LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

APLICAÇÃO DE ALGORITMO GENÉTICO EM UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA OTIMIZAÇÃO DO FLUXO FERROVIÁRIO

Alexandre A. Andrade, Lucas S. M. Guedes, Fernanda V. Vargas
VLI Multimodal
R. Tapuias, 49 - Floresta, Belo Horizonte - MG
alexandre.aandrade@vli-logistica.com.br,
lucas.guedes@vli-logistica.com.br,
fernanda.vargas@vli-logistica.com.br

Ricardo S. de Camargo
Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG
rcamargo@dep.ufmg.br

RESUMO

De maneira geral, um sistema ferroviário é caracterizado por sua complexidade. Como consequência, a maioria dos problemas relacionados à ferrovia são do tipo NP-difícil. Uma boa opção para se resolver estes problemas é a utilização de algoritmos genéticos. Este trabalho foi realizado na empresa VLI Multimodal. A VLI engloba a Ferrovia Centro-Atlântica (FCA), na qual tem-se um corredor ferroviário com um fluxo de minério entre as cidades de Arcos e Volta Redonda. O objetivo principal deste trabalho é a elaboração de uma ferramenta computacional para auxílio à tomada de decisão. Para modelar o problema, foi proposto um modelo linear inteiro misto (*MILP*) com função objetivo para minimizar o giro das locomotivas nas extremidades do corredor. Tal modelo foi implementado e utilizado como a função de avaliação da aptidão (*fitness*) do algoritmo genético. A ferramenta apresentou bons resultados para instâncias distintas.

PALAVRAS CHAVE. Algoritmo genético. Otimização. Logística ferroviária.

Tópicos. L&T, MH.

ABSTRACT

In general, a railway system is characterized by its complexity. As a consequence, most railroad-related problems are NP-hard. A good option to solve these problems is the use of genetic algorithms. This work was carried out at VLI Multimodal. The VLI comprises the Ferrovia Centro-Atlantica (FCA), in which there is a railway corridor with an ore flow between the cities of Arcos and Volta Redonda. The main objective of this work is the elaboration of a computational tool to aid decision making. In order to model the problem, a mixed integer linear programming (MILP) was proposed with an objective function to minimize the turning of the locomotives at the ends of the corridor. This model was implemented and used as the fitness evaluation function of the genetic algorithm. The tool presented good results for different instances.

KEYWORDS. Genetic algorithm. Optimization. Railway Logistics.

Paper topics. L&T, MH.

https://proceedings.science/p/106708?lang=pt-br

1. Introdução

Um sistema ferroviário é um sistema complexo composto por vários processos que se interagem e depende de dispositivos tecnológicos, do comportamento humano e do ambiente externo [D'Ariano, 2010]. Por se tratar de um sistema complexo, o desempenho de algumas operações ferroviárias tornam-se extremamente sensíveis a algumas variáveis do processo. Por consequência, o tratamento de problemas dessa natureza torna-se humanamente impossível quando o objetivo principal é tomar decisões ótimas.

Do outro lado, a solução de problemas complexos de otimização ainda encontra muitos desafios quando se trata de tempo de solução. Dessa maneira, uma técnica que vem ganhando cada vez mais confiabilidade e espaço é a solução por meio de algoritmos genéticos. A ideia deste trabalho é desenvolver uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão de curto prazo que gere um sequenciamento ótimo de trens no corredor Minas-Rio da Ferrovia Centro Atlântica (FCA), pertencente à VLI Multimodal. A VLI é uma empresa que oferece soluções logísticas de maneira integrada. Isso é possível pois a empresa possui portos, ferrovias e terminais integradores. Em 2017 a empresa transportou mais de 57 milhões de toneladas de produtos por suas ferrovias. [VLI, 2017].

No âmbito do planejamento de curto prazo, relacionar todos os fatores de maneira lógica visando o transporte máximo de produto pelo corredor em um horizonte de tempo de alguns dias se torna uma tarefa humanamente impossível e, dessa maneira, faz-se necessária a proposição de uma ferramenta que direcione este processo.

Ainda que se tenha uma quantidade enorme de problemas que envolvem o transporte ferroviário e que podem ser resolvidos a partir de uma abordagem utilizando métodos matemáticos de otimização, a literatura relacionada se mostrou um tanto quanto limitada até meados dos anos 90. A evolução dos aspectos relacionados à ferrovia, juntamente com a melhoria das condições tecnológicas possibilitaram um desenvolvimento nas soluções de problemas mais complexos ligados ao sistema ferroviário, passando também pela grande contribuição de métodos mais eficazes de solução de modelos matemáticos como, por exemplo, os algoritmos evolucionários.

2. Revisão da Literatura

O problema do *Timetabling* é um conceito definido por [Caprara et al., 2002] que visa determinar um cronograma periódico de trens de modo a atender as demandas e não sobrecarregar o sistema ferroviário. Tal problema às vezes também é definido como *Scheduling problem*.

