

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE INFORMÁTICA
BACHARELADO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

WESLEY BERNARDO

**IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO INSPIRADO NO
COMPORTAMENTO DAS COLÔNIAS DE FORMIGAS PARA A
PROBLEMÁTICA DA CONDUÇÃO DE TRENS DE CARGA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PONTA GROSSA
2019**

WESLEY BERNARDO

**IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO INSPIRADO NO
COMPORTAMENTO DAS COLÔNIAS DE FORMIGAS PARA A
PROBLEMÁTICA DA CONDUÇÃO DE TRENS DE CARGA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação, do Departamento Acadêmico de Informática, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. André Pinz Borges

PONTA GROSSA

2019



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Câmpus Ponta Grossa
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Departamento Acadêmico de Informática
Bacharelado em Ciência da Computação



TERMO DE APROVAÇÃO

IMPLEMENTAÇÃO DO ALGORITMO INSPIRADO NO COMPORTAMENTO DAS COLÔNIAS DE FORMIGAS PARA A PROBLEMÁTICA DA CONDUÇÃO DE TRENS DE CARGA

Por

WESLEY BERNARDO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 13 de novembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Ciência da Computação. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. André Pinz Borges
Orientador(a)

Prof. Dr. Gleifer Vaz Alves
Membro titular

Prof. Dr. André Koscianski
Membro titular

Prof. MSc. Geraldo Ranthum
Responsável pelo Trabalho de Conclusão
de Curso

Prof(a). Dra. Mauren Louise Sguario
Coordenador do curso

Dedico este trabalho, primeiramente à Deus, pois é Dele que vêm toda a fonte de conhecimento e, principalmente amor, porque sem amor, de nada valeria todo o processo. Dedico também à todos que estiveram do meu lado, alguns mesmo distantes, conseguiram passar coragem, confiança e resiliência nas dificuldades e obstáculos que encontramos durante o percurso do curso e da vida.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes parágrafos não irão atender a todas as pessoas que fizeram parte dessa importante fase de minha vida. Portanto, desde já peço desculpas àquelas que não estão presentes entre essas palavras, mas elas podem estar certas que fazem parte do meu pensamento e de minha gratidão.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. André Pinz Borges, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, pela paciência e compreensão em estar sempre entendendo minha situação e buscando soluções de maneira inteligente. Mas principalmente, agradeço pelos conselhos e orientações que trouxeram crescimento e enriquecimento tanto profissional como pessoal.

Meus singelos agradecimentos a minha família e amigos, dos quais mesmo distantes estavam sempre próximos com palavras de conforto, alegria. Acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio. Não posso esquecer de minha parceira, e futura mulher, Lady Daiane pela força e companheirismo durante todo percurso.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

BERNARDO, Wesley. Implementação do Algoritmo inspirado no comportamento da colônia de formigas para a problemática da condução de trens de carga. 108 páginas. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

O algoritmo baseado no comportamento das colônias de formigas é uma meta-heurística que teve seu estopim na década de 1990 por Marco Dorigo. A ideia principal é fundamentada no comportamento de formigas reais e suas habilidades em encontrar o melhor caminho entre o seu ninho e o alimento. Esta habilidade baseia-se na exploração de trilhas de feromônios, que são substâncias químicas deixadas no caminho para o ninho toda vez que se encontra alimento. Devido a este comportamento cooperativo e eficiente de busca, elas constroem alternativas de melhores de caminho para encontrar o alimento. No cenário da condução de trens de carga, o percurso de uma viagem foi subdividido em fragmentos, para representação fracionária de toda viagem, nomeado como ponto de medida. Cada ponto de medida representa o momento de aplicação de um ponto de aceleração, onde um ponto de aceleração é representado como uma formiga artificial. Logo, foi desenvolvido a Otimização por Colônias de Formigas, a qual foi integrada em um ambiente computacional que simula a condução real de um trem de carga. Nesse sentido, foi possível construir um conjunto de pontos de aceleração e aplicá-los durante uma viagem, sem causar danos à via e ao trem, mostrando assim a aplicabilidade de um algoritmo computacional em um problema com características reais. A aplicação do conjunto de pontos de aceleração desenvolvidos com a otimização, resultou no índice de similaridade de 87% comparada à condução realizada pelo maquinista. Sobretudo, a otimização também resultou no menor consumo de combustível e de tempo gasto em todo percurso, comparado à condução de uma maquinista.

Palavras-chave: Otimização, Colônia de Formigas, Condução.

ABSTRACT

BERNARDO, Wesley. **Implementation of the ant colony-inspired algorithm for the problem of freight train driving.** 108 Pages. Course Conclusion Paper (Bachelor of Computer Science) - Federal Technological University - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

The behavior-based algorithm of ant colonies is a metaheuristic that had its trigger in the 1990 by Marco Dorigo. The main idea is based on the behavior of real ants and their ability to find the best path between their nest and food. This skill is based on exploring pheromone trails, which are chemicals left on the way to the nest each time food is found. Due to this cooperative and efficient search behavior, they build better path alternatives to find the food. In the scenario of freight train driving, the route of a trip was subdivided into fragments, for a fractional representation of the entire trip, named as the point of measurement. Each measurement point represents the moment of application of an acceleration point, where an acceleration point is represented as an artificial ant. Therefore, Ant Colony Optimization was developed, which was integrated in a computational environment that simulates the real driving of a freight train. In this sense, it was possible to construct a set of acceleration points and apply them during a trip, without causing damage to the track and the train, thus showing the applicability of a computational algorithm in a problem with real characteristics. The application of the set of acceleration points developed with the optimization resulted in a similarity index of 87% compared to the driving performed by the driver. Above all, optimization also resulted in lower fuel consumption and time spent on the entire journey compared to driving a driver.

Keywords: Optimization, Ant Colony, Driving

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Formação da trilha de feromônio na busca do alimento	36
Figura 2. Modelo de movimento das formigas artificiais	37
Figura 3. Grafo problema do caixeiro viajante	45
Figura 4. Definição do ponto de medida.....	52
Figura 5. Exemplo de um grafo com 4 pontos de medida	54
Figura 6. Estrutura inicial do grafo para a aplicação do ACO	55
Figura 7. Exemplificação da regra de transição em duas situações	56
Figura 8. Simulação da transição de uma PA	59
Figura 9. Grafo completo para a aplicação do ACO	60
Figura 10. Arquivo XML com informações do ponto e medida	63
Figura 11. Arquivo XML com as informações da locomotiva	64
Figura 12. Arquivo XML com informações do vagão	65
Figura 13. Diagrama de classe geral do ACO	66
Figura 14. Diagrama de atividades de condução com o ACO	67
Figura 15. Diagrama de atividades para estruturar o grafo	69
Figura 16. Método estruturaGrafo	71
Figura 17. Processo de criação do grafo com ACO	73
Figura 18. Diagrama de atividades do ACO	75
Figura 19. Método calcularProbabilidade	76
Figura 20. Método atualizacaoFeromonio	77
Figura 21. Caminho escolhido pelo ACO aplicado ao modal férreo.....	83
Figura 22. Caminho escolhido após reestruturação do grafo com RT- Maior Potência.....	85
Figura 23. Perfil vertical do trecho do experimento	89
Figura 24. Percentual de similaridade – por profundidade do grafo	92
Figura 25. Resultados de similaridade dos trabalhos de Borges (2015).....	93
Figura 26. Consumo de combustível- por nível de profundidade do grafo.....	94
Figura 27. Resultados de consumo de combustível do trabalho de Borges (2015)	94
Figura 28. Dados da condução de Enembreck (2009)	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Consumo de combustível pelo ponto de aceleração	23
Tabela 2. Características da locomotiva C-30 e do vagão padrão container ...	50
Tabela 3. Potência e consumo de combustível da locomotiva C-30.....	51
Tabela 4 Representação de um trecho com 6 pontos de medida da via férrea	52
Tabela 5. Regra de transição - Padrão	57
Tabela 6. Regra de transição - Menor potência.....	57
Tabela 7. Regra de transição – Maior Potência.....	58
Tabela 8. Relação entre o valor de discrepância e a regra de transição	72
Tabela 9. Cálculos realizado pelo ACO por nível escolhido	84
Tabela 10. Cálculos realizado pelo ACO por nivel escolhido – pós reestruturação	85
Tabela 11. Parâmetros de entrada aplicados aos experimentos com o ACO ..	91

PSEUDOCÓDIGOS

Pseudocódigo 1. MetaHeurísticaACO	42
Pseudocódigo 2. Procedimento exploratório do ACO.....	43
Pseudocódigo 3. Procedimento construir soluções com formigas	47

EQUAÇÕES

Equação 1. Resistência total	26
Equação 2. Resistência normal da locomotiva	27
Equação 3. Resistência normal do vagão	27
Equação 4. Resistência de curva da locomotiva	27
Equação 5. Resistência de curva do vagão	28
Equação 6. Resistência de inércia	28
Equação 7. Resistencia de rampa.....	28
Equação 8. Força resultante (esforço trator)	29
Equação 9. Velocidade final.....	29
Equação 10. Força de aceleração.....	30
Equação 11. Força tratora máxima	30
Equação 12. Equação geral da probabilidade do ACO	39
Equação 13. Controle da taxa de evaporação	40
Equação 14. Atualização do feromônio	41
Equação 15. Quantidade de feromônio depositado.....	41
Equação 16. Equação da variação de feromônio	48
Equação 17. Inverso consumo de combustível	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVO GERAL	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3	JUSTIFICATIVA	16
1.4	ESCOPO.....	17
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	MODAL FÉRREO	20
2.1	VIA FÉRREA.....	20
2.2	LOCOMOTIVA E VAGÃO	21
2.3	CARACTERÍSTICAS DA CONDUÇÃO FÉRREA.....	23
2.4	CICLO DE CONDUÇÃO.....	24
2.5	CÁLCULOS UTILIZADOS DURANTE A CONDUÇÃO	25
2.5.1	Resistência Normal E Acidental.....	26
2.5.2	Esforço Trator E Força De Aceleração	29
2.5.3	Patinagem E Derrapagem	30
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	32
3	OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	33
3.1	DEFINIÇÃO DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA.....	33
3.2	DEFINIÇÃO DE META-HEURÍSTICA	34
3.3	INSPIRAÇÃO E EXPERIMENTOS PARA CRIAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	35
3.4	CARACTERÍSTICAS DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS.....	38
3.5	ESTRUTURAÇÃO DO ANT SYSTEM.....	42
3.6	APLICAÇÕES DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	44
3.6.1	Problema Caixeiro Viajante	44
3.6.2	Estruturação Do PCV Para Aplicação Do ACO.....	45
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
4	REPRESENTAÇÃO E MODELAGEM DO MODAL FÉRREO PARA APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	50
4.1	DEFINIÇÃO DO MODELO DE LOCOMOTIVA E VAGÃO.....	50
4.2	CARACTERÍSTICAS DA VIA FÉRREA NA APLICAÇÃO DO ACO	51
4.3	ESTRUTURA DO GRAFO	53

4.3.1	Regra De Transição.....	55
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
5	DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO ACO NA PROBLEMÁTICA DA CONDUÇÃO NO MODAL FÉRREO.....	62
5.1	MÉTODO DE AQUISIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO PONTO DE MEDIDA, LOCOMOTIVA E VAGÃO	62
5.2	MODELAGEM DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS	65
5.3	PRINCIPAIS MÉTODOS DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS APLICADA AO MODAL FÉRREO	67
5.3.1	Implementação Do Estado - Estruturar Grafo	68
5.3.2	Métodos Do ACO Desenvolvidos Para O Modal Férreo	74
5.4	EXEMPLIFICAÇÃO DOS CÁLCULOS REALIZADOS PELO ACO AO MODAL FÉRREO	78
5.4.1	Cálculos Do ACO Ao Exemplo Do Modal Férreo	79
5.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
6	RESULTADOS.....	88
6.1	CENÁRIO DE TESTE.....	88
6.2	MODELAGEM DOS EXPERIMENTOS	90
6.3	RESULTADOS OBTIDOS	91
6.3.1	Análise Por Profundidade Do Grafo	92
6.3.2	Análise Por Parâmetros De Entrada Na Execução Do ACO	95
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97
7	CONCLUSÃO	98
7.1	TRABALHOS FUTUROS	100
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho é uma continuidade dos estudos desenvolvidos por Borges (2009) e Borges (2015), os quais visam o reaproveitamento de políticas de ações aplicadas ao modal férreo. O ambiente de condução férrea possui características dinâmicas, como mudanças nas ações a serem executadas devido às variações que ocorrem nos objetos que compõe este modal, como mudanças nas características dos veículos e da via férrea. Desse modo, definir políticas de ações aplicáveis à condução de trem de carga é uma tarefa complexa e exige experiência, principalmente, quando as variações no ambiente de condução aumentam (BORGES, 2015).

A proposta deste trabalho é auxiliar na continuidade do desenvolvimento de um sistema inteligente de condução assistida. Este sistema possui características de um programa de computador capaz de auxiliar na tomada de decisão junto ao maquinista. Nesse sentido, este sistema poderá auxiliar nas escolhas das políticas de ações, e no monitoramento durante toda condução.

Na condução de um trem de carga, o maquinista deve estar atento às inúmeras informações referentes à condução: dados da locomotiva, vagão e via férrea. Informações como velocidade, velocidade máxima permitida, potência, consumo, tempo de percurso, eficiência da frenagem e da tração dos motores, devem ser constantemente monitoradas. Assim, o maquinista deve tomar as políticas de ações visando à segurança e eficiência da locomotiva, relacionados às normas de condução e ao menor consumo de combustível, respectivamente (BORGES, 2015).

O consumo de combustível associado às viagens nas locomotivas do tipo diesel-elétrica é resultado da combinação de pontos de aceleração (componente análogo à uma marcha de veículo de passeio), aplicados durante toda a viagem. As decisões de cada ponto de aceleração são dependentes, de forma clássica, da experiência do maquinista, o qual pode realizar uma viagem rápida em detrimento do consumo, ou uma viagem lenta em detrimento do tempo (KAWAJIRI, 2009).

A aplicação de um ponto de aceleração depende dos conhecimentos do modal férreo. Com o uso das inúmeras informações deste cenário, são realizados cálculos de velocidade, aceleração, força de tração, percentual da rampa, coeficiente de atrito, dentre outros (KAWAJIRI, 2009; BORGES, 2015). Um dos principais cálculos realizados é o da resistência total, e da potência de cada ponto de aceleração. Ambos

colaboram para o levantamento do melhor ponto de aceleração, evitando a patinação da locomotiva. A patinação ocorre quando a força de tração, do ponto de aceleração escolhido, não foi suficiente para superar a resistência total (BORGES, 2015).

Como alternativa de solução ao sistema de condução assistida, foi implementado a Otimização por Colônia de Formigas (ACO, do inglês *Ant Colony Optimization*) que vem sendo estudado para resolver diversos problemas de otimização combinatória, os quais procuram encontrar o melhor caminho (ou solução) com o uso de grafos¹ (PEREIRA, 2010).

O ACO é uma meta-heurística com base populacional inspirada no comportamento coletivo das formigas. De acordo com Bonabeau, Dorigo e Theraulaz (1999), este algoritmo é um exemplo eficiente da inteligência coletiva, e tem sido aplicado, com sucesso para diversos problemas combinatórios, tais como, o Problema do Caixeiro Viajante, o Problema de Atribuição Quadrático, o Problema do Roteamento de Veículos, entre outros (CARVALHO, 2007; DORIGO, 1992; PEREIRA, 2010; RODRIGUES, 2008).

Este trabalho propõe o uso do algoritmo baseado no comportamento das colônias de formigas para resolver o problema do alto consumo de combustível durante a viagem no modal férreo, desenvolvendo políticas de ações, que correspondam a esta expectativa. A proposta de solução foi dividida em três etapas de desenvolvimento: no levantamento de informações do estado da locomotiva a cada trecho de uma viagem, estruturado computacionalmente em um grafo; na aplicação do ACO na busca do melhor ponto de aceleração neste grafo, e na validação dos pontos escolhidos com o uso de um simulador, desenvolvido nos estudos de Borges (2009).

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é implementar a Otimização por Colônia de Formigas (ACO) e aplicá-lo ao simulador de condução de trem de carga. As soluções geradas pelo ACO serão incorporadas no simulador que possui características de condução

¹¹ Na literatura é mencionado a estrutura grafo, no entanto este trabalho é modelado com o uso da estrutura árvore.

real, para o fim de validar o conjunto de pontos de aceleração desenvolvidos, e compará-los a condução de um maquinista.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho possui várias etapas para sua elaboração, portanto os objetivos específicos, segue abaixo as principais atividades para construção do ACO, os quais serão detalhadas nos capítulos posteriores:

- Levantar, na literatura, as regras, requisitos e responsabilidades aplicados durante a condução do modal férreo;
- Compreender o funcionamento e aplicação do ACO;
- Implementar o algoritmo ACO e integrá-lo ao programa de computador desenvolvido por Borges (2015) para ser aplicável no modal férreo;
- Executar simulações com cenários distintos;
- Analisar e comparar os resultados aplicados ao simulador desenvolvido na literatura.

1.3 JUSTIFICATIVA

As locomotivas possuem grande participação econômica no país, tanto no transporte de matéria-prima como mercadorias destinadas à exportação. A considerável capacidade de transporte de carga neste modal tem impacto direto na redução do número de veículos de transporte de outros modais, como o rodoviário. Esta redução pode resultar em menores impactos ambientais, dado a menor emissão de monóxido de carbono (*CO*) na atmosfera por quantidade de carga transportada. (REIS, 2015).

Segundo a E&E – Economia & Energia – (2018), a emissão de poluentes, como o Monóxido de Carbono (*CO*), utilizando combustíveis do tipo diesel e gasolina, chegaram a 2.947 e 3.150 Gg/1000tEP (Gigagrama/toneladas equivalentes à petróleo), no ano de 1999. Tal pesquisa foi realizada no Brasil nos transportes de carga e coletivo.

A pesquisa de Dos Santos (2018), descreve que as partículas destes gases tóxicos emitidos na atmosfera, representam risco direto ao meio ambiente e à saúde

humana. Nesta pesquisa, identificou-se que a poluição do ar é causa de 3% da mortalidade, por doenças cardiopulmonares, 5% da mortalidade por câncer de traqueia, brônquios e pulmão, e em 1% da mortalidade por infecções respiratórias em crianças menores de 5 anos em todo o mundo. Nesse sentido, medidas que possibilitem a diminuição destes poluentes, podem impactar conseqüentemente nas ocorrências desses índices de mortalidades relacionados aos gases poluentes.

Na literatura, o ACO abrange sua aplicabilidade em vários cenários (VITORINO, 2009). Tem-se demonstrado uma boa opção de solução para problemas combinatórios e com otimização, como principalmente, o problema do caixa viajante (CARVALHO, 2007; RODRIGUES, 2008; VITORINO, 2009).

O ACO será aplicado, primeiramente, para gerar um conjunto de pontos de aceleração aplicáveis no modal férreo. Tais pontos visam auxiliar nas políticas de ações aplicadas pelos maquinistas, como também a economia de combustível durante toda viagem. A economia de combustível impacta no orçamento financeiro oriundo do volume de combustível utilizado. Do mesmo modo, a economia de combustível pode influenciar nos impactos ambientais devido a emissão de poluentes, no entanto, estudos avançados devem ser considerados para comprovação, os quais não serão abordados neste trabalho.

1.4 ESCOPO

Este trabalho aborda o algoritmo inspirados no comportamento das colônias de formigas aplicada na problemática do modal férreo, nele foram encontradas algumas limitações durante a implementação, as quais podem ser destacadas:

- O trabalho considera apenas os componentes que participam da movimentação constante da locomotiva, nesse sentido, não foram tratadas as características e elementos que envolvem a frenagem do trem de carga, como o freio dinâmico e independente;
- Para obtenção das informações do modal férreo não foram utilizados sensores instalados na locomotiva, alimentando o computador de bordo. Todo processo de condução foi realizado num sistema de simulação, o qual obtém dados reais da locomotiva, vagão e via férrea, de registros de viagens passadas.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi dividido da seguinte maneira:

Capítulo 2 – Modal férreo

Neste capítulo são introduzidas as características principais que envolvem a condução no modal férreo. Nesse sentido, foram descritas as funções da locomotiva, vagão e via férrea. Por fim, são abordados os principais cálculos de movimentação do trem de carga, o quais são integrados ao sistema de simulação de condução.

Capítulo 3 – Otimização por colônia de formigas

Este capítulo apresenta a descrição da Otimização por colônia de formigas que será utilizada para obter as políticas de ações aplicadas ao modal férreo. Na literatura, foi abordado um exemplo de aplicação desta otimização, que busca soluções ao clássico problema do caixeiro viajante (LOPES, RODRIGUES, STEINER, 2013). A estrutura e modelo deste exemplo, será utilizado como molde para aplicação da problemática deste trabalho.

Capítulo 4 – Representação e modelagem do modal férreo para aplicação da otimização por colônia de formigas

Neste capítulo tem-se a adaptação da otimização ao modal férreo, nele foram apresentados os modelos para desenvolvimento da estrutura grafo. O grafo tem a função de representar a problemática, o qual será componente principal, em conjunto com as equações da otimização, para busca das políticas de ações.

Capítulo 5 – Desenvolvimento e aplicação do ACO na problemática da condução no modal férreo

O presente capítulo apresenta inicialmente os modelos e diagramas de aquisição das informações do modal férreo, e dos principais métodos construídos na implementação da otimização por colônia de formigas. Posteriormente, são detalhados o fluxo dos processos realizados para obtenção das soluções utilizando a otimização. Por fim, para melhor entendimento de todos os cálculos e processos é realizado um exemplo de condução, esboçando todos os cálculos e passos realizados.

Capítulo 6 - Resultados

Neste capítulo são descritos os experimentos da aplicação da otimização ao modal férreo, o qual promoveu ao trabalho a possibilidade de aprimoramento dos resultados baseando nas alterações dos tipos de parâmetros, e da estrutura grafo. Ambas características resultaram em melhorias na condução do trem de carga relacionando-se, principalmente, ao consumo de combustível.

Capítulo 7 – Conclusão

Neste capítulo são detalhadas as conclusões relacionadas aos experimentos realizados. Por fim, é feita a sugestão de trabalhos futuros os quais podem ser aplicados a otimização para busca de soluções.

2 MODAL FÉRREO

Considerada uma das maiores conquistas da Revolução Industrial depois da máquina a vapor, a estrada de ferro potencializou a modernização dos meios de transporte com a forte redução de custos em locomoção de mercadorias (DA SILVA, 2011). Os Estados Unidos entravam para era das ferrovias no mesmo ano da inauguração da primeira locomotiva, nomeada como “*Best Friend of Charleston*”, realizando o trajeto de Charleston para Hamburgo, na Georgia (DA SILVA, 2011). Em 1937, a Alemanha inaugurou sua locomotiva fabricada pela empresa de Stepheson, e conduzida pelo maquinista William Wilson (NETO, 2017).

No Brasil a primeira malha de férrea foi desenvolvida em meados de 1854, com uma extensão de 14 quilômetros ligando Rio de Janeiro e a Serra de Petrópolis, conhecida como estrada de ferro de Mauá. No início do século XX, já tinha cerca de 29.000 quilômetros de malha férrea distribuída nos estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais e Recife (NETO, 2017).

O modal férreo é compreendido resumidamente dos seguintes componentes, os quais são: via férrea, estações, locomotiva e vagão (BORGES, 2015). As características de cada elemento são essenciais para tomada de decisão de um maquinista, assim como o número de locomotivas e vagões, como o perfil (ou estado) da via férrea, durante a condução (OLIVEIRA, 2018).

2.1 VIA FÉRREA

A via férrea é o meio de condução onde o trem de carga se movimenta, a qual é composta, basicamente, de dois trilhos em paralelo espaçados por uma distância definida, nomeada como *bitola* (OLIVEIRA 2018; CARVALHO, 2019). Os trilhos, com o auxílio dos fixadores e da placa de apoio, são fixados aos dormentes que, por sua vez, transferem o peso do trem de carga ao lastro, que por fim absorve todo o peso da carga em conjunto com o sublastro (OLIVEIRA, 2018; CARVALHO, 2019).

Os trens se movem pelo encaixe de suas rodas nos trilhos, os quais possuem a função de guia-lo na via. O material comumente utilizado para a construção dos trilhos é o metal, pois ele possui propriedades que corresponde à necessidade da via,

que são: elasticidade, dureza, tenacidade e resistência à flexão (CARVALHO, 2019; OLIVEIRA, 2018).

Os dormentes são elementos superestruturais que possuem duas funções: manter o espaçamento dos trilhos, utilizando-se os componentes de fixação, e transmitir o peso do trem ao lastro e conseqüentemente, ao sublastro (CARVALHO, 2019; OLIVEIRA, 2018). Os materiais que podem utilizados na composição de um dormente são: madeira, concreto ou aço (CARVALHO, 2019). A madeira é comumente utilizada devido as suas vantagens como flexibilidade e elasticidade, favorável à sua funcionalidade (CARVALHO, 2019).

A bitola corresponde ao espaçamento entre os trilhos, e esta distância é definida pela largura do veículo que será rebocado na via. Os valores normalmente utilizados para as bitolas são: 1.0m, 1.435m e 1.6m. Este valor, também pode ser definido conforme as especificações de cada região, as quais são tomadas como conforme, o limite de velocidade e ao peso do veículo (vagão, carga e locomotiva) o que será rebocado na via. No Brasil bitolas de 1 metro são comumente utilizadas (OLIVEIRA, 2018; BRINA, 1982).

2.2 LOCOMOTIVA E VAGÃO

As locomotivas, em sua maioria, possuem o peso que pode variar entre 100 a 210 toneladas, com comprimento entre 16,7 e 22,5 metros (BORGES, 2009). Os motores são normalmente a diesel-elétrico, os quais possuem a potência que pode variar dentre 1500HP (*horse-power*) a 2600HP, em corrente contínua, e 6000HP, em corrente alternada (BORGES, 2015). Na locomotiva diesel-elétrica o mecanismo do motor primário (a diesel) aciona o motor elétrico, que por sua vez, transmite sua força aos motores de tração (BORGES, 2015; MIO DAL PAI, 2012).

De forma específica, nas locomotivas a diesel-elétrica aplica-se o modelo de transmissão de energia mecânica em energia elétrica, para o fim de transmitir todo potencial energético gerado aos motores de tração. A força de tração resultante traciona as rodas proporcionando a movimentação da locomotiva (MIO DAL PAI, 2012).

A quantidade de componentes no modal durante uma viagem depende da quantidade de carga a ser transportada. Estes componentes se identificam pela

quantidade de locomotivas e vagões utilizados, para o fim de obter o melhor desempenho dos motores de tração e do sistema de frenagem (OLIVEIRA, 2018).

