

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Marco Túlio Domingues Costa

APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO INTEIRA NA
OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE
UMA TRANSPORTADORA

Itabira

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Marco Túlio Domingues Costa

APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO INTEIRA NA
OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE
UMA TRANSPORTADORA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, da Universidade Federal de Itajubá, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Emerson José de Paiva

Itabira

2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Marco Túlio Domingues Costa

APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO INTEIRA NA
OTIMIZAÇÃO DO ROTEAMENTO DE VEÍCULOS DE
UMA TRANSPORTADORA

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr. Fátima M. S. Lima (UFMG)

Prof. Dr. Tarcísio Gonçalves de Brito (UNIFEI)

Prof. Dr. Emerson José de Paiva (Orientador)

Itabira

2019

Dedico este trabalho à Maria Clara, minha linda filha,
motivo pelo qual todos os meus objetivos de vida fazem sentido.

Agradecimentos

Agradeço à Deus pela oportunidade, pela força e pela fé que me permitiram seguir nessa jornada desafiadora mas, ao mesmo tempo, de grande valia para meu conhecimento e meu crescimento intelectual, profissional e pessoal.

À minha esposa, Patrícia Sartori, por confiar em mim e me dar forças e incentivo todas as vezes que me encontrei desestimulado ou estressado em meio ao conjunto de obrigações e desafios que me eram impostos ao longo da jornada. Seu apoio incondicional e sua confiança em minha capacidade me ajudaram a seguir mesmo quando eu mesmo cheguei a não acreditar. Estendo os agradecimentos aos seus pais que torceram por mim.

Aos meus pais e irmãos que, em amplos aspectos, são meus exemplos de vida e que também viram em mim um exemplo de dedicação para chegar a um determinado objetivo, que hoje é este que agora alcanço.

À empresa Correia Martins, sobretudo na figura do Edson Correia Júnior, pessoa de índole, humor e coragem ímpar, por terem me permitido usar a empresa como foco para o desenvolvimento do estudo apresentado neste trabalho, além de não terem medido esforços para me atualizar e me entregar às informações necessárias para que o trabalho pudesse ser adequadamente elaborado. Este trabalho só foi possível pelo empenho também colocado por esta empresa.

Aos amigos Rubem Vasconcelos e Bráulio Barcelos pelas horas de conversas e discussões que tivemos sobre problemas de roteamento de veículos. A visão de diferentes pontos me permitiu enxergar possibilidades e ampliar meus horizontes. A dedicação de um amigo é uma grande dádiva que acredito que poucos possuem.

E ao Dr. Emerson José de Paiva, grande professor, dedicado mestre, exemplo de doutor, e o importante orientador que ajudou a me conduzir para os resultados que apresento aqui. Estendo este agradecimento a todos os professores do Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção da UNIFEI, pela formação e conhecimento que cada um me possibilitou.

“Fiz bandeira destes trapos, devorei concreto e asfalto.”

Humberto Gessinger

Resumo

A evolução das organizações e o acirramento da concorrência empresarial, também presentes no campo da logística, impõem a necessidade das organizações aperfeiçoarem seus processos. Este trabalho apresenta o aprimoramento do processo logístico de uma transportadora pela proposição de uma nova variante para o problema de roteamento de veículos, denominado roteamento de veículo com restrição de duração e depósito de apoio (SD-DCVRP). Esta variante pode ser descrita como um VRP com dois depósitos, sendo um com maior importância, a partir do qual partem todas as entregas, que possui a característica de ser periférico, e um segundo depósito que tem localização centralizada e atua como apoio ao primeiro. O objetivo do SD-DCVRP é minimizar o tempo total de percurso e reduzir o número de veículos usados. Para esta variante, é proposto um modelo matemático genérico a fim de resolver este tipo de problema considerando um número pequeno de vértices. Aplicando-se o método da simulação de Monte Carlo alguns cenários foram desenvolvidos, os quais foram otimizados a partir de modelagens matemáticas de programação inteira. Os resultados obtidos para os diversos cenários gerados apontam para uma boa adequação da proposta.

Palavras-chaves: Logística. Problema de roteamento de veículos. Depósito de apoio. Monte Carlo.

Abstract

The organizations evolutions and the intensification of business competition, also present in the field logistics fields, impose the need for organizations to perfect their processes. This work presents the improvement of the logistic process of a carrier by proposing a new variant for the vehicle routing problem, the Vehicles Routing Problem with Support Deposit and Duration Constraints (SD-DCVRP). This variant can be described as a VRP with two depots, one most important, from which all deliveries start, but which has the characteristic of being peripheral, and a second deposit that has a centralized location and acts as a support to the first. The purpose of the SD-DCVRP is minimize total travel time and reduce the number of vehicles used. For this variant, a generic mathematical model is proposed in order to solve this type of problem considering a small number of vertices. For this, the scenarios evaluated were simulated using the Monte Carlo method, the problem was solved by exact computational methods and presented satisfactory answers.

Keywords: Logistics. Vehicles Routing Problem. Support Deposit. Monte Carlo.

Lista de figuras

Figura 1 - Variação acumulada do PIB brasileiro e o do setor de transporte – 1996 a 2016 (%).....	26
Figura 2 – Comparativo de malha rodoviária pavimentada no ano de 2016 (em km/1.000 km ²).....	28
Figura 3 – Condição de infraestruturas das estradas pavimentadas brasileiras	28
Figura 4 – Rodovias de acesso às principais rotas atendidas.....	45
Figura 5 – Localização das cidades da Rota Leste	47
Figura 6 – Grafo Geral da Rota Leste.....	48
Figura 7 – Representação gráfica da resolução do cenário 2.....	68
Figura 8 – Representação gráfica da resolução do cenário 1.....	68
Figura 9 – Representação gráfica da resolução do cenário 4.....	69
Figura 10 – Representação gráfica da resolução do cenário 11.....	71
Figura 11 – Representação gráfica da resolução do cenário 12.....	71
Figura 12 – Painel de entrada do programa de roteamento SCM para Correia Martins	72
Figura 13 – Painel de roteamento do programa SCM para Correia Martins	73

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais ocupações do transporte rodoviário de cargas, Brasil - 2015 (%)	24
Tabela 2 – Matriz de distâncias entre vértices do grafo para o Cenário 4 – Tempo em min.	65
Tabela 3 – Conjunto de resultados obtidos para o primeiro grupo de cenários	67
Tabela 4 – Conjunto de resultados obtidos para o segundo grupo de cenários	70

Lista de Quadros

Quadro 1 – Técnicas adotadas no roteamento de veículos	38
Quadro 2 – Exemplo da simulação de um cenário.....	64

Lista de Abreviaturas e Siglas

2E-RLP	<i>Two-Echelon Time-Constrained Vehicle Routing Problem</i>
AD	Antônio Dias
AMPL	<i>A Mathematical Programming Language</i>
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
AV	Alvinópolis
BC	Barão de Cocais
BH	Belo Horizonte
CA	Catas Altas
CD	Centro de distribuição
CF	Coronel Fabriciano
CluVRP	<i>Clustered Vehicle-Routing Problem</i>
CNT	Confederação Nacional dos Transportes
CPLEX	<i>C programming language</i>
CT	Caeté
CumVRP-LD	<i>Cumulative Vehicle Routing Problems with Limited Duration</i>
Cu-VRP	<i>Cumulative Vehicle Routing Problem</i>
CVPSD	<i>Vehicle Routing Problem with Opportunity Restriction Stochastic Demand</i>
CVRP	<i>Capacitated Vehicle Routing Problem</i>
GAP	<i>Generalized Allocation Problem</i>
GLPK	<i>GNU Linear Programming Kit</i>
ILS	<i>Iterated local search</i>
IT	Itabira
IP	Ipatinga
JM	João Monlevade
LFVRP	<i>Line-haul Feeder Vehicle Routing Problem</i>
LOSI	Laboratório de Otimização e Simulação
MCGRPTW	<i>Mixed Capacity Routing Problem with Time Window</i>
MILP	<i>Mixed Integer Linear Programming</i>
MTVRPTW-LD	<i>Multi-Trip Vehicle Routing Problem with Time Window Limited Duration</i>
NE	Nova Era
NU	Nova União
PIB	Produto Interno Bruto
PRVAFHL	<i>Asymmetric Vehicle Routing Problem with Heterogeneous Limited Fleet</i>

PRVLD	Problema de Roteamento de Veículos com Limite de Duração
PTSPD	<i>Probabilistic Traveling Salesman Problem with Deadlines</i>
PVRP	<i>Periodics Vehicle Routing Problem</i>
RMBH	Região Metropolitana de Belo Horizonte
RP	Rio Piracicaba
RRVRP	<i>rollon-rolloff vehicle routing problem</i>
SCM	Sistema de Controle de Movimentações
SB	Sabará
SD-DCVRP	<i>Vehicles Routing Problem with Support Deposit and Duration Constraints</i>
SD	São Domingos do Prata
SG	São Gonçalo do Rio Abaixo
SCIP	<i>Scipoptsuite</i>
SP	Santana do Paraíso
TM	Timóteo
Unifei	Universidade Federal de Itajubá
VBA	<i>Visual Basic Applications</i>
VRP	<i>Vehicle Routing Problem</i>
VRPB	<i>Vehicle Routing Problem with Backhaul</i>
VRPCD	<i>Vehicle Routing Problem with Cross-Docking</i>
VRPSD-DC	<i>Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints</i>
VRPPD	<i>Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery</i>
VRPSPD	<i>Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickups and Deliveries</i>
VRPTW	<i>Vehicle Routing Problem with Time Window</i>

Lista de Símbolos

a	Percurso entre uma cidade i e uma cidade j (aresta) também representada por (i, j)
μ	Tempo
b	Tempo de transbordo ou tempo de descarga
n	Clientes
k	Veículos
l	Centros de distribuição
h	Qualquer membro do conjunto de localidades
e	Entregas
D	Duração máxima do tempo de entrega
X	Variável de decisão / Variável aleatória
ϵ	Pertence
μ_{ij}	Tempo consumido no trajeto de determinada aresta
l_p	CD principal
l_a	CD de apoio
G	Grafo
S	Conjunto de Cidades (Clientes)
L	Conjunto de Centros de Distribuição
H	Conjunto de Localidades
A	Conjunto de Arestas
K	Conjunto de Veículos
E	Conjunto de entregas
b_j	Tempo de transbordo no cliente
b_l	Tempo de transbordo no depósito de apoio
$r(S)$	Número mínimo de veículos para atender ao conjunto de clientes
\subseteq	Subconjunto
\geq	Maior ou igual a
\leq	Menor ou igual a
\neq	Diferente
\forall	Para todo
C_{ij}	Custo de ir do vértice i para o vértice j ;

X_{ij}	Variável de decisão;
v	Conjunto de vértices (localidades) que compõem o grafo;
γ	Número mínimo de veículos que percorrem a rota S;
\subset	Contido
\setminus	Menos / sem
Σ	Somatório

Sumário

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivo geral	18
1.2 Objetivos Específicos	18
1.3 Justificativa	18
2. A LOGÍSTICA E A OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE	20
2.1 Processos logísticos	20
2.2 Características do modal rodoviário	21
2.3 Competitividade Logística	25
2.4 Desafios e problemas do transporte e da logística	27
2.4.1 Desafios estruturais do transporte	27
2.4.2 Problemas na gestão do transporte e de rotas.....	29
2.5 Simulação e otimização no transporte	31
2.5.1 Modelos de simulação.....	31
2.5.1.1 <i>Simulação de Monte Carlo</i>	32
2.5.2 Algoritmos de otimização	33
2.5.3 Problemas de roteamento de veículos e suas derivações	35
2.5.3.1 <i>Problemas de roteamento de veículos com múltiplos depósitos</i>	36
3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	43
3.1 Classificação e delineamento da pesquisa	43
3.2 Caracterização da organização	44
3.3 Definição da variante de VRP para o estudo	49
3.4 Aplicação dos métodos de simulação e otimização	50
4. ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS	55
4.1 Classificação do problema de roteamento	55
4.2 Definição do modelo matemático para o problema	55
4.2.1 Modelo matemático padrão para o SD-DCVRP.....	56
4.2.2 Adaptações do modelo matemático convencional para VRP	59
4.2.3 Escolha do modelo matemático a ser empregado	62
4.3 Simulação de cenários por Monte Carlo	64
4.4 Resultados obtidos por aplicação de técnicas computacionais	66
4.5 Proposição de interface para a ferramenta de roteamento	72
5. CONCLUSÃO	74
5.1 Propostas de trabalhos futuros	77
REFERÊNCIAS	78
APÊNDICES	83

1.INTRODUÇÃO

O Brasil é um país continental com grande fluxo comercial entre suas regiões e que carece de modais logísticos variados bem implementados. Há no país uma exploração significativa de sua malha viária, sendo, atualmente, o modal rodoviário o principal meio de movimentação de cargas, significando que o ramo de transporte e logística se mantém como um mercado com grande possibilidade de exploração.

Compreende-se que o planejamento logístico extrapola sua importância no atendimento das instituições e de seus clientes, servindo como fator diferencial no mercado, tornando as decisões relacionadas a essa área como questões estratégicas.

A própria necessidade de informação por parte dos consumidores, sobretudo em função do dinamismo e evolução dos produtos ofertados no mercado, requer do sistema logístico um planejamento bem realizado, permitindo ao consumidor deter posse do produto desejado, com as características almejadas e no momento oportuno (NOVAES, 2015).

O planejamento de uma rede de suprimentos é um fator fundamental para o bom desempenho organizacional. Conforme explicitam Slack, Chambers e Johnston (2009), a competitividade organizacional está ligada à toda rede de suprimentos que envolve, desde os fornecedores dos fornecedores, até os clientes dos clientes.

As empresas incumbidas da realização das movimentações de materiais, passam a ser, então, a cada vez, mais exigidas em seus processos, seja em função dos custos gerados, seja pelo cumprimento dos prazos determinados, devendo, ainda, serem, flexíveis nestes quesitos.

Entendendo-se, pois, a importância estratégica da logística para as organizações, compreende-se que a movimentação de materiais, e, conseqüentemente, o fluxo de informação gerado, devem ser estudados e trabalhados no sentido de se identificarem as necessidades mais latentes dos clientes em relação a essas movimentações, e os pontos em que há necessidade de melhorias na logística organizacional, capazes de tornar a organização mais competitiva, utilizando-se, para tanto, as ferramentas disponíveis e as técnicas mais apropriadas de tomadas de decisão.

Assim, para que se possam compreender as especificidades do setor de transporte de materiais, bem como, para possibilitar as proposições de melhorias no processo logístico, de modo a atender os requisitos de competitividade descritos, esta pesquisa traz uma série de discussões e proposições relativas a um problema logístico específico: roteirização de veículos com restrição de duração e depósito de apoio. A grande dificuldade na tomada de

decisão relacionada ao modelo identificado reside no fato de que em determinadas ocasiões o modelo se comporta como um VRP com restrições de duração e em outras um VRP com múltiplos depósitos e restrição de duração e, em ambas as situações, deve-se considerar diferente nível de importância entre os depósitos. Para tanto, tentando-se conduzir ao entendimento dessas discussões e proposições, esse trabalho apresentará cinco capítulos, a saber: O primeiro deles é esta própria introdução, que, além de apresentar a ideia e a proposta do estudo, identifica o problema de pesquisa, os objetivos, geral e específicos, e a justificativa pela qual a pesquisa proposta se apresenta relevante em um contexto específico da organização objeto de estudo.