[Caprara et al., 2002] propõe uma formulação teórica com a utilização de grafos para abordagem do problema *timetabling*. Esta formulação é usada para derivar um modelo de programação linear inteira que é relaxado utilizando metodologia Lagrangeana. O relaxamento é incorporado dentro de um algoritmo heurístico que faz uso extensivo da informação associada com os multiplicadores de Lagrange. O trabalho foi feito com uma empresa ferroviária italiana.

[Fischetti et al., 2009] propõe e analisa quatro diferentes métodos para melhorar a robustez de um dada solução de TTP (*Time Tabling Problem*). As abordagens combinam Programação Linear (LP) e Programação Estocástica/ Técnicas de otimização robusta. O trabalho faz uma análise da eficácia computacional e também aplicabilidade prática dos quatro métodos.

Em contraste com [Fischetti et al., 2009] (que apresenta modelo para caso acíclico), [Peeters e Kroon, 2001] apresenta uma formulação para *timetabling* cíclico. O modelo de otimização feito neste caso foi não linear inteiro misto e a função objetivo é proposta para minimizar o tempo de viagem dos passageiros. Uma contribuição importante de [Peeters e Kroon, 2001] é mostrar como aproximar a parte não linear do modelo, resultando em um modelo linear inteiro misto.

[Harbering et al., 2015] apresenta um trabalho utilizando uma abordagem mais associada ao clássico problema de minimizar o makespan em um *job shop scheduling problem*. Visando

aumentar a velocidade de resposta, definiu-se um limite inferior em relação ao valor objetivo do problema de programação de trens, o que que facilitou a solução em alguns casos especiais. Adicionalmente, comprova-se a complexidade pseudo-polinomial para uma definição mais geral do problema de *scheduling*.

[Singh et al., 2013] apresenta uma ferramenta de otimização desenvolvida para um grande multinacional de minério de ferro para gerenciar as operações de sua rede de abastecimento. A ferramenta produz planos para horizontes temporais desde algumas semanas até dois anos, ou seja, considera-se um horizonte de planejamento finito em que cada período deve ser convertido para um determinado número de dias (tipicamente uma semana). Minas são divididas em cinco regiões, quatro das quais são servidas pela frota de trens da localidade 1 e um pela frota da localidade 2. A principal variável de decisão é o número de trens a serem enviados de minas para portos durante cada período. Outras variáveis importantes são os níveis de estoque em minas e portos considerados na solução.

[Fischetti e Monaci, 2017] desenvolve uma abordagem simples baseada em Programação Linear Inteira (MILP), que utiliza uma heurística ad-hoc com pré-processamento nos níveis mais altos de um solver comercial de uso geral aplicado a uma formulação MILP padrão. Uma análise computacional em casos reais mostra que essa abordagem pode ser usada com sucesso para reescalonamento do trem em tempo real, pois é capaz de fornecer soluções quase ótimas dentro dos prazos muito ajustados impostos pelo ambiente em tempo real.

[Nachtigall e Voget, 1996] aborda o problema de seqüenciamento de trem em uma ferrovia coreana. Primeiro apresenta um modelo de programação inteira mista para o problema, enquanto várias restrições de operação devem ser satisfeitas, incluindo questões de equipagem e as restrições de alocação de manutenção. Nesse contexto, propõe um algoritmo genético híbrido como uma solução para o problema. O algoritmo proposto utiliza uma técnica de elitismo um pouco modificada, juntamente com dois procedimentos heurísticos relacionados ao modelo de programação inteira mista.

[Tormos et al., 2008] foca na aplicação de algoritmos evolutivos para resolver problemas reais muito complexos. Para este propósito, um Algoritmo Genético foi desenvolvido para resolver o Problema da Temporização de Trem. O problema de escalonamento ferroviário considerado no trabalho implica a otimização de trens em uma linha ferroviária que é ocupada (ou não) por outros trens com horários fixos. O cronograma para os novos trens é obtido com um Algoritmo Genético (GA) que inclui uma heurística para construir a população inicial.

No trabalho de [Salim e Cai, 1997], um algoritmo genético de desempenho aprimorado é proposto para resolver o problema do planejamento ferroviário. O problema em consideração envolve a movimentação de vários trens que transportam cargas minerais através de uma linha férrea de longo curso, com alguns trechos de linhas singelas e outros com linhas duplas. Restrições que refletem alguns requisitos práticos como reduzir os impactos ambientais do transporte de minerais, evitar que trens carregados percorram áreas povoadas durante determinados horários, devem ser atendidos.