Cada locomotiva possui um computador de bordo, capaz de ler o estado de diversos sensores durante a viagem. Com este processo é possível obter as informações como: velocidade, pressão dos freios, ponto de aceleração aplicado, uso ou não do freio dinâmico, entre outros (BORGES, 2015). Estas informações coletadas são utilizadas pelo maquinista para determinar as ações a serem executadas durante a viagem, de acordo com a situação da locomotiva (ROCHA, 2009).

Os vagões são veículos utilizados para o transporte de carga, e são normalmente estruturados em containers, que podem variar de 30 a 125 toneladas em seu peso. Cada vagão possui especificações que variam da especificação do peso limite ao esquema de distribuição do ar para frenagem do mesmo (BORGES, 2015).

2.3 CARACTERÍSTICAS DA CONDUÇÃO FÉRREA

A condução de um trem não é uma tarefa simples ou fácil, pelo fato que o conhecimento e habilidade para uma condução são diferentes daquelas observadas na condução de outros veículos, como carros e caminhões. A complexidade está relacionada aos procedimentos e percepções necessários ao maquinista, dos quais se referem às regras de condução na via, a aplicação de marchas, e ao sistema de frenagem escolhido para cada situação (BORGES, 2009).

A condução de um trem de carga é feita aplicando-se forças de aceleração ou frenagem, usando para isso, válvulas para mudanças de marchas, botões e alavancas para acionamento de freios, painéis de monitoramento do estado da locomotiva e computador de bordo para auxílio no *status* das linhas férreas (NETO, 2017). Na condução de um trem de carga são usadas praticamente duas ações: o acionamento dos freios e a aplicação de marchas, que são conhecidas como *pontos de aceleração* (BORGES, 2009). Cada ponto de aceleração gera uma força motora que, por consequência, consome uma determinada quantidade de combustível diferente em função do ponto escolhido. A Tabela 1 ilustra, por exemplo, a relação entre o ponto de aceleração e quantidade consumida de combustível de alguns modelos de locomotivas.

Tabela 1. Consumo de combustível pelo ponto de aceleração

Marcha/Consumo (L/h)	C30	C36	DASH8	DASH9	SD60
1	12,23	12,2	14,6	15,9	19,3
2	32,94	42,0	42,2	43,5	34,8
3	172,94	193,4	190,2	205,9	165,0
4	238,82	288,6	269,3	295,8	226,3
5	336,47	409,9	384,0	411,9	298,3
6	443,52	536,5	492,9	527,3	374,7
7	534,52	655,4	602,2	638,3	497,7
8	612,94	723,0	713,6	786,5	619,6

Fonte: Adaptada de MAXWELL (2019)

A execução de cada ponto de aceleração não é obrigatoriamente sequencial. A troca dos pontos depende de cada situação no decorrer da condução do trem de carga. No entanto, a literatura recomenda-se a transição de um ponto de aceleração para o outro de forma graduada (LEITE, 2009; BORGES, 2009). Os pontos de

aceleração possuem características particulares e dinâmicas, existe uma grande dificuldade em se definir uma política de aceleração que possa ser empregada, de forma eficaz, em cada trecho, durante um percurso de condução (BORGES, 2009).

A realização de uma boa viagem está relacionada aos procedimentos tomados, de modo a aproveitar da melhor forma possível, primeiramente a performance (suas características físicas, como peso, quantidade de vagões e locomotivas) do trem, com o intuito de facilitar as aplicações de ponto de aceleração e frenagem.

Em ambientes com aclives e declives, o maquinista pode aproveitar o peso do trem e a situação da via, para diminuir a aplicação dos freios. Do mesmo modo, o maquinista também pode mudar ponto de aceleração, dependendo de cada situação, visando aproveitar as características do trem, a fim de otimizar o esforço dos motores, possibilitando principalmente, a economia de combustível no percurso da viagem (HOWLETT, CHENG & PUDNEY, 1995; LEITE, 2009).

Além da experiência do condutor, outros fatores que influenciam diretamente no consumo de combustível durante a viagem são as paradas efetuadas durante condução no percurso (LEITE, 2009). Em média, 15% do combustível total consumido durante uma viagem são decorridos de paradas não previstas no planejamento, uma vez que os esforços de partida de uma locomotiva exigiram muito dos motores de arranque, ocorrendo conseqüentemente, o consumo maior de combustível (JURASKA & MAGYLA, 2004).

2.4 CICLO DE CONDUÇÃO

A tarefa de condução de um trem de carga é complexa devido à ampla possibilidade de aplicações de pontos de aceleração ou frenagem no decorrer de uma viagem. Esta atividade compreende um ciclo formado por concepção, atuação e retroalimentação (BORGES, 2009 Idem. 2015).

Para um condutor exigem-se competências que possibilitem aplicar e explorar tais características, considerando que a condução de um trem é empenhada por um ciclo formado por ações que compõem tais atividades (BORGES, 2015; LEITE, 2009). Este condutor deve possuir uma concepção e abstração de objetos que compõem o cenário no qual ele está inserido, selecionando uma ação desejada e adequada a condução, e por fim, aplicá-la. A solução criada é utilizada para aprimorar seu próprio

conhecimento e concepção do cenário, de forma geral é o condutor que realiza uma aplicação e utiliza seu próprio aprendizado como método de escolha de solução (LEITE, 2009).

Existem dois tipos de perspectiva de condução, separados em condução manual e condução assistida (BORGES, 2015).

A Condução manual é caracterizada pela tomada de decisão exclusiva do maquinista, neste contexto, o maquinista usa-se de equipamentos embarcados e de suas próprias percepções (LEITE, 2009). Já a condução assistida é caracterizada pelo uso de programas de computador que auxiliam a tomada de decisão do maquinista ou até mesmo o próprio programa conduzir um trem de forma automática (BORGES, 2015).

No ambiente deste trabalho, será utilizado o método de condução assistida, neste sentido, a percepção ocorre pela leitura de dados de sensores simulados. A leitura destas informações por si só é insuficiente para o sistema selecionar uma ação correta e aplicável. Para tal, são necessários cálculos matemáticos para obter a situação atual do trem.

2.5 CÁLCULOS UTILIZADOS DURANTE A CONDUÇÃO

Na condução assistida, um sistema de condução faz uso de cálculos do domínio para verificar situações, como excessos e desperdícios durante a condução. Na fase de cálculos, é usado um conjunto de dados, oriundos do estado atual do trem durante a condução, os quais podem resultar nas informações, das forças atuantes e do próximo estado da locomotiva, como: a força de tração dos motores, resistência dos trilhos, força de aceleração, força de aderência máxima, velocidade da locomotiva após aplicação da marcha, entre outras (JENNINGS, 1996).

O procedimento padrão para a movimentação de um trem é aplicar uma potência (oriunda de um ponto de aceleração) maior que a resistência total do trem. A aplicação deve obedecer às restrições e regras de condução, tais como a velocidade máxima permitida no trecho (BRINA, 1983).

2.5.1 Resistência Normal E Acidental

As equações de Davis, publicadas em 1926, mostram cálculos das resistências que um trem deve superar para movimentar de um ponto a outro na via férrea. A resistência de um trem, em quilograma por tonelada (Kg/t), consiste em um conjunto de forças contrárias ao movimento. A resistência está relacionada com a ação do contato das rodas sobre os trilhos, sendo uma força oposta ao esforço trator nas rodas da locomotiva (BORGES, 2009 Idem 2015; SANTOS, 2016). A Equação 1 representa a resistência total, a qual envolve os componentes e forças exercidas à locomotiva e ao vagão (BRINA, 1983).

Equação 1. Resistência total

$$R_{total} = n_l \times P_l \times (R'_{nl} + R'_{cl} + R'_y + R'_j) + n_v \times P_v \times (R'_{nv} + R'_{cv} + R'_y + R'_j)$$

Fonte: BRINA (1983)

Onde:

- R_{total} é a resistência total (em Kgf);
- n_l é o número de locomotivas;
- n_v é o número de vagões;
- P_v é o peso do vagão (em toneladas);
- P_l é o peso da locomotiva (em toneladas);
- R'_{nl} é a resistência normal da locomotiva (em Kgf);
- R'_{nv} é a resistência normal do vagão (em Kgf);
- R'_{cl} é a resistência de cursa da locomotiva (Kgf);
- R'_{cv} é a resistência de curva do vagão (Kgf);
- R'_y é a resistência de inércia (Kgf);
- R'_j é a resistência da rampa (em Kgf).

As resistências normais e acidentais são forças realizadas em diferentes componentes. A força normal está localizada no veículo, enquanto a força acidental ocorre de acordo com algumas circunstâncias específicas, como: ao iniciar o movimento do trem, durante a condução à curva, como também durante o trajeto em rampas (BORGES, 2015).

A resistência normal da locomotiva (R_{nl}) pode ser representada pela Equação 2 (BRINA, 1983).

Equação 2. Resistência normal da locomotiva

$$R_{nl} = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,03 \times V + \frac{0,0024 \times A \times V^2}{w \times n}$$

Fonte: BRINA (1983)

Onde:

- w é o peso por eixo da locomotiva em toneladas (*short-ton*);
- V é a velocidade (em milhas/hora);
- A é a área frontal da locomotiva (*square-feet*) e
- n é o numero de eixos da locomotiva.

A resistência normal do vagão (R_{nv}) pode ser demonstrada pela Equação 3 (BRINA, 1983).

Equação 3. Resistência normal do vagão

$$R_{nv} = 1,3 + \frac{29}{w} + 0,045 \times V + \frac{0,0024 \times A \times V^2}{w \times n}$$

Fonte: BRINA (1983)

Onde:

- w é o peso por eixo do vagão em toneladas (*short-ton*);
- V é a velocidade (em milhas/hora);
- A é a área frontal do vagão (*square-feet*) e
- n é o numero de eixos do vagão.

A resistência de curva da locomotiva (R_{cl}) é ilustrada na Equação 4 (BRINA, 1983), onde a variável p representa o tamanho da bitola (em metros).

Equação 4. Resistência de curva da locomotiva

$$R_{cl} = 0,2 + \frac{100}{R} \times (p + b + 3,8)$$

Fonte: BRINA (1983)

A resistência de curva do vagão (R_{cv}) pode ser representada pela Equação 5 (BRINA, 1983). Tanto da Equação 4, como na Equação 5, faz-se uso de R que representa o raio da curva (em metros) e b que representa o valor da base rígida, medida em metros (BORGES, 2015).

Equação 5. Resistência de curva do vagão

$$R_{cv} = \frac{500 \times b}{R}$$

Fonte: BRINA (1983)

A resistência de inércia é a força necessária para que ocorra a alteração da movimentação do trem de carga. Ela pode ser representada pela Equação 6 (BRINA, 1982).

Equação 6. Resistência de inércia

$$R_{\gamma} = 4 \times \frac{V_f^2 - V_i^2}{l}$$

Fonte: BRINA (1983)

Na Equação 6 têm-se os valores de V_f que representa a velocidade final e V_i que corresponde à velocidade inicial, e l corresponde ao deslocamento desejado (em metros).

Por fim, a Equação 7 representa o valor da resistência de rampa, onde i corresponde ao percentual de inclinação de um ponto específico da via.

Equação 7. Resistência de rampa

$$R_i = 10 \times i$$

Fonte: BRINA (1983)

Desse modo, para a solução da Equação 1, deverão ser utilizadas todas as equações relacionadas a resistências atuantes, durante a condução no modal férreo, mencionadas nessa seção.

2.5.2 Esforço Trator E Força De Aceleração

O esforço trator é a força necessária para movimentar o trem de carga, a unidade de medida resultante é o *kgf* (Kilograma-força). Pela Equação 8 pode ser realizado o calculo referente a este esforço, denominado força de tração (ou força tratora) F_t (BRINA, 1983).

Equação 8. Força resultante (esforço trator)

$$F_t = \frac{273,24 \times 0,82 \times HP}{V}$$

Fonte: BRINA (1983)

Na Equação 8 tem-se, V que representa a velocidade final da locomotiva, em *km/h* (quilometro por hora), e HP que corresponde ao valor da potência da locomotiva, em *horse power*, que resumidamente, é resultante da força dos motores à um ponto de aceleração aplicado (BRINA, 1983). Nesta mesma equação, tem-se também, as constantes cujos valores são de 273,24 e 0,82. A primeira, foi definida empiricamente, e a segunda, representa o valor de perda dos motores diesel e elétrico (BORGES, 2015).

A velocidade final, necessária para levantamento de informações para concretização da Equação 8, entre outros processos, pode ser calculada com o uso da Equação 9. Nesta equação tem-se vf que refere à velocidade final, vi é a velocidade inicial (ou atual), fa é a força de aceleração, pe é o peso do trem e dp é o deslocamento previsto (BORGES, 2009).

Equação 9. Velocidade final

$$vf = \sqrt{\left|vi + \frac{fa \times dp}{4 \times pe}\right|}$$

Fonte: BRINA (1983)

A força aplicada para aceleração do trem, denominada força de aceleração pode ser calculada pela diferença entre a força de tração máxima (F_{tn}) e o conjunto de resistência (R_{total}) (DE NASCIMENTO, 2012). Esta força de aceleração pode ser demonstrada e calculada com o uso da Equação 10 (BORGES, 2015).

Equação 10. Força de aceleração

$$F_{ac} = F_{tm} - R_{total}$$

Fonte: BRINA (1982)

O valor resultante da força de aceleração é essencial para o levantamento do ponto de aceleração ideal para aplicação à locomotiva (DE NASCIMENTO, 2012). Neste trabalho, este cálculo é realizado nos processos de validação de um ponto de aceleração. Por fim, a força tratora máxima (F_{tm}) será descrita na próxima seção, a qual descreve o sistema de frenagem utilizado nas locomotivas e vagões.

2.5.3 Patinagem E Derrapagem

Durante o deslocamento do trem de carga, podem ocorrer alguns fenômenos físicos relacionados ao movimento do veículo sobre os trilhos por uma ação errônea do condutor, os quais podem ser nomeados como patinagem e derrapagem (DE NASCIMENTO, 2012).

A patinagem ocorre quando a força de tração escolhida é maior que a força máxima de aderência suportada pelo contato das rodas aos trilhos (DO NASCIMENTO, 2012). Para evitar-se este problema, durante o deslocamento da locomotiva, deve-se definir o limite da força de tração, denominado força tratora máxima. Na Equação 11 têm-se os cálculos relacionados à definição deste limite, onde P corresponde ao peso da locomotiva, f à força tratora e V a velocidade atual.

Equação 11. Força tratora máxima

$$F_{tm} = \frac{P \times f}{1 + (0,01 \times V)}$$

Fonte: BRINA (1982)

Outra reação semelhante é a derrapagem, a qual ocorre durante a desaceleração do trem de carga, que pode ter causado pela aplicação excessiva da força de frenagem ou pela mudança nas condições de atrito da via (DO NASCIMENTO, 2012). A aplicação da frenagem possibilita ao maquinista o controle de velocidade da locomotiva, e seu manejo pode ser realizado de forma parcial ou

total, e podem ser realizados com a aplicação dos freios dinâmicos, automáticos e independentes (BORGES, 2015).

O freio dinâmico tem acionamento elétrico pela ação dos motores de tração, e pode ser definido, pelo processo de inversão de um ponto de aceleração, o qual resulta numa força contrária ao movimento do trem (BORGES, 2009). Recomenda-se sua aplicação, quando a locomotiva estiver numa velocidade dentre 20 a 30 *km/h*, e o tempo gasto para efetividade desta aplicação são em cerca de 10 minutos (BORGES, 2015).

O freio automático é realizado por compressão de ar, o qual é direcionado ao encanamento de freios, distribuído da locomotiva para os vagões (DO NASCIMENTO, 2012). A pressão distribuída nos vagões são direcionadas aos cilindros de freio, que por sua vez, realiza a pressão na sapata de freios sobre as rodas dos vagões (BORGES, 2009). Durante o processo de aplicação tem o prazo de vinte minutos para efetivação, dependendo da quantidade de vagões, nesse instante, deve-se atenção ao medidor de pressão denominado manômetro, para controle de pressão de ar no encanamento de freios (BORGES, 2015).

O freio independente é o freio a ar exclusivo à locomotiva, sua execução é realizada diretamente na sapata de freios nas rodas da locomotiva. Este freio responde mais rapidamente ao comando que os outros sistemas mencionados, e a velocidade recomendada para sua aplicação é menor que 10 *km/h* (CARIA, 2006; BORGES, 2009).

A complexidade de condução está relacionada aos vários cálculos e métodos necessários para a aplicação de uma ação durante a condução. Dada tal complexidade, a formação de um bom maquinista é necessária, este passo é desenvolvido na medida em que suas habilidades são treinadas durante o percurso da condução, sendo assim dependentes das experiências no ambiente de condução para o aprendizado (BORGES, 2009).

Com tantas operações durante a condução de um trem de carga, é exigida a alta perícia dos maquinistas para controle de todos os aspectos mencionados, tanto na execução de um ponto de aceleração, como a determinação de melhor método de frenagem a ser aplicado (CARIA, 2006).

Todas as tarefas e cálculos apresentados são exaustivos a um condutor iniciante, possuindo grande custo de tempo para aprendizado. Por isso, a disponibilidade de experiências na forma de um sistema baseado em conhecimento

se justifica, em particular, ao condutor, para funcionar como auxílio na tomada de decisão (CASSEMIRO & COSTA, 2015; BORGES, 2015).

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As características abordadas neste capítulo podem ser descritas em três módulos: descrição dos elementos físicos do ambiente (locomotiva, vagão, via férrea), regras de condução e cálculos de movimento do trem de carga. O primeiro módulo será representado num grafo, o segundo e o terceiro serão tratados dentro do ambiente de simulação, nomeado como Simulador, cujo desenvolvimento foi realizado no trabalho de Borges (2015).

3 OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

A Otimização por Colônia de Formigas (ACO, do inglês *Ant Colony Optimization*) é uma meta-heurística inspirada na observação do comportamento de formigas reais em busca de alimento para sua colônia (DORIGO, 1992). Esta meta-heurística foi introduzida por Marco Dorigo e colegas (DORIGO, 1992, Id.,1996; DORIGO & GAMBARDELLA, 1997), para o fim de resolver problemas combinatórios. Após sua criação, muitas variações foram elaboradas como os algoritmos *MAX-MIN Ant System* (MMAS), *Ant Colony System* (ACS), *BeamACO*, dentre outros (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Na primeira e segunda seção deste capítulo têm-se as definições e características de otimização combinatória e meta-heurística, os quais são conceitos essenciais para entendimento do ACO. Na terceira seção são descritos a origem, desenvolvimento e experimentos do ACO. Na quarta seção são abordadas as aplicações e exemplos da literatura utilizando esta otimização.

3.1 DEFINIÇÃO DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA

Os problemas de otimização combinatória têm o objetivo de maximizar ou minimizar uma função definida sobre certo domínio. Sua estrutura pode ser descrita por um conjunto $P = (S, \Omega, f)$, onde: S é o conjunto de soluções candidatas; Ω é um conjunto de restrições; e f é a função objetivo que associa um custo $f(s)$ a cada solução candidata $s \in S$ (CORMEN et al., 2009). O objetivo é encontrar os elementos de $s^* \in S$, que se enquadram nas restrições de Ω e possuam o menor custo dentre todos os elementos de S (VIANA, 1998; CORMEN et al., 2009; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Todavia, resolver problemas computacionais que envolvem otimização combinatória, como o Problema do Caixeiro Viajante, Ciclo Hamiltoniano e Roteamento de Veículos, corresponde à tarefa complexa. Problemas estes pertencem à classe NP-difícil, e sua solução por meio de métodos exatos são pouco efetivos em instância de dimensões elevadas (CORMEN et al., 2009; OLIVEIRA, 2010).

Desse modo, foi utilizado neste trabalho um método de otimização combinatória para solução da problemática da condução dos trens de carga. O emprego justifica-

se uma vez que a definição de um ponto de aceleração neste modal é um problema de escolha combinatória. Nesse sentido, o conjunto de soluções candidatas S pode ser representado como os possíveis pontos de aceleração aplicáveis a cada situação da via férrea. O conjunto de restrições Ω pode ser representado como as regras de condução do modal férreo e $f(s)$ o custo de combustível associado a cada ponto de aceleração escolhido.

3.2 DEFINIÇÃO DE META-HEURÍSTICA

Na literatura, são encontrados basicamente dois tipos de algoritmos: exatos e aproximados. Os algoritmos exatos garantem encontrar uma solução ótima para qualquer problema de otimização (PINHEIRO, et al., 2012, CORMEN et al., 2009). No entanto, levam um tempo computacional alto para encontrar uma solução, principalmente em instâncias elevadas. Os algoritmos aproximados, também conhecidos como heurísticas, possuem a característica principal de encontrar bons resultados, no entanto não garantem a produção de soluções ótimas (PINHEIRO, et al., 2012, CORMEN et al., 2009).

O nome Heurística (do grego, *heuriskein*) significa “descobrir”, que na computação, refere-se ao método baseado na experiência ou julgamento, que conduz a boas soluções, e garante a aproximação de soluções ótimas. Em paralelo, o termo meta-heurística deriva da composição de duas palavras: “heurística” cujo significado já foi mencionado, e o prefixo “meta” que significa “após” indicando um nível superior de representação e descoberta (CORMEN et al., 2009; RAYWARD-SMITH, et al., 1996).

Uma meta-heurística é uma estratégia de busca para um determinado problema que tenta explorar, de forma eficiente, todas as soluções viáveis dentro do espaço de busca. O processo de busca pode ser auxiliado por meio dos métodos heurísticos integrados ao conhecimento do problema (SOUZA, 2018). Na literatura foram apresentadas algumas das principais heurísticas, dentre elas o Algoritmo Genético (GA, do inglês, *Genetic Algorithm*), Busca Tabu (TS, do inglês *Tabu Search*), Pesquisa em Vizinhança Variável (VNS, do inglês *Variable Neighborhood Search*), Busca Local Iterativa (ILS, do inglês *Iterated Local Search*) e a Otimização por Colônia

de Formigas, que é um elemento principal deste trabalho, e será detalhado no tópico a seguir (CORMEN, et al., 2009; CHAVES, 2009; RAYWARD-SMITH, et al., 1996).

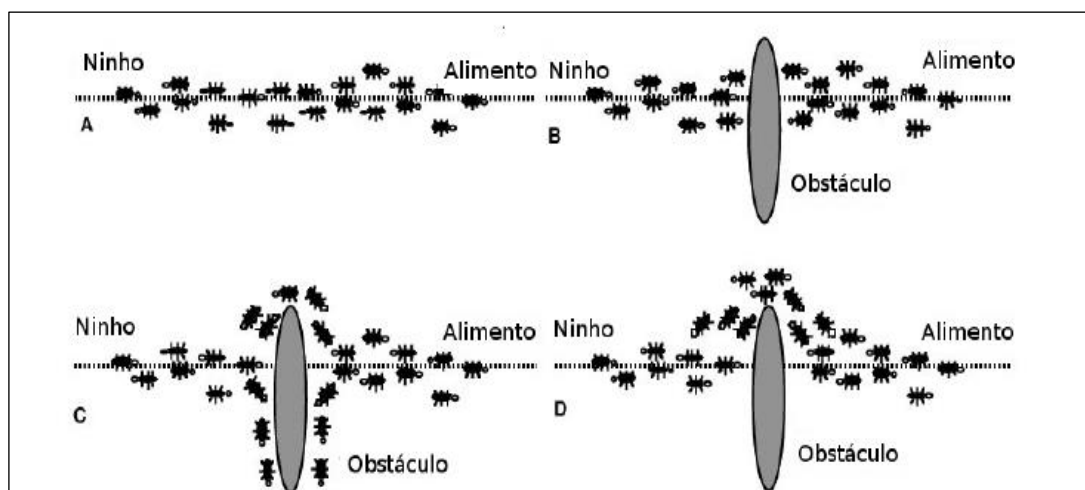
3.3 INSPIRAÇÃO E EXPERIMENTOS PARA CRIAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

O ACO é uma meta-heurística baseada no comportamento que as formigas possuem em encontrar o menor caminho entre sua colônia e sua fonte de alimento. Este fenômeno natural é realizado de forma organizada e cooperativa, que ocorre nos trilhos (caminhos) onde as formigas percorrem durante a busca do alimento. No decorrer deste processo, são deixados pelas formigas, rastros de feromônios que servem como referência para as outras formigas, e facilitador no rastreamento do alimento para toda a colônia (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; DORIGO, 1992; MANIEZZO; 1991; DORIGO et al., 1996).

A forma de comunicação das formigas é realizada quimicamente pelo contato entre suas antenas, mandíbula ou contato visual. Estas formas de comunicações são nomeadas como estigmergia (em inglês *stigmergy*) que significa o estímulo para o indivíduo aumentar sua interação e desempenho em alguma atividade (DORIGO e STÜZLE, 2004).

O processo ocorre da seguinte forma: quando se iniciam os trabalhos de busca por alimento, as formigas saem do ninho de forma aleatória, realizando buscas exploratórias por alimento. Encontrado o alimento, elas retornam ao ninho deixando um rastro de feromônios, enquanto outras formigas ainda estão buscando alimento. Assim, as formigas que saírem do ninho tomam a decisão de seguir o caminho, proporcional a quantidade de feromônios depositada anteriormente. Ao decidir seguir tal caminho, ocorre então um reforço do caminho com seu próprio feromônio (DORIGO, 1992), conforme Figura 1 referente a experimentos realizados da busca do alimento das formigas.

Figura 1. Formação da trilha de feromônio na busca do alimento



Fonte: LOPES, RODRIGUES E STEINER (2013)

É possível analisar que na primeira etapa (etapa A) as formigas seguem primeiramente um caminho aleatório na busca do seu alimento. Na segunda etapa, (etapa B) um obstáculo é colocado no caminho. Em C as formigas iniciam o desvio. Em D o caminho com maior frequência de formigas ocorre no caminho mais curto.

