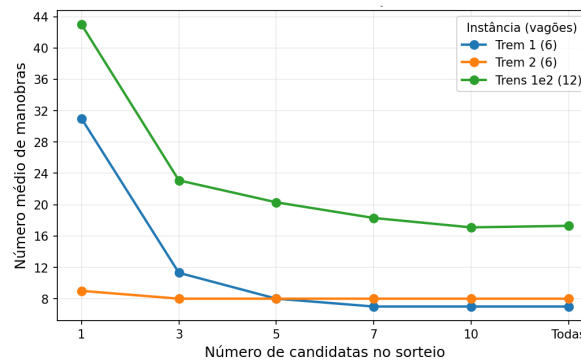
Além da qualidade média, o número de candidatas afeta a **robustez** do método, como revelam as barras de erro das Figuras 5.3–5.5, isto é, o intervalo de ± 1 desvio-padrão do número de manobras sobre as 10 execuções, tanto mais estreito quanto mais consistente



(a) Instâncias sintéticas.

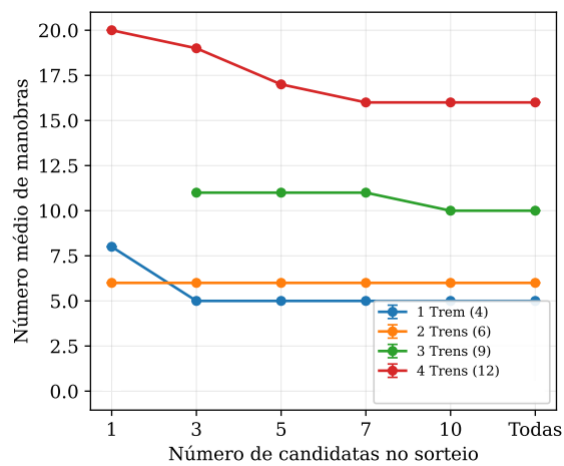


(b) Instâncias Reais MRS P1 e P2.

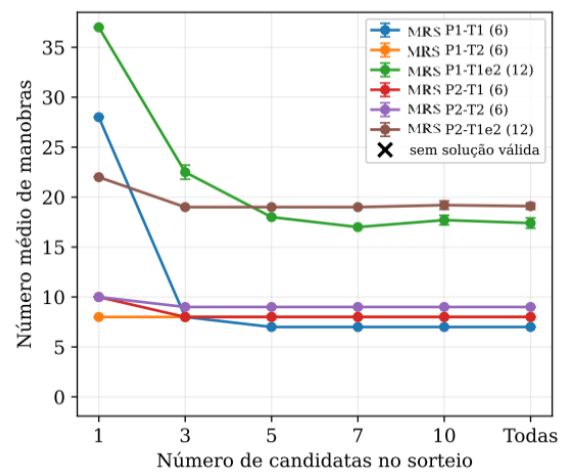


(c) Instâncias reais do pátio desafio.

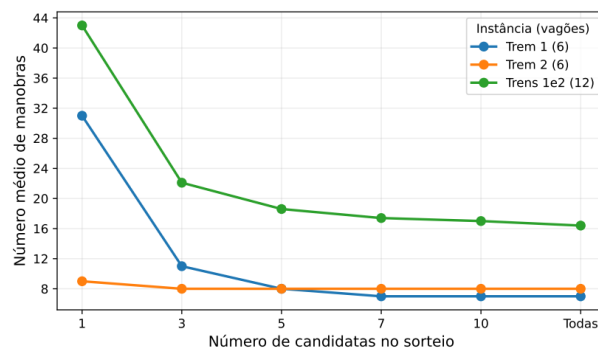
Figura 5.3: Número médio de manobras (10 execuções) em função do número de candidatas no sorteio, para 200 construções (20 formigas $\times$ 10 gerações). O símbolo “x” indica configuração sem solução válida em nenhuma das execuções.



(a) Instâncias sintéticas.

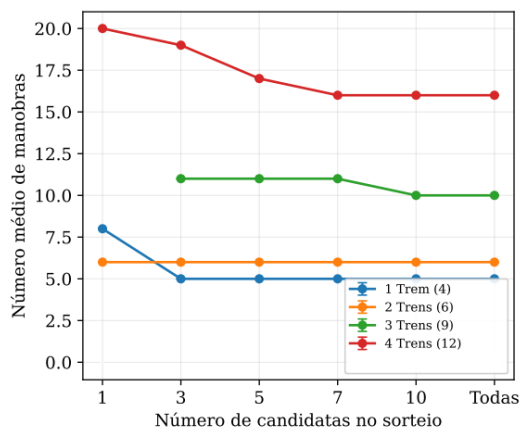


(b) Instâncias Reais MRS P1 e P2.

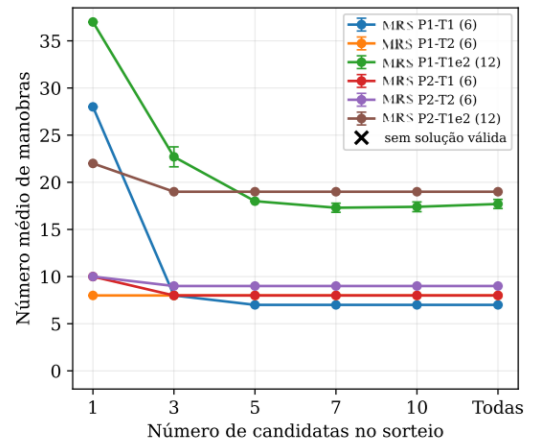


(c) Instâncias reais do pátio desafio.