Na sequência é apresentada uma revisão de bibliografia que permitirá a fundamentação teórica necessária para a condução da pesquisa, segundo a metodologia considerada adequada. Nesse capítulo são discutidos de forma ampla os conceitos ligados à logística e à movimentação de materiais; os mecanismos de simulação e pesquisa operacional empregados para solução de problemas neste campo de estudo, iniciando-se sempre de forma genérica e com conceituações mais amplas para, em uma análise mais específica, definir os conceitos e discussões que conduzam até a apresentação de informações pertinentes à proposta da pesquisa. Desse modo, é conceituado o processo logístico; são apresentados os tipos de modais logísticos comumente empregados no país com uma ênfase no modal rodoviário, uma vez que esta é a área que se pretende explorar; são discutidos os tipos de problemas de transporte e, ao final do capítulo, discutem-se os métodos de simulação e otimização que podem ser empregados para a resolução dos problemas de roteirização.

O terceiro capítulo descreve as metodologias utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa, iniciando-se com a caracterização da organização na qual o estudo foi realizado, apresentando-se aspectos como localização e tipos de atividades logísticas desenvolvidas. A forma como se conduziu a aplicação dos métodos de simulação, a execução da construção dos modelos matemáticos e a execução dos algoritmos de otimização para os problemas de roteirização identificados, foram explorados na sequência.

No quarto capítulo, embasado pelos métodos descritos, são apresentados os principais resultados alcançados na pesquisa proposta e as soluções mais atrativas para aplicação pela organização estudada. É também neste capítulo que são apresentadas as respostas ao problema de pesquisa e aos objetivos específicos traçados para o projeto.

Por fim, o quinto capítulo dessa dissertação, fecha as discussões e conceituações apresentadas ao longo da pesquisa, apresenta conclusões obtidas para o estudo, faz algumas considerações pertinentes às respostas obtidas no trabalho, além de apresentar proposições de

complementação da pesquisa e de novos trabalhos possíveis dentro dessa mesma linha.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver, em planilha eletrônica, um modelo matemático de otimização capaz de solucionar problemas de roteirização de veículos de uma empresa de transporte e logística, considerando-se cenários simulados aleatoriamente.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar as diversas variáveis existentes nos processos de movimentação de materiais da empresa, indicando o problema de roteamento característico da organização.
- Aplicar o método determinístico da simulação de Monte Carlo, na inferência probabilística de variações das movimentações por intervalos temporais previamente determinados, a fim de gerar cenários possíveis para os testes de roteamento;
- Gerar o modelo matemático apropriado para o algoritmo ou programa computacional utilizado para intervenção do planejamento e programação das movimentações de materiais da empresa;
- Submeter os cenários simulados ao determinado modelo para a otimização de roteamento de veículos, segundo suas características específicas;
- Apresentar alternativa viável, técnica e economicamente, para implementação dos métodos de programação na empresa alvo do estudo.

1.3 Justificativa

A justificativa para a realização desta pesquisa, reside no viés da competitividade organizacional possibilitada pelo aprimoramento logístico, tanto por parte da transportadora estudada em relação a seus concorrentes, como a competitividade por parte dos clientes dessa transportadora, uma vez que, a partir do roteamento, pode-se alcançar o atendimento desses clientes em prazos menores do que os praticados quando as rotas são definidas empiricamente.

A capacidade do operador logístico em atender às necessidades de certo cliente são determinantes às estratégias organizacionais das empresas que, conforme expõem Slack, Chambers e Johnston (2009) explicam à integralização vertical, como àquela em que a própria empresa é responsável por todos os processos, e a terceirização, pautadas na aptidão do terceiro em cumprir os objetivos de desempenho da qualidade, rapidez, confiabilidade,

flexibilidade e custo.

Atualmente, a terceirização dos serviços logísticos tem se apresentado mais proeminente, movimentando centenas de bilhões de dólares e atingindo um crescimento de 43% no mercado latino-americano entre 2010 e 2012 (NOVAES, 2015).

Por outro lado, o próprio fator de competitividade entre as empresas de logística envolve sua capacidade de gestão em relação à de seus concorrentes, sobretudo no momento atual em que novas tecnologias utilizadas nos processos de roteirização tem influenciado a logística industrial. Conforme destaca Novaes (2015), ao mesmo tempo em que a indústria se reinventou, substituindo a produção em massa, por meios de produção ágeis e, ao mesmo tempo, flexíveis, também evoluiu a distribuição de materiais, com observação e integração mais profunda entre os membros da cadeia de suprimentos.

O número de organizações ligadas ao ramo logístico corroboram com tal afirmativa, principalmente àquelas ligadas ao transporte rodoviário que, conforme informação do Portal Brasil (2014), a ANTT registrou quase quinhentas mil empresas desse modal no Brasil.

Sendo assim, o que torna uma empresa da área logística competitiva passa pela capacidade da mesma em atender de maneira flexível e prontamente, mantendo regularidade na qualidade da movimentação dos materiais. E para que isso seja possível, o planejamento das operações torna-se de importância estratégica para essas organizações.

Atualmente, tanto a simulação como a pesquisa operacional são ferramentas fundamentais utilizadas no apoio e na realização do planejamento logístico das organizações. Por isso, compreende-se que, ao entender as especificidades de cada empresa do ramo, tais ferramentas precisam ser adaptadas para atender aos seus objetivos estratégicos.

2.A LOGÍSTICA E A OTIMIZAÇÃO NO TRANSPORTE

A compreensão da logística e da necessidade de aprimorar seus processos são requisitos fundamentais para o fator de competitividade entre as organizações deste setor. Faz-se necessário, pois, compreender qual contexto no qual a logística se insere, no cenário brasileiro, apresentando uma reflexão acerca de suas virtudes, problemas e/ou desafios.

Por fim, na tentativa de contribuir para a resolução de alguns dos problemas/desafios identificados, são apresentados algumas das principais ferramentas disponíveis na literatura, além dos algoritmos de otimização já propostos nas diversas pesquisas já publicadas.

2.1 Processos Logísticos

Numa definição geral, a logística é formada pela união das tarefas ligadas à movimentação de materiais, bem como dos processos de armazenamento necessárias para promover maior facilidade no fluxo dos mesmos. Isto implica que toda movimentação, do produtor ao cliente final, passando pelos intermediários, estão envolvidos nos processos logísticos (CHIAVENATO, 2008).

O processo logístico é definido por Rosa (2012) como a alocação adequada do produto, considerando aspectos amplos de custo, prazo, quantidades, materiais e documentos. O autor explica, ainda, que a gestão logística envolve, para um mesmo produto, atividades de transporte, armazenagem e estoque, entre outras atividades administrativas necessárias para gestão dos materiais, desde sua produção até o cliente final, estendendo-se às atividades de serviços, chamada de logística de serviços, e ao fluxo oposto de materiais, chamada de logística reversa.

Embora seja uma parte fundamental dos processos organizacionais, por muito tempo as atividades logísticas foram tidas, apenas, como um ponto de apoio às atividades de manufatura e entendia-se que não agregavam valor à produção, sendo visto, principalmente, como de atuação reativa ou secundária (NOVAES, 2015).

Hoje, é entendida não só como uma área estratégica, como se compreende a necessidade de que o processo de gestão se estenda entre os fornecedores e os clientes, na chamada gestão da cadeia de suprimentos. Em uma definição mais abrangente, gestão da cadeia de suprimentos nada mais é que, segundo Slack, Chambers e Johnston (2009, p. 389), o gerenciamento da relação de interdependência das organizações, tanto no sentido macro, considerando todos os envolvidos simultaneamente, como no sentido restrito das ligações

específicas entre dois entes da cadeia, que ao final agregam valor ao cliente na ponta desta cadeia. Os autores destacam ainda que, somente com a gestão desta cadeia, haverá o cumprimento dos objetivos de desempenho organizacional. Tal raciocínio é confirmado por Colavite e Konishi (2015), quando afirmam que a ação dos gestores na articulação logística definirá as possibilidades de sucesso, sobretudo no que diz respeito à redução dos custos operacionais e da satisfação gerada ao consumidor.

Segundo Novaes (2015), a gestão da cadeia de suprimentos envolve o gerenciamento dos materiais durante uma sequência de atividades que vão desde a seleção e aquisição de suprimentos, passando pelos processos de manufatura e distribuição física dos produtos, até as atividades de varejo, possuindo, ainda, como parte fundamental a atividade de transporte, envolvida em várias etapas da cadeia.

É perceptível, enfim, que a logística possui capacidade para agregar valor ao processo e ao produto desde que haja compreensão, pelos tomadores de decisão, e que se aplique o processo de gestão logística na empresa e em toda a cadeia em suprimentos que lhe infere ou dela sofre influência.

Contudo, o processo de gestão logística exige o conhecimento amplo, não apenas do negócio e seus clientes, mas também das possibilidades de transporte em si. Conforme destacam Wanke e Fleury (2017), dentro dos aspectos cruciais no processo de gestão logística, observando tanto aspectos de custos como da relação dos serviços realizados, está a escolha do modal empregado para a movimentação de cargas.

No Brasil, por sua longa extensão e diferentes recursos naturais, diversos tipos de movimentações são exploradas, existindo exploração logística nos modais aeroviários, ferroviários, aquaviários (fluvial e marítimo), dutoviário e rodoviário, sendo o último, segundo o atlas do transporte da CNT (2006), responsável por 96,2% do total de passageiros e 61,8% das cargas movimentadas no país.

Ampliando um pouco mais a reflexão das características e desafios relacionados ao modal rodoviário, foco dado para a aplicação prática deste trabalho, este tema merecerá uma breve discussão a seguir.

2.2 Características do modal rodoviário

Para Bertaglia (2003), o modal rodoviário pode ser considerado o modelo de transporte autosuficiente, já que variados tipos de cargas podem ser transportadas por rodovias independentemente da distância que precisa ser percorrida Além disso, quando

empregados sistemas multimodais, na maioria das vezes é o meio utilizado para realizar as conexões. Tudo isso faz do transporte rodoviário o principal modal de escoamento logístico na maioria dos países.

No Brasil não é diferente. A malha rodoviária é a principal referência de infraestrutura de apoio à logística no país. É o único modal que consegue alcançar qualquer localização no território brasileiro. O que nos leva a compreender o modal rodoviário como referência no transporte de cargas no Brasil (CNT, 2017; NOVAES, 2015).

Outro motivo que faz do transporte rodoviário mais acessível e preferido, diz respeito à incapacidade ou capacidade limitada dos demais modais no país. O sistema ferroviário possui uma malha restrita e dentre as malhas disponíveis não existe a integração efetiva entre elas. No transporte marítimo também há restrição na disponibilidade. O transporte dutoviário é tão específico que seu interesse é altamente restrito (NOVAES, 2015).

Além disso, por facilitar o atendimento dos clientes no ponto final necessário, uma vez que o carregamento e descarregamento não exige uma plataforma específica como outros modais, o transporte por rodovias se mostra mais flexível, sendo essas vantagens consideráveis em relação aos demais meios de movimentação de cargas. (CNT, 2017).

Em relação às características específicas deste tipo de modal, podem-se destacar, segundo Wanke e Fleury (2017, pag. 413):

- a) Em geral, só perde em velocidade de transporte para o modal aéreo, sendo considerado mais rápido que os demais. Porém, dependem significativamente da condição da via;
- b) A “variabilidade no tempo de entrega”, também chamada de consistência, é mediano e, também, um fator que depende do “estado de conservação das vias”;
- c) Possui a melhor disponibilidade, podendo chegar aos mais diversos locais e sendo quase independente em relação aos demais modais;
- d) No quesito frequência, só perde para o modal dutoviário (que opera 24 horas por dia), sendo melhor aproveitado que todos os demais modais;
- e) Quando se tratam de custos fixos, são considerados baixos para os transportadores, uma vez que a disponibilização e manutenção das rodovias, em geral, estão a cargo do estado;
- f) Possui custos variáveis (àqueles necessários a dar giro às atividades) médios em comparação aos demais modais, sendo, em geral, custos oriundos basicamente de manutenção da frota e abastecimento nas corridas.

Outra característica importante é à forma de exploração do transporte rodoviário,

atendendo, tanto o transporte de passageiros, como a movimentação de mercadorias em geral.

No que diz respeito ao transporte de passageiros, o modelo rodoviário permite amplo acesso à população, seja intermunicipal ou interestadual, cobrindo a maior parte do país. Além disso, permite aos passageiros preços estáveis, regularidade e flexibilidade de rotas e horários e baixo custo em distâncias pequenas, sendo, por tudo isso, o meio de movimentação mais utilizado no Brasil (CNT, 2017).

Já em relação ao transporte de cargas, Ballou (2011) explica que é o modelo de modal que permite maior conveniência nas atividades de carregamento e descarregamento e na facilidade das entregas, embora cada dispositivo de transporte (veículos utilizados) possuam uma limitação muito mais significativa de volumes para alguns produtos, quando comparado aos demais modais.

Dessa maneira, compreende-se que a utilização do transporte rodoviário torna-se mais apropriada em situações cujo material transportado seja perecível ou que possuam significativo valor, desde que possuam baixo ou médio peso e envolvam curtas ou moderadas distâncias. Nestas situações, a utilização desse modal permitirá uma confiabilidade elevada, tanto para os prazos, como para eventuais variações de volumes carregados (CNT, 2017).

Além disso, o transporte rodoviário facilita a operacionalização do método *Less than truck load* ou carga fracionada, que é aquela movimentação em que os veículos de transporte podem embarcar mercadorias de mais de uma origem e de diferentes organizações e que utilizam, para tanto, uma estrutura que facilite sua operação, como a disposição de centros de distribuições ou terminais de apoio (NOVAES, 2015).

Este método se difere das movimentações de lotação completa justamente pelo fato de que, em boa parte do tempo de movimentação, não estão com plena capacidade. Na lotação completa a movimentação ocorre com o veículo sempre completo, sendo um método, muitas vezes, privilegiado por gerar economia de escala no transporte. Ainda assim, muitas organizações de logística, ligadas ao transporte rodoviário, mantêm suas operações, considerando a adoção de carga fracionada como mecanismo de atender a um maior volume de clientes.

Entretanto, para que seja garantido o ganho produtivo na utilização do modelo rodoviário de transporte de cargas deve-se considerar, segundo Valente *et al* (2008), fatores como técnicas de carga e descarga, a distribuição de cargas nos veículos e os métodos de roteirização adequados. O conjunto de decisões acerca desses fatores contribuem para que o modelo rodoviário seja mais interessante em boa parte das necessidades de transporte.

Além das vantagens já citadas, deve-se destacar, ainda, a empregabilidade no setor

de transporte rodoviário em nosso país que, segundo a CNT (2017), foi responsável por empregar quase 70% dos profissionais envolvidos com transporte e logística no Brasil, no ano de 2015. A relação dos profissionais empregados somente na área de movimentação rodoviária de cargas no Brasil em 2015 é representada pela Tab.1.

Tabela 1 - Principais ocupações do transporte rodoviário de cargas no Brasil no 2015

Ocupações	Número de vínculos	Participação (%)	Participação (%) por tamanho do estabelecimento			
			Micro	Pequeno	Médio	Grande
Motoristas de veículos de carga em geral	354.620	38,8	50,6	37,7	34,0	34,1
Trabalhadores de carga e descarga	117.622	12,9	7,2	14,0	16,4	14,1
Escriturários em geral, agentes, assistentes e auxiliares administrativos	87.661	9,6	10,2	9,7	9,5	9,1
Motoristas de veículos de pequeno e médio portes	42.699	4,7	6,8	4,7	3,8	3,5
Escriturários de apoio à produção	28.897	3,2	1,1	3,3	4,4	3,9
Almoxarifes e armazenistas	18.121	2,0	0,7	2,0	2,2	2,7
Vendedores ou demonstradores em lojas	14.615	1,6	1,7	2,0	1,6	1,2
Trabalhadores no serviço de manutenção de edifícios	14.247	1,6	1,2	1,3	1,3	2,2
Técnicos em transportes rodoviários	12.458	1,4	0,7	1,3	1,7	1,8
Técnicos em transportes intermodais	12.223	1,3	0,8	1,2	1,6	1,7
Outras ocupações	209.729	23,0	19,0	22,8	23,5	25,7
Total de ocupações	912.892	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: CNT (2017)

Obviamente, a importância do setor e a relevância em relação aos demais modais é também financeira. A Própria Confederação Nacional do Transporte apresentou, em seu

estudo sobre o transporte rodoviário de 2017, dados do IBGE apontando o modal rodoviário como com índice representativo de 55,2% de todo o PIB relacionado ao transporte no ano de 2014, além de representar 12,7% do PIB total de serviços (excluindo o setor financeiro), sendo preponderante para o volume de renda gerada no país naquele ano (CNT, 2017).