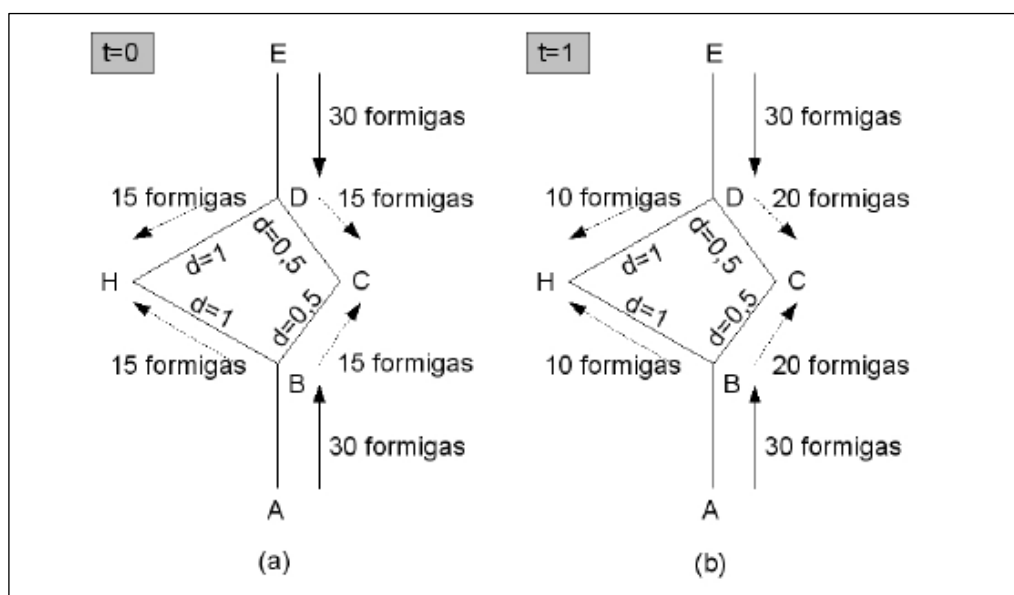
Na primeira etapa do experimento, a quantidade de formigas que seguem para um caminho mais longo ou mais curto é praticamente a mesma, pelo fato que no início do experimento a quantidade de feromônio são intimamente aproximados para cada caminho. No início do processo, as formigas escolhem os caminhos de forma aleatória. Porém, no decorrer do experimento, as formigas que optaram pelo caminho mais curto já estão voltando para o ninho, reforçando e aumentando a quantidade de feromônio em seu trajeto. Enquanto isso, as formigas que pegaram o caminho mais longo, ainda estão completando sua trajetória (DORIGO, 1992; DORIGO et al, 1996; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; COELHO & NETO, 2018).

É possível observar também que, após algum tempo, as formigas tendem ao caminho mais curto uma vez que este é o caminho que possui maior volume de feromônio. Quanto maior o volume de feromônio no trilho, maior é a possibilidade de encontrar o menor caminho entre o alimento e o ninho. Dessa forma, as formigas conseguem obter um bom (ou menor) caminho entre dois pontos (DORIGO, 1992; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013);

Com base nesta experiência, foi desenvolvido, um modelo representando as formigas artificiais, ilustrado na Figura 2 onde t , representa o tempo do sistema, d a distância do caminho, A e E são os pontos ou caminhos que as formigas devem atingir,

e por fim, H e C são os pontos intermediários, pelos quais as formigas podem escolher a fim de chegar ao seu destino (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Figura 2. Modelo de movimento das formigas artificiais



Fonte: LOPES, RODRIGUES E STEINER (2013)

De acordo com a Figura 2, em $t = 0$ tem-se a metade do número de formigas (15) que decidem ir do ponto B para o ponto C , e outra metade se direcionaram do ponto B para o ponto H , considerando que ainda não tenha feromônio no caminho. No tempo $t = 1$ considera-se a ocorrência do depósito de feromônios durante $t = 0$. Com isso, a quantidade de feromônio no caminho $B - H - D$ é menor que no caminho $B - C - D$ pois, neste caminho a distância é maior, assim as formigas demoraram mais tempo para percorrê-lo. Da mesma forma, neste mesmo caminho teve maior evaporação do feromônio. Com a menor concentração de feromônio nos pontos B , H e D , haverá uma menor tenência em seguir por este caminho, como é possível observar na figura, onde apenas 10 formigas escolheram este caminho.

Dessa forma, pôde ser analisado que o tempo, a taxa de evaporação do feromônio, e a concentração de feromônio em cada ponto, influenciam a escolha do caminho e são elementos essenciais para a objetivação do experimento (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

3.4 CARACTERÍSTICAS DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

Segundo Dorigo et al. (1996), a meta-heurística ACO possui três características elementares para seu funcionamento: (i) uso de algoritmo construtivo guloso, (ii) comportamento auto catalítico (com auto reforço) e (iii) computação distribuída.

Um Algoritmo Guloso (do inglês *Greedy Algorithm*) é responsável por gerar soluções a cada iteração baseando-se numa “função gulosa” (também chamada de heurística gulosa). Na função gulosa, o algoritmo seleciona as melhores soluções do momento, caracterizando assim a seleção de uma escolha local ótima, na esperança de que tal escolha o conduzirá a uma solução global ideal para o problema (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; CORMEN, et al., 2009).

O Algoritmo Guloso integrado ao ACO foi nomeado como “informação heurística”, e sua função gulosa foi desenvolvida utilizando a equação geral da probabilidade do ACO (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013). Assim, os algoritmos baseados na otimização por colônia de formigas constroem suas soluções baseando-se em duas componentes numéricas: o valor da função gulosa e a quantidade de feromônio depositado pelas formigas (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Alguns algoritmos foram desenvolvidos seguindo a ideologia do ACO, como o Ant Colony System (ACS), MAX-MIN Ant System (MMAS), dentre outros (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013). Para este trabalho foi selecionado o *Ant System* (AS) pela sua forma simples de construção em comparação aos outros algoritmos inspirados no ACO. Sua simplicidade dá-se na utilização da equação geral da probabilidade e nos cálculos de atualização do feromônio, os quais serão mencionados no decorrer deste capítulo.

A Equação 12 representa o principal elemento para a construção de um algoritmo guloso na aplicação do AS. Nesta equação, são descritas as informações probabilísticas referentes a cada possível solução (ou caminho) do problema. Com isso, cada solução candidata terá seu valor probabilístico próprio, este valor será utilizado nas próximas etapas nos processos de solução (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; DORIGO & STÜZLE, 2004, DORIGO et al., 1996; RIBEIRO 2010).

Equação 12. Equação geral da probabilidade do ACO

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha \times n_{ij}^\beta}{\sum_{u \in N_i^k(t)} \tau_{iu}^\alpha(t) \times n_{iu}^\beta(t)}, & \text{se } j \in N_i^k(t) \\ 0, & \text{se } j \notin N_i^k(t) \end{cases}$$

Fonte: RIBEIRO (2010)

Onde:

- t : é uma iteração;
- k : representa uma formiga;
- i : é o ponto origem;
- j : é o ponto destino;
- u : representa os pontos adjacentes ao ponto origem;
- p : é a probabilidade de uma formiga k partir de um ponto i ao ponto j ;
- α : representa a intensidade do feromônio;
- β : representa a intensidade da atratividade do problema;
- τ_{ij}^α : quantidade de feromônio depositado entre os pontos i e j ;
- n_{ij}^β : o inverso do consumo de combustível, entre os pontos i e j ;
- $\sum_{u \in N_i^k(t)} \tau_{iu}^\alpha(t) \times n_{iu}^\beta(t)$: o somatório da taxa de feromônio e do inverso do consumo de combustível, de todos os pontos adjacentes a i .

O método de escolha de uma formiga é definido pelos cálculos resultantes da Equação 12 (DORIGO et al., 1996; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; RIBEIRO 2010). Com o objetivo de evitar a possibilidade de repetição na escolha de apenas um caminho, as formigas se orientam em função do valor do feromônio. Desse modo, quanto maior quantidade de feromônio no ponto de escolha, maior será a probabilidade a convergência das formigas a este ponto (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; RIBEIRO, 2010).

Os principais componentes na Equação 12 são a influência do feromônio, no qual é depositado no caminho pela formiga, e a atratividade, que é definida de acordo com a modelagem do problema (RIBEIRO, 2010). Neste trabalho, a atratividade será representada pelo consumo de combustível gasto a cada possível caminho.

Os feromônios são elementos químicos gerados pelas formigas, quando elas encontram algum alimento. Eles são expelidos de forma controlada devido à reação eufórica das formigas em contato com o alimento encontrado. Neste sentido, a formiga retorna para sua colônia com o efeito dessa reação ativa, criando assim um rastro (ou trilha) de feromônios do alimento encontrado à sua colônia. A partir destas trilhas de feromônios, outras formigas também conseguem chegar ao alimento, caracterizando um trabalho cooperativo e eficiente das formigas, para encontrar seu alimento (DORIGO et al., 1996).

O desenvolvimento do ACO exige a execução do comportamento auto catalítico (auto corretivo), no qual corresponde ao comportamento que as formigas possuem de realizar o reforço (ou reaplicação) do feromônio no decorrer do caminho na busca do seu alimento (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; DORIGO et al., 1996).

Em conjunto com a Equação 12, será utilizado a Equação 13 para controlar o valor de variação do feromônio a cada iteração do algoritmo. Este processo é caracterizado pela ação de evaporação do feromônio, no qual evita que as formigas fiquem estacionadas em caminhos ótimos locais (RIBEIRO, 2010). Os caminhos ótimos locais são representados pela melhor solução local, que com isso, pode acarretar a soluções globais inviáveis (DORIGO et al., 1996; RIBEIRO, 2010). O processo de evaporação diminui a possibilidade das formigas escolherem caminhos que não foram visitados (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Na Equação 13 pode ser representada por uma constante de evaporação f_e , com $0 \leq f_e < 1$ (RIBEIRO, 2010).

Equação 13. Controle da taxa de evaporação

$$\tau_{ij}(t) \leftarrow (1 - \rho) \times \tau_{ij}(t)$$

Fonte: RIBEIRO (2010)

Onde:

- ρ : corresponde a taxa fixa de evaporação;
- $\tau_{ij}(t)$: é o valor atual da taxa de feromônio.

Na Equação 13 tem-se ρ que representa a taxa de evaporação do feromônio, o valor de inicialização sugerido é 0,1 (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013). Segundo Ribeiro (2010), quanto mais próximo o valor 1 está de ρ , mais acelerada é a

evaporação do feromônio. Portanto, quanto maior valor de $\tau_{ij}(t)$, maior será a influência em $p_{ij}^k(t)$, aumentando assim, a disparidade do valor da probabilidade de cada nó (ou vértice), a aleatoriedade na busca na exploração dos caminhos (DORIGO et al. 1996; RIBEIRO, 2010).

Quando a formiga escolhe um caminho a seguir, neste caminho é adicionado o valor resultante da Equação 14. Após a formiga passar por todos os pontos de medida, disponíveis, será realizada a aplicação da taxa de evaporação a todos os pontos, utilizando a Equação 13 (RIBEIRO, 2010).

Equação 14. Atualização do feromônio

$$\tau_{ij}(t + 1) = \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t)$$

Fonte: RIBEIRO (2010)

Onde:

- $\Delta\tau_{ij}(t)$: é a taxa de feromônio atual entre os pontos i e j .

Na Equação 14 tem-se $\Delta\tau_{ij}(t)$ que é representado na Equação 15, a qual calcula a quantidade de feromônio depositado por uma formiga k dentre os pontos i e j na iteração t (RIBEIRO, 2010).

Equação 15. Quantidade de feromônio depositado

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^{n_k} \Delta\tau_{ij}^k(t)$$

Fonte: RIBEIRO (2010)

Portanto, as equações citadas serão componentes de solução para o procedimento guloso, que terá a função de buscar os caminhos que proporciona maior atratividade relacionada com a quantidade de combustível consumo no caminho escolhido. O processo guloso será repetido até que satisfaça o número de iterações definida para o problema, o qual será demonstrada no capítulo de desenvolvimento.

3.5 ESTRUTURAÇÃO DO ANT SYSTEM

A estruturação do ACO descrita por Lopes, Rodrigues e Steiner (2013) foi dividida em três atividades principais: (i) construir soluções com formigas, (ii) aplicar a busca local e (iii) atualizar o valor de feromônio. Estes procedimentos podem ser representados resumidamente pelo Pseudocódigo 1, cada passo será discutido com profundidade no capítulo de aplicação do ACO ao modal férreo.

Nos Pseudocódigo 1 e Pseudocódigo 2, pela literatura, os parâmetros dos procedimentos não são demonstrados por considerá-los como variáveis globais (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; RIBEIRO, 2010). No capítulo de aplicação do ACO ao modal férreo, estes parâmetros foram demonstrados e adaptados conforme a estrutura desenvolvida, e nos componentes necessários para realização dos cálculos do ACO.

Pseudocódigo 1. MetaHeurísticaACO

```

1  PROCEDURE MetaHeurísticaACO()
2  IniciarParametros(); //valores iniciais: probabilidade e atratividade
3  IniciarValorFeromonio(); //em todos os caminhos
4  WHILE (não alcançou a condição de parada) do
5    ConstruirSolucoesComFormigas();
6    EvaporacaoFeromonio();
7    AplicarBuscaLocal();
8  END WHILE
9  END PROCEDURE

```

Fonte: Adaptada de LOPES, RODRIGUES E STEINER (2013)

Os métodos *IniciarParametros* e *IniciarValorFeromonio* estão relacionados à inicialização das variáveis relacionadas ao AS, os quais possuem a função de carregar o valor inicial do feromônio ($\Delta\tau$), probabilidade (ρ), e atratividade (n) a cada elemento correspondente ao problema (RIBEIRO, 2010). Neste processo inicial, pode ser desenvolvido também, o procedimento de criação das formigas, porém, no Pseudocódigo 1, este processo foi realizado em um passo anterior e externo ao exemplo demonstrado (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

O procedimento *ConstruirSolucoesComFormigas* será desenvolvido com a utilização da Equação 12 como requisito determinante na seleção de um caminho. Tal

procedimento pode ser comparado ao apresentado por Ribeiro (2010), o qual possui comportamento exploratório representado no Pseudocódigo 2.

Pseudocódigo 2. Procedimento exploratório do ACO

```

1  PROCEDIMENTO explorar()
2  WHILE (cada estado a ser visitado)
3      probabilidade ← calcProb();
4      //calcProb() conforme a Equação 12
5  END WHILE
6  WHILE (cada estado a ser visitado)
7      IF (probabilidade ≤ rand(estado)) THEN
8          //verifica probabilidade entre os vértices adjacentes
9          estadoSelecioneado = estado
10     END IF
11 END WHILE
12 AtualizacaoLocalFeromonio (estadoSelecioneado)
13 RETURN (estadoSelecioneado)
14 END PROCEDURE

```

Fonte: Adaptada de Ribeiro (2010)

No Pseudocódigo 2 têm-se a realização da busca exploratória das formigas. Neste procedimento é primeiramente calculado o valor de probabilidade em cada vértice (estado), adjacente conforme Equação 12, representado na linha 3. Após, é realizado a busca do vértice que possui o maior valor de probabilidade, e posteriormente retornando o estado (ou a formiga) de maior probabilidade (RIBEIRO, 2010).

O estado com maior probabilidade é então selecionado, e posteriormente executado o procedimento *AtualizacaoLocalFeromonio* para aplicação do reforço positivo ao estado de maior probabilidade, ou seja, ao estado melhor estado daquele respectivo ponto, ou nível da estrutura.

O procedimento *AtualizacaoLocalFeromonio* é desenvolvido seguindo as especificações da Equação 14, a qual é adiciona-se a taxa de feromônio, ao estado selecionado. A taxa de feromônio ($\Delta\tau_{ij}$) é normalmente calculada, aplicando-se o valor de uma constante, somado com a quantidade atual de feromônio, especificado na seção 3.4, deste capítulo. Portanto, o valor atual de feromônio no estado escolhido, também influência no resultado da aplicação da atualização local.

Após o procedimento de atualização local do feromônio é executado a evaporação do feromônio dado pelo procedimento *EvaporacaoFeromonio*. O procedimento de evaporação é construído baseado na definição da Equação 13, aplicada em todos os estados (ou vértices) do modelo de estrutura escolhida para o problema, normalmente o grafo (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

A condição de parada pode ser adaptada a cada tipo de problema e está relacionada ao alcance de solução almejada (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013). Neste trabalho foi selecionado um número definido de iterações, também indicado por Dorigo (1997). No próximo tópico, será apresentada a aplicação do ACO ao problema do caixeiro viajante, com isto, algumas adaptações foram necessárias para sua conclusão.

3.6 APLICAÇÕES DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

Na literatura pode ser encontrado várias aplicações do uso do algoritmo ACO em problemas de otimização combinatória, sendo alguns deles: no Problema do Caixeiro Viajante (PCV), no Problema de Cobertura de Conjunto (PCC), no Problema de Roteamento de Pacotes de Rede de Computadores, como também no Problema de roteirização de veículos (DORIGO et al., 1996; DORIGO & STÜZLE, 2004). Neste tópico será descrito o PCV para a exemplificação do ACO e posteriormente sua estruturação e implementação no modal férreo.

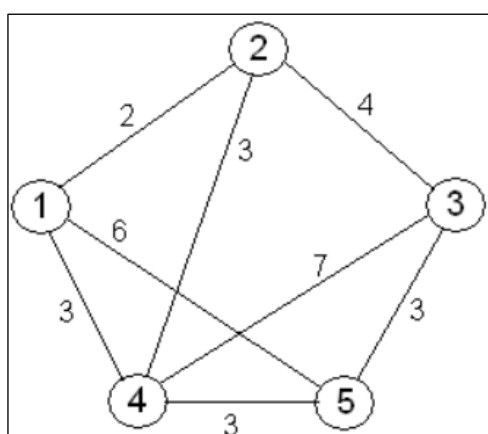
3.6.1 Problema Caixeiro Viajante

O Problema do Caixeiro Viajante (do inglês, *Traveling Salesman Problem*) pode ser descrito como um problema de um vendedor ambulante que necessita sair de sua cidade, e percorrer todas as cidades contidas em sua área geográfica. O objetivo deste ambulante é retornar para a cidade origem, de tal maneira que o custo total de toda viagem seja mínimo, e cada cidade seja visitada apenas uma vez (APPLEGATE, et al., 2006; CORMEN, et al., 2009; DA CUNHA, BONASSER & ABRAHÃO, 2002).

3.6.2 Estruturação Do PCV Para Aplicação Do ACO

O Problema do Caixeiro Viajante (PCV) pode ser estruturado com um grafo completo $G = (V, E)$, sendo V o conjunto de cidades (ou vértices) e E o conjunto de arestas que conectam estas cidades. A cada aresta (i, j) é atribuído o valor d_{ij} , que representa o inverso da distância entre as cidades i e j . Para ilustração, será utilizada a Figura 3 para representação dessa estrutura mencionada. (CORMEN et al., 2009; NILSSON, 1982; SANTOS, & LEAL, 2007).

Figura 3. Grafo problema do caixeiro viajante



Fonte: NILSSON (1982)

Em Dorigo & Stützle (2004) foi realizada a estruturação do ACO ao PCV obtendo como base o Pseudocódigo 1. Para cada passo de construção da solução do PCV uma formiga deve visitar cada vértice (ou cidade) adjacente passando por todas as cidades apenas uma vez, e por fim retornar ao vértice inicial.

Para este problema, a quantidade de feromônio depositado indica o índice de aceitabilidade de uma formiga visitar um vértice j , partindo de uma cidade i , trajeto definido como τ_{ij} . Em conjunto ao valor do feromônio, é considerada a “informação heurística” representada por n_{ij} que é inversamente proporcional à distância entre i e j . O cálculo de escolha é representado por $\tau_{ij}^{\alpha} \times n_{ij}^{\beta}$, sendo α e β os valores que indicam a importância do feromônio e da informação heurística (DORIGO & STÜZLE, 2004; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

O processo de solução junto ao ACO inicia-se com a definição do número de formigas a ser utilizado para a resolução do problema. Segundo Koide (2010) e

Becceneri (2008) o número de formigas deve ser escolhido com a análise restrita a cada tipo de problema. Na literatura, o PCV foi implementado utilizando o número de formigas correspondente ao número de cidades, distribuindo para cada cidade uma única formiga (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Cada formiga iniciará numa cidade e todas elas construirão sua solução através de seus passos de construção. Para cada passo, uma formiga seleciona uma cidade adjacente que ainda não foi visitada, e a escolha desta cidade, dependerá do valor da probabilidade de cada uma. A construção de solução termina quando todas as cidades adjacentes forem verificadas. O valor da probabilidade de cada formiga pode ser definida pela Equação 12 (DORIGO & STÜZLE, 2009; KOIDE, 2010; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013; BECCENERI, 2008).

A Equação 12, aplicada ao PCV, $N(i, s_k)$ representa o conjunto de cidades candidatas que podem ser selecionadas a partir da cidade i , com a solução parcial representada por s_k , solução tal, construída pela formiga k . A construção de s_k pode ser definida com a utilização de uma estrutura vetorial de tamanho n , correspondente ao número de cidades escolhidas. Assim, a partir dos critérios da Equação 12, pode ser construído um algoritmo de característica gulosa, no qual cada vértice conterà uma solução, que na aplicação do PCV, será representado como uma possível rota (DORIGO & STÜZLE, 2009; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Para a aplicação e construção do ACO ao PCV, utilizando juntamente a Equação 12, outros parâmetros podem ser representados:

- ρ : a taxa de evaporação;
- NI_{max} : o número máximo de iterações do algoritmo;
- τ_0 : o valor de feromônio para cada aresta na inicialização do algoritmo;
- m : o numero de formigas utilizado.

Segundo Lopes, Rodrigues e Steiner (2013) definir os valores para estes parâmetros é sempre um desafio na construção de um ACO. Na literatura foram sugeridos para a aplicação do PCV os seguintes valores: $m = n$, $\beta = 0.5$, $\alpha = 1$, $\rho = 0.5$, $NI_{max} = 5000$ e $\tau_0 = 0.05$ (DORIGO et. al., 1996; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Um dos procedimentos mais importantes na construção do ACO representado no Pseudocódigo 1, é o procedimento *ConstruirSolucoesComFormigas*. Este

procedimento realiza a tarefa de construções de solução para cada formiga, no PCV este procedimento foi construído e representado pelo o Pseudocódigo 3 (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Pseudocódigo 3. Procedimento construir soluções com formigas

```

1  PROCEDURE ConstruirSolucoesComFormigas()
2  FOR cada aresta  $(i, j)$  DO
3       $\tau_{ij} = \tau_0$ ; // inicialização do feromônio a cada caminho das formigas
4  END FOR
5   $S.probabilidade = 0$ ; //esvaziar todos os campos de probabilidade da matriz
6  FOR  $k = 1$  TO  $m$  DO
7      WHILE (Houver cidade que ainda não está em  $S_k$ ) DO
8          Selecione a cidade  $j$  com probabilidade  $p_{ij}^k$  da Equação 1;
9          Inserir  $j$  na solução  $S_k$ ;
10         Mover a formiga  $k$  para a cidade  $j$ ;
11     END WHILE
12 END FOR
13 FOR  $k = 1$  TO  $m$  DO
14     Mover a formiga  $k$  para a cidade  $S_k[1]$ ;
15     Calcular o custo  $L_k$  da rota obtida pela formiga  $k$ ;
16 END FOR
17 END PROCEDURE

```

Fonte: LOPES, RODRIGUES E STEINER (2013)

No Pseudocódigo 3 tem-se primeiramente, a inicialização do valor de feromônio τ_0 em cada formiga. Nos próximos passos do algoritmo, o índice j representa a cidade no qual é analisada, e k , representa o índice de movimentação de uma formiga. Na linha 12, p_{ij}^k representa os cálculos de probabilidade utilizando a Equação 12, aplicada a formiga k na movimentação de i para j , obtendo assim o valor de probabilidade para esta movimentação (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Na linha 13 do Pseudocódigo 3 apresenta o passo de inserção de uma cidade ao conjunto de rotas S_k . Na linha 14, realiza a movimentação para a próxima cidade, encerrando assim a iteração do laço (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

A linha 18 realiza o deslocamento do índice do caminho percorrido pela formiga ao ponto de origem, a fim de realizar a varredura da melhor rota partindo do ponto inicial. Este passo é realizado na linha 19, a qual verificará o custo total da rota

investigada, posteriormente este valor é comparado com as outras rotas analisadas, optando pela rota de menor custo (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

O procedimento *ConstruirSolucoesComFormigas* do Pseudocódigo 1 será aplicado a todas as cidades selecionando a melhor rota, da iteração do método *MetaHeuristicaACO* (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013). Logo após, é executado o reforço positivo ao vértice escolhido, aplicando-se o procedimento *AtualizacaoLocalFeromonio*, o qual foi desenvolvido na seção anterior, utilizando a Equação 14 e Equação 15 (DORIGO et al., 1996; DORIGO & STÜZLE, 2009; LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Pela Equação 15 é analisado o valor do feromônio de cada formiga, representado por $\Delta\tau_{ij}$. Em conjunto com a influência de $\Delta\tau_{ij}$ e o valor atual de τ_{ij} , tem-se o valor de $\Delta\tau_{ij}^k$, adaptado esta equação ao PCV, foi criada a Equação 16 (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Equação 16. Equação da variação de feromônio

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{L^k} & , \text{ se a aresta } (i, j) \text{ pertence a solução } S_k \\ 0 & , \text{ caso contrário} \end{cases}$$

Fonte: LOPES, RODRIGUES E STEINER (2013)

Na Equação 16, L^k representa a soma dos custos de todas as arestas que fazem parte do conjunto de solução da formiga k . O valor de custo pode ser escolhido segundo as características de cada problema. Por exemplo, seja um problema de uma distribuidora de alimentos que deseja entregar seus produtos no menor tempo possível, passando por todos os pontos de entrega. Este é um problema característico do PCV e o valor de custo, neste exemplo, é representado pelo tempo total gasto a cada ponto de distribuição (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

O procedimento *BuscaLocal*, do Pseudocódigo 1 não foi implementado nesta aplicação, no entanto, segundo a literatura, sua aplicação é bastante recomendada, segundo Lopes, Rodrigues e Steiner (2013). Por fim, a condição de parada do algoritmo é definida analisando a rota de cada formiga, quando todas (ou quase todas) as formigas estiverem passando pela mesma rota, o algoritmo deve ser finalizado, e selecionado a formiga de melhor custo total. Esta condição de parada caracteriza o

ponto de conversão que se deseja a um respectivo problema (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Otimização por Colônia de Formigas possui características de busca exploratória, baseada nos requisitos do problema, o qual é nomeado como função (ou método) heurística. Esta função é adaptada ao problema de condução do modal férreo, o qual visa o consumo de combustível, considerando as regras e critérios de condução.

Nos experimentos é notório o comportamento de aprendizado das formigas quando convergem, primeiramente, ao caminho errôneo, mas com os processos de evaporação e adição de feromônios, elas passam a percorrer o melhor caminho. O experimento proporcionou inspiração para o desenvolvimento de equações que possibilitam a similaridade deste comportamento.

A aplicação das equações do ACO integrada ao problema do caixeiro viajante, foi essencial para o entendimento, das variáveis participantes, e do comportamento do ACO dentro de um contexto de otimização combinatória. Nesse sentido, o próximo capítulo será baseado na integração do ACO ao modal férreo, baseando primeiramente no exemplo do caixeiro viajante, como também em outros, apontamentos encontrados na literatura.