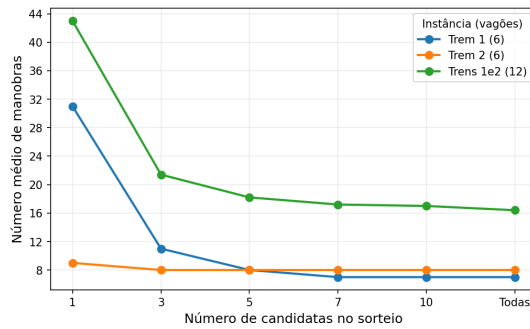
Figura 5.4: Número médio de manobras (10 execuções) em função do número de candidatas no sorteio, para 5000 construções (100 formigas $\times$ 50 gerações). O símbolo “x” indica configuração sem solução válida em nenhuma das execuções.



(a) Instâncias sintéticas.



(b) Instâncias Reais MRS P1 e P2.



(c) Instâncias reais do pátio desafio.

Figura 5.5: Número médio de manobras (10 execuções) em função do número de candidatas no sorteio, para 20000 construções (200 formigas $\times$ 100 gerações). O símbolo “x” indica configuração sem solução válida em nenhuma das execuções.

for o método. Sob 200 construções, a configuração com 3 candidatas é a mais instável: na `IMRSPati1-Trem1`, a média de 11,6 esconde uma faixa de 8 a 17 manobras entre as execuções. À medida que se ampliam as candidatas para 7, 10 e *todas*, as barras de erro reduzem acentuadamente, indicando soluções não apenas melhores, mas também mais **consistentes** entre execuções. Observa-se, ainda, que as instâncias reais da MRS exibem maior sensibilidade ao parâmetro do que as sintéticas de mesmo porte, o que reflete a estrutura combinatória mais rica das configurações reais de pátio.

5.5.2 Influência do número de construções

A comparação entre as Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 evidencia o papel do esforço de busca. O aumento progressivo de 200 para 5 000 e, em seguida, para 20 000 construções torna o método, ao mesmo tempo, **melhor e mais estável**. O ganho de estabilidade é nítido nas instâncias mais difíceis: já a partir de 5 000 construções, as configurações com sorteio convergem para um mesmo patamar de manobras com desvio praticamente nulo, eliminando a instabilidade observada com 200 construções. O ganho de qualidade, por sua vez, manifesta-se sobretudo nas instâncias difíceis e de forma consistente entre os níveis: a melhor média da `IMRSPati1-Trens1E2` cai de 27,7 (com 200 construções) para 21,9 (com 5 000) e, então, para 20,4 (com 20 000); a `IMRSPati1-Trem1` converge de cerca de 8 para 7 manobras. Confirma-se, assim, que candidatas e construções atuam de forma complementar: ambas favorecem a exploração do espaço de soluções e, com isso, a qualidade do resultado, ainda que com retornos decrescentes nos maiores orçamentos.

Vale destacar que a falha do modo guloso na `instancia3Trens` persiste nos três orçamentos, reforçando que se trata de uma limitação *qualitativa* do mecanismo de seleção, e não de uma questão de quantidade de construções.

5.5.3 Consistência entre execuções: média versus melhor solução

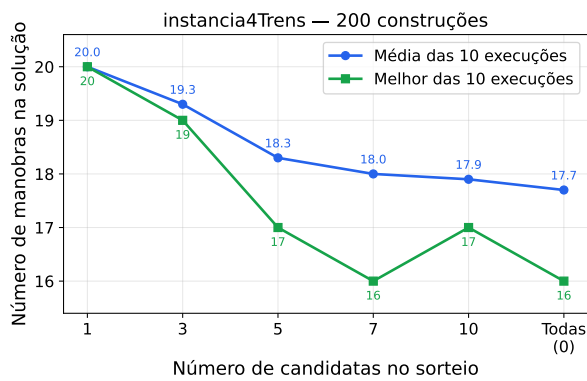
As análises anteriores basearam-se na média das execuções válidas. Para avaliar a **consistência** do método, isto é, o quão próximo o resultado de uma execução típica está do melhor resultado alcançável, compara-se, para cada instância, a média das 10 execuções (curva azul, marcadores circulares) e a melhor das 10 execuções (curva verde, marcadores quadrados), em função do número de candidatas. Quanto menor a distância entre as duas curvas, mais consistente é o método: no limite em que coincidem, praticamente toda

execução atinge a melhor solução conhecida.