Os diversos fatores apresentados ao longo desta seção, sobretudo pelo vasto embasamento trazidos pelos autores, corroboram para a ideia de que há relevante importância do setor de transporte, sobretudo o rodoviário, em relação à economia do país, trazendo à tona o aspecto de competitividade no setor, fato discutido na seção seguinte.

2.3 Competitividade Logística

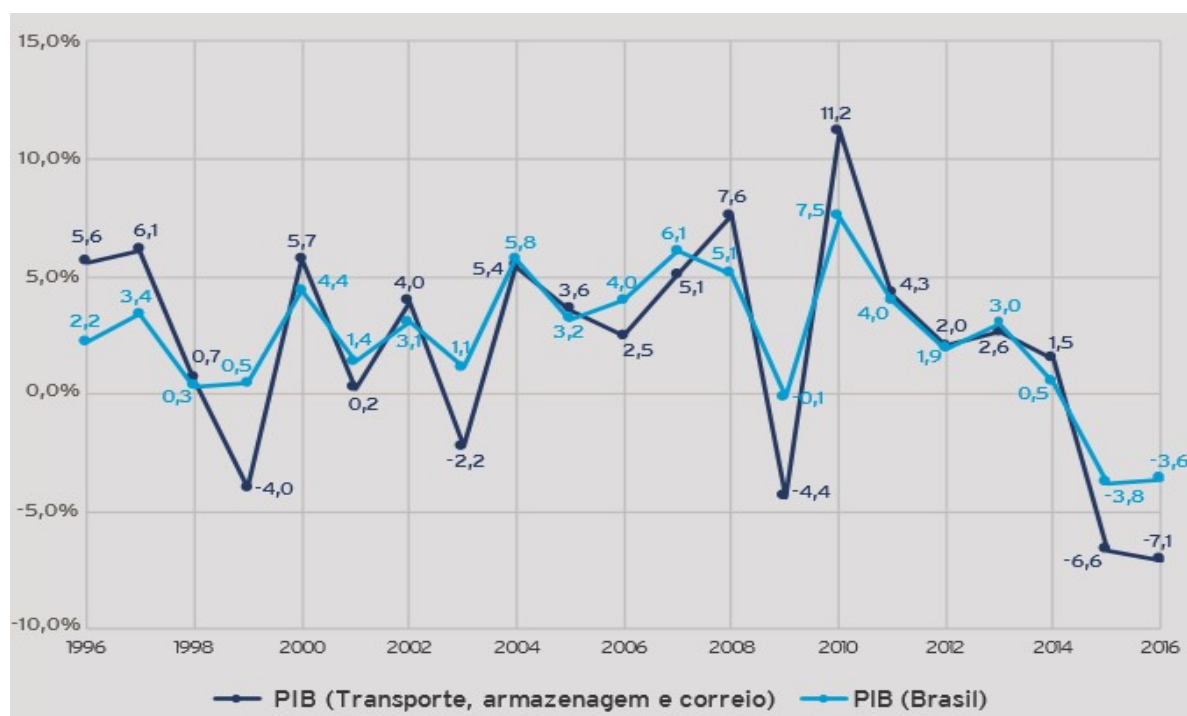
Ser competitivo é possuir capacidade de concorrer com as demais organizações ou instituições de um determinado setor ou em um determinado conjunto de frentes comerciais.

Ballou (2011) infere que a importância do setor de transporte na economia de uma nação pode ser facilmente observável quando se compara um país desenvolvido a outro ainda em desenvolvimento. As falhas no transporte podem dificultar a comercialização para além do perímetro produtivo, sendo necessárias condições que garantam economias de escala, redução do preço e, conseqüentemente, maior competitividade.

Neste sentido, Wanke e Fleury (2017) destaca o cenário contraditório existente no Brasil, em que, de um lado, se tem o investimento e aprimoramento por parte das organizações desta área, contrastando com os diversos empecilhos existentes na estrutura do transporte, que acabam por comprometer, tanto estas empresas, como também, o próprio crescimento sócio-econômico nacional.

De fato, a atividade de transporte mostra-se tão importante para a nação que, conforme aponta a CNT (2017), a variabilidade do PIB brasileiro está diretamente relacionadas às altas e baixas da movimentação financeira do setor de logística no país, gerando impacto direto em todos os setores da economia. A Fig. 1 apresenta um comparativo do PIB brasileiro e do setor de transporte entre a metade final da década de 90 e a metade inicial da década passada, um intervalo de 20 anos.

Figura 1 - Variação acumulada do PIB brasileiro e o do setor de transporte – 1996 a 2016 (%)



Fonte: CNT (2017)

A variação do PIB nacional se apresenta como um reflexo da variação ocorrida no setor de transporte entre os anos de 1996 e 2016, ficando visível que os períodos de grande avanço financeiro no setor, como em 2008 e 2010, foram, também, observados quanto ao PIB do Brasil, assim como os períodos de grandes quedas do PIB nacional se espelham à queda de rendimento do setor de transportes. O detalhe crucial apresentado no gráfico, é que a maior redução ocorreu nos últimos dois anos de referência.

Quedas de rendimentos significativas como a demonstrada, impactam diretamente todas as organizações imediatamente envolvidas no setor de transportes. Desse modo, a competitividade pode se tornar ainda mais acirrada entre as organizações que prestam serviços logísticos. Razollini Filho (2011) descreve que há, para tanto, um conjunto de esforços que permitem diminuir os recursos financeiros despendidos, amplia a exatidão dos processos, além de garantir maior agilidade na entrega para garantir o aumento do desempenho e da lucratividade da organização.

Entre esse conjunto de esforços capaz de propiciar o aumento da produtividade estão o planejamento das atividades de transporte, o direcionamento de veículos apropriados e em adequada situação de manutenção, a realização apropriada do carreto, aplicação de novas técnicas para o transbordo, além do uso de técnicas e tecnologias apropriadas de desenvolvimento logístico, que permitem que haja racionalização dos dispêndios,

principalmente na movimentação de cargas rodoviárias (VALENTE *et al*, 2008).

Embasado pelas pontuações dos diversos autores citados, compreende-se que a competitividade reside em fatores diversos da logística, influenciam significativamente funções econômicas de uma nação e que são necessárias ações e decisões para solução de problemas, redução de custos e garantia da qualidade nos processos logísticos.

A competitividade logística para as empresas que realizam a movimentação de cargas no país passa, então, necessariamente pela solução de problemas específicos desta área. Tais problemas são discutidos na seção a seguir.

2.4 Desafios e problemas do transporte e da logística

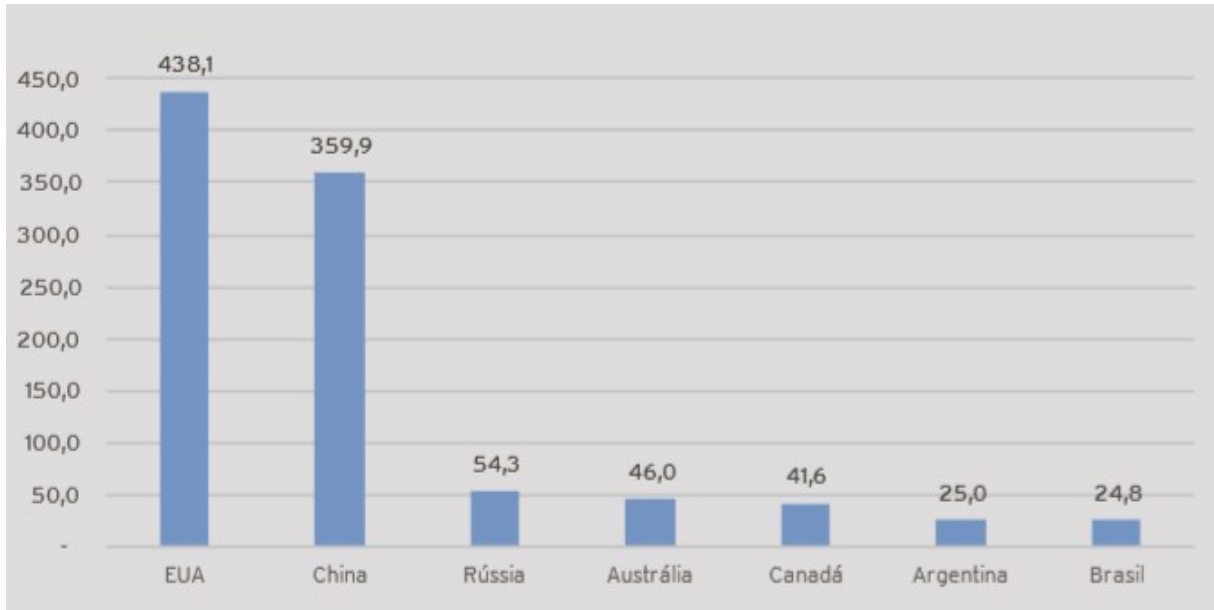
Independentemente do modal logístico empregado para a realização do transporte, todos poderão estar sujeitos a problemas de transporte. Entretanto, pelas características e volumes de movimentações trabalhadas, o modal rodoviário possui maior propensão a tais problemas. Em geral, os problemas relacionados ao transporte podem residir em duas áreas principais: infraestrutura viária e gestão logística organizacional. Esses dois aspectos da função logística serão discutidos a seguir.

2.4.1 Desafios estruturais do transporte

Os desafios estruturais dizem respeito, principalmente, às questões ligadas à infraestrutura de transporte, que envolve a disponibilidade de malhas, tais como malha ferroviária ou rodoviária, além da condição de manutenção e de utilização de tais vias pelos transportadores (CNT, 2017).

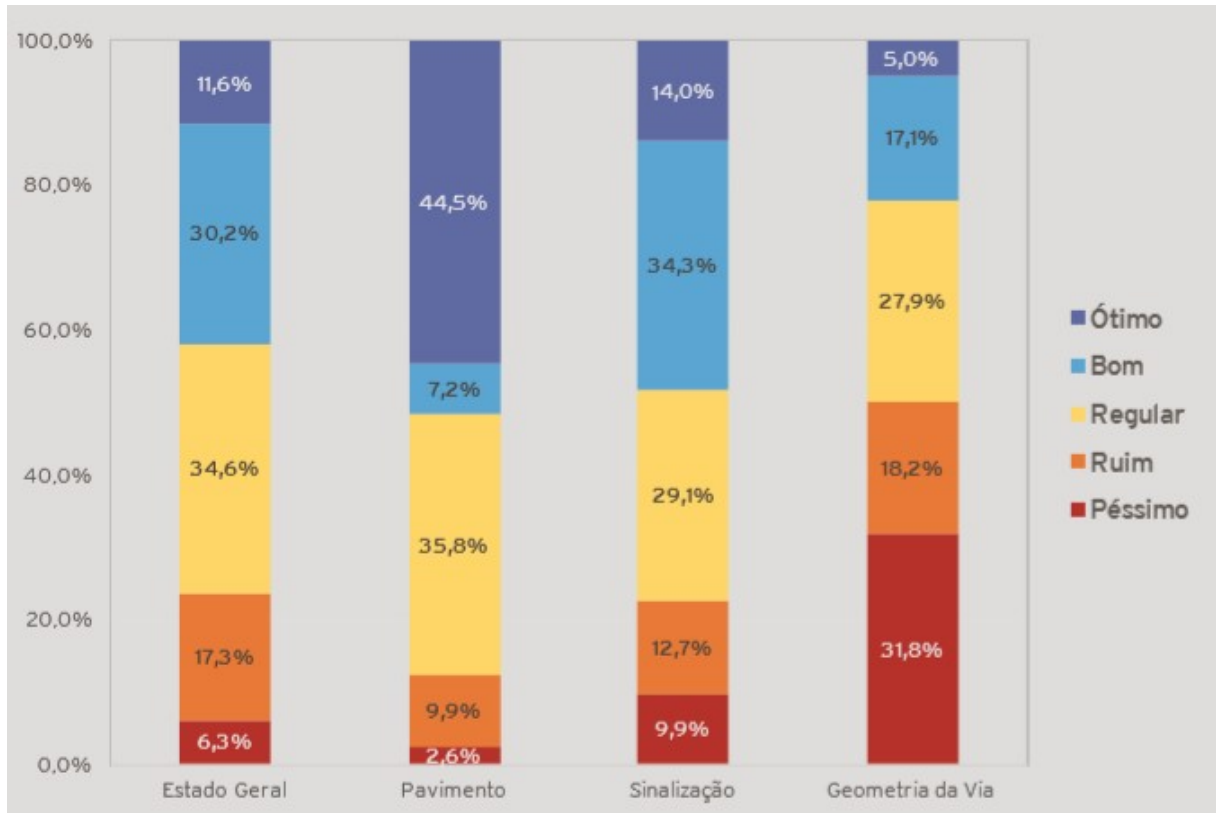
O relatório “Transporte rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos” elaborado pela Confederação Nacional do Transporte no ano de 2017, sendo esta a última análise vigente, descreve alguns desses desafios estruturais do transporte rodoviário que podem ser compreendidos quando analisadas Fig. 2, que trata da malha disponível e a compara com malhas de outros países continentais como o Brasil, e a Fig. 3, que apresenta dados sobre a condição das vias brasileiras sobre quatro aspectos: estado geral, pavimento, sinalização e geometria da via.

Figura 2 – Comparativo de malha rodoviária pavimentada de 2016 (em km/1.000 km²)



Fonte: CNT (2017)

Figura 3 – Condição de infraestruturas das estradas pavimentadas brasileiras



Fonte: CNT (2017)

Conforme apresentado na Fig. 2, o Brasil possuía em 2016 uma malha rodoviária

pavimentada restrita quando comparado a outros países de tamanho continental, chegando a ter quase metade da malha da Austrália, que possui área territorial inferior à do Brasil, e 18 vezes menor que a malha rodoviária pavimentada dos Estados Unidos.

Além do total de quilômetros de malhas pavimentadas disponíveis, outro problema é que as que são pavimentadas possuem qualidade questionável. Ao observar a Fig. 3 é possível perceber que, do total da malha pavimentada no país, menos de 42% possuem condição adequada de rodagem, o que pode influenciar a definição das rotas e os prazos de entregas das cargas movimentadas no país.

Na origem dos problemas estruturais estão as questões de priorização de investimentos governamentais, regulação, fiscalização e custo de capital, que levaram o país à dependência exagerada do modal rodoviário e, como consequência, a baixos índices de produtividade, ao elevado nível de insegurança nas estradas, à baixa eficiência energética e a altos níveis de poluição ambiental. Tudo isso vem ocorrendo ao mesmo tempo em que o transporte aumenta sua importância na economia brasileira (WANKE; FLEURE, 2017).

Em geral, os problemas relacionados a extensão de malha pavimentada, bem como das condições de tráfego das vias, não pode ser controlado por parte dos operadores logísticos, mas podem influenciar significativamente o segundo aspecto resultante dos problemas logísticos: a gestão do transporte e de rotas.