3. Descrição do problema

No corredor Minas-Rio existem duas localidades principais: Arcos e Barra Mansa. Em Arcos acontece o carregamento, a formação dos trens carregados e também é o local onde chegam os trens vazios. O carregamento em si ocorre em um terminal de um cliente, a alguns quilômetros do pátio ferroviário de Arcos e a formação dos trens acontece no próprio pátio de Arcos. A outra localidade é Barra Mansa. Nesse pátio tem-se a chegada dos trens carregados e a saída de trens vazios. A descarga dos trens é realizada em três terminais de distintos, também a alguns quilômetros

do pátio de Barra Mansa. A Figura 1 é uma ilustração bastante simplificada do corredor, apenas para dar uma ideia geral de seu layout. As setas laranjas indicam circulação dos trens carregados e as verdes a circulação de trens vazios. Os pátios são os locais em que ocorrem as manobras e formação dos trens.



Figura 1: Diagrama simplificado da estrutura do corredor Minas-Rio.

O fluxo de minério entre Arcos e Barra Mansa segue uma dinâmica relativamente simples. De modo geral temos os seguintes passos: os vagões vazios chegam ao pátio de Arcos, manobram e são levados para terminal de carregamento. Em seguida, eles são carregados no terminal e retornam para o pátio de Arcos. Então forma-se um trem carregado neste pátio e o trem circula até Barra Mansa. Os vagões carregados chegam ao pátio de Barra mansa e são levados para um pátio intermediário entre Barra mansa e os terminais de descarga. Prosseguindo, os vagões são levados do pátio intermediário para os terminais de descarga, onde eles são descarregados e em seguida retornam para o pátio intermediário. Por fim, os vagões vazios retornam para o pátio de Barra mansa e forma-se um trem vazio. Este trem circula até Arcos, fechando o ciclo.

A operação do fluxo entre Arcos e Barra Mansa é direcionada pela programação diária de trens. Esta programação tem por objetivo definir o que de fato será realizado num horizonte de três dias (D até D+2) e é feita de maneira totalmente manual, após um repasse de como está o cenário no corredor. Em suma, são definidos quantos vagões serão carregados com cada produto, quantos vagões serão descarregados, quais trens serão formados em Arcos e Barra Mansa (suas composições) e que horas sairão.

Um detalhe importante para o fluxo entre Arcos e Barra mansa é que um dos maiores de seus gargalos é a quantidade de locomotivas. Isto é, o ciclo das locomotivas (tempo que se demora entre a saída de um local até o retorno para o mesmo local) deve ser o menor possível para garantir um bom desempenho da operação. Isso passa principalmente por um tempo de giro (tempo decorrido entre a chegada e saída de um local) pequeno nas pontas do trecho.

Portanto, pela necessidade de otimizar a utilização principalmente das locomotivas, a maneira como a programação é realizada atualmente se torna um grande risco por sua natureza extremamente manual, dependendo unicamente da capacidade analítica dos programadores do corredor.

4. Metodologia

A formulação do problema neste trabalho teve o foco principal nas operações realizadas em Arcos e Barra Mansa. O traslado entre estes dois pontos não teve grande importância dentro da formulação, pois não há grandes problemas de conflito de trens no fluxo. A seguir, detalhamos o modelo matemático proposto (Linear Inteiro Misto).

Função objetivo:

$$min \sum_{t} \sum_{k} i_{t,k} + (\Delta - \sum_{t} \sum_{p} \rho_{t,p}) \tag{1}$$

Sujeito à:

$$\Omega_{\xi}^{min}\ \psi_{t,\xi} \leq \sum_{p\ \in\ G_{\xi}} \sigma_{t,p,\xi} \leq \Omega_{\xi}^{max}\ \psi_{t,\xi} \qquad \forall t, \xi \tag{2}$$

$$\Omega_{\xi}^{min}\ \psi_{t,\xi} \leq \sum_{f\ \in\ G_{\xi}} a_{t,f,\xi} \leq \Omega_{\xi}^{max}\ \psi_{t,\xi} \qquad \forall t, \xi \tag{3}$$

$$\sum_{p} \sigma_{t,p,1} = 0 \qquad \forall t \in P \tag{4}$$

$$30 \cdot \eta_{t,2} \leq \sum_{p} \sum_{\xi} \lambda_{t,p,\xi} \leq \sum_{\tau\ \in\ H_2} \mu_{\tau} \cdot \eta_{t,2} \qquad \forall t \tag{5}$$

$$20 \cdot \eta_{t,4} \leq \sum_{f} \sum_{\xi} \beta_{t,f,\xi} \leq \sum_{\tau\ \in\ H_4} \mu_{\tau} \cdot \eta_{t,4} \qquad \forall t \tag{6}$$

$$\sum_{t''} l_{t',t'',p} \leq 1 \qquad \forall t', p \tag{7}$$

$$\sum_{t''} t'' \cdot l_{t',t'',p} \geq \theta_{t',p}\ A_p \qquad \forall t', p \tag{8}$$