4 REPRESENTAÇÃO E MODELAGEM DO MODAL FÉRREO PARA APLICAÇÃO DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

Neste capítulo está o desenvolvimento do ACO integrado aos requisitos e especificações que envolvem a condução dos trens de carga descritos no Capítulo 2. Dentro do desenvolvimento de solução são considerados e calculados cada elemento que envolve a condução da locomotiva e vagão, assim como sua atuação na via férrea. Neste sentido, o ACO foi desenvolvido para criar um conjunto de pontos de aceleração aplicáveis ao modal férreo, buscando mover um trem com o menor consumo de combustível durante todo um plano de viagem.

4.1 DEFINIÇÃO DO MODELO DE LOCOMOTIVA E VAGÃO

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado a locomotiva C-30 e um modelo padrão de vagão container. As características do modelo escolhido são oriundas do trabalho de Borges (2015), relacionado à geração de políticas de ações para a condução de trens de carga. Na Tabela 2 está a representação das características que correspondem ao modelo de locomotiva e vagão escolhido.

Tabela 2. Características da locomotiva C-30 e do vagão padrão container

CARACTERÍSTICA	LOCOMOTIVA C-30	VAGÃO CONTAINER
Comprimento	20 m	20 m
Base Rígida	2,4 m	Não se aplica
Peso	169,7t	99,46 t
Número de Eixos	6	4
Eficiência de frenagem	0,3	0,65
Atrito da sapata de freio na roda	0,358	0,358
Área do êmbolo do cilindro de freio	78,58 pol^2	78,58 pol^2
Área frontal	120 pés	120 pés
Aceleração da gravidade	9,8 m/s^2	9,8 m/s^2
Coeficiente de aderência	0,22	0,22
Bitola	1,6 m	1,6 m

Fonte: BORGES (2015)

Cada ponto de aceleração (PA) possui uma potência em cavalos vapor (HP) correspondente, e um consumo de combustível específico. Foram obtidos nos trabalhos de Borges (2015), as informações de consumo e potência que se aplicam

no modelo escolhido para este trabalho. Na Tabela 3, é apresentado o consumo e potência de cada marcha da locomotiva C-30 (BORGES, 2015).

Tabela 3. Potência e consumo de combustível da locomotiva C-30

PONTO DE ACELERAÇÃO	POTÊNCIA (CV)	CONSUMO (L/MIN)
Dinâmico	0	0,3168
Neutro	0	0,3168
1	100	0,5700
2	275	1,0668
3	575	1,9500
4	960	3,0330
5	1440	4,5330
6	1930	6,1830
7	2500	7,6998
8	2940	9,4002

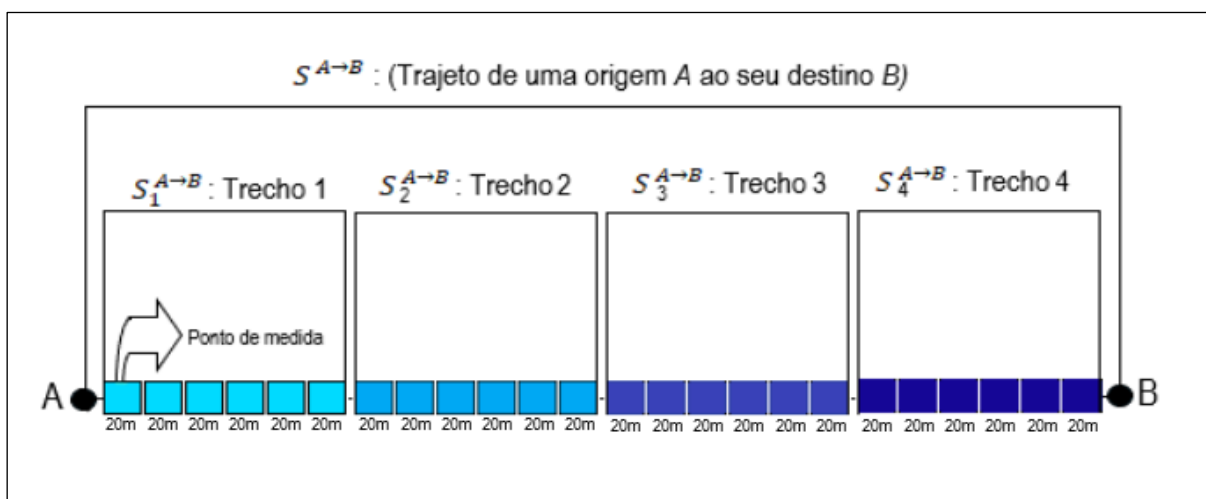
Fonte: BORGES (2015)

As informações apresentadas nas Tabela 2 e Tabela 3 foram utilizadas para a realização dos cálculos e verificações de regras que envolvem a condução do trem de carga. Dentre esses cálculos está a força de tração, que é a força necessária para fazer a locomotiva se mover, evitando a patinagem das rodas nos trilhos. A patinagem ocorre quando a força de tração do trem é maior que a força de tração máxima, processo detalhado no Capítulo 2. Pelas informações das tabelas foi possível calcular os principais componentes que envolvem a movimentação do trem de carga, como velocidade aceleração, tempo de deslocamento e o consumo de combustível a um ponto de aceleração escolhido.

4.2 CARACTERÍSTICAS DA VIA FÉRREA NA APLICAÇÃO DO ACO

Durante a condução da locomotiva, foi definido, neste trabalho, o momento em que uma política de ação deve ser tomada. O momento é baseado na segmentação do trajeto S de uma viagem, que parte da origem A ao destino B, representado por $S^{A \rightarrow B}$. O trajeto $S^{A \rightarrow B}$ foi dividido em trechos $S_x^{A \rightarrow B}$, onde x representa o trecho no qual o trem de carga se encontra no momento. Um trecho é descrito como um conjunto de pontos, nomeado como pontos de medida (pm) (BORGES, 2015).

Figura 4. Definição do ponto de medida



Fonte: Autoria Própria (2019)

Na Figura 5 o conjunto $S_1^{A \rightarrow B}$ possui 6 pontos de medida (pm), que também podem ser descrito como $S_1^{A \rightarrow B} = \{a, a + 1, a + 2, \dots, n\}$, onde, a possui valor igual à 1, e n é igual à 6. Cada pm será calculado de 20 em 20 metros, um pm pode ser representada como uma tupla $pm = \langle id, km, velMax, rampa, raioCurva, AC, g20, altitude, nroSb \rangle$, a qual refere-se as informações da via férrea (BORGES, 2015). A quantidade de pontos de medidas em cada trecho são variáveis, e nos experimentos serão exploradas o comportamento do ACO a cada tipo de variação do trecho, a representação das características de cada pm , podem ser demonstradas pela Tabela 4.

Tabela 4 Representação de um trecho com 6 pontos de medida da via férrea

ID	KM	VELMAX	RAMPA	RAIOCURVA	AC	G20	ALTITUDE
9	350	60	0,95	1150,5	25,48	0,99	526,10
10	350	60	0,95	1150,5	25,48	0,99	526,10
11	351	60	0,95	1150,5	25,48	0,99	526,10
12	351	60	0,95	1150,5	25,48	0,99	526,10
13	351	60	1,20	818,52	66,20	1,40	534,26
14	351	60	1,20	818,52	66,20	1,40	534,26

Legenda:

ID: Identificador do ponto de medida;

KM: Quilômetro de referência;

VELMAX: Velocidade máxima permitida (em km/h);

RAMPA: Inclinação da rampa (em %);

RAIOCURVA: Raio da Curva (em metros);

AC: Ângulo central da curva (em metros);

G20: Grau da curva para uma corda de 20m;

ALTITUDE: Altitude do ponto de medida (*em metros*).

Fonte: Adaptada de BORGES (2015)

Assim, a cada *pm* serão obtidas as informações da via férrea, da locomotiva e do vagão, para que seja estruturado o grafo e posteriormente, a inicialização do ACO.

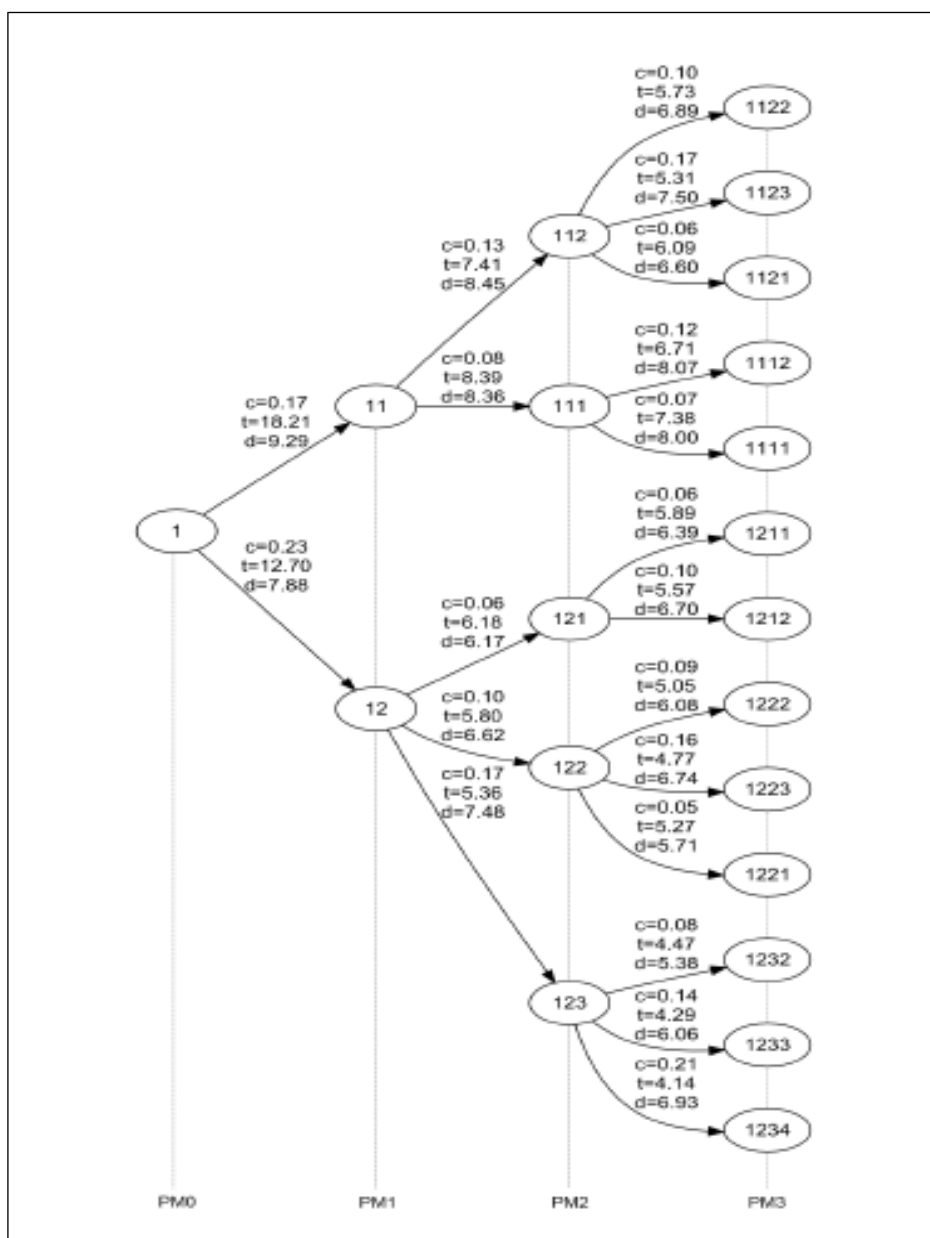
4.3 ESTRUTURA DO GRAFO

A estruturação do ACO no modal férreo será baseada no modelo de solução aplicado ao PCV, com algumas adequações. O problema da condução pode ser estruturado em um grafo $G(V, A)$, onde V representa o conjunto de vértices (formigas artificiais), e A representa o conjunto de arestas que ligam os vértices, que são representados pelos possíveis caminhos de uma formiga.

A construção do grafo será essencial para o deslocamento na busca de soluções com o ACO. Nele, cada vértice (formiga) carregará a informação do ponto de aceleração, e as arestas conterão as informações do consumo de velocidade, aceleração, consumo de combustível, distância percorrida e tempo gasto de um ponto específico a outro durante a viagem.

Os valores dos vértices e arestas foram selecionados baseando-se, no trabalho de Kawajiri (2009), com algumas adaptações, como a representação do vértice com valores do ponto de aceleração distribuído em cada ponto de medida. Os valores das arestas foram representados numa tupla com os valores de consumo de combustível (c), tempo gasto (t) no deslocamento de um ponto de medida, e a distância percorrida (d) (KAWAJIRI, 2009), o qual pode ser representado na Figura 5.

Figura 5. Exemplo de um grafo com 4 pontos de medida



Fonte: KAWAJIRI (2009)

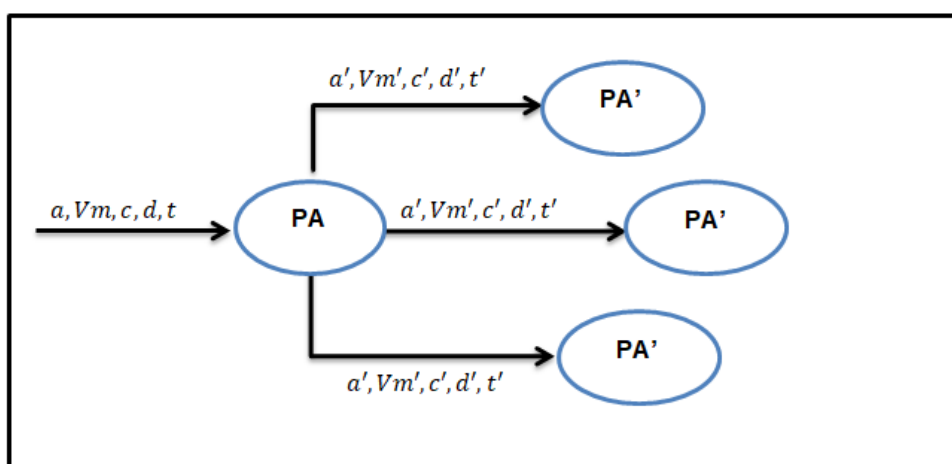
Na Figura 5, as arestas são desenvolvidas com os valores de c , t e d , que são representados, de forma semelhante neste trabalho, pois são componentes relacionados ao custo de movimentação da locomotiva a um respectivo ponto de aceleração (KAWAJIRI, 2009). Neste trabalho, a estrutura do grafo terá o acréscimo das informações da velocidade (v) e aceleração (a) da locomotiva.

A escolha dos componentes que representam o custo de movimentação foi realizada de acordo com os requisitos exigidos pelo Simulador para realização dos

cálculos de movimentação. Nesse sentido, cada aresta carregará as informações essenciais para os cálculos de movimentação descritos no Capítulo 2.

A Figura 6 segue o modelo inicial para representação do grafo, onde nas arestas, os valores c , d e t possuem a mesma característica apresentado na Figura 5, com o acréscimo das informações de a e Vm , que é a aceleração em m/s^2 , e a velocidade medida, em km/h . Por fim, nos vértices está o valor do PA , sendo os valores variando entre $[-1, 8]$.

Figura 6. Estrutura inicial do grafo para a aplicação do ACO



Fonte: Autoria própria (2018)

Este acréscimo de elementos no vértice facilitará na apresentação dos estados da locomotiva quando aplicado um ponto de aceleração, incluindo nos cálculos realizados pelo Simulador a cada nível do grafo. Como também, limitará a pontos de aceleração que restringem os limites de velocidade e aceleração definidos nas regras de condução a cada ponto de medida da via férrea.

Neste trabalho, o modelo que define a distribuição dos PA no grafo, será desenvolvido baseado na regra de transição, a qual será descrita na seção posterior.

4.3.1 Regra De Transição

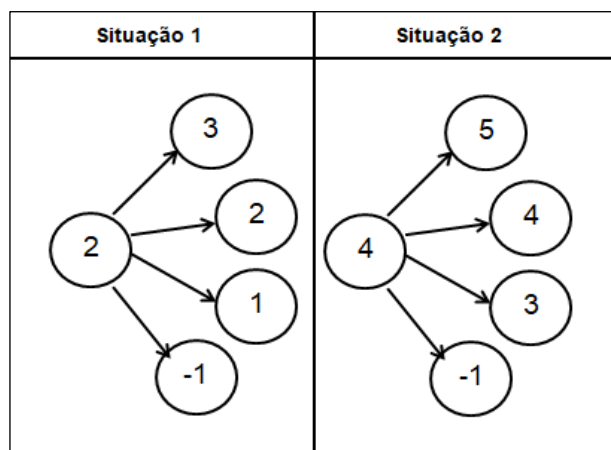
A regra de transição (RT) foi desenvolvida para que os PA s sejam aplicados gradualmente à locomotiva. Nos estudos de Leite (2009) foi observado que em ambientes de acentuação e declive, a aplicação graduada possibilitou a melhor economia de combustível. Nos estudos de Borges (2009) tal procedimento foi exemplificado na

aplicação dos freios dinâmicos durante o início de um longo aclave, o qual foi recomendado redução graduada dos pontos de aceleração para tal situação. Desse modo, foi definido neste trabalho o uso da regra de transição, para que os pontos de aceleração sejam aplicados de forma gradual em cada ponto de medida.

A *RT* representa a distribuição dos pontos de aceleração aceitáveis a cada ponto de medida. A *RT* restringe o limite de discrepância dentre os possíveis *PA* a cada ponto de medida. Esta discrepância foi definida entre os valores de $[+1,0 e -1]$. Assim, a *RT* irá escolher 4 pontos de aceleração, que representam os próximos *PA* aplicáveis ao *pm* atual, três *PA* oriundas do valor de discrepância, e um referente ao ponto de freio.

A Figura 7 mostra a aplicação da *RT*, a qual possui duas situações distintas para exemplificação. Estas situações representam cenários que uma locomotiva pode estar durante a condução: o ponto origem representa o ponto atual da locomotiva, e os pontos adjacentes, são os possíveis pontos de aceleração aplicados ao próximo ponto de medida. Para facilitação do entendimento da aplicação da *RT* será demonstrado apenas os valores dos *PA* no grafo da Figura 7.

Figura 7. Exemplificação da regra de transição em duas situações



Fonte: Autoria própria

Na Figura 7 é encontrado a situação 1 que demonstra uma locomotiva iniciando o *PA* igual 2. Com a aplicação da *RT* nesta situação são criados 3 vértices que se enquadram aos próximos *PA* aceitáveis: 1, 2 e 3. Além disso, é acrescentado em cada situação o ponto -1, que representa o freio dinâmico. Os novos vértices foram criados com a realização da aplicação da discrepância dos valores $[+1, 0, -1]$ ao *PA* atual. Na

situação 2, é realizado o mesmo processo, no entanto o ponto de aceleração inicial é o 4, assim são criados os vértices conforme a mesma discrepância da *RT*, resultando em *PA* igual à 5, 4 e 3, adicionado também o vértice com valor -1, representado o ponto do freio dinâmico.

A Tabela 5 representa a distribuição da *RT*, nomeada como regra de transição - padrão (ou *RT*), pois será a regra inicialmente utilizada para obter os *PA* aplicáveis a um ponto de medida.

Tabela 5. Regra de transição - Padrão

PA	PA(x)
Ponto de aceleração atual	$x + 1$
	x
	$x - 1$
	-1

Fonte: Autoria Própria

O simulador validará o *PA* escolhido e retornará dois tipos de respostas: ponto viável ou inviável para aplicação. Os pontos viáveis são posteriormente utilizados no decorrer da condução. No entanto, para os pontos inviáveis têm-se dois possíveis cenários: o resultado de falta de força ou da reação da patinagem, ao ponto de medida analisado.

A patinagem ocorre quando o ponto de aceleração escolhido gerou uma força de tração tal, que superou a força de tração máxima na via férrea, conforme descrito no Capítulo 2. Nesse sentido, será necessário escolher pontos de aceleração menores, comparado ao utilizado na *RT* padrão, com isso será utilizado a *RT – Menor potência*, representada pela Tabela 6.

Tabela 6. Regra de transição - Menor potência

PA	PA(x)
Ponto de aceleração atual	3
	2
	1
	-1

Fonte: Autoria Própria

Para a situação de falta de força (gerada por pouca potência), durante a simulação dos *PA* disponíveis, será necessária a escolha de pontos de aceleração

maiores, o qual resultará em valor de potência maior. Neste caso será utilizada a *RT-Maior Potência*.

Tabela 7. Regra de transição – Maior Potência

PA	PA(x)
Ponto de aceleração atual	8
	7
	6

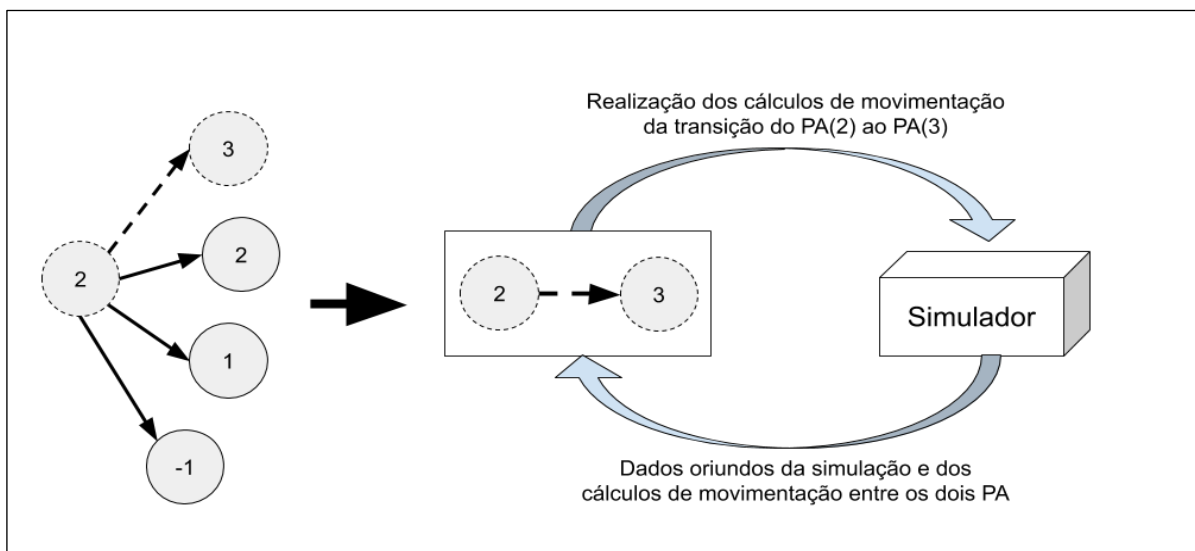
Fonte: Autoria Própria

A *RT* padrão (ou *RT*) será preferencialmente utilizada em todos os pontos do grafo. Desse modo, a aplicação das *RT – Menor Potência*, e *RT – Maior Potência* serão somente utilizadas conforme indicação do simulador.

Os 4 pontos de aceleração serão escolhidos pelas regras de transição conforme a Tabela 5. Após a obtenção dos PA obtidos pela *RT* é realizado os cálculos de movimentação da locomotiva, referente a cada transição do ponto de aceleração atual, aos pontos de aceleração escolhido pela *RT*. As informações obtidas nos cálculos de movimentação de cada transição serão integradas a cada aresta respectiva à cada transição do PA atual ao PA da *RT*.

Para exemplificação será utilizado a situação 1 da Figura 7, a qual será demonstrado o processo de simulação e a aquisição das informações referente à transição do PA, representado pela Figura 8.

Figura 8. Simulação da transição de uma PA



Legenda:

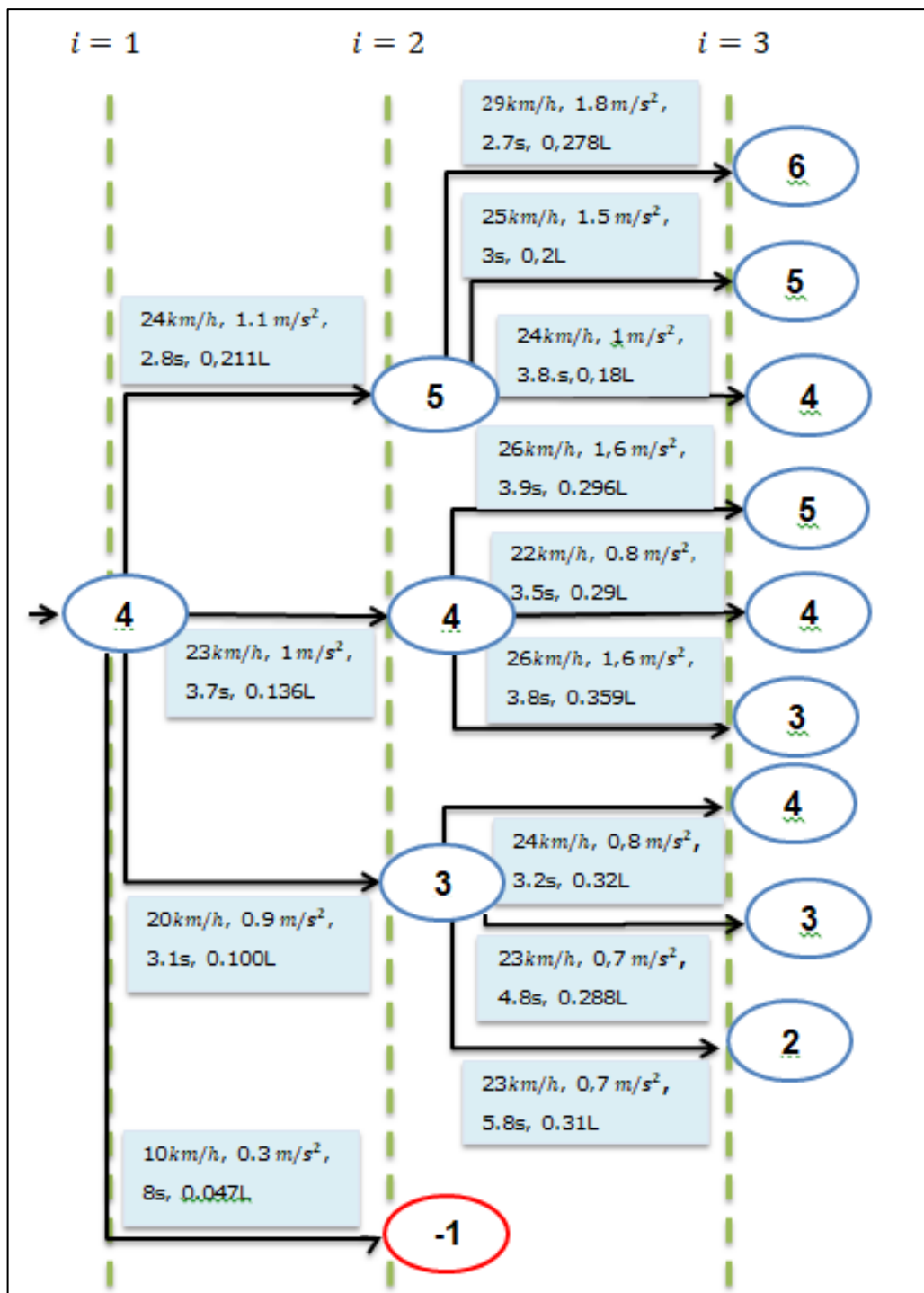
Cada transição entre o PA atual (2) aos PA adjacentes (3,2,1-1) serão realizados os cálculos de movimento pelo Simulador. Os dados resultantes dos cálculos de movimento das simulações, serão integradas em cada aresta correspondente.