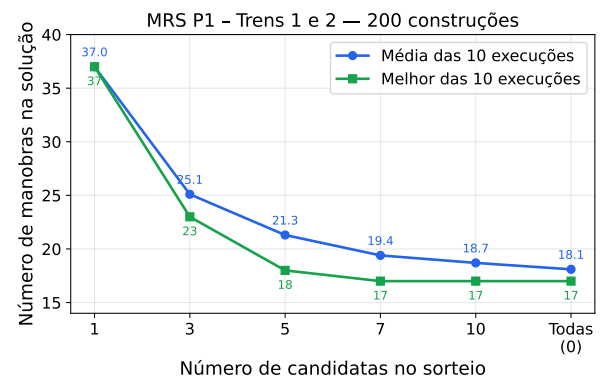
Em 9 das 13 instâncias, média e melhor praticamente coincidem em qualquer orçamento: são os casos em que o método converge para a mesma solução em todas as execuções: `instancia1Trem`, `instancia2Trens`, `IMRSPati1-Trem1`, `IMRSPati1-Trem2`, `IMRSPati2-Trem1`, `IMRSPati2-Trem2`, `IMRSDesafio-Trem1` e `IMRSDesafio-Trem2`, além da `instancia3Trens` a partir de 3 candidatas (para `candidatas= 1` não há solução válida, conforme a Seção 5.5.1). Como nesses casos as duas curvas são indistinguíveis, exibi-las pouco acrescentaria. Por isso, e para não sobrecarregar a exposição com um número excessivo de gráficos, as Figuras 5.6, 5.7 e 5.8 restringem-se às **quatro instâncias em que média e melhor de fato divergem**: `instancia4Trens` (Figura 5.6(a)), `IMRSPati1-Trens1E2` (Figura 5.6(b)), `IMRSPati2-Trens1E2` (Figura 5.6(c)) e `IMRSDesafio-Trens1E2` (Figura 5.6(d)), que são as informativas para esta análise e correspondem, justamente, às configurações de maior dificuldade combinatória, visto que são as instâncias com mais blocos de vagões.

Nessas quatro instâncias, a distância entre média e melhor é sensível ao orçamento de construções. Com 200 construções (Figura 5.6), abre-se uma folga visível entre a melhor execução encontrada e a média. Na `instancia4Trens`, a média estabiliza em torno de 17,7–18 manobras, enquanto a melhor execução alcança 16; na `IMRSPati1-Trens1E2`, a média oscila entre 18 e 19 contra uma melhor de 17; na `IMRSPati2-Trens1E2`, a média fica em torno de 19,7 contra uma melhor de 19; e na `IMRSDesafio-Trens1E2`, a média fica em torno de 17 contra uma melhor de 16. Esse afastamento entre as curvas é o sinal de que, com pouco esforço, os resultados variam entre execuções e dependem de uma construção afortunada.

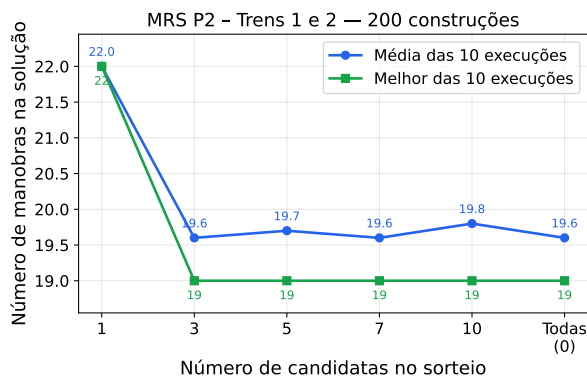
À medida que o orçamento cresce para 5 000 (Figura 5.7) e 20 000 construções (Figura 5.8), essa folga se fecha quase por completo. Na `instancia4Trens` e na `IMRSDesafio-Trens1E2`, as curvas de média e melhor já praticamente se sobrepõem a partir de 5 000 construções, convergindo para 16 manobras. A `IMRSPati2-Trens1E2` ilustra esse fechamento de forma particularmente nítida: a folga observada com 200 construções desaparece já com 5 000 e, com 20 000, média e melhor coincidem exatamente em 19 manobras. O único resíduo persistente aparece na `IMRSPati1-Trens1E2`, na qual, mesmo com 20 000 construções, a média permanece ligeiramente acima da melhor ($\approx 17,7$ contra 17), o que é coerente com o fato de ser a instância de estrutura combinatória mais



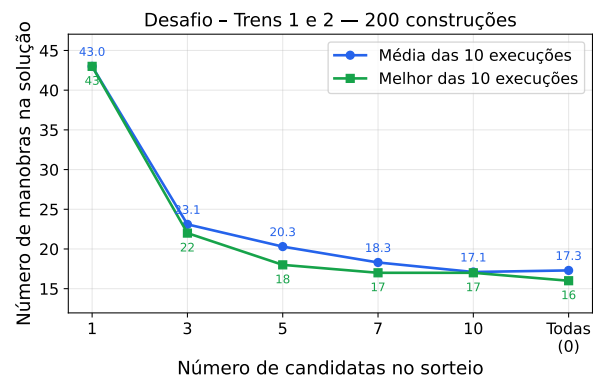
(a) instancia4Trens.



(b) IMRSPati1-Trens1E2.

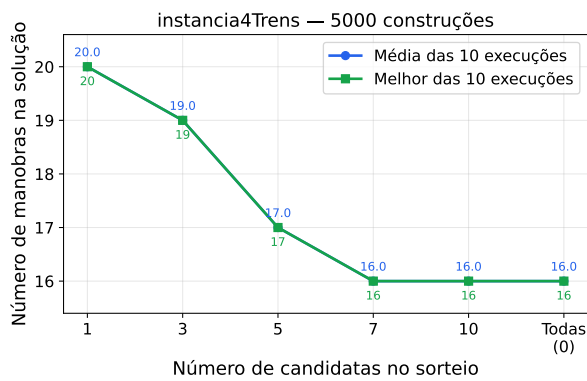


(c) IMRSPati2-Trens1E2.