$$j_{t',t'',p} \leq \theta_{t',p} \qquad \forall (t', t''), p \tag{9}$$

$$j_{t',t'',p} \leq N \cdot l_{t',t'',p} \qquad \forall (t', t''), p \tag{10}$$

$$e_{t,p} = e_{t-1,p} + g_{t-TTreg3,p} - x_{t,p} \qquad \forall t, p \tag{11}$$

$$i_{t,m,k} = i_{t-1,m,k} + y_{t-TT,m,k} - y_{t,m,\hat{k}} \qquad \forall t, m, k : \hat{k} = 3 - k \tag{12}$$

$$59 z_{t,\delta} \geq \sum_{p\ \in\ R_{\delta}} x_{t,p} \geq B_{\delta}^{min}\ z_{t,\delta} \qquad \forall t, \delta \tag{13}$$

$$\sum_{p} x_{t,p} \leq \sum_{\tau\ \in\ E} \mu_{\tau} \cdot \phi_{t,\tau,1} \qquad \forall t \tag{14}$$

$$\sum_{\tau\ \in\ F_k} \phi_{t,\tau,k} \leq 1 \qquad \forall t, k \tag{15}$$

$$z_{t,\delta} \leq \sum_{\tau\ \in\ E} \phi_{t,\tau,1} \qquad \forall t, \delta \tag{16}$$

$$y_{t,m,k} = \sum_{\tau\ \in\ F_k} \alpha_{\tau} \cdot \phi_{t,\tau,k} \qquad \forall t, m, k \in G \tag{17}$$

$$\nu_{t,k} = \sum_{\tau\ \in\ H_k} \alpha_{\tau} \cdot \eta_{t,k} \qquad \forall t, k \tag{18}$$

$$15 \cdot \nu_{t,3} \leq \sum_{p} g_{t,p} \leq \sum_{\tau\ \in\ H_3} \mu_{\tau} \cdot \eta_{t,3} \qquad \forall t \tag{19}$$

$$n_{t,k} \geq \eta_{t,k} \qquad \forall t, k \tag{20}$$

$$30 \cdot \eta_{t,1} \leq \sum_{f} \omega_{t,f} \leq \sum_{\tau\ \in\ H_1} \mu_{\tau} \cdot \eta_{t,1} \qquad \forall t \tag{21}$$

$$38 \cdot \kappa_{t,f} \geq \sum_{f} \gamma_{t,f} \geq O_{f}^{min}\ \kappa_{t,f} \qquad \forall t \tag{22}$$

$$\sum_{f} \gamma_{t,f} \leq \sum_{\tau\ \in\ D} \mu_{\tau} \cdot \phi_{t,\tau,2} \qquad \forall t \tag{23}$$

https://proceedings.science/p/106708?lang=pt-br

$$\kappa_{t,f} \leq \sum_{\tau \in D} \phi_{t,\tau,2} \qquad \forall t, f \tag{24}$$

$$\rho_{t,p} = L_p \cdot x_{t,p} \qquad \forall t, p \tag{25}$$

$$e, i, n, x, y, \gamma, \omega, \lambda, \nu, a, j, \sigma, \beta, \theta, g \in \mathbb{Z} \tag{26}$$

$$\rho \geq 0 \tag{27}$$

$$\kappa, l, \phi, \psi, z, \eta \in \{1, 0\} \tag{28}$$

A equação (1) minimiza a quantidade de locomotivas paradas em Arcos ou Barra Mansa. Há também uma punição relacionada ao volume. Δ representa a necessidade de transporte de carga e ρ representa o que de fato foi carregado. Ou seja, o resultado da subtração entre os dois será tão grande quanto menor for o realizado.

(2) estabelece os limites inferior e superior de quantidade de vagões que de fato estão entrando no terminal para efetuarem a descarga.

(3) estabelece os limites inferior e superior de quantidade de vagões que de fato estão saindo do terminal após terem concluído a descarga. As equações 2 e 3, juntas, indicam uma importante premissa do processo de descarga: a troca de lotes. Só é possível sair do terminal se houver vagões para entrar. Isso é delimitado pela variável binária $\psi_{t,\xi}$.

(4) estabelece os horários em que não é possível entrar no terminal de descarga $\xi = 1$. Tais horários são indicados pelo conjunto P.

(5) delimita a quantidade de vagões carregados que devem estar na reganga que vai para o pátio intermediário. Os conjuntos H_k contém os modelos de reganga para o local *k* e μ_τ a quantidade máxima do modelo τ.

(6) delimita a quantidade de vagões vazios que devem estar na reganga que vai para o pátio de Barra Mansa.

(7) e (8) só fazem sentido se avaliadas juntas. Elas indicam os vagões que entraram para o carregamento no instante *t'* só sairão em um tempo suficiente para que todos vagões sejam carregados. Isso é delimitado principalmente pela variável binária *l*. A_p indica a taxa (hora/vagão) de carregamento do produto *p*.