Fonte: Autoria própria

Os dados retornados do simulador a cada transição são utilizados para compor os valores das arestas do grafo, os quais foram representados na seção anterior, demonstrados na Figura 6, como consumo, velocidade medida, distância percorrida, dentre outros.

O ACO seja integrado ao simulador desenvolvido no trabalho de Borges (2009). Este simulador visa realizar as simulações de cada *PA* escolhido para cada *pm*. Ele realizará os cálculos matemáticos referentes a dinâmica do movimento realizado pelas locomotivas, seus procedimentos e requerimentos de informações são detalhados no Capítulo 5. Para demonstração de sua aplicação, será considerado as informações da Tabela 4 com o uso de apenas 3 *pm*, cujos ID são 9, 10 e 11, o qual será representado pela Figura 9, onde *i* é o *pm* analisado.

Figura 9. Grafo completo para a aplicação do ACO

**Legenda:**

- i , representa o índice do ponto de medida;
- s , representa o tempo (s);
- L , representa o consumo;
- km/h , a velocidade (quilômetro por hora);
- m/s^2 , a aceleração (metros por segundo ao quadrado).

O ACO utilizará o mecanismo de criação do grafo da Figura 9 para encontrar o melhor caminho, partindo do ponto de atuação da locomotiva. A profundidade do grafo corresponderá à quantidade de pontos de medida de cada trecho, no exemplo da Figura 9 tem-se 3 níveis de profundidade. Para este trabalho, será considerado inicialmente, 4 pontos de medida para cada trecho de uma viagem, logo o grafo terá no máximo a profundidade de 4 níveis. No entanto, para experimentação são também considerados outros níveis de profundidade, a fim de analisar os resultados baseados na profundidade do ACO, e o comportamento e eficiência do ACO às devidas mudanças no grafo.

Serão adicionados nas arestas do grafo os valores do feromônio (f) e probabilidade (pr), estes valores são primordiais para os cálculos de conversão e busca das formigas. A demonstração, representação e exemplificação dos modelos construídos e cálculos realizados serão representados no Capítulo 5.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo definiu os modelos utilizados para a integração do ACO, assim como, a representação do ambiente modal férreo, a definição do modelo do grafo, e as características de transição dos pontos de aceleração. O ACO será integrado neste modelo, que com os cálculos e processos do ACO, será possível encontrar o melhor ponto de aceleração de cada nível do grafo, resultando por fim, conjunto de pontos de aceleração, cujo tamanho é equivalente à profundidade da estrutura grafo. A modelagem e implementação de todos estes processos serão detalhados no próximo capítulo.

5 DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DO ACO NA PROBLEMÁTICA DA CONDUÇÃO NO MODAL FÉRREO

Neste capítulo são apresentados os modelos de diagrama de classes que representam cada componente responsável da criação da estrutura do grafo e da solução criada utilizando a metodologia do ACO. Serão apresentados também os elementos responsáveis pela obtenção das informações e dados da via férrea, da locomotiva e vagão, baseados em dados reais para aplicação. No decorrer deste capítulo são demonstrados os códigos na Linguagem *JAVA*, dos principais métodos na criação da estrutura do grafo e dos processos de solução utilizados pelo ACO. Por fim, será demonstrado um exemplo de solução utilizando o ACO a um *pm*, o qual será aplicado com o uso do simulador.

5.1 MÉTODO DE AQUISIÇÃO DAS ESPECIFICAÇÕES DO PONTO DE MEDIDA, LOCOMOTIVA E VAGÃO

As informações de cada ponto de medida, assim como as características da locomotiva e vagão são coletadas em arquivos XML, que reúnem características reais que foram representados Tabela 2 (BORGES, 2009). Os dados foram obtidos a partir de planos cartográficos, conforme descrito em Borges (2009). Os pontos são representados conforme esquema apresentado na Figura 10, onde foram mostradas as definições de apenas um ponto de medida, como o identificador, a velocidade máxima do ponto, o quilometro pertencente, percentual de rampa, raio da curva, ângulo central da curva, corda de grau 20, altitude e dados da localização.

Figura 10. Arquivo XML com informações do ponto e medida

```

<viaFerreia>
  <identificador>Preencher nome</identificador>
  <distanciaPonto>20</distanciaPonto>
  <bitolaLinha>1.60</bitolaLinha>
  <velocidadeMedia>100</velocidadeMedia>

  <listaDePontosDeMedida>
    <pontoDeMedida>
      <id>6383</id>
      <velocidadeMax>60</velocidadeMax>
      <km>334</km>
      <rampa ini="0.0" fim="20.0">1.0164286</rampa>
      <raioCurva ini="0.0" fim="20.0">452.0</raioCurva>
      <ac ini="0.0" fim="20.0">94.155556</ac>
      <g20 ini="0.0" fim="20.0">2.5355556</g20>
      <altitude ini="0.0" fim="20.0">565.748</altitude>
      <localizacao>
        <latitude>0</latitude>
        <longitude>0</longitude>
      </localizacao>
    </pontoDeMedida>
  </listaDePontosDeMedida>
</viaFerreia>

```

Fonte: Adaptada de Borges (2009)

Para a simulação de uma viagem é utilizado um arquivo completo, contendo dados dos pontos de medidas entre duas cidades, como a distância entre os pontos, a bitola da linha, a velocidade média do trecho, uma lista dos pontos de medida.

O modelo de arquivo XML que representam as características da locomotiva e vagões são exemplificados na Figura 11 e Figura 12.

Figura 11. Arquivo XML com as informações da locomotiva

```
<composicao id="Composicao de Teste">
  <distanciaEntreVeiculos>1.25</distanciaEntreVeiculos>
  <listaVeiculos>
    <locomotiva quantidade="4">
      <veiculo>
        <tara>169.7</tara>
        <numeroDeEixo>4</numeroDeEixo>
        <areaFrontal>120</areaFrontal>
        <comprimento>20</comprimento>
      </veiculo>
      <propulsor>
        <modelo>C30</modelo>
        <quantidadeDePontos>11</quantidadeDePontos>
        <idPontoAceleracaoPartida>0</idPontoAceleracaoPartida>
        <pontoDeAceleracao>
          <id>-2</id>
          <potencia>0</potencia>
          <consumo>0.3168</consumo>
        </pontoDeAceleracao>
        <pontoDeAceleracao>
          <id>-1</id>
          <potencia>0</potencia>
          <consumo>0.3168</consumo>
        </pontoDeAceleracao>
        <pontoDeAceleracao>
          <id>0</id>
          <potencia>0</potencia>
          <consumo>0.3168</consumo>
        </pontoDeAceleracao>
        <pontoDeAceleracao>
          <id>1</id>
          <potencia>100</potencia>
          <consumo>0.5670</consumo>
        </pontoDeAceleracao>
      </propulsor>
    </locomotiva>
  </listaVeiculos>
</composicao>
```

Fonte: Adaptada de Borges (2009)

Pela Figura 11 são encontradas as informações da locomotiva, destacando-se os valores de cada ponto de aceleração, o qual possui dados do ID, potência e consumo de cada ponto de aceleração. Na Figura 11 foi ilustrado somente 4 pontos de aceleração, no arquivo completo, são utilizados 8 pontos de aceleração para aplicação do ACO para a locomotiva.

Figura 12. Arquivo XML com informações do vagão

```
<vagao quantidade="58">
  <veiculo>
    <tara>29.46</tara>
    <numeroDeEixo>4</numeroDeEixo>
    <areaFrontal>120</areaFrontal>
    <comprimento>20</comprimento>
  </veiculo>
  <carga>70</carga>
</vagao>
```

Fonte: Adaptada de Borges (2009)

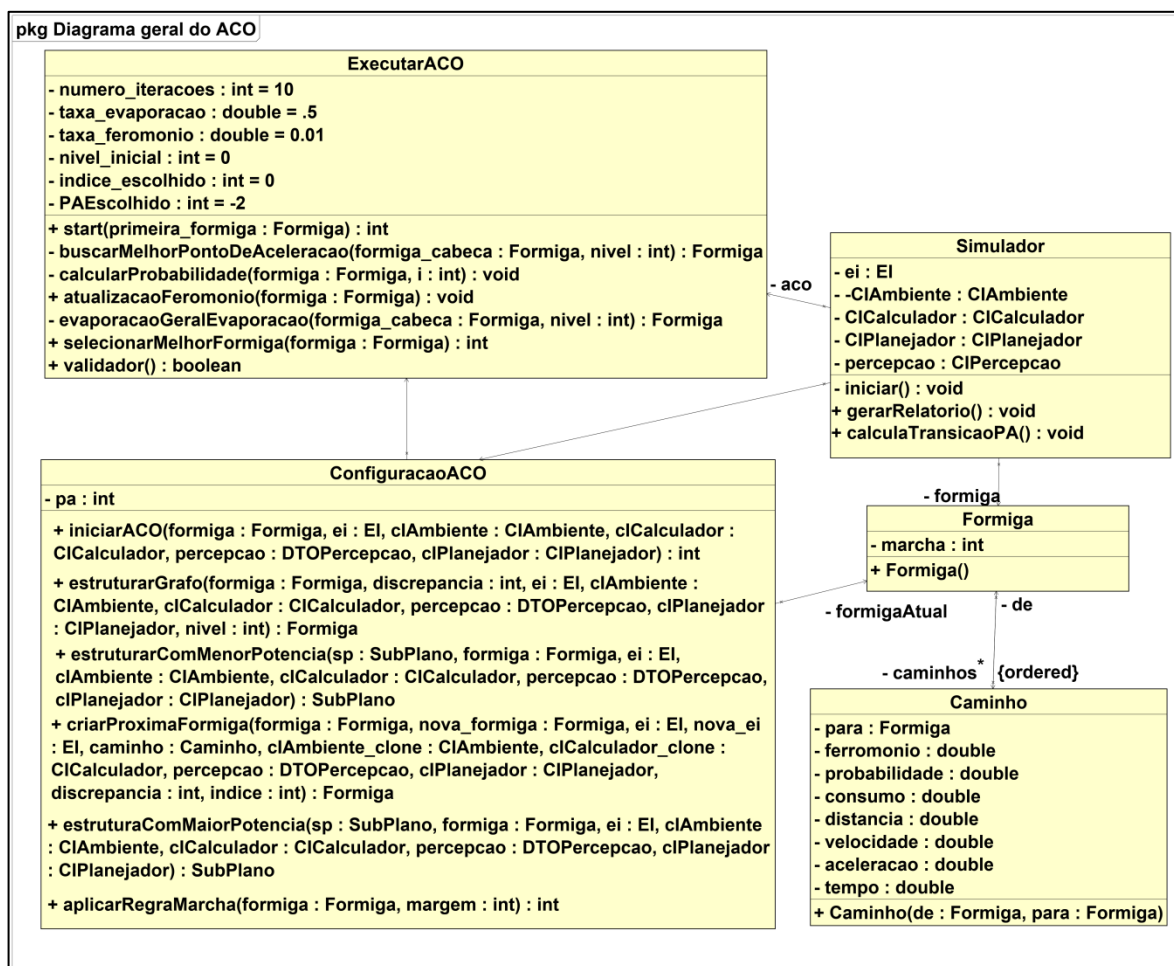
Já a Figura 12 mostra as especificações do vagão, os quais serão utilizados no cálculo de movimentação usado pelo ACO, dentre elas a quantidade de vagões, tara, número de eixos, área frontal, comprimento e capacidade de carga. Este conjunto de valores é igual para todos os vagões que compõe um trem.

Para cada representação mencionada (locomotiva, vagão e ponto de medida) foram desenvolvidas classes responsáveis pela leitura destes arquivos XML. Este processo de leitura, definido como um *parser*, será realizado por meio do analisador XML do DOM, o qual é responsável por analisar todo o documento XML e o carregar na memória, estruturando-os em nós para facilitação de sua manipulação (MKYONG.COM, 2019).

5.2 MODELAGEM DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS

O diagrama de classes da Figura 13 apresenta os principais componentes de solução do ACO. Neste diagrama, a classe *Formiga* contém as características do vértice do grafo, assim como a classe *Caminho*, que possui das características da aresta, componentes já descritos e detalhados no Capítulo 4.

Figura 13. Diagrama de classe geral do ACO



Fonte: Autoria Própria

No diagrama da Figura 13 a classe Simulador representa a classe principal de cálculos relacionados a condução, validação e simulação de cada ponto de aceleração escolhido para cada ponto de medida. Foram mostrados apenas instâncias que foram utilizadas para a construção dos métodos do ACO. Além disso, o Simulador (em sua estrutura completa) possui outras classes de planejamento, análise do ambiente da via férrea, dos componentes de validação, da aquisição dos arquivos *xml*, como também, registros de todas as atividades realizadas à cada ponto de medida.

Por esta complexidade e extensão do sistema, foi definido a representação simplista do simulador, focando-se nos detalhes da implementação relacionados diretamente a construção do ACO.

As classes *ConfiguracaoACO* e *ExecutaACO* são responsáveis pela criação do grafo, e da execução do ACO ao grafo gerado, respectivamente. Na classe

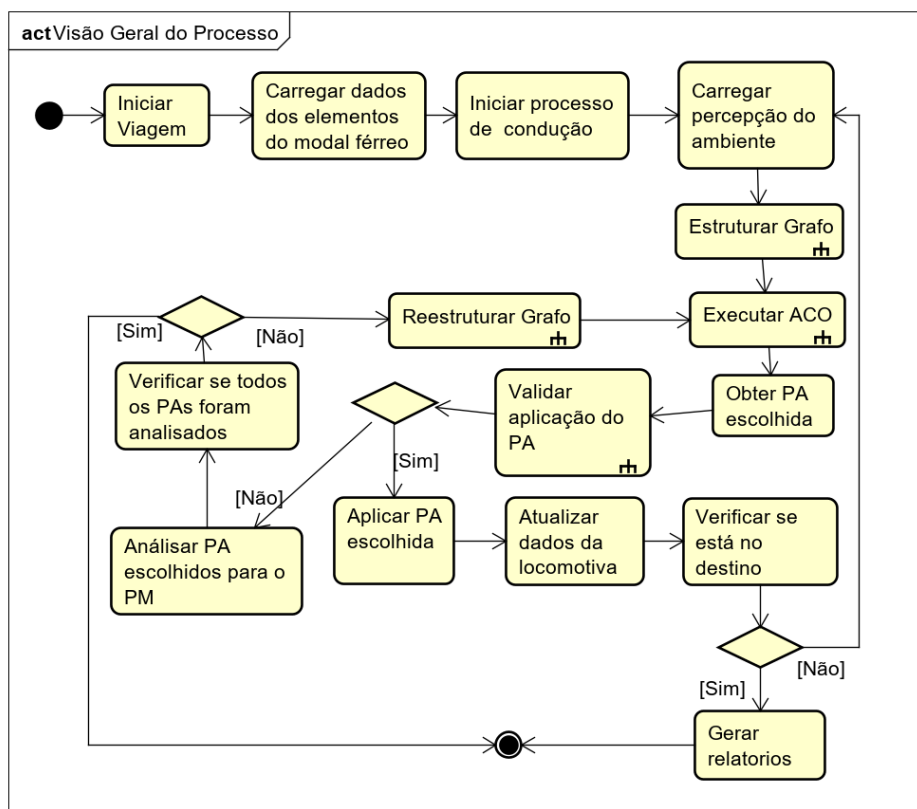
ConfiguracaoACO estão os métodos da regra de transição, da construção do grafo, e dos planos de contingência, relacionados aos valores de discrepância para os casos de patinação ou falta de potência dos motores de tração.

Por fim, a classe *ExecutaACO* possui os principais métodos relacionados à busca pelo melhor ponto de aceleração, o qual consumira o menor consumo de combustível. Cada método desta classe foi construído baseando nas equações do ACO e adaptados as especificações do modal férreo.

5.3 PRINCIPAIS MÉTODOS DA OTIMIZAÇÃO POR COLÔNIA DE FORMIGAS APLICADA AO MODAL FÉRREO

Para explanação dos principais métodos desenvolvidos segundo especificações e equações do ACO, será necessário primeiramente compreender o fluxo do programa. Para este fim, será utilizado o diagrama de atividade Figura 14, o qual têm-se os passos realizados durante a condução utilizando o ACO.

Figura 14. Diagrama de atividades de condução com o ACO



Fonte: Autoria própria

Em análise ao sistema proposto pelo diagrama da Figura 14 tem-se, primeiramente, o ponto inicial que demonstra o processo de inicialização da viagem. Em seguida tem-se o estado de ação “*Carregar dados dos elementos do modal férreo*”, o qual representa o processo de aquisição das características da locomotiva, vagão e via férrea, neste estado todos os dados pertinentes ao modal férreo são carregados no sistema.

A atividade “*Iniciar condução*” refere-se à inicialização de condução da locomotiva, com a aplicação do PA igual a 1. Somente o primeiro PM da condução é resolvido aplicando-se o PA igual a 1, todos os PM posteriores são resolvidos com a solução do ACO.

A atividade “*Carregar percepção*” representa o processo de análise do ambiente onde são obtidas as informações e estado da via férrea no devido PM. Estas informações possibilitaram a realização dos cálculos de transição de um PA para outro, analisando a viabilidade de aplicação do PA escolhido ao PM analisado. As informações obtidas neste estado podem ser exemplificadas pela Tabela 4.

Após os processos de aquisição de informações da locomotiva: inicialização da condução e da percepção do PM obtida; será iniciado o fluxo da aplicação do ACO. Este fluxo é composto pelas informações do PM, com estes dados o ACO será implementado seguindo os principais processos: “*Estruturar Grafo*”, “*ACO*”, “*Validar PA escolhido*” e “*Reestruturar Grafo*”, estes processos são responsáveis pela solução do ponto de aceleração aplicáveis ao ponto de medida, os quais são detalhados na próxima seção.

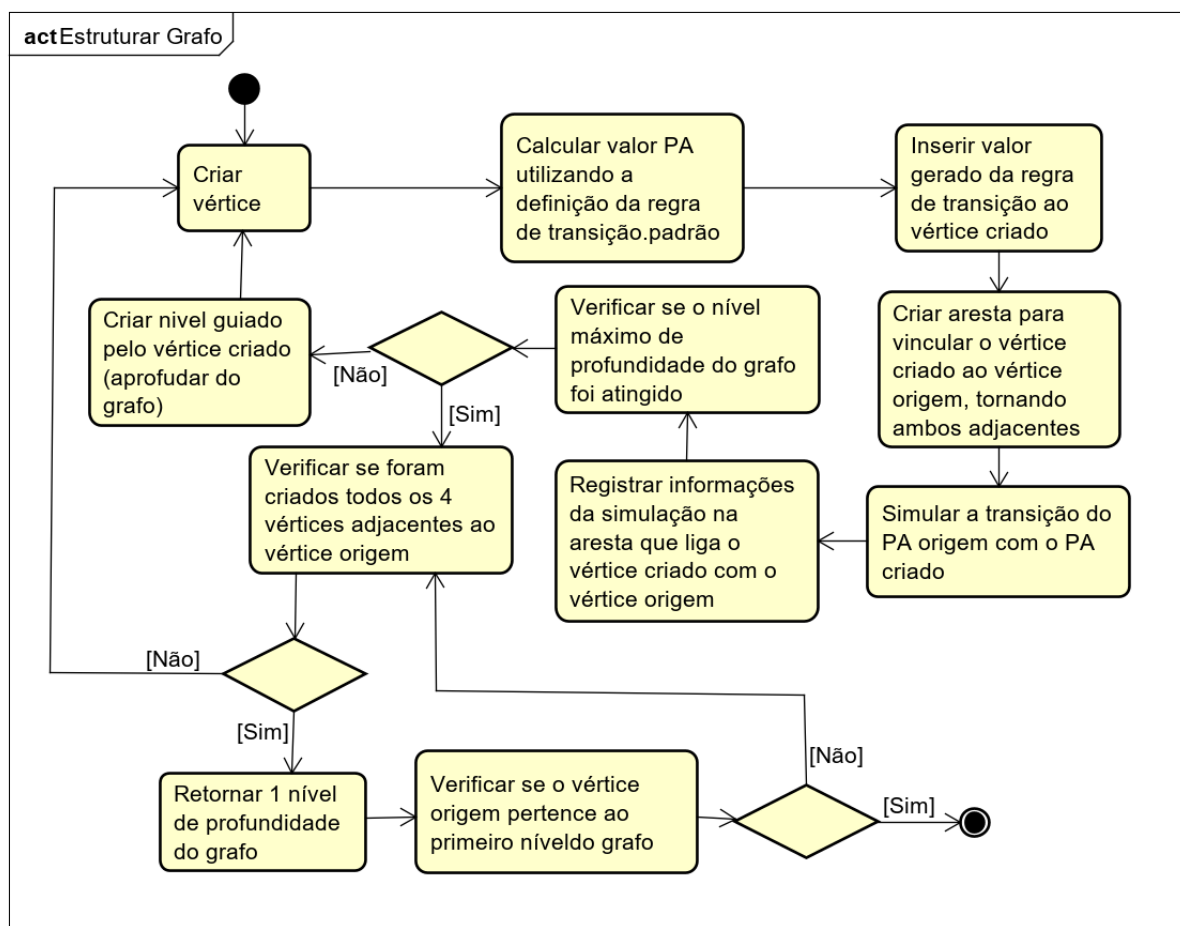
Por fim, será aplicada a solução gerada atualizando todas as informações de condução com a transição dos PA realizado. Posteriormente, será analisado o estado da viagem (se a locomotiva chegou ao seu destino), caso não tenha chegado ao destino, então será novamente obtida as informações do próximo PM, e reiniciado o fluxo do ACO.

5.3.1 Implementação Do Estado - Estruturar Grafo

Para modelagem e implementação do grafo tem-se a atividade “*Estruturar Grafo*”. Neste ponto será utilizada a regra de transição padrão para construção do

grafo, calculando cada transição com auxílio do Simulador, processo demonstrado pela Figura 8, o qual pode ser detalhado com o uso do diagrama da Figura 15.

Figura 15. Diagrama de atividades para estruturar o grafo



Fonte: Autoria própria

Para inicialização do processo “*Estruturação do grafo*” é necessário obter o valor do PA atual da locomotiva, por isso no ponto inicial do diagrama tem-se como parâmetro de entrada: PA atual. O PA atual será o vértice origem do grafo, o ponto de partida para a construção do grafo.

Para detalhamento do comportamento do diagrama da Figura 15, será utilizado também o diagrama representado na Figura 13, onde é apresentado o método *Estruturar Grafo*.

Conforme mencionado no Capítulo 4, para o desenvolvimento do grafo foram utilizadas as informações do Simulador para realizar os cálculos de condução de cada transição de PA do grafo, cujo resultado será aplicado à cada aresta da transição

analisada. Desse modo, o grafo estará completo com todas as informações calculadas e preenchidas para a aplicação dos cálculos do ACO.

O gerenciamento de criação do grafo será realizado pela classe *ConfiguracaoACO* do diagrama da Figura 13. Esta classe usa as informações das arestas no simulador, e modula cada informação obtida ao nó do grafo, gerenciando também as regras de transições aplicadas em cada aresta. Os principais métodos utilizados para a criação do grafo utilizando nesta classe são: *estruturaGrafo*, *aplicarRegraMarcha*, *estruturarComMaiorPotencia* e *estruturarComMenorPotencia*.

O método *estruturaGrafo*, representado na Figura 16, é responsável pelo processo recursivo da criação do grafo. O processo é realizado em profundidade, ou seja, a concretização do grafo inicia-se do nível mais profundo do grafo e é terminada nos nós filhos do primeiro nó (nó raiz) do grafo.

A variável *nivel* limita a quantidade de nível de criação do grafo, definido neste trabalho, inicialmente com o valor igual à 4 níveis, os quais serão alterados para experimentações e análise de resultados.

A regra de transição foi implementada no método *aplicarRegraMarcha*. A quantidade de caminhos criados é definida pelo número de iterações do laço da linha 13, definida com o valor 4, representado 4 vértices à cada nível do grafo.

Figura 16. Método *estruturaGrafo*

```

01 public Formiga estruturarGrafo(Formiga formiga, int nivelMax,
02     int discrepancia, EI ei, CIAmbiente ciAmbiente, CICALculador
03     ciCalculador, DTOPercepcao percepcao, CIPlanejador ciPlanejador,
04     int nivel){
05
06     if(nível < nivelMax){
07         if(formiga.getCaminho().isEmpty()){
08             Formiga nova_formiga;
09             EI nova_ei = null;
10             Caminho caminho;
11             CIAmbiente ciAmbiente_clone = CIAmbiente.clone();
12             CICALculador ciCalculador_clone = ciCalculador.clone();
13             Int i=0;
14             for(; i < 4; i++){
15                 nova_formiga = new Formiga();
16                 caminho = new Caminho(formiga);
17                 nova_ei = ei_clone();
18                 formiga = criarProximaFormiga(formiga, nova_formiga,
19                     ei, nova_ei, caminho, ciAmbiente_clone,
20                     ciCalculador_clone, percepcao, ciPlanejador,
21                     discrepancia, i);
22                 estruturarGrafo(formiga.getCaminho().get(i).getPara(),
23                     nivelMax, discrepancia, nova_ei, ciAmbiente,
24                     ciCalculador_clone,
25                     ciPlanejador.atualizarPercepcaoComBaseEmEI
26                     (percepcao, ei), ciPlanejador, nível+1);
27             }
28         }
29     }
30     return formiga;
31 }

```

Fonte: Autoria Própria

Outras variáveis do método *estruturaGrafo* armazenam informações específicas do ambiente e da simulação, sendo elas:

- *ei*: armazena todas as informações do trem, da via e das variáveis calculadas, apenas para leitura e escrita;
- *ciAmbiente*: responsável por armazenar e carregar dados da via e do trem;
- *ciPlanejador*: variável que armazena os métodos do ACO e demais funcionalidades responsáveis por gerar planos de viagem, como outros algoritmos utilizados em trabalhos anteriores;

- *c/Calculador*: objeto responsável por processar os cálculos matemáticos da condução.