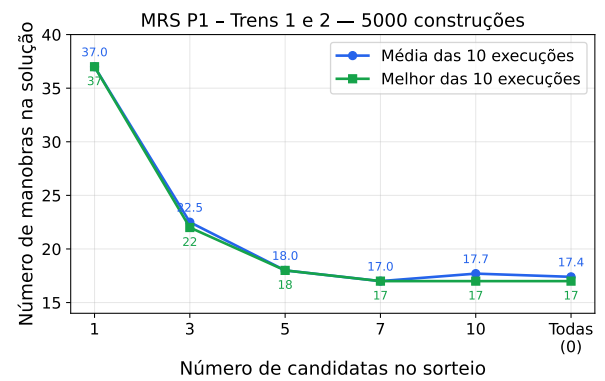


(d) IMRSDesafio-Trens1E2.

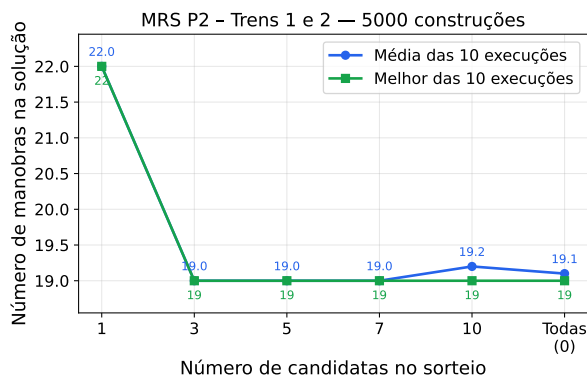
Figura 5.6: Número de manobras em função do número de candidatas no sorteio, para 200 construções: média (azul, círculos) e melhor (verde, quadrados) das 10 execuções, para as quatro instâncias em que média e melhor divergem.



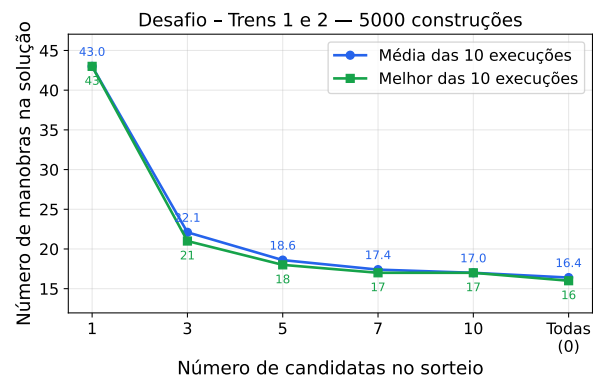
(a) instancia4Trens.



(b) IMRSPati1-Trens1E2.

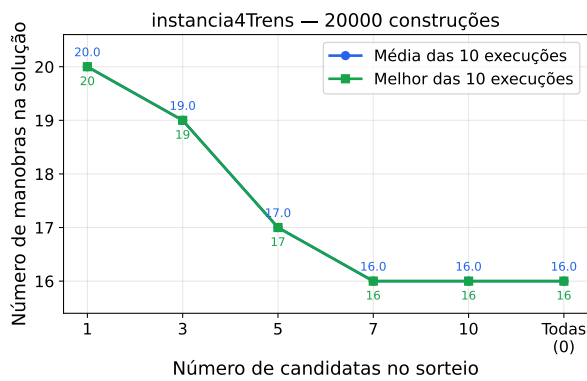


(c) IMRSPati2-Trens1E2.

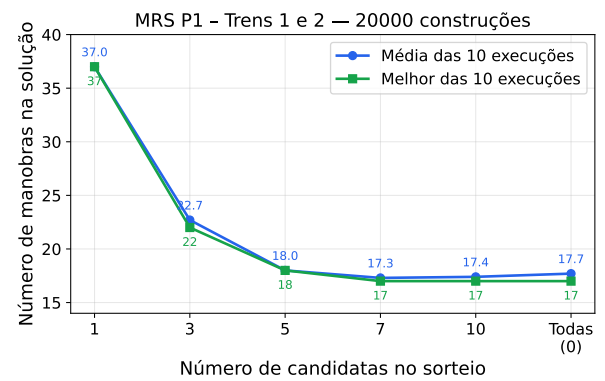


(d) IMRSDesafio-Trens1E2.

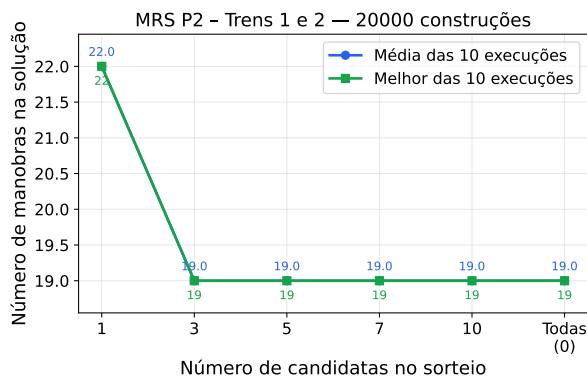
Figura 5.7: Número de manobras em função do número de candidatas no sorteio, para 5 000 construções: média (azul, círculos) e melhor (verde, quadrados) das 10 execuções, para as quatro instâncias em que média e melhor divergem.