(9) indica que a quantidade de vagões que foram para o carregamento no instante *t'* deve ser maior ou igual ao que sairá no instante de tempo *t' + t"*, para toda dupla *(t',t")*.

(10) garante que para a dupla *(t',t")* = 0, não haverá vagões saindo do carregamento. No caso em que *(t',t")* = 1, o parâmetro *N* funciona como um valor máximo de *j*. *N* é um valor suficientemente grande.

(11) representa o balanço de vagões carregados aguardando tração no pátio de Arcos. TT_{reg3} indica o tempo de trânsito entre o terminal e o pátio de Arcos.

(12) representa o balanço de locomotivas utilizadas para a formação de trem nos locais *k*. $\hat{k}$ denota o local de destino da locomotiva.

(13) delimita a quantidade de vagões que se deve ter de cada grupo de produtos R_δ. O parâmetro B estabelece a quantidade mínima para o grupo δ.

(14) delimita a quantidade de vagões carregados que devem estar no trem que parte de Arcos. O conjunto E contém os modelos de trem que saem de Arcos e μ_τ a quantidade máxima do modelo τ.

(15) garante que para o instante de tempo t no local k, apenas um modelo τ será selecionado.

https://proceedings.science/p/106708?lang=pt-br

(16) garante que um grupo δ de produtos só seja alocado no trem caso seja possível formar um modelo de trem τ em Arcos.

(17) determina a quantidade de locomotivas que sairão no trem. F_k indica o conjunto de modelos de trem do local k. α_τ a quantidade de locomotivas do modelo τ.

(18) determina a quantidade de locomotivas que sairão nas regangas. H_k indica o conjunto de modelos de reganga do local k. α_τ a quantidade de locomotivas do modelo τ.

(19) delimita a quantidade de vagões carregados que devem estar na reganga que sai do terminal e vai para o pátio de Arcos. Neste caso, a quantida mínima depende da quantidade de locomotivas ν que sairá na reganga.

(20) garante que se não houver locomotivas de manobra em k, não é possível formar uma reganga.

(21) delimita a quantidade de vagões vazios que devem estar na reganga que sai do pátio e vai para o terminal de Arcos.

(22) delimita a quantidade de vagões que se deve ter de cada frota. O parâmetro O estabelece a quantidade mínima para a frota *f*.

(23) delimita a quantidade de vagões vazios que devem estar no trem que parte de Barra Mansa. O conjunto D contém os modelos de trem que saem de Barra Mansa e μ_τ a quantidade máxima do modelo τ.

(24) é análoga à (16) e garante que uma frota f só seja alocada no trem caso seja possível formar um modelo de trem τ em Barra Mansa.

(25) determina o volume de produtos que de fato saem em trem de Arcos.

Há muitas equações de balanço no modelo como a (11). A ideia geral destas equações é somar a quantidade do instante anterior (*t-1*) com o que está chegando no instante de tempo *t* e subtrair o que está saindo no instante *t*.

O modelo matemático formulado para o problema foi implementado utilizando a linguagem de programação do Matlab. A implementação se deu de maneira sequencial, utilizando da sintaxe do Matlab para que toda a lógica dada pela formulação matemática fosse respeitada.

Para resolução do modelo implementado, foi utilizada a função *ga* da *toolbox* de otimização do Matlab. O principal parâmetro desta função é o *fun* que aceita uma matriz de tamanho *pop* x *nvars* e retorna um vetor do mesmo tamanho que *pop* contendo os valores da função *fitness*.

Neste contexto, foi construído um código que se enquadrasse às especificicações do argumento *fun* da função ga. No código foi implementado, sequencialmente, o modelo matemático formulado. A ideia geral é a seguinte: 1- Lê-se as especificações do trem dadas pelo gene/trem do cromossomo/programação; 2- Verifica se é possível formar o trem especificado. Caso seja possível, forma o trem e registra informações do próximo gene do indivíduo (o próximo trem); 3- Se não for possível formar o trem, forma-se reganga sentido pátio com o intuito de completar com vagões que faltam para formar o trem; 4- Se não for possível formar reganga sentido pátio, forma-se sentido terminal já com vistas no que é necessário para a formação do trem.

Após decorrido todos os instantes de tempo, avalia-se a média de tempo em que as locomotivas ficaram paradas nos pátios. Esta média é comparada com a meta e tem-se uma dispersão. O volume total transportado também é calculado e a dispersão em relação à necessidade é registrada. Com esses dados, temos o que é modelado na função objetivo do problema (1). Dessa maneira, o *fitness* para o indivíduo (sequenciamento de trens) que está sendo avaliado pode ser calculado e então temos o argumento *fun* da função ga.