No método *aplicarRegraMarcha* tem-se a aplicação a regra de transição, mencionado no Capítulo 4. Este método verifica o próximo ponto de aceleração utilizando, a regra de transição padrão, especificado pela Tabela 5. O valor de discrepância representa qual tipo de regra de transição que será aplicada, característica representada pela Tabela 8.

Tabela 8. Relação entre o valor de discrepância e a regra de transição

Discrepância	Tipo de regra de transição
1	Maior Potência
0	Padrão
-1	Menor Potência

Fonte: Autoria própria

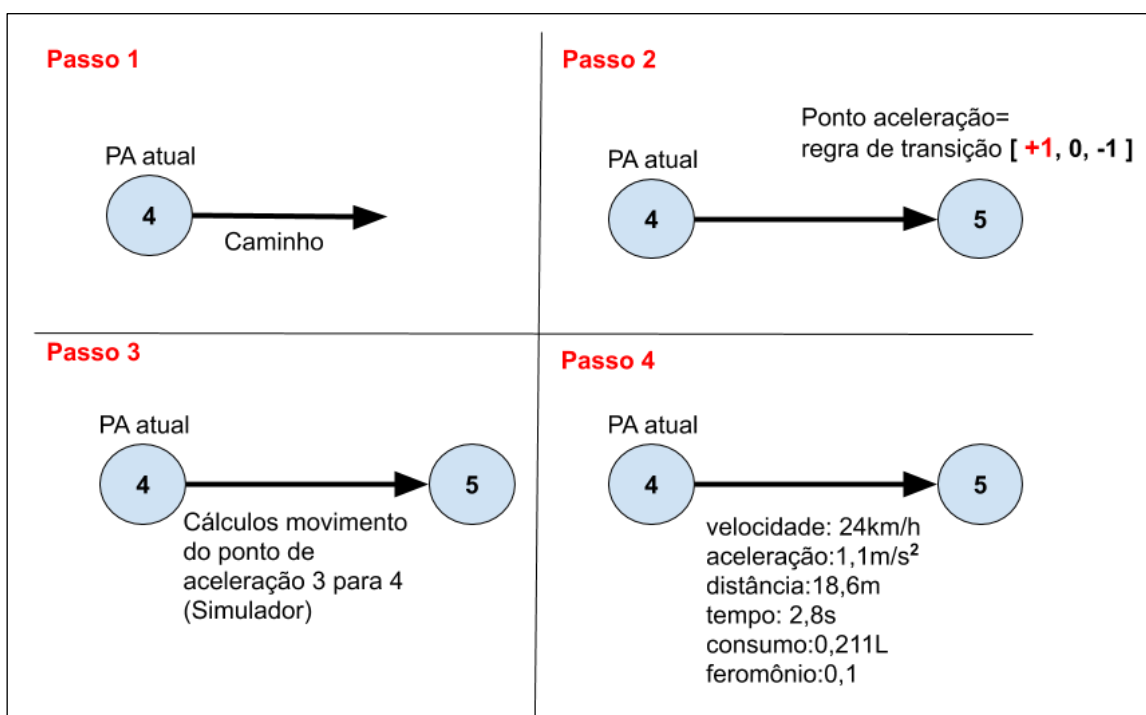
Os métodos *estruturarComMaiorPotencia* e *estruturarComMenorPotencia* têm a finalidade de realizar o plano de contingência, nas situações de falta de potência e patinagem, do ponto de aceleração escolhido, respectivamente.

O plano de contingência via a aplicação da Tabela 6 ou Tabela 7 para reestruturação do grafo. Exemplo: se o simulador retornar o status de inviabilidade de do PA escolhido, pelo motivo de patinagem, então será atualizado o valor de discrepância para -1, e conseqüentemente, será acionado o método *estruturarComMenorPotencia*. Tal processo garantirá que os próximos PAs selecionados não resultem em inviabilidade por patinagem. O mesmo processo é realizado caso o resultado de inviabilidade for pelo motivo de faltar potência do PA escolhido, acionando assim o método *estruturarComMaiorPotencia*.

Os cálculos de movimentação da locomotiva serão realizados pelo simulador, o qual fará uso das equações de *Davis*, descritas no Capítulo 2. Para detalhamento deste processo, inicialmente explicado no Capítulo 4, com o auxílio da Figura 9, seja uma locomotiva movendo com PA igual à 3. O processo de construção do grafo é requisitado, e seu primeiro passo é criar um vértice cujo valor é calculado pela regra de transição padrão. Após, é criada uma instancia do objeto *Caminho* para ser ligado ao vértice origem, cujo valor é igual à 3, este passo pode acompanhado na Figura 17.

A aplicação da regra de transição será executada 4 vezes: três delas são referentes aos valores da *RT*, e uma delas relacionada à representação do freio. Para entendimento da criação do caminho, e conseqüentemente, da estrutura do grafo, foi criado apenas um nó representando os processos realizados, descritos na Figura 17, a qual explana o processo apresentado pela do Capítulo 4 na Figura 8.

Figura 17. Processo de criação do grafo com ACO



Fonte: Autoria própria

Os 4 passos demonstrados na Figura 17 representam a criação de uma transição de um ponto de aceleração atual a um possível ponto de aceleração a ser aplicado ao próximo ponto de medida. No Passo 1 tem-se a criação do caminho, o qual é vinculado ao PA origem. No Passo 2, tem-se a criação do novo vértice, o qual foi preenchido o valor do PA referente à aplicação da regra de transição, a qual nesta figura destaca a aplicação do primeiro índice da regra de transição.

No passo 3 da Figura 17, o simulador é acionado para aplicar os cálculos de movimento da locomotiva ao aplicar o ponto de aceleração resultante da regra de transição. Este processo resultará nas informações da aresta, especificando o resultado da aplicação sobre o ponto de medida atual.

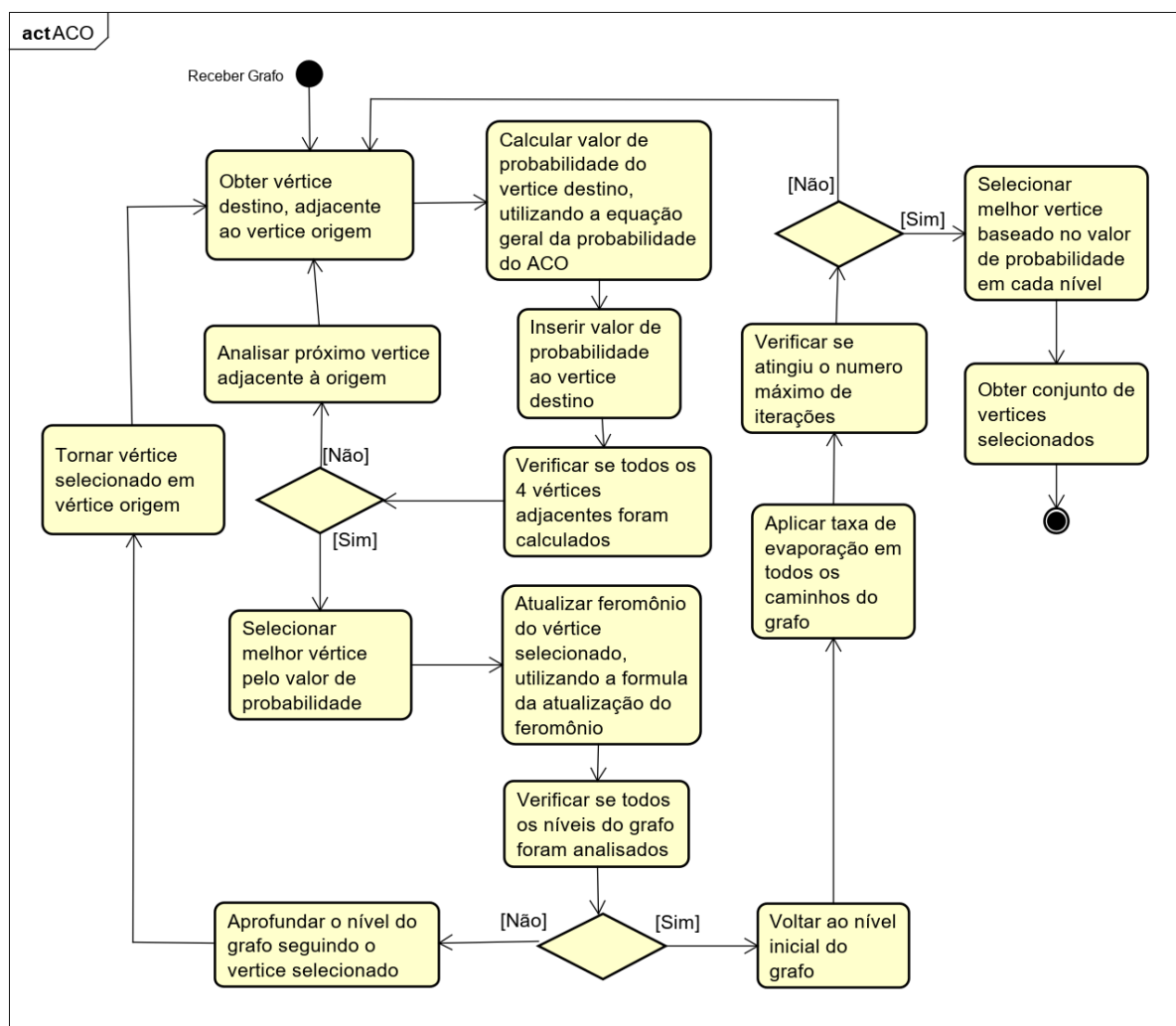
Por fim, no passo 4, as informações coletadas são adicionadas à aresta, juntamente com o valor inicial do feromônio e do consumo de combustível. Assim,

todos os passos mencionados serão repetidos nas próximas instancias do objeto *Caminho*. Gerando assim um grafo seguindo o modelo apresentado na Figura 9, inicialmente com o valor do nível igual à 4.

5.3.2 Métodos Do ACO Desenvolvidos Para O Modal Férreo

A ideia principal do ACO é buscar o melhor caminho percorrendo o grafo analisando, a cada nível, o caminho que melhor corresponde aos critérios definidos de consumo de combustível e quantidade de feromônio depositado. Em cada nível do grafo será calculada a probabilidade dos vértices adjacentes ao vértice atual (ao PA atual). Assim, o caminho que possuir o maior valor de probabilidade será aplicado a atualização (reforço) do feromônio. Em seguida, o algoritmo direciona ao caminho que produz maior probabilidade, percorrendo o próximo nível do grafo. Tal fluxo pode ser representado pelo diagrama da Figura 18.

Figura 18. Diagrama de atividades do ACO



Fonte: Autoria Própria

Para explanação do processo do ACO será também utilizado o diagrama da Figura 13, especificamente a classe *ExecutarACO*. Os processos e estados do fluxograma da Figura 18 estão vinculados às tarefas realizadas pelos métodos desta classe. O método *calcularProbabilidade*, descrito pela Figura 18, contém a aplicação da Equação 12.

Figura 19. Método calcularProbabilidade

```

01 private void calcularProbabilidade(Formiga formiga, int i){
02     int cont =0;
03     double somatorio_prob=0;
04     while(formiga.getCaminho().size() > cont){
05         somatorio_prob = somatorio_prob +
06             (formiga.getCaminho().get(cont).getFeromonio()*
07             (1/formiga.getCaminho().get(cont).getConsumo()));
08         cont++;
09     }
10     prob = (1/formiga.getCaminho().get(i).getConsumo())*
11         formiga.getCaminho().get(i).getFeromonio();
12     prob = (prob /somatorio_prob);
13     formiga.getCaminho().get(i).setProbabilidade(prob);
14 }

```

Fonte: Autoria Própria.

Para desenvolvimento da Equação 12 dentro do sistema, a equação foi segmentada em dois passos de solução. O primeiro passo é resolver a expressão que se localiza no denominador da equação, que é descrita pelo somatório: $\sum_{u \in N_t^k(t)} \tau_{iu}^\alpha(t) \times n_{iu}^\beta(t)$, (descrição da equação detalhada no Capítulo 4), este processo é resolvido pelo laço *while* do método da Figura 19.

O segundo passo é resolver a expressão que se localiza no numerador da Equação 12, descrita por $\tau_{ij}^\alpha \times n_{ij}^\beta$, este processo é resolvido na linha 10 e 11 do método da Figura 19, onde n_{ij}^β representa o inverso do consumo de combustível, que pode ser calculado pela divisão *inverso consumo = 1/consumo*, conforme mencionado no Capítulo 4 (LOPES, RODRIGUES E STEINER, 2013).

Após os cálculos de probabilidade serem realizado ao nível do grafo, é iniciada a atualização do feromônio no caminho que possuir maior probabilidade. Este processo será realizado pelo método *atualizacaoFeromonio* e representado pelo código da Figura 20.

Figura 20. Método atualizacaoFeromonio

```

01 public void atualizacaoFeromonio(Formiga formiga){
02     int indiceCaminho = indiceMelhorCaminho(formiga);
03     double controle_evaporacao = formiga.getCaminho().get(indiceCaminho)
04         .getProbabilidade()*(1/taxa_evaporacao);
05     formiga.getCaminho().get(indiceCaminho)
06         .setFeromonio(controle_evaporacao+
07         formiga.getCaminho().get(indiceCaminho).getFeromonio());^
08 }

```

Fonte: Autoria Própria

O método *atualizacaoFeromonio* baseia-se diretamente na Equação 15 e Equação 14, os quais são resolvidos nas linhas 3 e 4, e nas linhas 5, 6 e 7, respectivamente. Na Equação 14, $\tau_{ij}(t)$ representa a quantidade de feromônio a ser depositado, pela ação de escolha da formiga, ao escolher o caminho, e $\Delta\tau_{ij}(t)$ representa o valor atual de feromônio do caminho. A aplicação deste processo é realizada somente para o caminho de maior probabilidade, garantindo a conversão das formigas aos pontos de maior esforço de feromônio.

O método *atualizacaoGeralEvaporacao* possui a função de inserir a taxa de evaporação a todos os caminhos do nível que está sendo explorado a cada iteração. Este processo subtrai o valor atual de feromônio de todos os caminhos, aplicando a Equação 13 descrita no Capítulo 4..

O método *selecionarMelhorFormiga* realiza a verificação do valor da probabilidade do nível que está sendo analisado, onde o caminho que possuir maior probabilidade é que será escolhido. O resultado gerado por nível do grafo representa de forma direta a próxima política de ação do sistema, para o próximo ponto de medida. Desse modo, conforme Figura 9, a solução de cada *pm* está diretamente interligada ao nível do grafo, assim para solução da *pm* igual à 1 deve ser analisado o nível do grafo igual à 1.

A quantidade de valores gerados, assim como o tamanho do conjunto de valores das soluções geradas, é diretamente proporcional à profundidade do grafo. Assim, quanto maior a profundidade do grafo, maior será o conjunto de soluções geradas pelo ACO por iteração.

Por fim, o método *validador* tem a funcionalidade de verificar, junto com o simulador, se o ponto de aceleração escolhido pode ser aplicado numa situação real,

dentro das regras de condução, utilizando os cálculos de movimentos, elencados as formulas de *Davis*, conforme mencionado no Capítulo 2. Este método analisa o retorno da validação do simulador, e seleciona os métodos de reestruturação do grafo.

As principais verificações durante validação da condução são consumo de combustível, análise do limite de velocidade na via férrea, possibilidade de patinagem ou de falta de potência, ao aplicar o ponto de aceleração escolhido. Se acaso o ponto de aceleração ser validado como viável à sua aplicação, então o mesmo é retornado ao sistema com *status* validado, e posteriormente aplicado o *PA* escolhido.

5.4 EXEMPLIFICAÇÃO DOS CÁLCULOS REALIZADOS PELO ACO AO MODAL FÉRREO

O exemplo de execução do ACO será representado seguindo o grafo iniciado na Figura 17. Nesse sentido, será considerado a estrutura do grafo em sua forma completa, contendo 4 níveis de profundidade, em cada nível possuindo 4 caminhos possíveis.

Para exemplificação, será considerada uma viagem cuja locomotiva inicia sua condução pelo ponto *A* com término em *B*. Neste exemplo, será utilizado o modelo de locomotiva e vagão apresentados no Capítulo 4, os quais serão inseridos numa via férrea com características de cada ponto de medida apresentadas pela Tabela 4.

Tabela 4.

A quantidade de formigas (vértices) em cada nível é representada por k , sendo $k = 4$. n_i corresponde ao nível do grafo, iniciado com valor igual à 0. Por fim, têm-se x que é igual ao trecho da viagem analisada ($x = 1$), e t que representa o valor de iteração do algoritmo, iniciada com valor igual à 0.

Os valores de α , β e τ serão definidos conforme recomendação de Dorigo & Stützle (2004) com valores de 0.1, 2 e 0.1, respectivamente. O valor do feromônio será modificado a cada iteração, conforme os cálculos realizados no decorrer da conversão do caminho.

5.4.1 Cálculos Do ACO Ao Exemplo Do Modal Férreo

Seja o ponto de medida $pm = 0$ (ponto de medida inicial), cujo PA aplicado é igual a 4 ($PA = 4$). O ACO será requisitado para verificar qual PA deve ser aplicado ao próximo ponto de medida ($pm = 1$).

Inicialmente o grafo é estruturado seguindo as características e cálculos executados para sua criação, demonstrado na seção 5.3.1, deste capítulo. Dentre os cálculos e fórmulas utilizadas pelo simulador, pode-se destacar as apresentadas no Capítulo 2, como, Equação 1 para obtenção da resistência total do ponto de medida tratado, Equação 8, Equação 10 e Equação 11, para os cálculos referente à força do PA escolhido ao ponto de medida.

Com a criação do grafo finalizada, representado o cenário proposto, os métodos de busca pelo melhor caminho são iniciados carregando os módulos do ACO para os cálculos de conversão. Nesse passo, foram realizados primeiramente os cálculos de probabilidade a cada nível do grafo, cálculos relacionados às equações: Equação geral da probabilidade do ACO; Controle da taxa de evaporação; Atualização do feromônio; Quantidade de feromônio depositado; Equação da variação de feromônio e Inverso consumo de combustível.

No caminho que liga o ponto de aceleração (PA) inicial, cujo valor é 4, ao PA com valor igual à 5, será utilizado a equação geral da probabilidade (Equação 12). Nela, p é o valor de probabilidade do PA igual a 5, como também i e j , que corresponde as formigas origem e destino, respectivamente. Por fim, n representa o inverso do consumo de combustível, cujo valor é obtido pelos cálculos realizados no simulador a cada transição de uma PA a outra, representando o custo de consumo de cada transição de um PA.

O valor de consumo de combustível da transição do $PA = 4$ ao $PA = 5$ é 0,211, este valor pode é calculado utilizando as características de cada PA informado na Tabela 3. Na Equação 12, n_{ij} representa o inverso do consumo de combustível, o qual pode ser calculado pela Equação 17.

Equação 17. Inverso consumo de combustível

$$n_{ij} = \frac{1}{\text{consumo de combustível}}$$

Fonte: KAWAJIRI (2009)

O inverso de um número é a troca do numerador para o denominador (ou vice-versa) (SILVA, 2019). Desse modo, o valor do consumo de combustível pode ser representado por $0,211^1$, e seu inverso representado por $0,211^{-1}$, ou seja, o inverso do consumo será $\frac{1}{0,211}$. No exemplo abaixo, tem-se o cálculo de n_{00} , qual faz-se uso da Equação 17 mencionada.

$$n_{00} = \frac{1}{0,211} = 4,739$$

O cálculo de consumo de combustível é realizado seguindo o mesmo processo para todos os nós do nível do grafo. Calculando posteriormente, o inverso do mesmo. Assim, a fórmula de probabilidade já pode ser utilizada para todos os pontos do nível calculado. Neste exemplo, será demonstrado apenas o primeiro nível do grafo, pois os mesmos processos se repetem em cada nível. Desse modo, neste exemplo, os vértices adjacentes ao PA inicial igual a 4 são: 5, 6, 7 e -1, todos oriundos da regra de transição.

PA = 4 ao PA = 5

$$p_{ij}^x(t) = \frac{\tau_{ij}^\alpha \times n_{ij}^\beta}{\sum_{u \in N_t^k(t)} \tau_{iu}^\alpha(t) \times n_{iu}^\beta(t)}$$

$$p_{00}^3(0) = \frac{0.1_{00}^{0,1} \times 4,739_{00}^2}{0.1_{00}^{0,1} \times 4,739_{00}^2 + 0.1_{01}^{0,1} \times 7,353_{01}^2 + 0.1_{02}^{0,1} \times 10_{02}^2 + 0.1_{03}^{0,1} \times 10_{03}^2}$$

$$p_{00}^3(0) = \frac{17,838}{17,838 + 42,947 + 79,433 + 79,433} \approx 0,094$$

O valor de probabilidade do caminho que liga o PA = 4 ao PA = 5 é 0,094. Do mesmo modo, são realizados os cálculos de probabilidade para as outras formigas adjacentes ao nó inicial do primeiro nível igual à 0 ($i = 0$).

PA = 4 ao PA = 4

$$p_{01}^3(0) = \frac{0.1_{01}^{0,1} \times 7,353_{01}^2}{0.1_{00}^{0,1} \times 4,739_{00}^2 + 0.1_{01}^{0,1} \times 7,353_{01}^2 + 0.1_{02}^{0,1} \times 10_{02}^2 + 0.1_{03}^{0,1} \times 10_{03}^2}$$

$$p_{01}^3(0) = \frac{42,947}{17,838 + 42,947 + 79,433 + 79,433} \approx 0,078$$

PA = 4 ao PA = 3

$$p_{02}^3(0) = \frac{0.1_{02}^{0.1} \times 10_{02}^2}{0.1_{00}^{0.1} \times 4,739_{00}^2 + 0.1_{01}^{0.1} \times 7,353_{01}^2 + 0.1_{02}^{0.1} \times 10_{02}^2 + 0.1_{03}^{0.1} \times 10_{03}^2}$$

$$p_{02}^3(0) = \frac{79,433}{17,838 + 42,947 + 79,433 + 79,433} \approx 0,414$$

PA = 4 ao PA = -1

$$p_{03}^3(0) = \frac{0.1_{03}^{0.1} \times 10_{03}^2}{0.1_{00}^{0.1} \times 4,739_{00}^2 + 0.1_{01}^{0.1} \times 7,353_{01}^2 + 0.1_{02}^{0.1} \times 10_{02}^2 + 0.1_{03}^{0.1} \times 10_{03}^2}$$

$$p_{03}^3(0) = \frac{79,433}{17,838 + 42,947 + 79,433 + 79,433} \approx 0,414$$

A escolha do melhor caminho será definida pelo caminho que possuir maior probabilidade ao nó adjacente à origem. No nível do grafo explorado têm-se dois nós com mesmo valor de probabilidade, no entanto, um desses valores é oriundo da aplicação do freio dinâmico, no qual é utilizado em apenas situações de risco ou emergência da via férrea, que neste cenário não se aplica. Nesse sentido, será escolhido o PA igual à 3, realizando a transação do PA = 5 ao PA = 3. Em seguida, será aplicada a atualização do feromônio, ao caminho escolhido, utilizando a Equação 14 e Equação 15.

Na Equação 14 tem-se $\tau_i(t+1)$, que representa o valor resultante do feromônio que deve ser aplicado ao nó selecionado, e τ_{ij} , que indica a taxa de feromônio, definida com valor igual a 0,01, Por fim, $\Delta\tau_{ij}(t)$, indica o valor atual do feromônio do nó i ao j .

Assim, a atualização pode ser calculada da seguinte forma:

$$\tau_i(t+1) = \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}(t)$$

$$\tau_{02}(0+1) = 0,1_{02} + 0,1 = 0,2$$

Após os cálculos de atualização do feromônio, é realizado o processo de evaporação do feromônio aplicado a toda extensão do grafo, utilizando a Equação 13 para realização deste processo. Na equação p representa o valor da taxa de evaporação, igual à 0,01, conforme sugerido em Dorigo & Stützle (2004), e τ_{ij} ,

representa o valor atual do feromônio. Como exemplificação dos cálculos de evaporação, têm-se abaixo os resultados do $n_i = 0$ (nível igual a 0):

$$\tau_{01}(0 + 1) \leftarrow (1 - 0,01) \times 0,2 \leftarrow 0,198$$

$$\tau_{02}(0 + 1) \leftarrow (1 - 0,01) \times 0,1 \leftarrow 0,099$$

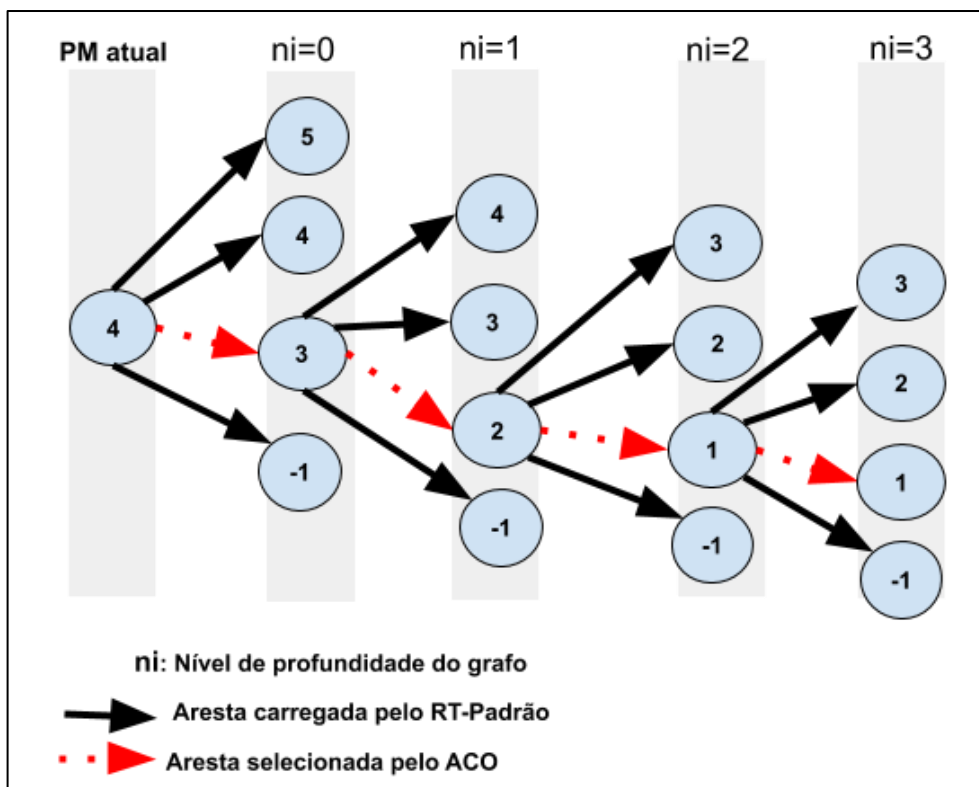
$$\tau_{03}(0 + 1) \leftarrow (1 - 0,01) \times 0,1 \leftarrow 0,099$$

$$\tau_{04}(0 + 1) \leftarrow (1 - 0,01) \times 0,1 \leftarrow 0,099$$

Com a aplicação da evaporação, o ACO irá convergir para o próximo nível do grafo, selecionando o caminho de maior probabilidade. Assim, todos os processos apresentados, como os cálculos de probabilidade, atualização e evaporação do feromônio são aplicados aos próximos níveis, e posteriormente selecionando o caminho de maior probabilidade, até chegar ao nível final do grafo.