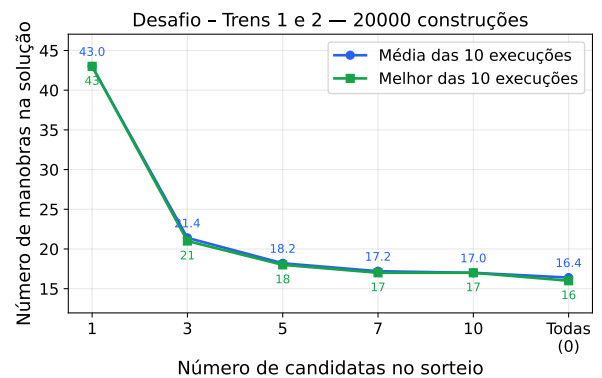
(a) instancia4Trens.



(b) IMRSPati1-Trens1E2.



(c) IMRSPati2-Trens1E2.



(d) IMRSDesafio-Trens1E2.

Figura 5.8: Número de manobras em função do número de candidatas no sorteio, para 20 000 construções: média (azul, círculos) e melhor (verde, quadrados) das 10 execuções, para as quatro instâncias em que média e melhor divergem.

rica do conjunto.

Esse comportamento reforça e qualifica a análise da Seção 5.5.2: o principal efeito de ampliar o número de construções não é tanto melhorar a melhor solução encontrada, que já é atingida, ocasionalmente, mesmo com 200 construções, mas sim aumentar a probabilidade de que uma execução típica alcance essa melhor solução. Em outras palavras, o orçamento de construções compra, sobretudo, **consistência**: com esforço suficiente, o método deixa de depender de sorte na amostragem e passa a entregar, de forma confiável, soluções próximas às melhores que consegue produzir. Esse ganho de robustez concentra-se justamente nas instâncias de estrutura combinatória mais rica, coerentemente com o observado nas análises anteriores.

5.5.4 Efeito da ponderação do sorteio

Todos os experimentos anteriores empregaram o **sorteio simples** (uniforme) entre as candidatas de menor custo, adotado na abordagem proposta (Seção 4.3.4). Cabe verificar se ponderar esse sorteio pelo custo, dando às candidatas mais baratas maior probabilidade de seleção, conforme a Equação 3.3 traria ganhos. Para responder a isso, todo o experimento foi repetido com um **sorteio proporcional ao custo**, mantidas as demais condições (10 execuções por configuração, nos três orçamentos), e as duas variantes foram comparadas.

Três observações destacam-se. Primeiro, nas instâncias mais simples, e em qualquer orçamento, as duas variantes produzem resultados idênticos; em particular, para *candidatas* = 1 os resultados coincidem por construção, já que, com uma única candidata, não há sorteio a ponderar. Esse comportamento valida que a única diferença entre os experimentos é, de fato, a presença ou ausência da ponderação.

Segundo, e de forma contraintuitiva, o sorteio **não proporcional iguala ou supera** levemente o proporcional nas instâncias mais difíceis. A diferença é mais expressiva na *IMRSPati1-Trens1E2*: com 5 000 construções e 5 candidatas, a média cai de 26,3 (proporcional) para 18,0 (não proporcional); com 200 construções, a melhor média passa de 27,7 para 18,1. Ganhos consistentes, ainda que menores, aparecem também na *instancia4Trens* (de 20 para cerca de 16–18 manobras) e na *IMRSPati1-Trem1*. Nas demais instâncias, as duas variantes praticamente empatam, com diferenças dentro da variabilidade entre execuções.

Terceiro, esse comportamento é **estável nos três orçamentos** de construções, o que indica que não se trata de um artefato de um regime específico de esforço computacional. A interpretação mais plausível é que a remoção da ponderação **amplia a diversidade** do processo construtivo: ao não concentrar a probabilidade nas candidatas de menor custo imediato, o sorteio uniforme explora regiões do espaço de soluções que a variante proporcional tende a evitar, escapando de ótimos locais associados a decisões gulosas. Como o feromônio do ACO já fornece, ao longo das gerações, um viés de intensificação em direção às boas soluções, a diversidade extra introduzida pelo sorteio uniforme atua de forma complementar, favorecendo as instâncias de estrutura combinatória mais rica. Vale observar, contudo, que o custo heurístico por manobra deixa de influenciar diretamente cada escolha individual nessa variante; um aprofundamento natural seria avaliar esquemas intermediários, por exemplo, ponderações mais suaves pelo custo, que combinem parte do direcionamento pelo custo com a diversidade observada no sorteio uniforme.