Representação dos indivíduos: No caso desta abordagem, os indivíduos representam a programação em um horizonte de tempo de três dias (D, D+1 e D+2). São 20 trens, os 10 primeiros

representam os trens que saem de Arcos e os 10 últimos os que saem de Barra Mansa. Cada trem (gene) da programação (indivíduo) é representado por um número de 0 a 3. O número possui 15 casas decimais. A parte inteira do número representa o modelo do trem (1, 2 ou 3) e as casas decimais determinam a quantidade de cada produto ou de cada frota na composição do trem. Para fazer a decodificação do número para a composição do trem, ou seja, do genótipo para o fenótipo, foi feito uma função. A função tem como argumentos o número e uma string especificando se o trem é carregado ou vazio.

A população: A população é uma matriz de dimensão 240 por 20, ou seja, a população é composta por 240 indivíduos. Esta matriz contém números reais entre 0 e 3 gerados aleatoriamente através da função *rand* do matlab. O tamanho da população foi definido após a realização de alguns testes e avaliando-se seus resultados.

Seleção: O método de seleção utilizado é o uniforme estocástico. Ele estabelece uma linha na qual cada pai corresponde a uma seção da linha de comprimento proporcional ao seu valor. O algoritmo se move ao longo da linha em passos de tamanho igual. Em cada passo, o algoritmo aloca um pai da seção em que ele está.

Recombinação: A função de cruzamento adotada cria um vetor binário aleatório e seleciona os genes em que o vetor é um 1 do primeiro pai e os genes em que o vetor é 0 do segundo pai e combina os genes para formar o filho.

Mutação: Foi utilizada a mutação uniforme. O algoritmo seleciona um gene de um indivíduo para mutação, onde cada gene tem uma taxa de probabilidade de ser mutado. O valor padrão da taxa é 0,01. Na segunda etapa, o algoritmo substitui cada gene selecionado por um número aleatório selecionado uniformemente do intervalo para esse gene.

Critério de parada: O critério de parada adotado para a ferramenta é o tempo computacional. A otimização é feita por no máximo 5 minutos.

A Figura 2 traz um diagrama com a ideia geral de funcionamento e principais componenetes da ferramenta que foi construída.

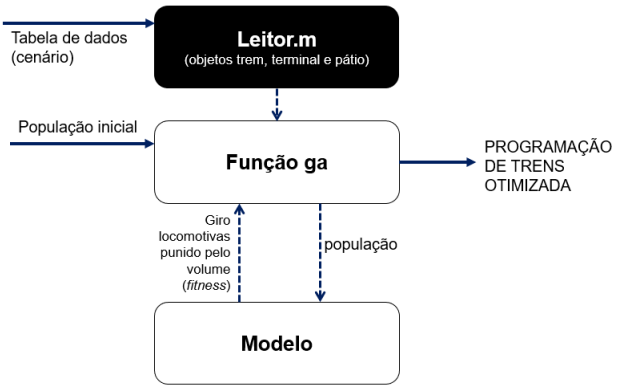

Figura 2: Diagrama da ferramenta computacional construída.

5. Resultados

Durante dois meses do ano de 2018, foi feito um acompanhamento dos resultados da ferramenta a fim de verificar a sua aderência à programação de trens que é realizada manualmente pelos programadores do corredor Minas Rio. Para quantificar tal comparação, adotou-se a seguinte métrica: a aderência à partida (horário de partida do trem) foi calculada com uma margem de duas horas, ou seja, se a diferença entre o resultado da ferramenta e a programação manual for menor ou

igual a duas horas, a aderência é de 100%. Caso a diferença seja de 3 horas, 75% de aderência e 0% nos outros casos. A aderência à formação foi calculada fazendo a divisão entre a quantidade total de vagões do trem dada pela ferramenta e a quantidade dada pela programação manual. Já o total é uma média ponderada entre as duas aderências supracitadas, com peso 6 para a partida e 4 para formação. A Tabela 1 traz os resultado da comparação.

Tabela 1: Comparação da programação da ferramenta com a programação manual.

Aderência da ferramenta à programação manual	
Partida	56%
Formação do trem	97%
TOTAL	74%

Para testar a robustez da ferramenta, foram realizados testes com três instâncias distintas. Pela natureza estocástica do algoritmo genético, cada instância foi executada 9 (nove) vezes e fez-se a média das saídas. Os resultados foram comparados ao que de fato foi realizado no período (histórico). A Tabela 2 mostra os resultados relativos para o volume transportado. Já a Tabela 3 tem os resultados relativos relacionados ao giro das locomotivas em Arcos e Barra Mansa.

Como se sabe o giro de locomotiva e volume realizado são as variáveis com impacto direto na função objetivo do modelo e por isso foram o foco principal dos testes para mensurar a qualidade da otimização.