2.4.2 Problemas na gestão do transporte e de rotas

O segundo importante aspecto da função logística está relacionado aos problemas de capacidade de gestão e programação das atividades operacionais logísticas. Neste sentido, o um dos pontos pertinente está atrelado à decisão das empresas em assumir ou não a responsabilidade pelo gerenciamento logístico.

A gestão envolve aspectos de verticalização ou terceirização. As análises sobre verticalizar ou terceirizar são complexas e podem ser aplicadas desde a fabricação de produtos, até os aspectos da coleta de insumos e distribuição das manufaturas, devendo-se avaliar os custos incorridos para implantação, além do fluxo de informações necessárias para a ideal operacionalização (SLACK; CHAMBERS; JOHNSTON, 2009).

Ballou (2011) explica que a escolha entre o transportador próprio e terceiro perpassa por aspectos de desempenho e, principalmente, custos, mas deve-se atentar para o efeito indireto destas escolhas, que impactam, inclusive, os modais utilizados.

Além disso, a gestão das rotas de transporte também é fator decisivo, independentemente se o serviço logístico é próprio ou terceirizado, uma vez que o fator

decisivo recai sobre a capacidade de atendimento ao cliente e, neste sentido, a roteirização adequada é fator preponderante para a gestão acertada da cadeia de suprimentos. É justamente este segundo tipo que pode garantir maior ou menor competitividade organizacional.

A compreensão de que os problemas de alocações de materiais nos transportes são diversos não é nova e há muito tempo se empregam ferramentas matemáticas e computacionais no auxílio da resolução dos desafios encontrados neste setor, o que permitiu uma evolução significativa dos métodos de gestão na movimentação de materiais.

Mas a primeira coisa que se deve destacar é que, embora ambos abordem problemas e otimizações relacionadas à movimentação de materiais, o problema de transporte típico é diferente dos problemas de roteirização.

O problema de transporte envolve o deslocamento de materiais entre pontos especificados, sendo uma derivação dos problemas de localização, como por exemplo, uma carga fechada entre uma fábrica e vários centros de distribuição, podendo ser resolvido pelas técnicas de programação linear (BALLOU, 2011).

Moreira (2010) apresenta uma visão complementar, acrescentando uma explicação sucinta para este tipo de problema, que trata daquele, no qual existe a distribuição dos produtos e suprimentos, saindo de localizações distintas e/ou com destino a locais também diferentes e com demandas específicas, com quantidades de materiais limitadas em cada transporte.

Além dos problemas de transporte mais básicos, há outro tipo de problema comum, quando se refere aos processos de distribuição de materiais: o roteamento ou roteirização de veículos. Conforme explicam Novaes (2015) e Oliveira e Delgado (2015), a roteirização de veículos envolve a aplicação de um grupo de veículos, em sua maioria com limitações específicas de carga, na distribuição de materiais para um conjunto de clientes, distribuídos em localidades distintas, tendo que cumprir um sequenciamento de visitas e respeitando restrições como, prazos de entrega, limitações de horas dos trabalhadores, horários de cargas e descargas, capacidade de carga dos veículos, além de cumprir todas as entregas previstas, sempre buscando o menor custo.

Sobre os problemas de roteirização, Ballou (2011, p. 143) descreve que a montagem de rotas busca otimizar as entregas considerando que “o movimento pode ser feito pela mínima distância, mínimo tempo ou por uma combinação destes”, e que o emprego de técnicas de modelos matemáticos aplicados a programas computacionais são viáveis e necessárias, dado o grande volume de possibilidades de resolução do problema e mesmo pela complexidade de alguns desses roteamentos.

Tomando tais discussões como base, cabe inferir a necessidade, por conseguinte, do conhecimento mais aprofundado das técnicas matemáticas e computacionais utilizadas para a resolução destes tipos de problemas.

2.5 Simulação e otimização no transporte

O problema de transporte é conhecido e estudado há tanto tempo que, conforme destaca Lachtermacher (2009), já se utilizava a programação linear para este tipo de problema antes do advento tecnológico e da grande utilização dos microcomputadores, sendo que é um problema que não se restringe efetivamente ao transporte, mas que leva este nome em função de terem sido os primeiros tipos de estudo.

Para auxiliar na resolução de tais problemas, entretanto, podem-se valer de diversas técnicas, seja de algoritmos e modelos matemáticos para a otimização, seja por métodos de simulação para compreensão e adequação dos problemas, e contar atualmente, sobretudo, com sistemas computacionais, que facilitam a resolução dos problemas e diminuem consideravelmente o tempo de busca pela solução ótima.

Para tanto, é necessário compreender os métodos de simulação e os modelos de otimização que se pretende adotar.

2.5.1 Modelos de simulação

A simulação é uma importante ferramenta para que se alcance uma compreensão detalhada de um sistema e auxilie a tomada de decisão por parte dos gestores.

A simulação trata da avaliação e análise de modelos representativos de sistemas reais, de modo que se obtenha uma solução ou otimização para tais sistemas. A opção pelos modelos de simulação reside, principalmente, em função da existência de inviabilidade de haver interferência em um sistema real ou ainda, quando o sistema real ainda não existe e se quer estudar sua viabilidade (PRADO, 2014; BATEMAN *et al*, 2013).

Embora a simulação esteja sempre associada à aplicação de softwares específicos para a representação, é importante notar que a mesma pode ser modelada e estudada de diversas maneiras (COSTA, PAIVA e BARCELOS, 2018).

Considerando as colocações dos autores anteriormente citados, entende-se que o método de simulação a ser empregado depende, então, da compreensão de quais processos pretende-se simular e quais informações espera-se obter.

Em situações em que se busca simular dados aleatórios a partir de um conjunto de

dados históricos conhecidos, como é proposto na presente pesquisa, tem-se como método comumente empregado o modelo de simulação de Monte Carlo.

.2.5.1.1 Simulação de Monte Carlo

O modelo de simulação de Monte Carlo é um mecanismo que simula o funcionamento de uma determinada realidade pela transformação de dados reais em conjuntos aleatórios de variáveis, mantendo a distribuição probabilística (PRADO, 2014).

Esse modelo de simulação surgiu baseado na experiência do inglês Joseph Jagger, um engenheiro mecânico que, por suas experiências com máquinas, constatou que não haveria um equipamento 100% perfeito, de modo que considerou que as roletas dos cassinos de Monte Carlo também teriam alguma diferença e tenderiam a apresentar determinados resultados com uma frequência ligeiramente maior. (MLODINOW, 2009). A observação de Jagger demonstrou a existência de uma abordagem para levantar, avaliar e definir maior ou menor chance de ocorrência de determinados dados.

Segundo Moreira (2010), para a realização da simulação pelo método de Monte Carlo, é fundamental a escolha de uma abordagem específica a fim de compreender adequadamente as variáveis probabilísticas aleatórias que permitirão apropriada simulação dos dados, ou seja, a partir de um conjunto de valores que apresentam certa probabilidade de ocorrência, seja possível gerar novos valores que respeitem à distribuição de frequência inicial observada.

Mlodinow (2009) explica que existe a definição da amostra aleatória sendo aquela que, a partir da coleta de um número significativo de vezes, haja frequência igual a qualquer um dos dados levantados. Esta condição é conhecida como probabilidade determinística. Entretanto, na prática e, compreendendo que não existe perfeição na coleta de dados, seja qual for a origem dos dados, existe uma concepção alternativa denominada probabilidade subjetiva, que julga a amostra de acordo com que ela é produzida. O método de simulação de Monte Carlo emprega justamente a segunda concepção.

Partindo dessa descrição, considera-se pertinente, portanto, a compreensão dos cálculos das variáveis aleatórias, que segundo De Paula (2014), é um constitutivo numérico resultante de um experimento que associa uma variável aleatória a uma função de distribuição cumulativa, existindo métodos de cálculos específicos para variáveis aleatórias discretas e outros para variáveis aleatórias contínuas.

Segundo De Paula (2014), toda vez que um número é finito e assume um valor enumerável diz-se variável aleatória contínua, obedecendo à condição da Eq. (1):

$$\{x_1, x_2, \dots\} \subset \mathbb{R} \setminus X(\omega) \in \Omega$$

Onde x_n são o conjunto de números, \mathbb{R} é o conjunto de números Reais, $X(\omega)$ é a variável aleatória, e Ω é o espaço amostral.

Sua função é dada na Eq. (2):

$$f(x) = P(X = x) \quad \forall x \in (-\infty, \infty) \quad (2)$$

Já as variáveis aleatórias contínuas, conforme por De Paula (2014, p. 24), será considerada como variável aleatória contínua caso todos os números reais relacionados possuam função não-negativa $f(x)$, e pode ser demonstrada pela Eq.(3):

$$P(X \in C) = \int_C f(x)dx \quad (3)$$

Onde x é a variável aleatória e C é o conjunto de números reais.

A função de distribuição acumulada da variável discreta é dada, pela Eq. (4)

$$F(X) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(x)dx \quad (4)$$

Embora os cálculos generalistas sigam as fórmulas anteriormente descritas, na prática as ferramentas computacionais não cumprem a aleatoriedade em seu sentido real. Como explica Mlodinow (2009), um conjunto realmente aleatório pode apresentar qualquer um das possibilidades de igual maneira, como, por exemplo, em um jogo de moedas uma sequência repetida de resultados pode ter menor chance probabilística de ocorrer, mas, em caso de sua ocorrência o resultado é igualmente válido. Porém, muitas vezes tal resultado é confundido como erro ou falha e influenciam o uso dos dados. Assim, os programas computacionais são desenvolvidos considerando tais aspectos de modo a gerar números pseudo-aleatórios.

A utilização desta técnica para simulação possui aplicação difundida e muito aplicada, permitindo a suavização dos dados com definições de importância de cada um, possibilitando repetir valores ponderados semelhantes aos coletados empiricamente (GLOAGUEN; ÉTIENNE; LECORFF, 2018). Além disso, é uma técnica que pode ter aplicações distintas, inclusive na avaliação do risco probabilístico (MARINCIONI *et al*, 2018).

2.5.2 Algoritmos de otimização

Tanto os problemas de transporte, como também os de roteirização, vão se tornando, a cada vez mais complexos dadas as grandes mudanças operacionais e logísticas ocorridas, seja pelas organizações ou por necessidades de mercado e de práticas que garantam

competitividade para as organizações. Tais situações exigem técnicas mais elaboradas para sua resolução.

Hoje, existem vários algoritmos computacionais que auxiliam na resolução deste tipo de problema, podendo ser aplicadas duas linhas de métodos diferentes: os exatos e os heurísticos (OLIVEIRA; DELGADO, 2015).

Entre os métodos exatos destaca-se o algoritmo de *Branch-and-bound* que, conforme explica Lachtermacher (2009, p. 156), envolve “dividir o conjunto de soluções viáveis em subconjuntos sem interseções entre si, calculando os limites superior e inferior para cada subconjunto, e eliminar certos subconjuntos de acordo com algumas regras pré-estabelecidas.”

Este método tem aplicações específicas e é mais eficiente para a utilização no auxílio à resolução de problemas de transportes típicos, aos quais se precisa direcionar valores inteiros, como por exemplo, número de cargas ou direcionamento de frota a locais específicos.

Para solução de problemas de transporte do tipo caminho mínimo, ou seja, o caminho mais curto entre o ponto de saída até o destino, passando por conjunto de sub-rotas, pode-se empregar o algoritmo de Dijkstra, que, segundo Marins (2011), foi um dos primeiros algoritmos propostos para a resolução deste tipo de problema e se vale da rotulação dos nós (vértices, locais) a partir do nó inicial e, a cada iteração, se rotulam outros nós, temporariamente ou definitivamente, até que se possa rotular o destino definitivamente, obtendo-se a resposta ótima do problema.

Os algoritmos exatos também são capazes de resolver problemas de roteamento, entretanto, sua utilização não é interessante quando há um número significativo de locais ou destinos, uma vez que necessita de um volume muito grande de restrições e ocasiona significativa dificuldade para sua resolução, mesmo com auxílio de ferramentas computacionais.

Como explica Kramer *et al.* (2016), os problemas de roteamento de veículos são classificados como NP-difícil, que são problemas que possuem aumento da dificuldade e do tempo de resolução em escala exponencial, à medida que se aumenta o número total de destinos estudados.

Por tal motivo, a prática do emprego de algoritmos heurísticos se tornou o artifício mais propício para resoluções de problemas com esta classificação. Um dos algoritmos heurísticos mais comumente usado, como relata Novaes (2015), é o método de *Clarke & Wright*, sendo utilizado tanto isoladamente, como parte componente de softwares de

roteamento de veículos, sendo, portanto, mais interessante para este tipo específico de problema.

O método de *Clarke & Wright* é uma metodologia na qual se constrói a solução para o problema de forma paulatina e respeitando todas as restrições, ou seja, a cada passo existem duas rotas diferentes com exequibilidade de união para formação de uma única rota, o que possibilita a redução dos custos (OLIVEIRA; DELGADO; MOREIRA, 2015).

Há ainda, o modelo de Fisher & Jaikumar, citado nos estudos de Herrera e Alarcón (2017, p. 435). Este modelo, como explicam os autores, busca criar grupos de rotas a partir da resolução do “problema de atribuição generalizada (GAP) nos clientes”, sendo mais fácil de aplicar que o algoritmo anterior, mas, também, tendo maiores limitações de aplicação.

Outros métodos utilizados, descritos por Guimarães, Pereira e Medeiros (2015), são os algoritmos de *Gillet Johnson* e, também, os de *Teitz & Bart*, ambos pautados na heurística do vizinho mais próximo. Há, portanto, vários métodos heurísticos diferentes, surgindo novos métodos a partir de novos estudos e sendo alguns adaptados de outros inicialmente existentes.

A aplicação das diferentes técnicas é definida, contudo, de acordo com a característica do problema estudado, da disponibilidade dos recursos computacionais que aplicam as técnicas e a preferência dos aplicadores.

2.5.3 Problema de roteamento de veículos e suas derivações

O problema de roteamento de veículos (VRP - *Vehicle Routing Problem*) foi proposto por Dantzig e Ramser em 1959, que apresentaram um artigo com a primeira modelagem matemática, com o intuito de resolver problemas na distribuição de combustíveis e, desde então, os mais diversos estudos sobre VRP surgiram e se multiplicaram (KRAMER; SUBRAMANIAN; PENNA, 2016).

Neste modelo inicial de VRP, há um centro de distribuição único, se conhece as demandas e estas, a princípio, não podem ser decompostas; são percorridas por veículos sempre com a mesma condição de execução do trabalho, sendo este o único fator restritivo do modelo. Neste modelo, que também pode ser denominado de problema de roteamento de veículos capacitados (CVRP), consideram-se as diferentes limitações dos veículos e é esperado que se consiga visitar todos os vértices apenas uma vez, saindo e chegando no mesmo centro de distribuição (CD) (ABREU, 2016; BERTAZZI; MAGGIONI, 2018; MORAIS, 2012).

Entretanto, devido à existência de outros problemas de roteamento que não obedecem sistematicamente às condições anteriormente descritas, foram propostas, ao longo

dos anos, variações para estes modelos.

Uma dessas variações é o Problema de Roteamento de Veículos com Janela de Tempo (VRPTW) que, segundo Morais (2012), é definido como uma rota que parta do centro de distribuição e chegue a cada um dos cliente respeitando as restrições de capacidade e janela de tempo. Abreu (2016) acrescenta que a chamada “janela de tempo” é um período exato do tempo em que o entregador deve chegar, permanecer e finalizar a entrega em determinado consumidor.