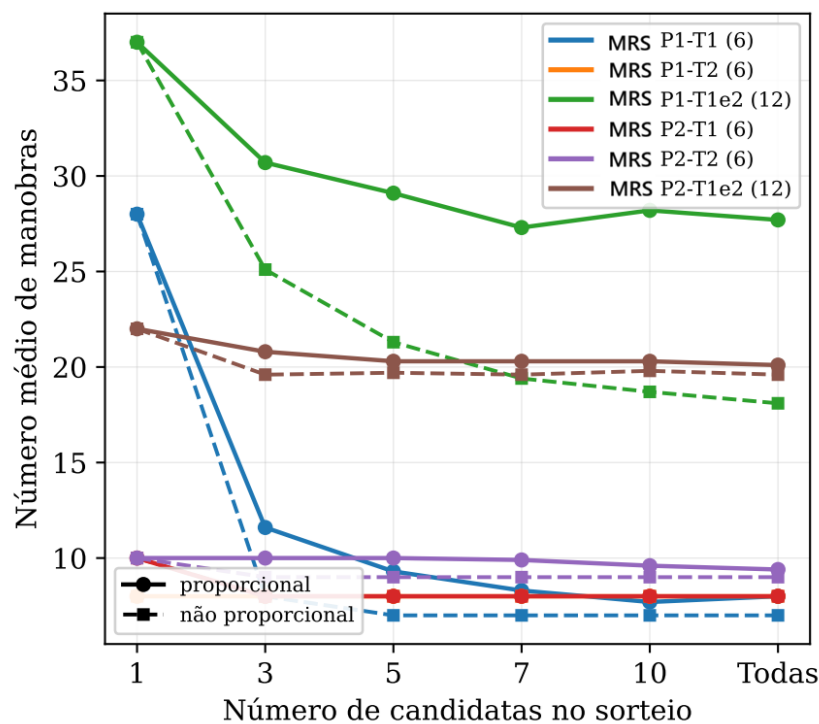


Figura 5.9: Manobras vs. candidatas para os pátios P1 e P2 com 200 construções. Linha tracejada para sorteio simples e contínua para o sorteio ponderado.

5.5.5 Discussão

Os resultados sustentam três conclusões principais. Primeiro, a integração entre a heurística construtiva e a meta-heurística ACO forma soluções válidas para todas as instâncias, incluindo as nove instâncias reais de operação. Segundo, a **construção aleatória**, dispor de um conjunto de candidatas e sortear entre elas é um componente essencial da abordagem, e não um mero refinamento: a escolha puramente gulosa não só degrada acentuadamente a qualidade como pode impedir a formação dos trens, ao passo que um pequeno conjunto de candidatas (≥ 3) já recupera soluções válidas e de boa qualidade. A ponderação dessas candidatas pelo custo, por sua vez, mostrou-se menos determinante: como detalhado na Seção 5.5.4, o sorteio uniforme alcançou resultados equivalentes ou ligeiramente superiores. Terceiro, há um regime de **retornos decrescentes**: ampliar o número de candidatas e o número de construções melhora a qualidade e a robustez, mas com ganhos que se concentram nas instâncias mais difíceis e tendem a saturar, o que oferece uma base empírica para a escolha de parâmetros que equilibrem qualidade e tempo de execução. A comparação direta com métodos exatos e com outras meta-heurísticas, bem como a análise em um conjunto ainda mais amplo de instâncias, constituem desdobramentos naturais, discutidos no Capítulo 6.

6 Conclusão

Este trabalho abordou o Problema de Formação de Trens em Pátios de Classificação Ferroviária, cujo objetivo é minimizar o número de manobras necessárias para posicionar cada bloco de vagões na linha, na ordem e na posição exigidas pelo seu trem de saída, respeitando restrições de acessibilidade, zonas proibidas, conexões físicas entre linhas e janelas temporais. Trata-se de um problema de otimização combinatória de elevada complexidade, para o qual os métodos exatos, como o modelo de programação linear inteira mista de Sá (2021), que serviu de base inicial a este estudo, tornam-se inviáveis em instâncias de porte realista, motivando a investigação de uma alternativa heurística mais escalável.

Retomando os objetivos traçados na introdução, todos foram contemplados ao longo do trabalho. A modelagem computacional do pátio foi desenvolvida no Capítulo 2, contemplando manobras direcionais e a verificação explícita de acessibilidade, zonas proibidas e conexões físicas entre linhas, com roteamento de múltiplos saltos quando a linha de saída não é diretamente alcançável. Sobre essa modelagem, propôs-se no Capítulo 4 uma heurística construtiva gulosa aleatória, que constrói a solução manobra a manobra, avaliando candidatas por uma função de custo multicritério e selecionando-as por um sorteio aleatório entre as candidatas de menor custo. A heurística foi integrada a uma meta-heurística de Otimização por Colônia de Formigas, na variante *Ant System* elitista, na qual o feromônio, indexado por pares (bloco, linha de destino), reforça progressivamente as decisões das melhores soluções, com limite superior para conter a estagnação.

Um aspecto crítico dessa integração, também previsto entre as contribuições, foi identificado e tratado: a colônia passou a considerar apenas soluções completas, o que impede que soluções parciais, que foram interrompidas por bloqueio e, portanto, inválidas, sejam indevidamente premiadas pela simples contagem de manobras. Complementarmente, desenvolveu-se um validador independente, que reexecuta cada sequência de manobras e verifica todas as restrições de validade, e uma ferramenta auxiliar de visualização, que anima o rearranjo do pátio e facilita a depuração e a comunicação dos resultados.