Tabela 2: Resultado da ferramenta comparado ao realizado para três instâncias distintas - Volume.

	volume dado pela Ferramenta em relação ao Realizado						
Período	**Produto 1**	**Produto 2**	**Produto 3**	**Produto 4**	**Produto 5**	**Produto 6**	**TOTAL**
8/10 a 10/10	63%	78%	122%	inf	157%	inf	**110%**
16/10 a 18/10	77%	63%	79%	inf	95%	inf	**93%**
31/10 a 02/11	inf	134%	58%	inf	48%	inf	**83%**

Tabela 3: Resultado da ferramenta comparado ao realizado para três instâncias distintas - Giro locomotiva.

Diminuição no tempo de giro da locomotiva		
Período	**Arcos**	**Barra Mansa**
8/10 a 10/10	17%	8%
16/10 a 18/10	5%	47%
31/10 a 02/11	21%	32%

Com estes testes, foi possível comprovar a robustez da ferramenta, pois para as três instâncias foram obtidos bons resultados, principalmente em relação ao tempo de giro das locomotivas, com destaque para Barra Mansa no período de 16 a 18 de outubro de 2018, apresentando uma diminuição de 47% no tempo de giro.

5.1. Simulação com adição de ativos

Realizou-se testes adicionando vagões e locomotivas no corredor para avaliar se tais mudanças poderiam gerar indícios para otimização da operação. O resultado está na Tabela 4. Foram adicionadas 2 locomotivas em cada pátio no primeiro teste e 40 vagões vazios em Arcos no segundo teste.

Tabela 4: Resultados com adição de ativos (vagões e locomotivas).

Cenário	Giro locomotiva				Volume transportado	
	Arcos		Barra Mansa		TOTAL (t)	% do cenário modificado em relação ao original
	Giro (h)	% em relação ao original	Giro (h)	% em relação ao original		
CENÁRIO ORIGINAL	**8,3**	-	**3,3**	-	**17220,2**	-
Adição de 4 locomotivas	9,5	14%	6,7	102%	16790,5	98%
Adição de 40 vagões	7,8	-7%	3,4	3%	17331,4	101%

É possível observar que a adição de locomotivas no sistema não traz ganho. O tempo médio de giro aumentou no dois locais. Isso se deve ao fato de que as locomotivas adicionadas na verdade não foram utilizadas, aumentando o tempo paradas em Arcos e Barra mansa. Já a adição de vagões, diminuiu em 7% o giro da locomotiva em Arcos e aumentou em 1% o volume transportado.

5.2. Influência do tamanho da população no desempenho do GA

Para avaliar a influência do tamanho na população no desempenho do algoritmo genético, realizou-se testes para 7 tamanhos de população diferentes: 100, 140, 180, 200, 220, 240 e 260 indivíduos. A Tabela 5 traz a relação da quantidade de gerações concebidas, o *fitness* médio da última geração e o *fitness* do melhor indivíduo na última geração para cada tamanho de população.

A Figura 3 contém, por exemplo, o gráfico da evolução do algoritmo genético para uma população de 240 indivíduos. O eixo x do gráfico representa em qual geração o algoritmo está e o eixo y o valor do *fitness*. Foram plotadas as curvas do melhor indivíduo e o *fitness* médio de cara geração. O ponto que representa o melhor indivíduo da última geração está destacado no gráfico.

Tabela 5: Resultado dos testes de variação do tamanho da população.

Tamanho população	Quantidade de gerações concebidas	Fitness médio - última geração	Fitness do melhor indivíduo - última geração
100	80	20,49	12,92
140	78	18,01	12,01
180	60	15,99	11,57
200	49	15,95	11,08
220	51	16,10	11,11
240	45	15,26	10,73
260	39	15,42	10,30

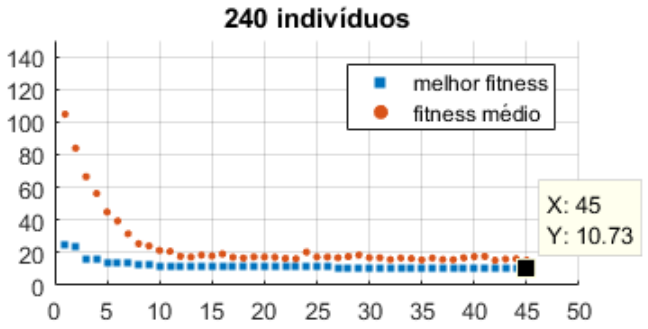

Figura 3: Evolução do algoritmo genético para a população de 240 indivíduos.

Todos os testes realizados foram feitos utilizando-se um notebook com processador Intel(R) Core(TM) i5-7200 CPU 2.5Ghz - 2.71Ghz com 8GB de memória RAM.

6. Considerações finais e proposta de continuidade

Neste trabalho foi desenvolvida uma ferramenta computacional para auxiliar na tomada de decisão de curto prazo da operação do corredor Minas-Rio da VLI. Para isso, foi proposto um modelo matemático linear inteiro misto que modela toda a dinâmica operacional. Para resolver o modelo, utilizou-se um algoritmo genético, obtendo bons resultados.