Ciancio, Laganáa e Vocaturo (2018) apresentam uma variante do VRP, mostrando um estudo específico sobre o Problema de Roteamento com Capacidade Mista com Janelas de Tempo (MCGRPTW) que trata de um grafo misto, com vértices e arestas unicamente positivas, no qual se deve levantar o conjunto de rotas, respeitando ao mesmo tempo as janelas de tempo e as capacidades dos veículos, de modo a reduzir os custos.

Outra variação está relacionada à coleta e entrega (VRPB). De modo geral, consiste em atender os consumidores ao mesmo tempo, com coletas de materiais e entregas sem que, em nenhum momento da rota, ultrapasse o limite máximo da capacidade dos veículos (ABREU, 2016). Nesta variante, também existem derivações. Morais (2012) aponta estudos sobre Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega Simultâneas (VRPSPD), que são aquelas em que, considerando uma mesma rota, os vértices visitados podem estar atrelados à coleta de materiais ou a entrega de produtos e em que a movimentação ocorre tanto do centro de distribuição para o cliente como o inverso, do cliente para o CD, e, também, o chamado Problema de Roteamento de Veículos com Coleta e Entrega (VRPPD), o qual utiliza os mesmos parâmetros do anterior, mas a movimentação dos produtos ocorre entre os clientes.

Pode-se acrescentar, segundo Monteiro (2017), o problema de roteamento de veículos com restrições de duração (PRVLD), uma variação mínima em relação ao problema original, no qual a restrição adicional se refere a limitação total do tempo consumido para determinada movimentação, como por exemplo, realizar todo o percurso da rota dentro de um prazo especificado de horas de trabalho.

.2.5.3.1 O problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos

O problema de roteamento de veículos com múltiplos depósitos (MDVRP) é uma das variantes possíveis para o PRV convencional, se distinguindo desse apenas por possuir dois ou mais depósitos, que podem ser pontos de partida distintos ou usados como pontos para suprimento adicional, respeitando restrições de iniciar e finalizar no depósito, com um tempo total de rota definido, demanda dos clientes não excede a capacidade dos veículos e

pertencem a uma rota específica (ALVES, 2015; MONTOYA-TORRES *et al.*, 2015).

A partir dessa variante, existem sub-variações, como demonstrado por Laporte *et al.* (1988), que citam três situações distintas para o MDVRP: a primeira é a com capacidade restrita, situação em que todos os nós são usados como depósitos e deve-se minimizar o custo do transporte respeitando restrições de que todos os veículos iniciem e retornem ao mesmo ponto, respeitando seu limite de capacidade, além de percorrer uma única rota. A segunda, denominada de custo limitado, similar ao problema anterior, mas que, ao invés de se ater à limitação de carga dos veículos, considera um limite precificado que não pode ser excedido. O terceiro, por fim, envolve não apenas a roteirização, mas também a localização dos depósitos, devendo minimizar simultaneamente os custos com veículos, depósitos e rotas.

Em outros estudos, como em Crevier *et al.* (2007) e Jordan e Burns (1984), é apontada outra sub-variação para o MDVRP envolvendo a movimentação entre depósitos. Denominado MDVRPI (*Muti-depot Vehicle Routing Problem with Inter-depot Routes*), esta variação os depósitos podem funcionar como pontos intermediários de reabastecimento, facilitando o atendimento dos pontos consumidores ao longo da rota. Deve-se destacar que nesta vertente o veículo pode iniciar ou finalizar a rota em um mesmo depósito ou em depósitos distintos.

Para cada sub-variação existente são propostos na literatura variados modelos matemáticos próprios para a resolução de cada um. Uma alternativa empregada para simplificar a resolução deste tipo problema, segundo Alves (2015), consiste em distribuir um grupo de clientes para cada depósito disponível e tratá-los como um VRP convencional, utilizando, para tanto, modelos de resolução mais simples. Deve-se destacar, entretanto, que esta estratégia auxilia na resolução, mas pode não trazer o melhor resultado final.

Além das vertentes mais comumente estudadas, outras pesquisas relatam diversas variações do PRV. No Quad. 1 são apresentados autores que se dedicaram a estudar outras variações para os problemas de roteamento nos estudos mais recentes, além de autores de estudos relevantes com grande número de citações ao longo dos anos de estudo sobre o tema.

Quadro 1 – Técnicas adotadas no roteamento de veículos

Referência	Variante do Problema de roteamento	Descrição da Variante	Modelo de algoritmo empregado	Algoritmo padrão	Solver / Software / Liguagem	Área de aplicação
Noorizadegan e chen (2018)	CVPSD	Problema de Roteamento de Veículos com restrição de oportunidade com demandas estocásticas	Exato	MIP / Branch-and-price	Scipoptsuite (SCIP)	Generalizado
Brandstätter e Reimann (2018)	LFVRP	Problema de Roteamento de Veículos com restrições de sincronização onde dois tipos de clientes são atendidos por dois tipos de veículos	Heurístico	Algoritmo Próprio	Não especificado	Generalizado
Hintsch e Irnich (2018)	CluVRP	Problema de Roteamento de Veículos Capacitados com Clusterização	Meta-heurístico	Ballas-Simoneti / VND / LNS	ILS	Generalizado
Naccache <i>et al.</i> (2018)	VRPTW / MPDPTW	Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo	Exato / Heurístico	Branch and Bound / ALNS Híbrido	*Solver Comercial	Generalizado
Ciancio <i>et al.</i> (2018)	MCGRPTW	Problema de Roteamento Geral Capacitado com Janelas de Tempo, definido em um grafo misto, para nós, arcos e arestas com demanda positiva	Heurístico / Exato	Clarke & Wright / Branch, Price & Cut	Java / CPLEX	Generalizado
Gaur e Singh (2016)	Cu-VRP	Problema de Roteamento de Veículos Cumulativo, modelo simplificado do VRP para o consumo de combustível	Exato / Heurístico	MILP	CPLEX	Generalizado

(Continua...)

Quadro 1 – Técnicas adotadas no roteamento de veículos (Continuação)

Referência	Variante do Problema de roteamento	Descrição da Variante	Modelo de algoritmo empregado	Algoritmo padrão	Solver / Software / Linguagem	Área de aplicação
Abreu (2016)	PVRP	Problema de Roteamento de Veículos Periódico	Exato / Heurístico	PS / ILS / PSO	CPLEX	Generalizado
Cinar <i>et al.</i> (2016)	CumVRP-LD	Problema de Roteamento de Veículos cumulativa com duração limitada, onde a carga também é considerada na função objetivo e na distância	Heurístico	Clarke & Wright / 2-phases	C++	Generalizado
Li <i>et al.</i> (2016) A	VRPTW / 2E-TVRP	Problema de Roteamento de Veículos com restrição de tempo de dois escalões, onde há interação de rotas de veículos em diferentes níveis por restrições de tempo	Heurístico	Clarke & Wright	E.G. / CPLEX	Sistemas de entregas entre CDs
Li <i>et al.</i> (2016) B	RRVRP	Problema de Roteamento de Veículos Rollon-Rolloff, problema de roteamento de nós com custo de arco assimétrico e um comprimento máximo de rota.	Heurístico	Clarke & Wright	CPLEX	Generalizado
Lima <i>et al.</i> (2016)	<i>*Sem sigla definida</i>	Problema de roteamento de veículos com frota heterogênea e com cargas mistas	Heurístico	RRT / ILS-VND / ILS-RVND / VNS-VND / VNS-RVND / MLI	C++	Transporte escolar rural
Oliveira <i>et al.</i> (2015)	CVRP	Problema de Roteamento de Veículos Capacitados típico.	Heurístico	Clarke & Wright / Monte Carlo Savings	IRACE	Generalizado

(Continua...)

Quadro 1 – Técnicas adotadas no roteamento de veículos (Continuação)

Referência	Variante do Problema de roteamento	Descrição da Variante	Modelo de algoritmo empregado	Algoritmo padrão	Solver / Software / Linguagem	Área de aplicação
Kramer <i>et al.</i> (2016)	AVRPHLF	Problema de Roteamento de Veículos Assimétrico com Frota Heterogênea Limitada, que é quando os veículos possuem capacidades distintas	Meta-heurístico	ILS-RVND	C++	Indústria de Bebidas
Weyland <i>et al.</i> (2013)	PTSPD	Problema de Roteamento de Veículos com prazos definidos ou ainda com problema do caixeiro viajante com prazos definidos	Heurístico	Monte Carlo / Quasi-parallel evaluation of samples	Não especificado	Generalizado
Hernandez <i>et al.</i> (2013)	MTVRPTW-LD	Problema de Roteamento de Veículos Multi-Viagens com Janelas de Tempo e duração limitada	Heurístico / Exato	Column Generation / Branch & Price	GLPK	Generalizado
Erera <i>et al.</i> (2009)	VRPSD-DC	Problema de Roteamento de Veículos com demanda estocástica e restrição de duração	Heurístico	Busca Tabu	Não especificado	Generalizado
Crevier <i>et al.</i> (2007),	MDVRPI	Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos com rotas entre depósitos	Heurístico	Busca Tabu	CPLEX	Generalizado
Braysy e Gendreal (2005)	VRPTW	Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo.	Heurístico / Meta-heurístico	Metaheurística de pesquisa local / Algoritmo Genético / Busca Tabu	Não Aplicado	Generalizado

(Continua...)

Quadro 1 – Técnicas adotadas no roteamento de veículos (Continuação)

Referência	Variante do Problema de roteamento	Descrição da Variante	Modelo de algoritmo empregado	Algoritmo padrão	Solver / Software / Linguagem	Área de aplicação
Prins (2004)	DVRP / VFMP	Problema de Roteamento de Veículos com restrição de distâncias. / Problema de Roteamento de Veículos número limitado de veículos	Heurístico	Algoritmo Genético / Busca Tabu	Pascal / Delphi 5	Entrega em bairros
Rochat e Semet (1994)	VRP adaptado	Problema de Roteamento de Veículos com restrição de capacidade do veículo, com janela de tempo e com limitação de duração.	Heurístico / Meta-heurístico	Algoritmo baseado em inserção / Busca Tabu	Não especificado	Indústria de rações animais
Osman (1993)	CVRP	Problema de Roteamento de Veículos sob restrições de capacidade e distância.	Heurístico	Busca Tabu	Não especificado	Generalizado
Laporte (1992)	CVRP / DVRP	Problema de Roteamento de Veículos Capacitados típico. / Problema de Roteamento de Veículos dinâmico.	Exato	Branch Bound / k-degree center / column generation / Clarke & Wright / Christofides-Mingozi-Toth / Busca Tabu	Não Aplicado	Generalizado
Desrochers <i>et al.</i> (1992)	VRPTW	Problema de Roteamento de Veículos com Janelas de Tempo.	Heurístico / Exato	Pulling With 2-Cycle Branch and bound	GENCOL / San Spark 1	Generalizado

Os diversos estudos apresentados, contudo, não esgotam todas as possibilidades de busca por soluções matemáticas inovadoras aos mais variados problemas de transporte. Para compreender toda a evolução e as diversas vertentes estudadas ao longo dos anos e compreender os métodos de classificação destas, sugere-se a leitura de Laporte (2009) e Desroches, Lenstra e Savelsbergh (1988).

Nesse sentido, este trabalho pretende contribuir com essa vasta literatura, apresentando uma possível solução para uma nova variante: a roteirização de veículos com restrição de duração e depósito de apoio.

3. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Neste capítulo são discutidas as metodologias empregadas para o desenvolvimento da pesquisa, sua classificação, a caracterização do objeto de estudo, com foco na estratificação das rotas da organização, observando as particularidades existentes no modelo de movimentação de carga da empresa estudada e contemplando os métodos matemáticos e computacionais para a resolução dos problemas.

3.1 Classificação e delineamento da pesquisa

Esta pesquisa possui natureza aplicada, classificando-se, quanto aos objetivos, como uma pesquisa de caráter exploratório, uma vez que envolve a compreensão de um problema real e busca-se, embasado pela vasta literatura existente, mecanismos de auxílio à resolução do problema de pesquisa. (MARCONI; LAKATOS, 2009)

Quanto à abordagem, este trabalho configura-se como Quanti-qualitativo, já que há predominância de informações quantitativas obtidas junto à organização objeto de estudo, sendo essas, inclusive, base para os cálculos, simulações e otimizações empregadas. Contudo, utiliza-se de informações de caráter qualitativo em dois pontos principais: primeiro, na escolha estratificada de apenas uma rota (entre quatro possíveis) para se propor as análises iniciais; e, segundo, por considerar aspectos de decisões estratégicas organizacionais para fundamentar mudança em um grupo específico de simulações.

Para tanto, a classificação, no que diz respeito aos métodos de pesquisa empregados, trata-se de modelagem e simulação, propostos na resolução do problema de roteirização e que fornecerão as respostas para os objetivos deste estudo.

Entre as etapas de concepção do estudo estão, desde a definição do local e momento de aplicação do estudo, até a resolução, por meio de técnicas de otimização por modelos matemáticos adequadamente adaptados, passando por uma análise estatística dos dados da organização e pela definição de cenários, por meio de simulação. Os detalhamentos dos procedimentos são descritos complementarmente no conteúdo das seções que se seguem, o que facilita a compreensão de como ocorre, na prática, a aplicação dos métodos.

3.2 Caracterização da Organização

Para a aplicação do estudo prático, buscou-se o conhecimento dos processos da transportadora Correia Martins. A empresa está localizada na cidade de Belo Horizonte e tem seu centro de armazenamento e distribuição localizado no anel rodoviário, apresentando fácil acesso às principais estradas federais que passam pela capital mineira. Possui, ainda, um galpão de apoio, situado na cidade de João Monlevade, a cerca de 100 km da capital e localizado estrategicamente no ponto mediano da principal rota gerida pela organização.

Considerou-se, para tanto, a coleta de dados referentes a seis meses de trabalho, entre os dias primeiro de novembro de 2017 e 30 de abril de 2018, com informações gerais obtidas a partir do banco de dados dos programas empregados pela empresa para o gerenciamento do faturamento e do controle das entregas.

A empresa faz coletas e entregas de cargas fracionadas, principalmente no estado de Minas Gerais, atendendo mais de 50 cidades nas adjacências de Belo Horizonte, mas presta serviços eventuais a outros estados, como São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Goiás.

No estado de Minas Gerais existem quatro rotas principais a partir da capital:

- i) A rota oeste, que abrange um conjunto de cidades que permeiam as rodovias BR 381 (Fernão Dias), sentido São Paulo, e BR 262, sentido Triângulo Mineiro;
- ii) A rota norte, atendendo cidades adjacentes às rodovias BR 040, sentido Brasília, e MG 10;
- iii) A terceira rota é a sudeste, com cidades cortadas pelas estradas BR 040, sentido Rio de Janeiro, BR 356, sentido cidades históricas, e MG 030;
- iv) A principal rota atendida pela transportadora liga as duas regiões metropolitanas do estado (RMBH ao Vale do Aço) pelas BR 381, sentido Salvador, e BR 262, sentido Vitória, sendo esta a rota leste.

Nesta última rota, há um conjunto de mais de 20 cidades com ocorrência frequente de atendimento ou com potencial de considerado das distribuições das cargas pela transportadora. A Fig. 4 apresenta um panorama geral da distribuição dos acessos dessas vias à RMBH.

Figura 4 – Rodovias de acesso às principais rotas atendidas



Fonte: Google Maps, 2018 – Adaptado.

Observa-se, pela na Fig. 4, que, partindo do Centro de Distribuição (CD), representado pelo círculo azul, ao centro, há possibilidade de se atender a todas as nove principais vias de escoamento de entregas da RMBH.