Quando todos os processos forem aplicados em todos os níveis do grafo, é caracterizada assim uma iteração do ACO. Neste trabalho foram definidas 10 iterações do ACO, para análise inicial da conversão das formigas, conforme indicação Neto & Filho (2013). A conversão da busca pelo melhor caminho, seguindo o exemplo desta seção, pode ser representada, resumidamente pela Figura 21.

Figura 21. Caminho escolhido pelo ACO aplicado ao modal férreo



Fonte: Autoria Própria

Portanto, ao final dos processos do ACO serão obtidos um conjunto de PA , o qual pode ser aplicado a cada pm subsequente. Assim, a solução gerada para o nível igual à 0 será aplicado ao pm igual a 1, do mesmo modo, para a solução gerada no nível 1, será aplicado ao pm igual a 2, processo semelhantemente aplicado às demais soluções por nível do grafo. O conjunto gerado $S_x^{A \rightarrow B}$, onde x representa o trecho igual à 1, tem-se os resultados $S_1^{A \rightarrow B} = \{3,2,1,2\}$.

Os cálculos resultantes das iterações realizadas podem ser representados e detalhados com a utilização da Tabela 9, assim como o valor dos principais elementos para os cálculos do ACO para cada transição e nível do grafo. Para análise de conversão, os pontos escolhidos à cada nível, foram destacados nesta tabela, o qual corresponde ao conjunto $S_1^{A \rightarrow B}$.

Tabela 9. Cálculos realizado pelo ACO por nível escolhido

N	i	j	PA(i)	PA(j)	τ_{ij}	τ_{ij}^{α}	n_{ij}	n_{ij}^{β}	p	$p(\%)$	$\tau_{ij}(t+1)$
0	0	0	4	5	0,1	0,793	0,085	0,007	0,256	25,6	0,199
0	0	1	4	4	0,1	0,793	0,086	0,007	0,025	25,5	0,099
0	0	2	4	3	0,1	0,793	0,093	0,008	0,235	23,5	0,099
0	0	3	4	-1	0,1	0,793	0,086	0,008	0,254	25,4	0,099
1	0	0	5	6	0,099	0,794	0,087	0,008	0,248	24,8	0,089
1	0	1	5	5	0,099	0,794	0,085	0,007	0,251	25,1	0,089
1	0	2	5	4	0,099	0,794	0,086	0,007	0,249	24,9	0,189
1	0	3	5	-1	0,099	0,794	0,085	0,007	0,251	25,1	0,089
2	1	0	5	6	0,089	0,785	0,087	0,008	0,250	25,0	0,079
2	1	1	5	5	0,089	0,785	0,085	0,007	0,245	24,5	0,079
2	1	2	5	4	0,089	0,785	0,086	0,008	0,251	25,1	0,179
2	1	3	5	-1	0,089	0,785	0,085	0,007	0,253	25,3	0,079
3	2	0	4	5	0,079	0,776	0,085	0,007	0,256	25,6	0,069
3	2	1	4	4	0,079	0,776	0,086	0,007	0,025	25,5	0,069
3	2	2	4	3	0,079	0,776	0,093	0,008	0,235	23,5	0,169
3	2	3	4	-1	0,079	0,776	0,086	0,008	0,254	25,4	0,069

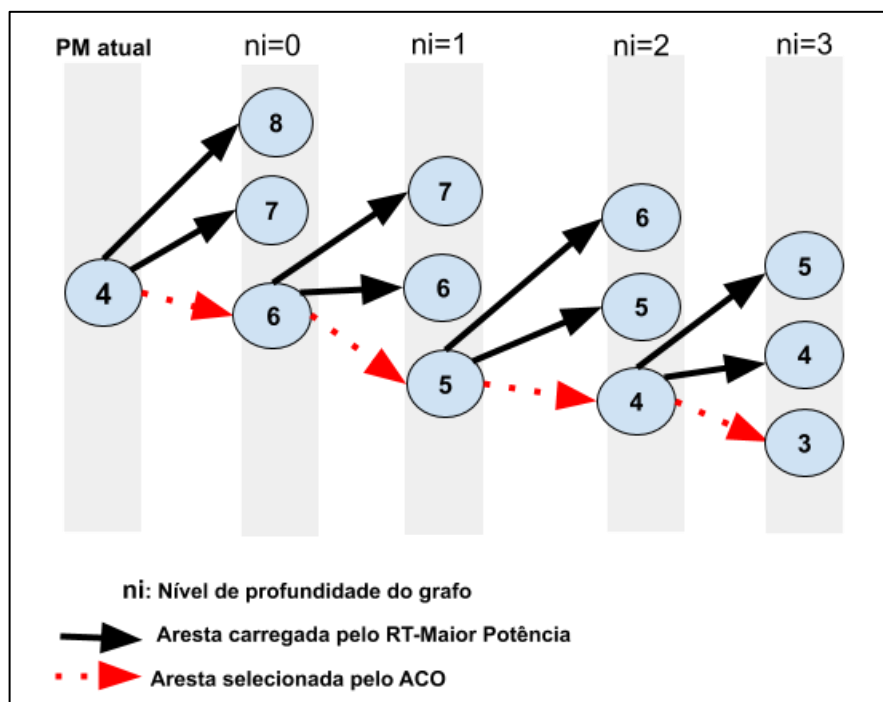
Fonte: Autoria Própria

Depois que realizado a busca pelas formigas na primeira iteração, o simulador é requisitado para validar o PA escolhido para o próximo ponto de medida ($pm + 1$). O PA escolhido, conforme destacado na Figura 21, e na Tabela 9, é o $PA = 3$. Na simulação deste, o simulador resultou na inviabilidade do PA escolhido, ao ponto de medida tratado, pelo motivo de falta de potência na marcha escolhida.

Com a negação do simulador ao PA escolhido, o ACO seguirá o fluxo definido na Figura 14, o qual aplicará a reestruturação do grafo, tal processo criará um novo grafo seguindo o modelo de definição da Tabela 6, com a mesma quantidade definida de níveis igual a 4. Para exemplificação, o novo grafo criado, utilizando a *RT – Maior Potência*, possui apenas 3 PA, pois na validação do Simulador do grafo anterior foi inviáveis, o qual continha o PA igual à -1, então neste pm , não é necessário fazer-se uso do freio dinâmico, uma vez que ele já foi categorizado como inviável pelo Simulador.

Após o processo de reestruturação do grafo, o ACO é novamente chamado para conversão no novo grafo criado, repetindo novamente os cálculos e os passos de conversão, já demonstrados. Assim, a conversão pode ser representada, no grafo reestruturado, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22. Caminho escolhido após reestruturação do grafo com RT-Maior Potência



Fonte: Autoria Própria

Ao final de todos os passos executados pelo ACO, assim como os cálculos de probabilidade, de atualização e da evaporação do feromônio, pode-se gerar novamente uma tabela que represente todos os cálculos e conversões realizadas, demonstrados pela Tabela 10, cujo conjunto gerado $S_1^{A \rightarrow B} = \{6,5,4,3\}$.

Tabela 10. Cálculos realizado pelo ACO por nível escolhido – pós reestruturação

N	i	j	PA(i)	PA(j)	τ_{ij}	τ_{ij}^α	n_{ij}	n_{ij}^β	p	$p(\%)$	$\tau_{ij}(t+1)$
0	0	0	4	8	0,1	0,794	0,933	0,871	0,268	26,8	0,099
0	0	1	4	7	0,1	0,793	0,765	0,585	0,327	32,7	0,099
0	0	2	4	6	0,1	0,793	0,614	0,377	0,405	40,5	0,199
1	2	0	6	7	0,099	0,794	0,764	0,585	0,254	25,4	0,089
1	2	1	6	6	0,099	0,794	0,614	0,370	0,378	37,8	0,089
1	2	2	6	5	0,099	0,794	0,450	0,430	0,488	48,8	0,189
2	2	0	5	6	0,089	0,785	0,614	0,377	0,226	37,6	0,079
2	2	1	5	5	0,089	0,785	0,450	0,203	0,310	31,0	0,079
2	2	2	5	4	0,089	0,785	0,301	0,906	0,518	51,8	0,179
3	2	0	4	5	0,079	0,776	0,450	0,203	0,208	20,8	0,069
3	2	1	4	4	0,079	0,776	0,301	0,091	0,310	31,0	0,069
3	2	2	4	3	0,079	0,776	0,194	0,037	0,482	48,2	0,169

Fonte: Autoria Própria

Após a realização de todos os cálculos de busca pelo ACO, o processo de validação pelo simulador é novamente requisitado, para validar a aplicação do ponto de aceleração escolhido ao ponto de medida tratado. Neste processo o ACO selecionou para o $PA = 6$, o qual se encontra no nível igual à 0, conforme Figura 22, que refere-se diretamente ao ponto de medida a ser resolvido.

O PA é validado de forma positiva, correspondendo às regras de condução referentes ao limite de velocidade no ponto da via, como também a inibição do processo de patinagem ou falta de potência. Desse modo, a solução do ponto de medida foi obtida, e aplicada ao simulador no cenário real. Assim, será analisado posteriormente o próximo ponto de medida (pm), logo para o $pm = 1$, aplica-se o $PA = 6$.

Ressalta-se que foi criado pelo ACO um conjunto de PA aplicáveis aos próximos pm , correspondente a numero de níveis criados pelo grafo, $ni = 4$, logo foram criadas 4 soluções para os próximos 4 pm . Quando todos os PA do conjunto $S_1^{A \rightarrow B}$ forem analisados e aplicados, o ACO será novamente chamado, para calcular os próximos pm subsequentes.

Para os próximos pm , segue o mesmo processo e cálculos como apresentado neste exemplo. O fluxo do ACO se encerra quando todos os pontos de medidas foram resolvidos, analisados e validados pelo Simulador.

Caso o Simulador não valide algum PA do conjunto gerado, então os resultados, subsequentes do conjunto que não foram aplicados, serão descartados. Assim, o ACO será novamente chamado, e será criada uma nova solução partindo do ultimo pm resolvido. Do mesmo modo, caso o ACO verifique todos os PA possíveis ao pm , aplicando os processos de reestruturação do grafo, e o Simulador não validar nenhum PA como viável, então a condução será encerrada imediatamente, este processo pode ser analisado pelo fluxograma da Figura 14.

5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado a aplicação dos cálculos e métodos do ACO ao modal férreo, integrando-o ao cenário do modal férreo. Nesse sentido, pôde ser realizado experimentos que relacionavam ao comportamento do ACO, para aprimorar

os resultados comparando-os com resultados de condução realizado por um maquinista real.

Os experimentos foram classificados, primeiramente, pelo fator de profundidade do grafo, a fim de analisar o comportamento do ACO, a cada tipo de profundidade. Após, foi selecionado o nível de melhor índice de similaridade e de consumo de combustível, comparado ao do maquinista, e aplicado parâmetros de diferentes autores da literatura, para verificar melhorias relacionadas, principalmente ao consumo de combustível.

6 RESULTADOS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com a realização de experimentos utilizando diferentes características no cenário do modal férreo para a aplicação do ACO.

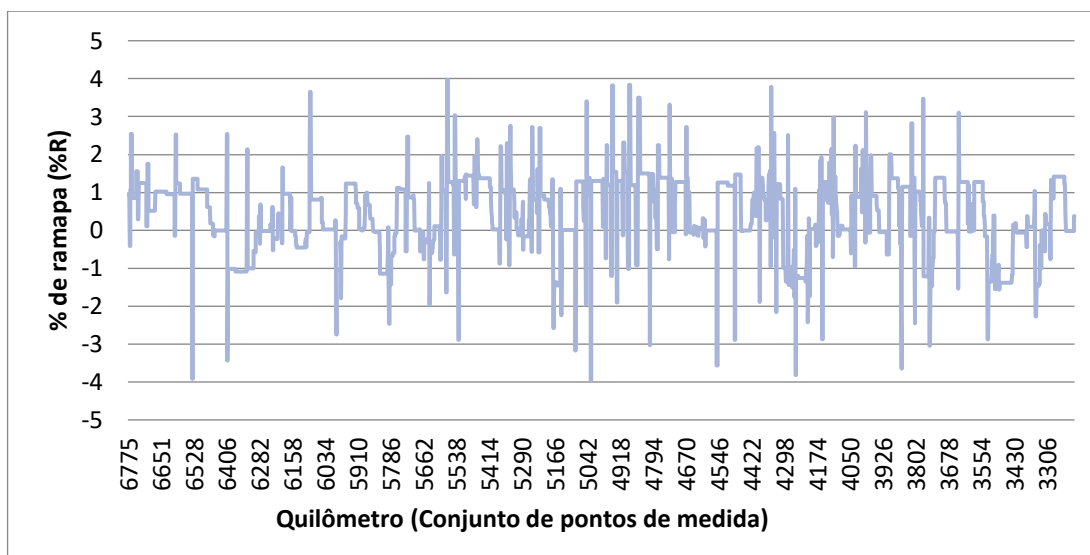
Esta seção se divide na demonstração das características do cenário de teste, na modelagem dos experimentos e, por fim na análise dos resultados da execução do ACO. Posteriormente, os resultados obtidos são comparados com os realizados pelo maquinista, visando o consumo de combustível obtido durante toda a viagem do trem de carga.

6.1 CENÁRIO DE TESTE

No cenário proposto para realização dos resultados foi selecionado o modelo de locomotiva C-30, como representado pela Tabela 2, cujas características do ponto de aceleração são demonstrados na Tabela 3. As informações das tabelas mencionadas são características reais obtidos no trabalho do Borges (2015).

O Simulador utilizará características da via férrea, como as apresentadas pela Tabela 4. Os principais elementos da via férrea, analisados neste trabalho, são o índice de velocidade máxima e o percentual de rampa em cada *pm*. A Figura 23 representa os percentuais de rampa em cada ponto de medida do experimento.

Figura 23. Perfil vertical do trecho do experimento



Fonte: Adaptada de Borges (2015)

O percentual de ramapa impacta diretamente no ponto de aceleração escolhido. Conforme Figura 23, entre os quilômetros 6651 e 6578 têm-se o percentual variando entre 2 à -3,0, o que indica uma descida na via férrea. Neste cenário, o motor terá que gerar maior potência para superar a resistência total, processo que será considerado na escolha do *PA* pelo ACO. Do mesmo modo ocorre em situações de subida na via férrea, a qual o motor precisa gerar potência menor, demonstrados entre os quilômetros 6158 e 6034, indicando percentuais dentre -0,2 e 3,4.

O índice de velocidade máxima definida em cada ponto de medida também é um componente que interfere na escolha dos pontos de aceleração tanto do sistema, como do maquinista. No Simulador, este índice é analisado durante a validação do ponto de aceleração escolhido pelo ACO. Se a simulação do *PA* escolhido ao *pm* resultar no aumento excessivo na velocidade da locomotiva, ultrapassando o limite definido ao *pm*, então o *PA* é categorizado como inviável pelo simulador.

No cenário proposto, o coeficiente de atrito é igual à 0,22, correspondendo a um ambiente com o clima ensolarada (BORGES, 2015). Não foram testados outros valores de coeficiente de atrito por não haver dados disponíveis para comparação.

Outro fator importante para a determinação (ou escolha) do um ponto de aceleração é a quantidade de carga rebocada pelos vagões, assim como o peso do próprio vagão, e da locomotiva. O peso total da locomotiva, vagão e carga influencia diretamente na resistência total do trem, conforme demonstrado na Equação 1, que

consequentemente possui relação direta à força necessária para movimenta-la, força relacionada ao ponto de aceleração escolhido (BORGES, 2015). A quantidade de locomotivas utilizadas neste experimento são 3, a quantidade de vagões são 58, com peso total igual à 6278 toneladas, informações reais obtidas no trabalho de Borges (2015).

6.2 MODELAGEM DOS EXPERIMENTOS

As características do computador utilizado para o experimento são:

- Processador: Intel® Core™ i5 M480;
- Memória (RAM): 8 GB;
- Capacidade do disco rígido: 150 GB;
- Sistema Operacional Windows 10.

A modelagem dos experimentos nesta seção será realizada analisando a atuação do ACO aos diferentes níveis de profundidade do grafo. Neste sentido, será possível verificar se a profundidade do grafo corresponde diretamente ao desempenho do ACO, consequentemente na escolha dos pontos de aceleração.

Foram definidos neste experimento seis tamanhos de níveis distintos, como o exemplificado no Capítulo 5 nas Figura 21 e Figura 22, iguais à: 2, 3, 4, 5, 6 e 7. A quantidade de níveis do grafo foi escolhida como base na limitação do computador utilizado para o experimento. Durante os experimentos foi constatado que para níveis acima de 7, resultou em impactos nos recursos de RAM, disco rígido, processador como também do tempo gasto para obter uma solução com o ACO. Por esta razão foi definido o limitante de 7 níveis neste experimento, pelo alto consumo dos recursos computacionais em instâncias maiores.

O ACO terá o mesmo comportamento de conversão do caminho para todos os seis níveis de profundidade, ressalta-se que o conjunto de PA aumenta, de acordo com o nível de profundidade do grafo, como apresentado na exemplificação do Capítulo 5. Nesse sentido, a cada chamada com ACO, o mesmo gerará um conjunto de PA, cuja quantidade de elementos, correspondente diretamente ao valor do nível utilizado.

Nos experimentos foram analisados também o comportamento do ACO a cada tipo de parâmetro de entrada, obtidos na literatura, correspondente aos valores de

$alpha$ (α), $beta$ (β) e valor inicial do feromônio (τ_0), oriundos da Equação 12. Os parâmetros foram obtidos na literatura e podem ser demonstrados pela Tabela 11.

Tabela 11. Parâmetros de entrada aplicados aos experimentos com o ACO

<i>alpha</i> (α)	<i>beta</i> (β)	(τ_0)	<i>Autor</i>
0.2	2	30	Dorigo (1997)
0.95	1	0.5	Enembreck (2009)
1	1	0.9	Ferreira (2012)
0.1	2.5	20	Neto & Filho (2013)

Fonte: Autoria própria

Os parâmetros demonstrados foram selecionados por sua influência nos cálculos de conversão nas formigas. Segundo Dorigo (1997), tais parâmetros participam diretamente na convergência das formigas, quando relacionado às fórmulas e equações do ACO, como a equação geral da probabilidade, da evaporação e atualização do feromônio, detalhados no Capítulo 3.

Com isso, os parâmetros são aplicados à cada inicialização do ACO, e consequentemente a cada nível do grafo, proposto neste experimento (6 níveis de profundidade). Assim, será analisado os impactos que cada tipo de parâmetro pode causar, na condução, e consequentemente no consumo de combustível numa viagem.

Portanto, neste experimento são analisados dois tipos de comportamento: por nível de profundidade do grafo, e por parâmetro de entrada. Na seção posterior serão apresentados os resultados obtidos deste experimento.

6.3 RESULTADOS OBTIDOS

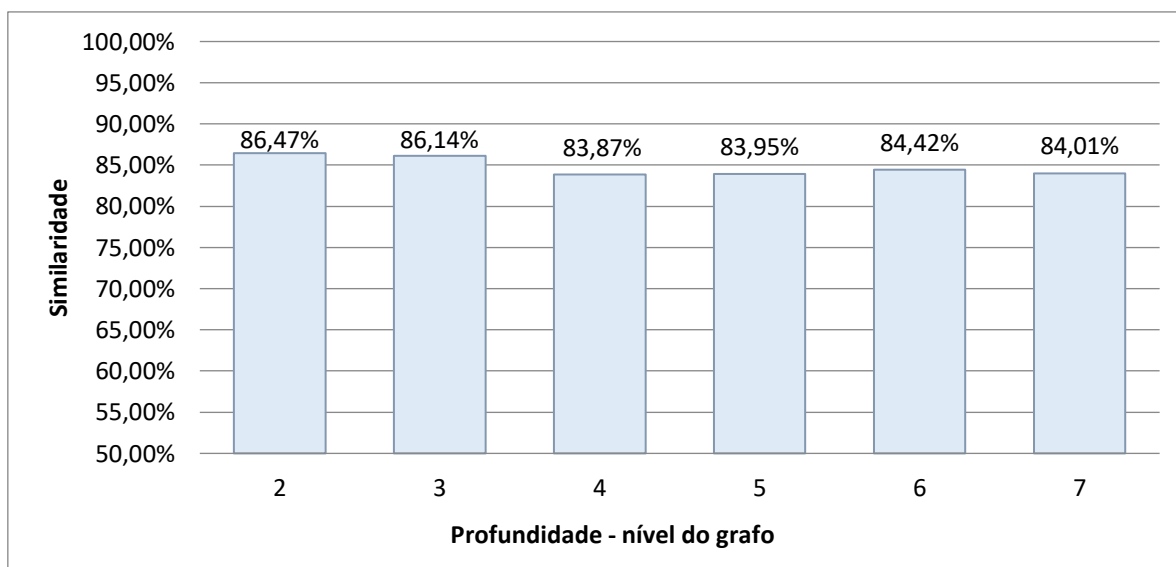
Todos os processos do ACO, assim como da condução no modal férreo foram realizados dentro do sistema de simulação desenvolvido no trabalho de Borges (2015). Deste modo, todos os cálculos de movimentação, consumo, resistências atuantes, entre outros, são realizadas pelo módulo de cálculos integrado ao Simulador, consolidando assim, a eficiência dos resultados coletados.

6.3.1 Análise Por Profundidade Do Grafo

Para realização do experimento baseado na profundidade do grafo, será utilizado o parâmetro do Dorigo (1997), o qual indica os valores de $\alpha = 0.2$, $\beta = 2$ e $\tau_0 = 30$.

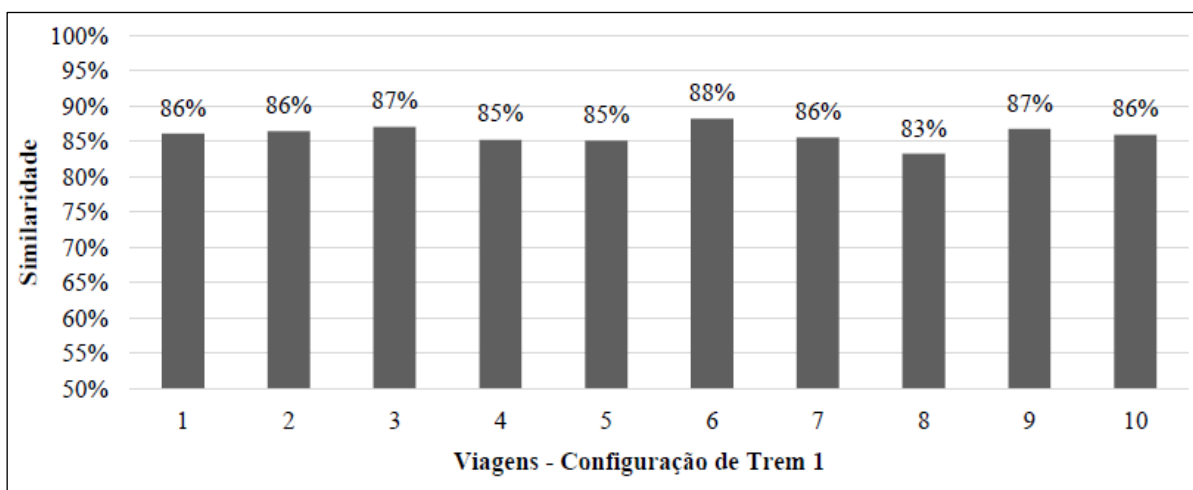
Na análise de profundidade do grafo, o percentual de similaridade da condução entre o maquinista e o sistema, gerou um percentual de média igual à 84,22% (conforme Figura 24). O nível de profundidade do grafo que proporcionou a similaridade com maior proximidade foi o nível igual à 2, com percentual igual à 86,47%.

Figura 24. Percentual de similaridade – por profundidade do grafo



Fonte: Autoria Própria

A solução gerada no trabalho de Borges (2015) resultou em índices de similaridade próximos aos do ACO, na Figura 25 pode ser analisado tal proximidade.

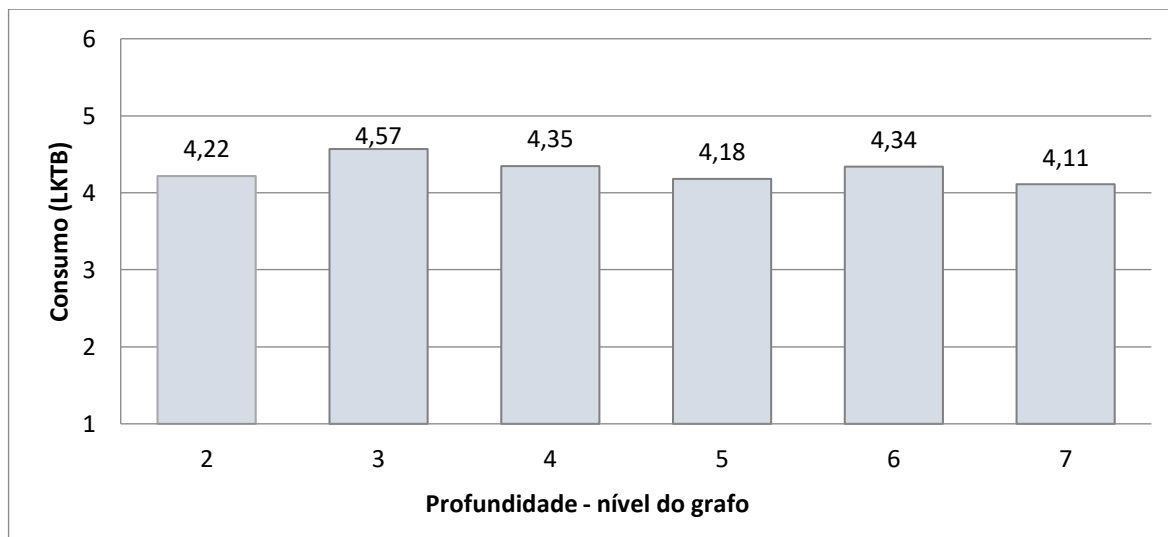
Figura 25. Resultados de similaridade dos trabalhos de Borges (2015)

Fonte: Borges (2015)

No resultado da Figura 25, coletados do trabalho de Borges (2015), têm-se 10 tipos viagens executadas pela mesma configuração definida ao trem, enquanto no ACO, esta configuração é caracterizada pela profundidade do grafo.