A formulação do problema teve uma preocupação principal em descrever minuciosamente as atividades nos pátios e terminais de Arcos e Barra Mansa por serem os pontos mais críticos do fluxo. Pelo fato deste grande nível de detalhe, foi possível perceber que seria bastante custosa a utilização de um método exato para solucionar o problema, afinal são 24 variáveis inteiras e 6 binárias distribuídas em 33 restrições, constituindo um problema de MILP (*Mixed Integer Linear Programming*).

Para a seleção do método de resolução do problema, o requisito foi um algoritmo robusto e com tempo de resposta relativamente baixo, por isso selecionou-se um algoritmo genético. Neste ponto, a definição da representação dos indivíduos como um vetor de números reais entre 0 e 3 foi uma decisão que se mostrou bastante eficiente considerando a complexidade das informações contidas nos genes do cromossomo (indivíduo). Esta representação deu simplicidade e agilidade ao algoritmo.

Finalmente, os testes realizados utilizando o algoritmo implementado possibilitam algumas considerações importantes. Foi comprovada a eficiência da ferramenta, pois na média, os resultados expõem uma melhoria no tempo de giro das locomotivas de 14,3% e 25% para Arcos e Barra Mansa, respectivamente. Os testes também trazem uma possibilidade de interpretação mais estratégica. A adição de ativos, por exemplo, provavelmente não trará grandes ganhos ao corredor. A melhoria das premissas da operação (maior eficiência operacional) supostamente trazem ganhos maiores. Concluiu-se também que o tamanho da população é um fator importante para o algoritmo. Para populações maiores, é possível chegar a resultados melhores. Isso pode ser explicado pelo fato de se ter um número maior de diferentes indivíduos quando tem-se uma população grande, permitindo uma maior exploração do espaço de busca.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi possível observar algumas oportunidades de melhoria ou de trabalhos futuros, as quais estão citadas a seguir: Resolução do modelo matemático utilizando um método exato para que se possa verificar a qualidade das soluções dadas atualmente; Implementação de uma heurística para criação da população inicial do GA, direcionada pelo cenário; Algoritmo híbrido, utilizando algoritmo genético para solucionar as restrições mais complexas/importantes e método exato para as mais simples; Formulação de uma função objetivo (linear) que priorize a resolução dos primeiros 24 instantes de tempo, gerando resultados melhores para a programação de D.

7. Agradecimentos

Ao professor Ricardo Saraiva e ao meu supervisor Lucas Sirimarco pelo apoio, atenção, disponibilidade e pela troca de conhecimentos durante o projeto. À Fernanda, pela imensa colaboração no desenvolvimento do projeto. À VLI, pela oportunidade. Aos colegas da VLI, pela amizade e pelos ensinamentos.

Referências

Caprara, A., Fischetti, M., e Toth, P. (2002). Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations research*, 50(5):851–861.

D'Ariano, A. (2010). *Improving real-time train dispatching performance: Optimization models and algorithms for re-timing, re-ordering and local re-routing*. PhD thesis, Springer.

Fischetti, M. e Monaci, M. (2017). Using a general-purpose mixed-integer linear programming solver for the practical solution of real-time train rescheduling. *European Journal of Operational Research*, 263(1):258–264.

Fischetti, M., Salvagnin, D., e Zanette, A. (2009). Fast approaches to improve the robustness of a railway timetable. *Transportation Science*, 43(3):321–335.

Harbering, J., Ranade, A., Schmidt, M., e Sinnen, O. (2015). Single track train scheduling. *Planning a Public Transportation System with a View Towards Passengers' Convenience*, p. 151.

Nachtigall, K. e Voget, S. (1996). A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization. *Computers & Operations Research*, 23(5):453–463.

Peeters, L. e Kroon, L. (2001). A cycle based optimization model for the cyclic railway timetabling problem. In *Computer-aided scheduling of public transport*, p. 275–296. Springer.

Salim, V. e Cai, X. (1997). A genetic algorithm for railway scheduling with environmental considerations. *Environmental modelling & software*, 12(4):301–309.

Singh, G., García-Flores, R., Ernst, A., Welgama, P., Zhang, M., e Munday, K. (2013). Medium-term rail scheduling for an iron ore mining company. *Interfaces*, 44(2):222–240.

Tormos, P., Lova, A., Barber, F., Ingolotti, L., Abril, M., e Salido, M. A. (2008). A genetic algorithm for railway scheduling problems. In *Metaheuristics for scheduling in industrial and manufacturing applications*, p. 255–276. Springer.

VLI (2017). Vli – integrando logística para criar valor. `http://www.vli-logistica.com.br/conheca-a-vli/quem-somos/`. Acesso em 10 de abr. de 2018.