Por se tratar de cargas fracionadas, com algumas ocorrências de cargas à granel e outras, mais raras, de volume específico de produto em maior quantidade, em geral, emprega-se o transporte dos veículos sub-utilizados e, portanto, não caracterizando o processo como roteamento com limite de carga. Outro fator significativo para a ocorrência da sub-utilização é que a empresa possui modelo de entrega expressa, na qual os materiais coletados e entregues na própria região metropolitana ocorrem no mesmo dia, da RMBH para as cidades do interior. Em sentido contrário, as entregas são feitas no dia seguinte, exceto para aquelas que distam mais de 200 km do CD principal ou do CD de apoio.

A frota da transportadora é limitada, possuindo dois caminhões do tipo baú, com capacidade de aproximada de cinco toneladas, destinados a entregas dos principais fluxos diários de escoamento, e outros quatro veículos de apoio, de menor porte, destinados, principalmente, às coletas das mercadorias ou para entregas pontuais, como as chamadas

cargas dedicadas.

Atualmente, tanto a delegação de qual veículo será utilizado em qual rota, quanto a sequência de cidades visitadas por tais veículos, são determinadas pelo conhecimento tácito dos gestores da organização, não havendo nenhum instrumento ou técnica específica para tal abordagem.

No período estudado, foi levantada a ocorrência de movimentações, seja para coleta ou para entrega, às 52 cidades, sendo que, apenas duas delas se localizam fora do estado de Minas Gerais: uma no estado de Goiás e outra no Espírito Santo. Das cidades atendidas no estado sede, 22 tiveram tanto demanda por coleta, como por entregas; 26 foram atendidas apenas com entregas; e apenas duas apresentaram somente solicitação de recolhimento de mercadoria. No total, foram identificados 102 conjuntos origem-destino diferentes. A relação de cidades atendidas no período é apresentada no Apêndice A, e a relação de origem e destino é apresentada no Apêndice B.

É válido destacar que ao longo do período estudado, mais de 60% das entregas tiveram origem em Belo Horizonte e que este percentual sobe para 92,6%, quando consideradas as demais cidades da RMBH. A região Metropolitana responde, ainda, por 42% dos destinos, enquanto que outros 55% dos destinatários pertencem a uma das quatro regiões/rotas anteriormente citadas. 95% dos materiais entregues nas quatro rotas de destaque tiveram origem no conjunto das três maiores cidades da RMBH: Belo Horizonte, Contagem e Betim.

Durante os seis meses avaliados, constatou-se que a rota leste foi a que teve o maior número de cidades atendidas com as entregas, totalizando 17 cidades. A rota oeste teve nove cidades atendidas no período. A rota sudeste teve entregas em oito cidades e a rota norte em seis.

Já em relação ao número total de entregas, levando em conta como origem a tríade BH-Contagem-Betim (excluindo estas cidades como destino), a região que mais recebeu encomendas foi a sudeste, concentrando 55% das entregas. Porém, quase 95% destas foram destinadas a duas cidades apenas: Itabirito (84,1%) e Mariana (10,3%). É necessário destacar, ainda, que nesta rota, apenas a cidade de Itabirito recebe cargas fracionadas. Mariana e as demais cidades desta região (cidades históricas) recebem apenas encomendas do tipo carga dedicada, que é aquela em que um veículo se desloca do ponto de origem, com um único destino, para entregar uma única encomenda e retorna ao CD após a realização do serviço, sem que hajam outras paradas programadas.

Por outro lado, a rota leste, segunda maior em número de entregas (40% do total),

possui maior distribuição de materiais entre as cidades que compõem a referida rota, havendo, inclusive, uma base de apoio em uma cidade pertencente a este itinerário. Nesta rota, a cidade com maior número de entregas é Itabira, representando 31,1 % das entregas, seguido de João Monlevade, com 20,8%, e Antônio Dias, com 13,3%, sendo essas três as mais expressivas.

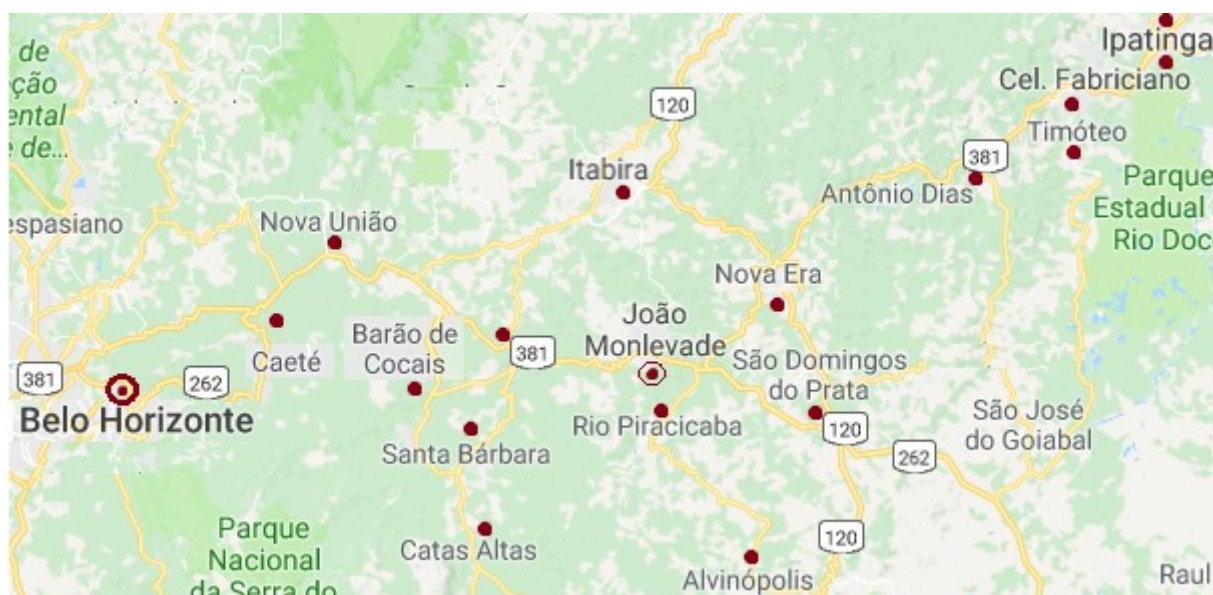
A rota leste, somada à rota sudeste, representam 95% das entregas totais realizadas pela Transportadora Correia Martins.

Outra característica relevante, diz respeito aos projetos futuros, estrategicamente definidos pela organização. A empresa procura fortalecer e ampliar o fluxo de entregas na rota leste e negocia com grandes grupos transportadores, responsáveis por distribuição de cargas específicas de grandes indústrias, assumir as entregas fracionadas na ramificação de Belo Horizonte a Governador Valadares, podendo abdicar de outras rotas com menor expressão em sua carteira de entregas.

Considerando-se os aspectos apontados, foi escolhida a rota leste como referência para a desenvolvimento do estudo por considerar se tratar esta como a principal rota de atendimento da transportadora Correia Martins, entando, portanto, todas as simulações realizadas para o atendimento da mesma, bem como a otimização com enfoque na resolução do roteamento desta rota.

A Fig. 5 apresenta as 16 localidades desta rota, visitadas durante os meses de novembro de 2017 e abril de 2018.

Figura 5 – Localização das cidades da Rota Leste



Fonte: Google Maps, 2018 – Adaptado.

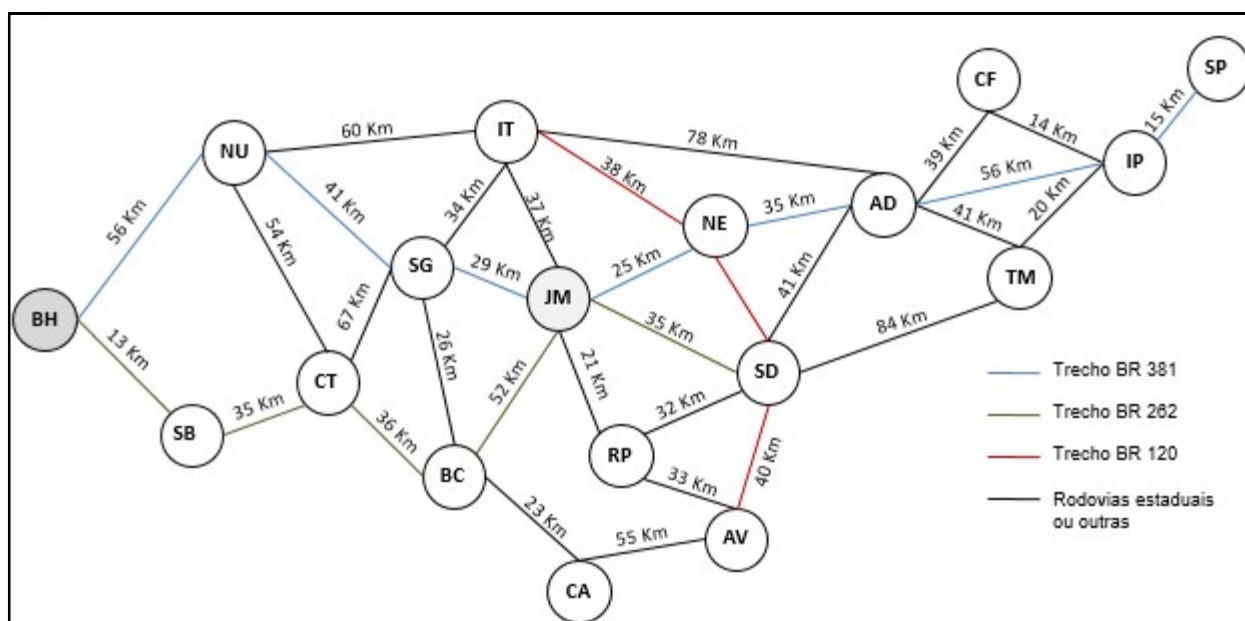
Conforme pode-se observar, as cidades da Rota Leste se espalham nas imediações das rodovias BR 262, BR 381 e BR 120, havendo, adicionalmente, uma série de outras

estradas com ligações intermediárias entre as cidades desse eixo de distribuição.

Há, ainda, o destaque para o CD de origem, na RMBH, e para o CD de apoio, localizado no município de João Monlevade, geograficamente mais centralizado em relação às cidades-clientes, distando cerca de 100 km de cada uma das duas regiões metropolitanas do estado (RMBH e Vale do Aço).

Para facilitar a compreensão acerca da rede de caminhos que interligam as cidades da rota Leste, um grafo geral da rota é apresentado na Fig. 6.

Figura 6 – Grafo Geral da Rota Leste



Fonte: autoria própria.

Na Fig. 6 fica explícita a utilização de três rodovias principais: as BR 381, 262 e 120 (única das três a não passar por Belo Horizonte). As demais vias correspondem a trechos de estradas estaduais, rurais, ou ainda, de estradas de acesso. As siglas que representam os nomes das cidades e estão descritos no Apêndice C.

Quando avaliadas as entregas, além das 52 cidades visitadas e dos 102 conjuntos origem-destino já citados, foi possível identificar a ocorrência de 1535 movimentações distintas, indicando que, em média, a cada dia de atividade foram atendidas 11,7 localidades diferentes (ainda que tenha ocorrido na mesma cidade) e com um desvio-padrão de 4,7% em relação à esta média anteriormente indicada, apontando que a rede de distribuição diária é menor que o todo e, eventualmente, menor, até mesmo, que o grafo de qualquer uma das quatro rotas realizadas por esta transportadora.

A compreensão da média das localidades atendidas durante um dia de serviço prestado é importante para que, no processo de simulação das entregas, sejam determinados

grafos alinhados com a realidade atual de movimentações da organização em estudo.

3.3 Definição da Variante de VRP para o Estudo

O problema de roteamento de veículos é antigo e tem resultado, ao longo dos anos, no surgimento de diversas variações que tentam se adaptar a situações específicas de exigência de trabalho nas coletas e/ou entregas de materiais.

A compreensão das características das entregas da empresa objeto de estudo, é fundamental para a definição do modelo VRP, e suas variantes, que melhor se aplica à sua condição de trabalho.

Segundo Raff (1983) alguns aspectos devem ser observados, quando da caracterização de um problema de roteamento de veículos: o tamanho e o tipo da frota disponível; as características dos centros de distribuição; a natureza e a localização da demanda; as características de orientação da rede disponível; as restrições de capacidade dos veículos; a limitação de tempo para execução de determinada rota; o tipo de operação empregada (coleta, entrega ou ambos); os custos, que podem ser fixos ou variáveis; os objetivos de otimização.

A partir da combinação das repostas de cada um destes itens, considerando que existe um parâmetro pré-especificado para cada um, é possível identificar qual modelo VRP pode ser aplicado.

Considerando, então, os aspectos gerais da Transportadora Correia Martins as restrições impostas à pesquisa, tem-se que:

- A organização atende, pela rota Leste e segundo o período estudado, a 17 cidades, com entregas partindo da RMBH (BH-Contagem-Betim);
- Há dois centros de distribuição distintos: um principal em Belo Horizonte, de onde partem todas as entregas, e outro, de apoio, em João Monlevade, para dividir e redistribuir eventuais cargas;
- O tipo de carregamento é chamado de carga fracionada, não atingindo o limite de carga possível dos veículos utilizados para a movimentação e implicando, ainda, que a heterogeneidade dos veículos não interfere no processo;
- Na rota Leste, em geral, não há coleta simultânea em relação às entregas, sendo as coletas geralmente feitas por outro veículo e em períodos do dia distintos em relação às entregas;
- Não há limitação de tempo em cada cliente, mas há limitação de tempo para o conjunto da

rota;

- As vias empregadas na entrega são, em todas as situações, de mão dupla, de modo que o grafo é direcionado, ou seja, os arcos são tidos como de característica orientados. Contudo, a distância e o tempo podem ser diferentes entre duas localidades em sentidos distintos.

Com base nas informações anteriormente descritas, têm-se como referência inicial o roteamento de veículos com restrição de duração (LDVRP), uma vez que todas as entregas demandadas devem ser realizadas dentro do dia seguinte à ocorrência das coletas.

Embora exista um CD em João Monlevade e que existem estudos específicos para múltiplos depósitos, destacam-se que as características dos depósitos são distintas, tanto em termos de tamanho, quanto, principalmente, em termos de utilidade e importância. Necessariamente todas as cargas partem do CD 1 (RMBH). O CD 2 (JM) é mantido à disposição para remanejamento de carga, sendo que um segundo veículo pode partir dali, reduzindo sua distância percorrida e o tempo consumido para a entrega. Esse modelo logístico, portanto, não permite o estudo a partir de um Problema de Roteamento de Veículos com Múltiplos Depósitos (MDVRP).

Considerando as características relacionadas ao emprego de mais de um depósito e a restrição de duração das rotas, o estudo mais próximo é o proposto por Crevier *et al.* (2007) que concebe a possibilidade de movimentação entre os depósitos em problemas envolvendo múltiplos depósitos (MDVRPI). Entretanto, a condição de movimentação entre os mesmos está posta de modo que um veículo inicie a rota em um determinado depósito e termine em outro.

Dessa forma, e considerando que não foi encontrada uma variante específica para essa condição, propõe-se, nesse trabalho, um novo modelo logístico, que atenda a este problema em particular, assim denominado: Problema de roteamento de veículos com depósito de apoio e restrição de duração (em inglês, *Vehicles Routing Problem with Support Deposit and Duration Constraints* – SD-DCVRP). A sigla foi assim formulada para que não se confunda com *Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints* (VRPSD-DC) nominado nos estudos de Erera, Morales & Savelsbergh (2009).

O modelo matemático necessário a resolução desta nova vertente do VRP precisa, portanto, estar adequada às restrições relativas ao novo problema identificado.