Os experimentos computacionais, realizados sobre treze instâncias, sendo elas quatro sintéticas e nove derivadas de dados reais de operação da MRS Logística, confirmaram

a obtenção de soluções válidas para todas, atendendo ao objetivo central de formar corretamente os trens de saída com um número reduzido de manobras. A análise paramétrica revelou, ainda, três aspectos relevantes do comportamento do método. Primeiro, a aleatoriedade na construção mostrou-se essencial: a escolha puramente gulosa, sem sorteio, não apenas degrada a qualidade como chega a impedir a formação dos trens em uma das instâncias, ao passo que um pequeno conjunto de candidatas já recupera soluções válidas e de boa qualidade. Segundo, a forma de ponderação do sorteio revelou-se menos determinante do que se poderia supor: um sorteio uniforme entre as candidatas alcançou resultados equivalentes ou ligeiramente superiores ao sorteio proporcional ao custo. Terceiro, tanto o número de candidatas quanto o número de construções melhoram a qualidade e a robustez das soluções, com retornos decrescentes e ganhos concentrados nas instâncias mais difíceis. No conjunto, esses resultados evidenciam a adequação da combinação entre uma heurística construtiva específica do domínio e uma meta-heurística populacional para o problema considerado, cumprindo a proposta apresentada na introdução de oferecer um método capaz de produzir soluções de boa qualidade em tempo computacional viável.

6.1 LIMITAÇÕES

Apesar dos resultados obtidos, o trabalho apresenta limitações, que dizem respeito tanto ao alcance da avaliação experimental quanto às simplificações adotadas na modelagem do pátio. Reconhecê-las é importante para delimitar o escopo das conclusões e para orientar os desdobramentos discutidos na Seção 6.2.

No plano da avaliação, embora os experimentos tenham abrangido treze instâncias, incluindo nove casos mais próximos de operações reais, derivados de dados da MRS Logística, não foram contemplados pátios de grande porte, o que ainda não permite conclusões amplas sobre a escalabilidade do método. Além disso, a calibração dos pesos da função de custo foi conduzida de forma manual, sem um processo sistemático de ajuste, e a ausência de um conjunto de referência consolidado dificulta o posicionamento quantitativo da abordagem frente a outros métodos.

No plano da modelagem, a principal simplificação é a ausência de **manobras de múltiplos blocos**. Tais manobras movimentam, de uma só vez, um corte contíguo de dois ou mais blocos adjacentes, prática comum na operação cotidiana dos pátios e

bastante eficaz para reduzir o volume total de manobras. A abordagem atual gera apenas manobras individuais, não dispondo de recursos para construir soluções que aproveitem esse agrupamento.

Uma segunda simplificação decorre da **discretização das linhas por trechos**. Cada linha é representada por uma sucessão de trechos de comprimento fixo, cada qual comportando exatamente um vagão, ao passo que, na realidade, as linhas são contínuas. Essa abstração, embora conveniente do ponto de vista algorítmico, afasta o modelo da geometria real do pátio. Como consequência direta, o modelo **não distingue tipos de vagões**: ao assumir que todo vagão ocupa um trecho idêntico, ele desconsidera a existência de vagões mais longos ou mais curtos. Uma formulação contínua do problema aproximaria a representação das condições efetivamente encontradas em operação.

O modelo também **não contabiliza a locomotiva**, ignorando tanto o seu comprimento quanto o seu deslocamento pelo pátio. Essa omissão tem duas consequências indesejáveis: por um lado, uma manobra inviável na prática, em razão da posição corrente da locomotiva, pode ser incluída na solução; por outro, uma manobra que, na realidade, seria mais demorada e custosa, devido à distância entre a locomotiva e o bloco a ser movido, pode ser avaliada como vantajosa e indevidamente selecionada.

Por fim, a abordagem admite **apenas uma manobra por vez**, não modelando a possibilidade de manobras simultâneas. Segundo informações operacionais da MRS, esse tipo de situação não é frequente na prática, o que atenua o impacto da limitação; ainda assim, estendê-la representaria um passo relevante rumo a uma representação mais fiel da operação.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Os desdobramentos naturais deste trabalho decorrem, em boa parte, das limitações discutidas na Seção 6.1, e podem ser organizados em duas frentes: o aprimoramento da fidelidade do modelo e a evolução do método de solução.

No que tange à **fidelidade da modelagem**, vislumbram-se as seguintes direções:

- **Manobras de múltiplos blocos**: superar a limitação correspondente descrita na Seção 6.1, transportando, em uma única manobra, um corte contíguo de blocos adjacentes que sigam na mesma direção, com um modelo de custo marginal que recompense o agrupamento apenas quando este reduza o esforço total, tal recurso

aproximaria o método da prática operacional e tenderia a diminuir o número de manobras;

- **Representação contínua das linhas:** substituir a discretização por trechos de tamanho fixo por uma modelagem contínua dos comprimentos, o que permitiria, de imediato, distinguir vagões de diferentes comprimentos e refletir com mais exatidão a geometria do pátio;
- **Modelagem da locomotiva:** incorporar o comprimento e o deslocamento da locomotiva ao custo e à viabilidade das manobras, evitando que manobras inexequíveis sejam incluídas na solução e que o custo real de deslocamento seja subestimado;
- **Manobras simultâneas:** estender o modelo para admitir a execução de mais de uma manobra ao mesmo tempo, ampliando a aderência à operação ainda que se trate de situação pouco frequente na prática.