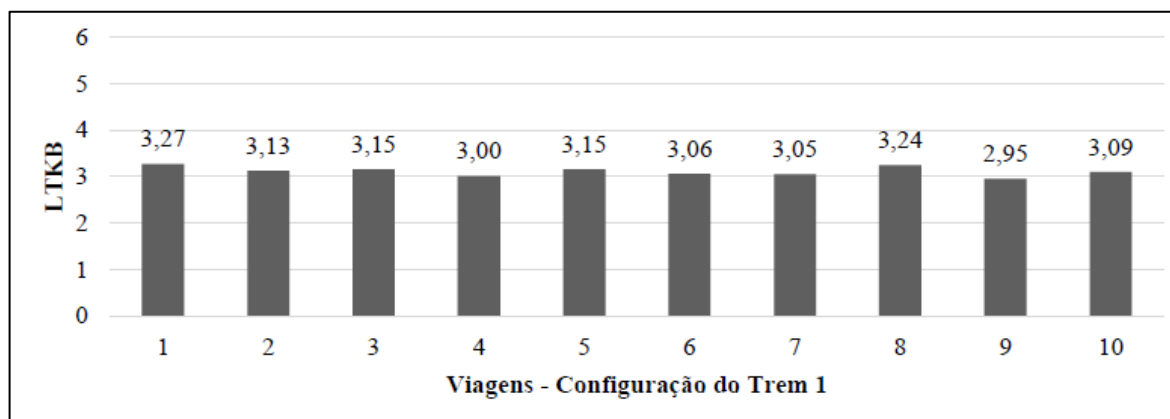
O índice de similaridade ajuda a mostrar a eficiência do ACO quando comparada à condução do maquinista, quanto maior a similaridade, mais próximo o ACO está do comportamento, e das ações executadas pelo maquinista.

Em análise ao consumo de combustível gasto a cada nível do grafo, tem-se o relatório demonstrado na Figura 26. Neste relatório tem-se o consumo de toda a viagem em litros por tonelada bruta transportada (LTKB), onde os cálculos são demonstrados no Capítulo 2.

Figura 26. Consumo de combustível- por nível de profundidade do grafo

Fonte: Autoria Própria

Em análise comparativa aos resultados de consumo no trabalho de Borges (2015), verificam-se valores aproximados quando correlacionados aos resultados do ACO, demonstrado na Figura 27. Saliendo que a abordagem da aplicação dos resultados do trabalho de Borges (2015), difere pelo modelo o qual foi aplicado para obtenção dos resultados do ACO. A análise compara apenas os valores finais de cada resultado do trabalho de Borges, o modelo de aplicação utilizado, não explorado neste trabalho.

Figura 27. Resultados de consumo de combustível do trabalho de Borges (2015)

Fonte: Borges (2015)

Pelo relatório da Figura 26, o nível de profundidade do grafo igual à 7, possui o melhor aproveitamento de combustível, igual à 4,11 LKTb. O índice médio do

consumo de combustível para todos os níveis foi de 4,295 LKTB, valores abaixo do consumo real, resultante da condução do maquinista que é de 6,19 LKTB, conforme Borges (2015).

Por fim, como análise adicional, tem-se o tempo gasto durante a viagem, o qual foi em média de 130 minutos, valor novamente abaixo dos 217 minutos da viagem real realizada pelo maquinista, conforme índice obtido em Borges (2015).

6.3.2 Análise Por Parâmetros De Entrada Na Execução Do ACO

Para a realização dos experimentos relacionando-se os parâmetros de entrada do ACO, especificados por α (α), β (β), foi necessário realizar a adequação nos valores do índice inicial de feromônio (τ_0). A necessidade deste processo está relacionada às fórmulas e equações onde este parâmetro será inserido.

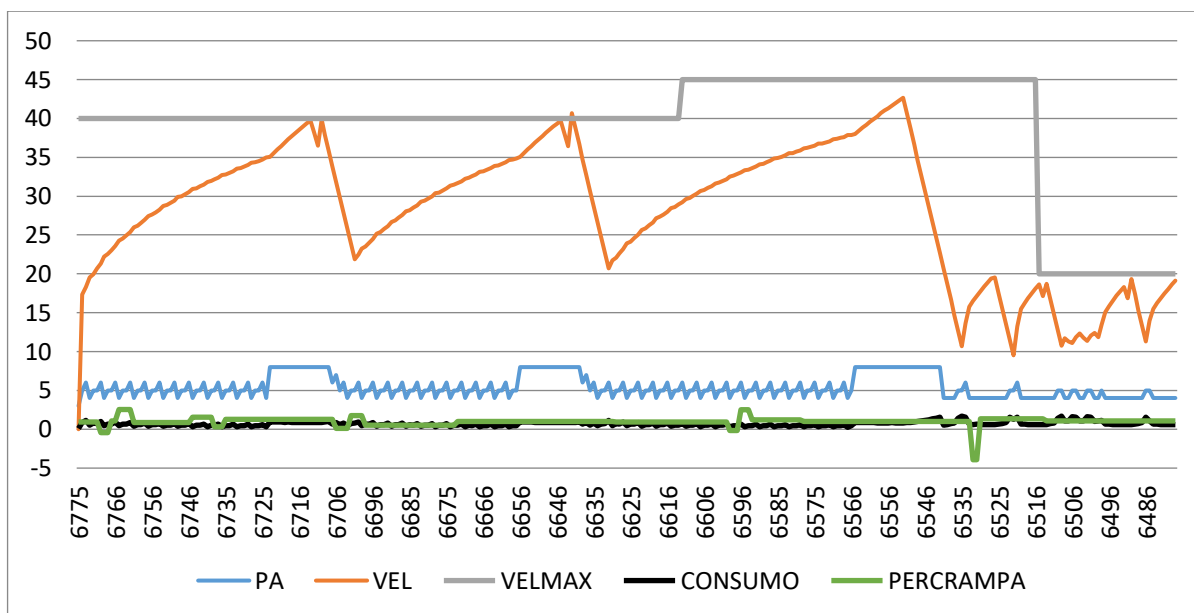
O valor inicial do feromônio é diretamente utilizado na Equação 12, Equação 13 e na Equação 14, as quais são responsáveis pela conversão do caminho escolhido, da atualização e evaporação do feromônio. Com isso, na aplicação de valores extremamente baixos para τ_0 , como os indicados por Enembreck (2009) e Ferreira (2012), resultaram em valores extremamente baixos, convergindo à cálculos próximos ou iguais à zero, durante a execução do ACO.

Portanto, foi necessária a maximização de todos os valores de inicialização do feromônio para todos os autores pesquisados na literatura, realizando assim a multiplicação de todos em 5 vezes. Este processo foi necessário para garantir o balanceamento dos valores indicados pelos autores.

Desse modo, o valor de entrada do feromônio indicado por Dorigo (1997), será multiplicado por 5, resultando em $\tau_0 = 150$, na indicação de Enembreck (2009) tem-se $\tau_0 = 2,5$, para Ferreira (2012) têm-se $\tau_0 = 4,5$, por fim para Neto & Filho (2013) teremos o valor modificado para $\tau_0 = 100$.

Na análise por parâmetro de entrada de cada autor, utilizaremos o nível que proporcionou a melhor economia de combustível, cujo nível de profundidade é igual à 7. Na Figura 28, tem-se o relatório da condução realizada utilizando o parâmetro de Enembreck (2009).

Figura 28. Dados da condução de Enembreck (2009)



Fonte: Autoria Própria

O relatório da Figura 28 foi desenvolvido considerando os primeiros quilômetros de deslocamento do trem na via (cerca de 6 quilômetros). Tal descrição foi escolhida para melhor visualização do comportamento da locomotiva à cada ponto de aceleração escolhido pelo ACO.

Em análise ao relatório da Figura 28 tem-se o comportamento gradativo do ACO, na escolha dos pontos de aceleração. Este método de escolha de pontos de aceleração com maior força está relacionado diretamente à regra de transição, cuja característica foi descrita no Capítulo 5.

O comportamento de escolha gradativa dos pontos de aceleração por ser demonstrada entre os quilômetros 6775 e 6725. Nestes pontos, o percentual de rampa a cada ponto varia entre -0.3 e 0.5, não impactando expressivamente na tomada de decisão do ACO. No entanto, entre os quilômetros 6735 e 6706, o percentual de rampa aumenta, caracterizando a necessidade de ponto de aceleração com maior força.

O comportamento do ACO está voltado diretamente a condição da via e da locomotiva, todos estes cenários contribuem para a forma de condução, e posteriormente na economia de combustível.

Analisando os parâmetros de entrada de cada autor, na problemática deste trabalho, os mesmos não impactaram na influência do consumo de combustível. Todos os parâmetros possuíram os mesmos resultados finais, de igual modo ao

apresentado pela Figura 28, como o consumo de combustível e a similaridade de condução, comparado ao do maquinista.

Neste sentido, os índices que trouxeram maior impacto na convergência dos caminhos, assim como na melhoria das soluções geradas pelo ACO, conseqüentemente no consumo de combustível gasto na viagem, foi o valor de profundidade do grafo.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos após a aplicação dos algoritmos na simulação do modal férreo. Observou-se que a profundidade do grafo foi fundamental para a obtenção de bons resultados. No próximo capítulo serão apresentadas as conclusões do trabalho.

7 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e aplicação da Otimização por Colônia de Formigas na problemática da condução do trem de carga. O sistema desenvolvido teve o foco principal a criação de plano de ações capaz de conduzir um trem de carga, e resultar na economia de combustível. Para tornar isto possível, foi necessário o estudo da funcionalidade e dos cálculos realizados pelo Simulador, os quais envolvem o cenário do modal férreo, detalhado nos trabalhos de Borges (2009 Idem. 2015). Como também, o estudo das características e aplicações do ACO na literatura, para modelá-lo de acordo com a problemática deste trabalho.

Este trabalho pretende colaborar com as pesquisas e desenvolvimentos realizados nos estudos de Borges (2009 Idem. 2015), o qual visa criar mecanismos e ferramentas que possibilitem a criação de planos de condução de trem de carga eficientes. Neste aspecto foi observado que as características da problemática de condução enquadraram-se nos critérios da otimização estudada, proporcionando assim no seu desenvolvimento e aplicação.

É importante notificar que este trabalho não possui o objetivo de aplicar ou desenvolver um sistema de gerenciamento de condução, mas sim explorar e analisar as contribuições que os algoritmos de aprendizagem podem alcançar no apoio à decisão. Este apoio pode ser utilizado principalmente à maquinistas inexperientes, utilizando o sistema como um auxiliador aos diferentes cenários do modal. Com isso, foram analisados os resultados do sistema comparando com os do maquinista para mensurarmos a qualidade das soluções geradas.

Um dos principais desafios no desenvolvimento do ACO foi a construção de uma estrutura computacional, seguindo as características do modal férreo, capaz de integrar aos mecanismos e cálculos do ACO. Para auxílio nesta construção foi pesquisado na literatura, autores que também aplicaram soluções de otimização ao modal férreo, os quais fizeram uso do grafo para representação deste problema, o qual também foi utilizado neste trabalho.

Para a construção do grafo foi necessário o estudo das características e cálculos realizados pelo ACO, para o fim de selecionar os dados que participariam, como variáveis nas fórmulas e equações do mesmo. Com a construção do grafo realizada, a ACO fez a busca pelo melhor conjunto de pontos de aceleração, baseado na profundidade (nível), deste grafo.

Nos experimentos realizados no Simulador, o ACO apresentou resultados próximos aos resultados da condução de um maquinista. Analisando o comportamento do ACO aos diferentes perfis de profundidade do grafo, foi observado que em alguns pontos de maior profundidade do grafo, maior era sua eficiência do ACO, visando a economia de combustível aplicado em toda a condução. Não foi comprovado a relação direta entre o consumo de combustível e a profundidade do grafo, estudos aprofundados podem ser realizados em trabalhos futuros analisando o comportamento do ACO à índices de maior profundidade.

Em paralelo a análise do comportamento da ACO visando a profundidade do grafo, foi concluído também que, neste trabalho, os diferentes parâmetros de entrada do ACO, não influenciaram na melhoria da conversão na busca dos caminhos pelo grafo. Este comportamento está restritamente relacionado ao valor variável: consumo de combustível.

O valor do consumo de combustível é obtido realizando os cálculos de transição de um ponto de aceleração ao outro, obtendo o custo de combustível a cada transição (cálculo realizado pelo simulador). Desse modo, cada ponto de aceleração possui uma potência, e conseqüentemente um consumo por minuto, este valor é relativamente maior de um para outro (discrepância alta). Exemplo: o ponto de aceleração igual à 1 possui o consumo por minutos igual à 0,57 por minuto, enquanto o ponto de aceleração igual à 3 consome 1,95, conforme Tabela 3.

A disparidade nos valores de consumo resulta na discrepância nos valores de probabilidade. Deste modo, mesmo que sejam utilizados parâmetros de entrada (σ , β e τ_0) diferentes, não são suficientes para ultrapassar o valor de discrepância da probabilidade calculada em cada nó do grafo. Esta análise foi concluída na realização dos experimentos, focando-se nos valores de probabilidade de cada nó, a cada nível do grafo.

A aplicação do ACO foi bem-sucedida em todas as etapas: desenvolvimento, modelagem e aplicação no modal férreo e integração ao Simulador, o qual resultou em valores menores de consumo de combustível, comparados à condução real de um maquinista.

Por fim, a funcionalidade do ACO, desenvolvida neste modal, pode contribuir para a criação de planos de viagens. No quesito monetário, tal ferramenta pode contribuir como auxiliadora aos maquinistas com menos experiência de condução, uma vez que o sistema estará preparado para gerar soluções a quaisquer

características da via, da locomotiva ou vagão. Para um maquinista iniciante, tal processo corresponde a um alto grau de complexidade, de cálculos e percepções, desse modo, um sistema de aprendizado como o apresentado neste trabalho, pode ser um auxiliador na tomada de decisão.

7.1 TRABALHOS FUTUROS

O comportamento da ACO, assim como os cálculos realizados e os resultados coletados nos experimentos indicam que novas pesquisas podem ser realizadas no ambiente estudado.

No que refere ao comportamento do ACO e sua aplicação na plataforma de Simulação do trabalho de Borges (2015), pesquisas podem ser realizadas para o fim de integrar o ACO a um sistema de aprendizado baseado em experiência. Na literatura descreve-se o Raciocínio Baseado em Casos como um modelo que compõe quatro etapas de construção, entre elas a adaptação (VON WANGENHEIM, 2008). Esta etapa é fundamentada em criar soluções baseando em experiências passadas, neste sentido, a modelagem do problema em um grafo, pode ser representada, e posteriormente aplicado a busca exploratório do ACO, para o fim de resolver esta etapa.

Duas características no desenvolvimento do ACO são a praticidade e eficiência, baseadas na integração das fórmulas e equações probabilísticas para sua solução. Estas características podem ser exploradas e estudadas nos diversos cenários, onde os mesmos são categorizados como um problema de otimização combinatória (RODRIGUES, 1996):

- Problema da Ordenação de Elemento;
- Problema da Árvore de Espalhamento Mínimo;
- Problema do Fluxo de redes.

Tais problemas se enquadram na categoria de problemas de otimização combinatória, os quais podem ser utilizados o ACO para gerar soluções eficientes e em tempo hábil.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, F. S. et al. **Problemas de roteamento de veículos aplicados no planejamento logístico do transporte escolar da cidade de Coxim-MS.**

Dissertação Universidade Estadual de Campinas, 2015.

AMANDI, Analía Adriana. **Programação de agentes orientada a objetos.** 1997.

Tese de Doutorado. Instituto de Informática da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

ANDREOTTI, A. J. N. et al. **Estudo de vantagens da utilização do modal ferroviário.** Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Palmital. 2014.

APPLEGATE, D. L., et al. ***The traveling salesman problem: a computational study.*** Princeton University Press, 2006.

ARORA, Sanjeev; BARAK, Boaz. **Computational complexity: a modern approach.** Cambridge University Press, 2009.

BARROS, W. L. et. al. Congresso de Administração da América Latina. **Transporte ferroviário de minério de ferro: um estudo de caso para redução de combustível.** Rio Grande do Norte, Natal. 2016.

BECCENERI, J. C. **Meta-heurística e Otimização Combinatória: Aplicações em Problemas Ambientais.** INPE. São Jose dos Campos. 2008.

BONABEAU, Eric; DORIGO, Marco; THERAULAZ, Guy. **Swarm intelligence: from natural to artificial systems.** Oxford university press, 1999.

BORGES, A. P. **Descoberta de Regras de Condução de Trens de Carga.** 2009. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná.

BORGES, A. P. **Uma contribuição para a geração de políticas de ações para condução de trens de carga usando raciocínio baseado em casos.** Tese de Doutorado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba. 2015.

BRINA, H. L. **Estradas de Ferro 2. Tração–Frenagem–Material Rodante–Circulação de Trens.** Rio de Janeiro, Ed. Livros Técnicos e Científicos. 1982.

BRINA, H. L. **Estradas de ferro 1. Livros Técnicos e Científicos,** Ed. Livro Técnicos e Científicos. 1983.

CASSEMIRO, Da S & DA COSTA, F. A. C. V. **Distribuição Otimizada de Locomotivas para Ganho de Eficiência Energética.** XXIV Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte da ANPET. Outro Preto. São Paulo, 2015.

CARIA, D. A. **Análise Das Causas De Falhas No Sistema De Freio Dinâmico Em Locomotivas Da Frota A.** Monografia. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2006.

CARVALHO, Marcia Braga de et al. **Aplicações de meta-heurística genética e fuzzy no sistema de colônia de formigas para o problema do caixeiro viajante.** 2007.

CARVALHO, M. **Transporte – Linha ferroviária com lastro.** Infraestrutura Urbana. Disponível em: <<http://infraestruturaurbana17.pini.com.br/solucoes-tecnicas/29/linha-ferroviaria-com-lastro-as-recomendacoes-tecnicas-para-a-292647-1.aspx/>> Acesso em: Fev de 2019.

CHAVES, A. A. **Uma Meta-Heurística Híbrida Com Busca Por Agrupamentos Aplicada A Problemas De Otimização Combinatória.** Tese de Doutorado. INPE. São José dos Campos, 2009.

COELHO, L. S. & NETO, R. F. T. **Colônia de Formigas: Uma Abordagem Promissora para Aplicações de Atribuição Quadrática e Projeto de Layout.** UFSCAR. Disponível em:

<http://www.dep.ufscar.br/admin/upload/ARTIGO_1156534584.PDF>. Acesso em: Dez. de 2018.

CORMEN, T. H. et al. Introduction to Algorithm. 3rd. ed. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts. England. London, 2009.

DA SILVA, Marcos Rafael. **UM AGENTE DELIBERATIVO APLICADO AO APOIO À CONDUÇÃO DE TRENS**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. 2011

DA CUNHA, C. B., BONASSER, U. O., & ABRAHÃO, F. T. M.. **Experimentos computacionais com heurísticas de melhorias para o problema do caixeiro viajante**. XVI Congresso da Anpet. 2002.

DE OLIVEIRA PADILHA, Alan Mateus. **Problema de Roteamento de Veículos Dinâmicos com janela de tempo Aplicado ao Atendimento de Ordens Emergenciais de uma Concessionaria de Energia Elétrica**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Maria. 2015.

DO NASCIMENTO, P. C. **Sistema de Controle de Frenagem Para Trens Metropolitanos de Tração Elétrica**. Dissertação. UFMG. Belo Horizonte, 2012

DORIGO, M. **Optimization, Learning and Natural Algorithms**. PhD thesis, Politécnico di Milano. Italian. 1992.

DORIGO, M. et al. **Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents**. IEEE *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. Part B, 26(1):29-41, 1996.

DORIGO, M. & GAMBARDILLA, L. M. **Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem**. IEEE *Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1):53-66, 1997.

DORIGO, M. & DI CARO, G. "**Ant colony optimization: a new meta-heuristic.**" *Proceedings of the 1999 congress on evolutionary computation-CEC99* (Cat. No. 99TH8406). Vol. 2. IEEE, 1999.

CORNE, D., DORIGO, M. & GLOVER, F. **New Ideas in Optimization.** Ed. McGraw-Hill. Nova Iorque, 1999.

DORIGO, L. & STÜZLE, T. **Ant Colony Optimization.** Ed. Bradford Company Scituate. United States of America. Massachusetts, 2004.

DOS SANTOS, F. S. **Diagnóstico das emissões atmosféricas em minas gerais: um estudo para as fontes fixas e veiculares.** Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). 2018.

E&E (Economia & Energia). **O setor de transportes.** Disponível em: <http://ecen.com/eee30/s_trnsp9.htm>. Acesso em: Jan de 2018.

HOWLLET, P. G., CHENG, J. PUDNEY, P. J. **Optimal Strategies for Energy-Efficient Train Control.** In: *Laiecka I., Morton B. (eds) Control Problems in Industry.* Birkäuser Boston. 1995.

JURASKA, M., and TOMAS M. **Investigation of fuel consumption of non-scheduled trains thermal traction.** *Transport 19.* Published by Vilnius Gediminas Technical University. 2004.

JENNINGS, Nick R. **Coordination techniques for distributed artificial intelligence.** Foundations of distributed artificial intelligence, p. 187-210, 1996.

KAWAJIRI, M. A. G. **Otimização do consumo em locomotivas: Uma abordagem baseada em colônias de formigas.** Relatório Final. Curitiba, 2009.

KOIDE, Rubem Matimoto. **Algoritmo de colônia de formigas aplicado à otimização de materiais compostos laminados.** Tese de Doutorado. Dissertação

(Mestrado em Engenharia)–Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

KOIDE, R. M. **Algoritmo De Colônia De Formigas Aplicado À Otimização De Materiais Compostos Laminados**. Dissertação. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

LEITE, Allan Rodrigo. **Um esquema para redução do consumo de combustível em sistemas de condução férrea baseado em otimização distribuída de restrição**. Dissertação. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba, 2009.

LOPES, H. S., RODRIGUES, L. C. A., e STEINER, M. T. A. **Meta-heurísticas em pesquisa operacional**. Ed.: OmniPax. Curitiba, 2013.

MIO DAL PAI, Leonardo Rafael. **Estudo do custo do ciclo de vida de um motor diesel de locomotiva**. 2012.

MKYONG.COM. **How to read XML file in Java – (DOM Parser)**. Disponível em: <https://www.mkyong.com/java/how-to-read-xml-file-in-java-dom-parser/>>. Acesso em: Jan de 2019.

NABAIS, R. J. S. **Manual básico de engenharia ferroviária**. Oficina de Textos. São Paulo, 2014

NETO, Rogério G. Lemos. **História do Modal Ferroviário**, 2017. Disponível em: <<http://www.estudoadministracao.com.br/ler/16-11-2014-como-fazer-citacoes-internet/>>. Acesso em: 21 de outubro de 2017.

NETO, R. F. T., & FILHO, M. G.. **Otimização por colônia de formigas para o problema de sequenciamento de tarefas em uma única máquina com terceirização permitida**. *Gestão e Produção*, 20(1), 76-86. 2013

NILSSON, N. J. **Principles of Artificial Intelligence**. Ed. Springer-Verlag. Stanford University. 1982.

NWANA, Hyacinth S. Software agents: An overview. **The knowledge engineering review**, v. 11, n. 3, p. 205-244, 1996.

OLIVEIRA, J. C. **Estrutura de Via Permanente Ferroviária e Suas Patologias**. UNIJURI (Universidade Regional do Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul). Trabalho de Conclusão de Curso. Ijuí, 2018.

OLIVEIRA, Flávio Moreira de. Inteligência artificial distribuída. **Anais da IV Escola Regional de Informática**, p. 54-71, 1996.

OLIVEIRA, I. C. **Complexidade Computacional e o Problema P vs NP**. Dissertação. UNICAMP, 2010.

PEREIRA, Fernando Silva. **Reconfiguração ótima de sistemas de distribuição de energia elétrica baseado no comportamento de colônias de formigas**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

PINHEIRO, R. G. S. et al. **Métodos exatos e heurísticos para biclusterização em grafos**. XVI CLAIO (Congresso Latino-Ibero-americano de Investigación Operativa) / SBPO (Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional). Rio de Janeiro. 2012.

RAYWARD-SMITH, et. al. **Modern Heuristic Search Methods**. Ed. Illustrated. University of Michigan, United States of America, 1996.

REIS, de Manuel A. S., LACZNSKI, Priscila S. M. **Panorama do transporte Ferroviário no Brasil – Desafios e Oportunidades**. Artigo, FGV Projetos – Infraestrutura, 25 de Agosto de 2015.

RIBEIRO, R. **Análise do impacto da teoria das redes sociais em técnicas de otimização e aprendizagem multiagente baseada em recompensas**. Tese de Doutorado. Pontifícia Universidade de Católica do Paraná. Curitiba, 2010.

RODRIGUES, Samuel Bellido. **Metaheurística Colônia de Formigas aplicada a um Problema de Roteamento de Veículos: caso da Itaipu Binacional**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, v. 40, 2008.

RODRIGUES, R. F. **Times assíncronos para resolução de problemas de otimização combinatória com múltiplas funções objetivo**. 1996. 233f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Computação, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/275997>>. Acesso em: 21 jul. 2018.

ROCHA, M. E. O. **Aplicação da Engenharia de Confiabilidade na manutenção de componentes de locomotivas**. Dissertação para Título de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia. Rio de Janeiro, 2009.

SANTOS, R. L., & LEAL, J. E. **Solução de um problema de roteirização com janelas de tempo através de um algoritmo de múltiplas colônias de formigas**. Revista *Transportes*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p.5-16, Dezembro, 2007

SOUZA, M. J. F. **Inteligência Computacional para Otimização**. Disponível em: <<http://www.decom.ufop.br/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>> Acesso em: Dez. 2018.

VON WANGENHEIM, C. G. et al. **Raciocínio Baseado em Casos**. Barueri, SP: Manole. 2008

MAXWELL. **Medidas Futuras que impactam o consumo de combustível**. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/14568/14568_9.PDF> Acesso em Out. 2019.

VIANA, G. V. R. **Meta-Heurística e Programação Paralela em Otimização Combinatória**. 1 ed. EUFC, 1998.

VITORINO, T. A. S. **Raciocínio Baseado Em Casos: Conceitos e Aplicações.**
Dissertação. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Belo Horizonte. 2009

WEISS, Gerhard (Ed.). **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence.** MIT press, 1999.