3.4 Aplicação dos métodos de simulação e otimização

A definição dos métodos utilizados para garantir um estudo fiel à realidade da

organização e, ao mesmo tempo, ser capaz de apontar a melhor maneira de realizar o roteamento de veículos desta transportadora, é, aqui, apresentada. Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, quatro fases principais foram abordadas: Análise dos dados, simulação de cenários, otimização das rotas, proposição de interface.

A primeira fase foca no levantamento dos dados de entrega da transportadora e sua posterior análise por métodos estatísticos. O tratamento estatístico foi empregado para identificar as características de entregas como locais e rotas mais comuns, variabilidade das entregas, média diária de localidades visitadas e o desvio-padrão dessas médias.

As informações foram obtidas junto à transportadora Correia Martins, em seu banco de dados gerencial, entre os dias 01 de novembro de 2017 e 20 de abril de 2018, considerando todas as entregas realizadas neste período.

As informações estatísticas resultantes das análises desses dados, foram base para a realização da segunda fase: aplicação do modelo de Monte Carlo na simulação de cenários de entregas. Os modelos matemáticos dos cenários de simulação foram construídos a partir dos recursos disponíveis no software adotado: o Microsoft Excel, disponível no Laboratório de Otimização e Simulação (LOSI), da Unifei Itabira. Na montagem da função probabilística do modelo de Monte Carlo, foram considerados todos os dados levantados. Dessa forma, todas as cidades visitadas no período estudado poderiam aparecer nos cenários simulados, havendo uma supressão das cidades que não fossem da rota específica adotada para as análises e respeitando as variabilidades probabilísticas gerais dos dados coletados.

Foram simulados, pelo método de Monte Carlo, 20 cenários distintos, divididos em dois grupos de dez cenários, sendo cada um dos cenários representado por um grafo específico, considerando, apenas, as cidades da rota leste. O número de cenários foi definido como modo de verificar, de fato, qual modelo responderia melhor às demandas de roteamento que poderiam surgir. Para tanto, os dez primeiros modelos simulados foram baseados, exclusivamente, na condição atual de atuação da organização, conforme variação estatística identificada na planilha de dados fornecida pela empresa. Na condição atual de atuação, existe o transporte de carga fracionada para cidades de diferentes rotas (leste, oeste, norte e sudoeste), o que na prática dilui o volume de entregas entre as rotas e gera uma média de entregas diárias igual ou inferior a 6 cidades na rota leste, alvo do estudo.

Os outros dez cenários consideraram o aumento esperado de demanda para a rota leste, utilizando-se os mesmos dados de probabilidade, mas elevando a demanda, segundo as expectativas almejadas pela transportadora, que é a dedicação de distribuição apenas à rota leste e a expectativa do aumento do número de entregas nesta rota em volume similar ao

conjunto das quatro rotas atualmente atendidas pela transportadora. Tal expectativa é oriunda da negociação atual da transportadora com uma distribuidora atuante no estado de Minas Gerais que demanda por atendimentos de entregas à região do Médio Piracicaba e do Vale do Aço.

Para a definição das cidades que compõem os grafos foi empregado o software MS Excel, ferramenta com a qual a simulação foi gerada. Na sequência, suprimidas as cidades que não pertenceriam à rota definida para determinado cenário, foram gerados, um a um, os grafos, considerando as conexões entre as cidades como arcos e excluindo como vértice aquelas cidades que, mesmo sendo da rota leste, por ventura não tenham sido sorteados na simulação.

A terceira fase foi subdividida em outros dois componentes: o primeiro, para a aplicação dos cenários obtidos em um modelo matemático de Programação Linear Inteira e o segundo, na utilização do referido modelo para a solução dos cenários, por meio da aplicação de ferramentas computacionais.

O modelo matemático de programação Linear Inteira adotado como referência foi o modelo utilizado para resolução de problemas convencionais de roteamento de veículos baseado em Toth e Vigo (2002), que são apresentados pelas Eq. 5 a 11:

$$\min \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} C_{ij} X_{ij} \quad (5)$$

$$\sum_{i \in V} X_{ij} = 1 \quad \forall j \in V \setminus \{0\} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in V} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in V \setminus \{0\} \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} X_{i0} = k \quad (8)$$

$$\sum_{j \in V} X_{0j} = k \quad (9)$$

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} X_{ij} \geq \gamma(S) \quad \forall S \subset V \setminus \{0\}, \quad S \neq \emptyset \quad (10)$$

$$(11)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \forall i, j \in v$$

A simbologia do modelo representa:

C_{ij} – Custo de ir do vértice i para o vértice j ;

X_{ij} – Variável de decisão que representa se o veículo passará ou não por determinada aresta;

v – Conjunto de vértices (localidades) que compõem o grafo;

k – Número de veículos;

γ – Número mínimo de veículos que percorrem a rota S ;

S – Conjunto de vértices (que está contido no conjunto geral v);

Os demais símbolos que aparecem no modelo são representações de símbolos matemáticos.

A Eq. (5) apresenta a função objetivo de minimização do custo final da rota. As demais equações representam as restrições do problema, sendo que: as Eq. (6) e Eq. (7) impõem que exatamente um arco entra e sai de cada vértice associado a um cliente, respectivamente. As Eq. (8) e Eq. (9) exigem que o somatório das rotas que chegam e que partem da origem sejam igual ao número total de veículos utilizados para as entregas nas rotas estabelecidas, respectivamente. A restrição definida pela Eq. (10) são as chamadas restrições de corte de capacidade, que impõem a conectividade da solução e os requisitos de capacidade do veículo, estipulando que cada corte $(V \setminus S; S)$ definido por um conjunto de vértices S é atravessado por um número de arcos não menores que $\gamma(S)$ (número mínimo de veículos necessários para atender ao conjunto S). A Eq. (11) é condicionamento para que a variável de decisão assuma valor binário para todo vértice i ou j pertencente ao conjunto de vértices v .

Um ponto chave na modelagem diz respeito às considerações específicas que interferem diretamente na definição do conjunto de restrições. Um desses fatores está diretamente relacionado às características e condições das vias pelas quais são montadas as rotas e que foram consideradas, em termos de distância, na formulação dos grafos. Como amplamente explicitado na revisão da literatura, um dos desafios de se criar um modelo de transporte competitivo em relação aos concorrentes, reside em pontos não controláveis diretamente pela organização, que envolvem a velocidade média por trecho, trechos com gargalos específicos, eventuais barreiras de pedágios e, principalmente, a condição estrutural das rodovias.

Neste sentido, buscou-se criar ponderações em relação às velocidades permitidas nas vias, que são menores nas estradas estaduais que nas rodovias federais, a consideração atual

de acréscimo sobre trechos em obras e redução da velocidade média para trechos com condição de pavimentação precária ou falta de pavimentação, sendo os arcos apresentados nos grafos traduzidos em termos de tempo de percurso.

Outro ponto de adaptação diz respeito aos modelos em si, uma vez que se tenha identificado variação do tipo de VRP, é necessária a inserção de restrições específicas às características diferenciais da nova variante do problema, sendo aplicado, portanto e quando cabível, uma adaptação do modelo ora apresentado.

4. ANÁLISE DOS DADOS E RESULTADOS

Tomando como base as considerações propostas nos procedimentos metodológicos no capítulo anterior, este capítulo, busca responder aos objetivos de pesquisa, apontando as respostas para as modelagens, simulações e otimizações em relação ao problema pesquisado.

4.1 Classificação do problema de roteamento

O SD-DCVRP trata da proposição de uma nova variante para o problema de roteamento. Considerando-se as particularidades oriundas das características dos processos logísticos da empresa objeto de estudo, deve-se ater às seguintes propriedades:

- Deve-se possuir, no mínimo, dois centros de distribuição, sendo o primeiro de maior importância, a partir do qual partem todas as entregas previstas, e o segundo, apenas com caráter de apoio, de onde partem os demais veículos;
- Por condição lógica da manutenção de um centro de distribuição de apoio, compreende-se que o CD principal é periférico, possuindo longas distâncias em relação a determinados clientes, ao passo que o CD de apoio possui localização centralizada;
- Variações do tamanho e da capacidade de carga da frota não são fatores relevantes para o problema, uma vez que, por entregar cargas fracionadas, o volume nunca é excedido;
- O tempo consumido para todas as entregas não pode ser excedido, considerando um limite diário de trabalho dos veículos e funcionários. Além disso, deve ser acrescido um tempo pré-estipulado para as entregas em mais de um estabelecimento, realizado em uma mesma cidade.
- Toda vez que um veículo que tenha partido do CD 1 tenha que realizar transbordo no CD 2, deverá resultar em um acréscimo de tempo pré-estipulado para a referida rota.

A determinação pela nova variante do problema de roteamento de veículo foi considerada tendo em vista que a condição de trabalho exercida pela empresa objeto de estudo não se enquadrou em nenhum modelo apresentado nos mais diversos estudos sobre o tema, possuindo peculiaridades que exigiam a proposição dessa nova variante.

4.2 Definição do modelo matemático para o SD-DCVRP

A partir do conjunto de informações obtidas, e considerando a variante de problema

identificado como SD-DCVRP, apresentam-se, como alternativas para sua resolução, duas condições de modelagens matemáticas diferentes, sendo a primeira, a proposição de um modelo matemático específico para a resolução do SD-DCVRP e a segunda, com a utilização de modelo matemático padrão para resolução de problemas de roteamento de veículos, porém, com adaptações para atender ao problema fim.

Na sequência são apresentadas as descrições dos modelos e adaptações, além da definição de escolha de um método para aplicação.

4.2.1 Modelo matemático padrão para o SD-DCVRP

O problema do SD-DCVRP possui a representação de seu grafo $G = (S \cup L, A)$. Os índices, parâmetros, incluindo os conjuntos, e as variáveis de decisão são apresentados, respectivamente, na sequência:

Índices

$i ; j$: Vértices (cidades);

k : veículos;

l : CD de apoio;

$i_0 = l_p \rightarrow$ CD principal;

$i_l = l_a \rightarrow$ CD de apoio;

Parâmetros

a é o percurso entre uma cidade i e uma cidade j (aresta) também representada por (i, j) ;

μ é o tempo consumido para ir de uma localidade a outra (custo da aresta);

D é o tempo total de duração permitido;

b_j é o tempo de baldeação (transbordo) no cliente;

b_l é o tempo de baldeação (transbordo) no CD de apoio;

e é o número de entregas em uma determinada localidade.

$S \{1, \dots, n\} \rightarrow$ Conjunto de Cidades (Clientes);

$L \{0, \dots, l\} \rightarrow$ Conjunto de Centros de Distribuição;

$H \{S \cup L\} \rightarrow$ Conjunto de Localidades;

$A \{1, \dots, a\} \rightarrow$ Conjunto de Arestas;

$K \{1, \dots, k\} \rightarrow$ Conjunto de Veículos;

$E \{1, \dots, e\} \rightarrow$ Conjunto de entregas;

O modelo proposto utiliza como padrão uma variável de decisão comum aos problemas de roteamento de transporte, na qual:

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & , \text{ se o veículo } k \text{ percorre a aresta } (i, j) \\ 0 & , \text{ se o veículo } k \text{ não percorre a aresta } (i, j) \end{cases}$$

Onde: $i, j, \in \{0, \dots, n\}$ $i \neq j$ e $k \in \{1, \dots, K\}$.

Considerando todos os aspectos citados, têm-se a proposição do modelo matemático para o SD-DCVRP propriamente dito, representadas pelas Eq. 12 a 23:

Função Objetivo:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^k t_{ij} \cdot x_{ijk} \quad i \neq j \quad (12)$$

s.a.:

$$\sum_{j=0}^n x_{0j1} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{1jk} = 1, \quad \forall k \in K, k \neq 1 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i01} = 1 \quad (15)$$

$$\sum_{i=2}^n x_{i1k} = 1, \quad \forall k \in K, k \neq 1 \quad (16)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in S, i = 2, \dots, n \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in S, = 2, \dots, n \quad (18)$$

$$\sum_{k=2}^K \sum_{j=1}^n x_{1jk} = k \quad (19)$$

$$x_{0l1} = \begin{cases} 1 & l = 2 \\ 0 & l \neq 2 \end{cases} \quad (20)$$

$$\sum_{a=1}^A x_{ijk} (\mu_{ij} + e_j \cdot b_j) \leq D \quad (21)$$

$$\sum_{a=1}^A x_{ijk} (\mu_{ij} + e_j \cdot b_j) \leq D - (\mu_{0l} + b_l), \quad \forall k \in K, k \neq 1 \quad (22)$$

A Eq. 12 apresenta a função objetivo de minimização do tempo da rota para a variante proposta. As demais equações representam as restrições do problema. A restrição apresentada na Eq. 13 é utilizada para designar que todas as entregas devem partir com o veículo 1 do CD principal, uma vez que todas as cargas estão em tal CD; a restrição apresentada na Eq. 14 define que, para situações em que haja mais de um veículo, todos partam do CD de apoio, exceto o veículo 1, de modo que este CD, por se encontrar centralizado, passa a ser o ponto de distribuição e, conseqüentemente, o ponto de partida de todos os veículos adicionais. As expressões da Eq. 15 e Eq. 16 garantem que todos os veículos utilizados retornem para o CD do qual partiram;

A restrição proposta na Eq. 17 impõe condição para que apenas um veículo chegue em cada vértice, ao passo que a Eq. 18 descreve que apenas um veículo pode deixar cada vértice. A combinação dessas duas restrições impede que uma determinada aresta seja percorrida por mais de um veículo. A Eq. 19 descreve que o número de rotas que saem do CD de apoio sempre será igual ao número de veículos que partem deste CD, ou seja, cada veículo faz apenas uma única rota.

As restrições formuladas em nas Eq. 20, Eq. 21 e Eq. 22 trazem a principal distinção em relação a outros modelos, caracterizando o modelo SD-DCVRP, garantindo que todo veículo que parta do CD de apoio deva esperar que o veículo que tenha saído do CD principal passe primeiramente no CD de apoio para, só então, iniciar sua rota (Eq. 20). Considerando

que há limite de tempo para o percurso total da rota ou das rotas que compõem o sistema de entregas, o percurso total percorrido pelo veículo que parte do CD principal não pode ser excedido (Eq. 21). Da mesma forma, todos os percursos que partem do CD de apoio também não podem exceder o tempo total disponível que, neste caso, deve considerar, ainda, o tempo gasto pelo primeiro veículo levar as cargas do CD principal para este CD (Eq. 22), sempre considerando o tempo de transbordo ou descarga da carga.

4.2.2 Adaptações do modelo matemático convencional para VRP

A complexidade computacional associada à resolução dos modelos com características logísticas, impõem que adequações e simplificações sejam adotadas. No estudo realizado, a existência de dois CDs impactam significativamente na complexidade de resolução. A solução para esse problema poderia ser o desmembramento do grafo geral em dois ou mais subgrafos, sendo que cada um representaria apenas um centro de distribuição.

Esta prática é comum em trabalhos que avaliam problemas de roteamento de veículos com múltiplos depósitos, sendo empregado como uma estratégia para simplificação do problema (ALVES, 2015).

Entretanto, por não se tratar de um MDVRP típico, uma pequena adaptação do modelo precisa ser realizada no desmembramento. Para maior compreensão, deve-se entender que, no problema estudado, duas situações de atendimento dos clientes podem ocorrer: a primeira situação é aquela em que o número de cliente (vértices) é pequeno, de tal modo que um único centro de distribuição seria suficiente, configurando-o como um problema comum de VRP com restrição de duração. Para este poderá ser adotado o modelo convencional descrito pelas Eq. 23 a 30, já incluindo restrição de tempo total da rota.