No que tange à **evolução do método de solução**, destacam-se:

- **Hibridização com busca local:** incorporar procedimentos de busca local (por exemplo, na linha do *Variable Neighborhood Descent*) para refinar as soluções construídas, possivelmente reduzindo o número de manobras;
- **Objetivo multicritério:** estender a função objetivo para considerar explicitamente o tempo total de manobras e o cumprimento das janelas temporais, além da contagem de manobras;
- **Ajuste automático de parâmetros:** empregar ferramentas de calibração automática (por exemplo, *racing*) para os pesos da função de custo e os parâmetros do ACO, superando a calibração manual adotada;
- **Ponderações intermediárias do sorteio:** investigar esquemas de seleção entre o sorteio simples (uniforme) e o sorteio proporcional ao custo; por exemplo, ponderações mais suaves pelo custo, à luz do resultado de que o sorteio uniforme mostrou resultados melhores ou equivalentes;
- **Paralelização:** explorar a independência entre as formigas para acelerar a execução em ambientes multiprocessados, viabilizando instâncias maiores;

- **Avaliação ampliada:** testar a abordagem em um conjunto maior e mais diversificado de instâncias, incluindo pátios de grande porte, e compará-la com métodos exatos (em instâncias pequenas) e com outras meta-heurísticas;
- **Roteamento ciente de lado de entrada:** aprimorar o roteamento de múltiplos saltos para considerar não apenas a distância, mas também o lado pelo qual um bloco deve ingressar na linha-alvo, reduzindo ainda mais situações de bloqueio.

REFERÊNCIAS

- Boysen, N., Emde, S., Fliedner, M., 2016. **The basic train makeup problem in shunting yards**. *OR Spectrum* 38 (1), 207–233.
- Boysen, N., Fliedner, M., Jaehn, F., Pesch, E., 2012. **Shunting yard operations: Theoretical aspects and applications**. *European Journal of Operational Research* 220 (1), 1–14.
- Dahlhaus, E., Horak, P., Miller, M., Ryan, J. F., 2000. **The train marshalling problem**. *Discrete Applied Mathematics* 103 (1–3), 41–54.
- Di Stefano, G., Koči, M. L., 2004. **A graph theoretical approach to the shunting problem**. *Electronic Notes in Theoretical Computer Science* 92, 16–33.
- Dorigo, M., Maniezzo, V., Colorni, A., 1996. **Ant system: optimization by a colony of cooperating agents**. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* 26 (1), 29–41.
- Eggermont, C., Hurkens, C. A. J., Modelski, M., Woeginger, G. J., 2009. **The hardness of train rearrangements**. *Operations Research Letters* 37 (2), 80–82.
- Feo, T. A., Resende, M. G. C., 1995. **Greedy randomized adaptive search procedures**. *Journal of Global Optimization* 6 (2), 109–133.
- Gatto, M., Maue, J., Mihalák, M., Widmayer, P., 2009. **Shunting for Dummies: An Introductory Algorithmic Survey**. In: Ahuja, R. K., Möhring, R. H., Zaroliagis, C. D. (Eds.), *Robust and Online Large-Scale Optimization*. Vol. 5868 of *Lecture Notes in Computer Science*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 310–337.
- Hansmann, R. S., Zimmermann, U. T., 2008. **Optimal Sorting of Rolling Stock at Hump Yards**. In: Krebs, H.-J., Jäger, W. (Eds.), *Mathematics – Key Technology for the Future*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 189–203.
- SOBRAPO, 2022. **4º Desafio MRS Logística S.A: Otimizador de Manobras em Pátios de Carga Geral**. 54º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO 2022), Juiz de Fora, MG, disponível em: <https://sbpo2022.galoa.com.br/4-desafio-mrs/>. Acesso em: 14 jun. 2026.
- Sá, R. F. d., 2021. **Avaliação de Capacidade de Processamento em Pátios Ferroviários Planos de Classificação através de Modelo de Otimização**. Dissertação (mestrado em engenharia de produção), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio), Rio de Janeiro.
- Talbi, E.-G., 2009. *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ.
- Wildo, B. F., Magalhães, C. d. S., Esteves Sobrinho, O., 2025. **TRANSPORTE FERROVIÁRIO NO BRASIL: IMPORTÂNCIA, DESAFIOS E VANTAGENS SOBRE O RODOVIÁRIO** RAIL TRANSPORT IN BRAZIL: IMPORTANCE, CHALLENGES, AND ADVANTAGES OVER ROAD TRANSPORT. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação — REASE*.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Declaro que, durante a elaboração deste trabalho, foram utilizadas ferramentas de inteligência artificial como apoio às seguintes atividades: revisão textual e gramatical, geração de imagens ilustrativas e formatação do texto.

Todo o conteúdo técnico, os resultados experimentais, a análise e as conclusões apresentados são de responsabilidade do autor, que revisou e validou integralmente o material produzido com esse apoio. As ferramentas utilizadas foram: Claude (Anthropic) e Gemini (Google).