Função Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \mu_{ij} \cdot x_{ij} \quad (23)$$

Onde $i \neq j$

s.a.:

$$\sum_{j=0}^n x_{0j} = 1, \quad \forall j \in H \quad (24)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{i0} = 1, \quad \forall i \in H \quad (25)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in S, i \neq 0 \quad (26)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in S, j \neq 0 \quad (27)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - r(S), \quad \forall S \subseteq H \setminus \{0\}, |S| \geq 2 \quad (28)$$

$$\sum x_{ij} (\mu_{ij} + e_j \cdot b_j) \leq D \quad (29)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (30)$$

Todos os símbolos utilizados são equivalentes ao modelo inicial apresentado para a resolução do SD-DCVRP.

A Eq. 23 apresenta a função objetivo focada na minimização do tempo do roteamento. A expressão apontada na Eq. 24 é condicionante de que a rota se inicie, obrigatoriamente, do centro de distribuição, ou seja, o veículo utilizado sairá do depósito; A Eq. 25 é a restrição empregada para garantir que a rota finalize sempre no centro de distribuição; A Eq. 26 define a existência de uma única rota que parte do CD, percorre todos os vértices e retorna ao CD; A Eq. 27 preza pela eliminação de sub-rotas, ou seja, impede a ocorrência de rotas que se iniciem e/ou terminem em um dos vértices que não seja o CD. Única restrição inserida que difere em relação ao modelo convencional de VRP, a Eq. 28, limita o tempo total da rota, já considerando o tempo de transbordo necessário no cliente. Por fim, a Eq. 29 é a reprodução da variável de decisão, limitando-a a condição binária em que $x_{ijk} \in \{0, 1\}$.

Já a segunda hipótese, se refere àquelas rotas que necessitam de um tempo maior que o disponível para serem cumpridas, ou que possuem um grande número de cidades (vértices) a serem percorridas, situações na qual seriam necessárias a utilização dos dois centros de distribuição (principal e de apoio). Neste caso, dividem-se as cidades entre os dois CD e aplica-se o modelo descrito na sequência a para o CD principal e o terceiro modelo, para o CD de apoio.

Função Objetivo:

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \mu_{ij} \cdot x_{ij}$$

Onde $i \neq j$

s.a.:

$$x_{01} = 1, \tag{31}$$

$$\sum_{i=0}^n x_{i0} = 1, \quad \forall i \in H$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in S, i \neq 0$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in S, j \neq 0$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - r(S), \quad \forall S \subseteq H \setminus \{0\}, |S| \geq 2$$

$$\sum x_{ij} (\mu_{ij} + e_j \cdot b_j) \leq D$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}$$

Neste segundo modelo, todos os símbolos empregados são equivalentes aos dos modelos anteriores. O mesmo vale para a função objetivo e as restrições, com exceção da expressão apresentada na Eq. 31, que foi alterada no intuito de forçar o primeiro deslocamento a ocorrer entre o centro de distribuição e a primeira cidade do grafo, que, no contexto geral, é o CD de apoio. Com esta condição, situações que exijam uso dos dois CD, o primeiro percurso sempre ocorrerá entre o CD principal e o CD de apoio.

O complemento da solução se dá pela aplicação do terceiro modelo adaptado, que é aqui apresentado a partir da Eq. 32.

$$\text{Min} \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=1}^k \mu_{ij} \cdot x_{ijk} \tag{32}$$

Onde $i \neq j$

s.a.:

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = 1, \quad \forall k \in K$$

$$\sum_{i=0}^n x_{i0k} = 1, \quad \forall k \in K$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall i \in S, i \neq 0$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij} = 1, \quad \forall j \in S, j \neq 0$$

$$\sum_{k=2}^K \sum_{j=1}^n x_{0jk} = k, \quad \forall j \in C \quad (33)$$

$$\sum x_{ij} (\mu_{ij} + e_j \cdot b_j) \leq D$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - r(S), \quad \forall S \subseteq H \setminus \{0\}, |S| \geq 2$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}$$

Nesta adaptação, todos os símbolos são equivalentes aos dos modelos anteriores. A função objetivo, expressa na Eq. 32, possui, assim como todo restante do modelo, o incremento da variável k representando a possibilidade do uso de mais de um veículo a partir deste CD. A Eq. 33 aponta que o número de rotas que partem deste CD é igual ao número de veículos utilizados, na qual cada veículo fica responsável por uma rota.

4.2.3 Escolha do modelo matemático a ser empregado

A escolha do método adotado deve perpassar por uma análise ampla, que permita, ao mesmo tempo, solucionar o problema acadêmico, como dar solução efetiva para a transportadora Correia Martins, sendo, portanto, necessário avaliar os modelos para pô-los em prática.

A proposição de um novo modelo matemático específico se sobressai quando considerado a relevância acadêmica do estudo, bem como em função de se obter um resultado mais preciso, o que tenderia a escolha, portanto, pelo modelo matemático específico para o SD-DCVRP.

Noutra perspectiva, considerando-se que um dos propósitos principais desta pesquisa reside na capacidade de dar real solução a um problema prático de uma determinada organização, deve-se levar em conta a capacidade de transformar o modelo (ou os modelos) escolhido(s) em ferramenta que permita usabilidade para a empresa. Neste aspecto, há que se considerar dois fatores principais: o fator técnico e o fator econômico.

Considerando o fator técnico, que é adaptar o modelo matemático a um programa computacional com interface amigável, que permita que qualquer pessoa que não seja um estudioso ou entusiasta seja capaz de operá-lo diariamente. Nesta condição, o modelo específico deve levar tempo considerável, e inicialmente inestimável, para ser implementado em um *software* já comercializado, dado que este modelo pode ter baixo potencial comercial, e, neste sentido, poderia ser requerido o desenvolvimento completo, não aproveitando plataformas já existentes.

Os modelos adaptados, por sua vez, perdem a capacidade de dar a melhor resposta de rota, embora melhorem o roteamento de uma forma geral, porém podem ser aplicados de forma simplificada, podendo ser usados, inclusive, em planilhas de Excel e de forma imediata.

Em relação ao segundo fator, para que se façam adaptações em *softwares* de roteamento já disponíveis no mercado, antes é necessário que a empresa adquira o *software*, teste-o, valide-o e solicite orçamentação para adaptação do programa (que pode ser admitido ou não), o que só em termos de tempo e mão de obra despendidos já inviabilizaria financeiramente esta opção. *Softwares* personalizados, por sua vez, costumam ser, por via de regra, ainda mais dispendiosos, afora o tempo necessário para adaptação e correção de falhas pontuais.

Sendo assim, soluções simplificadas, como a utilização dos modelos adaptados através do uso de planilhas personalizadas, podem entregar uma relação custo x benefício positiva que compense uma possível diferença entre o resultado de roteamento apresentado e o real resultado ótimo. A partir destas ponderações, considera-se que a utilização dos modelos matemáticos convencionais adaptados seja, para esta situação específica, a opção a ser utilizada para a resolução dos cenários.

4.3 Simulação dos cenários por Monte Carlo

São propostos aqui os cenários simulados que serão submetidos a tal modelo.

No primeiro grupo, todas as cidades servidas foram incluídas na simulação, posteriormente, removendo-se aquelas que não pertenciam à rota leste e excluindo-se, também, casos de repetição das mesmas cidades. A título de exemplo e com intuito de facilitar a explicação, o Quad. 2 apresenta o segundo cenário simulado. Todas as simulações do primeiro grupo de dez cenários e seu respectivo número pseudo-aleatório estão apresentados no Apêndice D, ao passo que a função cumulativa e a função de probabilidade calculada a partir dos dados levantados são apresentadas no Apêndice E.

Quadro 2 – Exemplo da simulação de um cenário

CENÁRIO 4	
0,4091568	Itabirito
0,4375502	Itabirito
0,0318399	Itabirito
0,1845767	Itabirito
0,1272607	Itabirito
0,8666859	Ipatinga
0,2253055	Itabirito
0,2040023	Itabirito
0,7781646	João Monlevade
0,5772978	Itabirito
0,9095511	São D. do Prata
0,6590998	Itabira
0,6044617	Itabira
0,8274435	Antônio Dias
0,7824051	João Monlevade
0,3738474	Itabirito

Como apresentado no Quad. 2, para a quarta simulação realizada, são gerados 16 números pseudo-aleatórios, representados na coluna da esquerda. Cada número, gerado de acordo com uma função de probabilidade estudada (especificada no Apêndice E e detalhadamente explicada na seção 3.2), devolve uma cidade correspondente à faixa. As cidades que não pertencem à rota leste são suprimidas, assim como as cidades desta rota que aparecem mais de uma vez na simulação, como acontece neste exemplo com as cidades de Itabira e João Monlevade, que apareceram duas vezes no grupo de resposta da simulação. As cidades que receberam destaque formarão o grafo representativo do problema.

Já no segundo grupo, foram consideradas, apenas, as cidades da rota leste e, embora seja compreendido que o incremento de demanda não se dará nas mesmas cidades auferidas nos dados coletados, tampouco na mesma proporção observada, considerou-se que, pelo menos para fins de estudos prévios e validação do modelo matemático, as simulações propostas são aceitáveis para os objetivos que se propõem, principalmente pelo fato de que as maiores cidades da rota entre a RMBH e o Vale do Aço estão contidas no modelo obtido dos dados e que outras cidades da região não consideradas nos dados são, quase sempre, muito próximas de outras que estão contidas.

O procedimento para definição dos grafos para cada cenário foi similar ao adotado no primeiro grupo de dez, com a diferença que, neste segundo caso, não foi necessária a supressão de cidades que não pertenciam à rota. Para esta segunda condição, o resultado numérico da simulação pode ser visto no Apêndice F, enquanto a função cumulativa e a função de probabilidade específica apenas para a rota leste são apresentadas no Apêndice G.

A partir da definição do grupo de cidades que formam cada grafo, foi elaborada a matriz de distâncias, considerando existir a possibilidade de que todas as cidades possuam arestas entre si e, ao mesmo tempo, compreendendo que o tempo consumido para se locomover do ponto A para o ponto B não necessariamente terá o mesmo valor de ir do ponto B para o ponto A. A matriz de tempos de locomoção entre as cidades do quarto cenário simulado é apresentada na Tab. 2.

Tabela 2 – Matriz de distâncias entre vértices do grafo para o Cenário 4 – Tempo em min.

		Destino					
		BH	IT	JM	AD	IP	SD
Origem	BH	–	118	122	175	209	148
	IT	139	–	49	79	110	66
	JM	157	49	–	76	114	43
	AD	206	78	76	–	54	65
	IP	240	116	107	54	–	99
	SD	176	66	43	65	106	–

Como a simulação é realizada apenas para os destinos, a matriz já inclui o ponto de origem, que é a localização do CD principal. A tabela contendo a relação das distâncias entre origem e destino de todas as cidades que compõem a rota leste está apresentada no Apêndice H. Dela derivam-se todas as matrizes de distâncias (origem x destino) para cada um dos 20 cenários simulados.

Já em relação ao tempo consumido no vértice, considerou-se que, com base em apontamento médio da própria empresa, para cada cidade se consome um tempo adicional de 20 minutos, referente ao descarregamento dos materiais, devendo haver o acréscimo de 20 minutos na mesma cidade a cada situação de repetição da cidade em determinado cenário simulado.

4.4 Resultados obtidos por aplicação de técnicas computacionais

Com o modelo matemático definido e de posse dos cenários simulados, a sequência da análise se volta para a aplicação de técnicas computacionais para a resolução de cada um dos 20 problemas. Considerou-se que a utilização da programação linear inteira seria suficiente, já que, para todas as situações, tratara-se de grafos com um número relativamente baixo de vértices. Definiu-se, para tanto, a utilização do Solver, através do software MS Excel, com presunção de linearidade e empregando o método simplex para a resolução do modelo.

Ao aplicar cada um dos cenários a um modelo de programação linear inteira, obteve-se o roteamento adequado para cada cenário. Em cada situação, inicialmente, o número de vértices determinaria se haveria, ou não, a necessidade da utilização do CD de apoio. O número máximo de vértices estabelecido para a utilização de um único CD foi de cinco, considerando o vértice do próprio CD. Toda vez que este valor era ultrapassado, exigiria a inclusão do CD de apoio para saída de uma segunda ou mais rotas.

Caso o número de vértices permitisse a utilização de um único CD, mas o tempo total da rota ultrapasse o limite estabelecido, então, da mesma forma, também seria sugerido o desmembramento da rota entre os dois centros de distribuição. Tal condição determinaria o número de veículos utilizados.

O tempo máximo para a resolução computacional de cada um dos cenários foi estabelecido em 300 segundos. O número máximo de iterações também foi limitado para que o tempo de resposta não se apresentasse de forma prolongada, sendo definido o valor de 300 iterações. Em nenhuma situação, seja tempo de resolução ou número de iterações, tais valores foram atingidos.

Os resultados obtidos para o primeiro grupo de cenários são apresentados na sequência, pela Tab. 3.

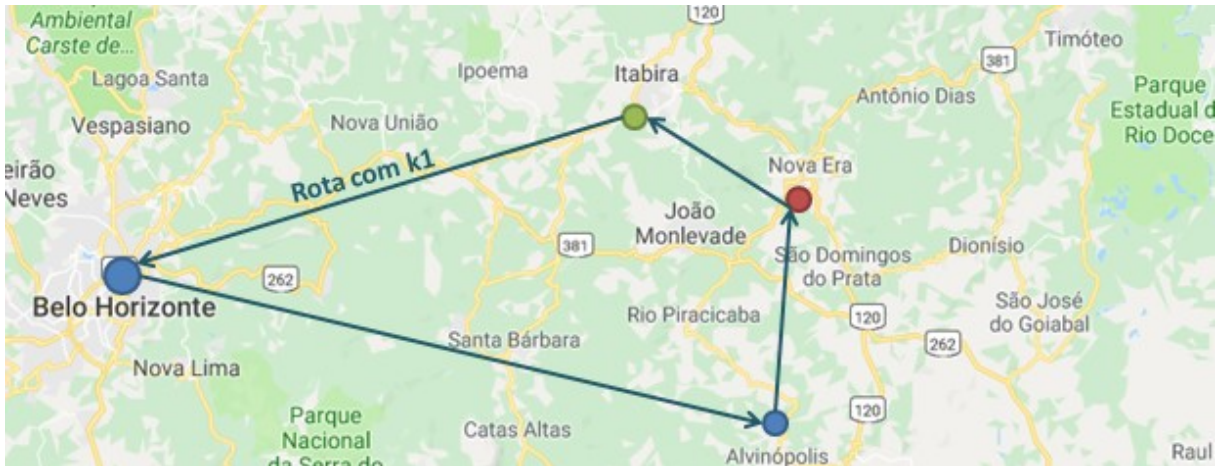
Tabela 3 – Conjunto de resultados obtidos para o primeiro grupo de cenários

Cenário	Vértices	Veículos empregados	Rotas por veículos (k)	tempo de trajeto por veículo (min)	Tempo com transb. (min)	Tempo final ótimo (min)
1	7	2	k1 : BH → JM → NE → IT → SG → BH k2 : JM → AD → IP → JM	375 237	455 277	732
2	4	1	k1 : BH → AV → NE → IT → BH	418	478	478
3	4	1	k1 : BH → IP → IT → SB → BH	491	551	551
4	6	2	k1 : BH → JM → SD → AD → IT → BH k2 : JM → IP → JM	447 221	527 241	768
5	3	1	k1 : BH → IT → JM → BH	310	350	350
6	5	1	k1 : BH → JM → AV → SD → IT → BH	463	543	543
7	4	1	k1 : BH → JM → IP → IT → BH	491	551	551
8	4	1	k1 : BH → AD → IP → TM → BH	483	543	543
9	5	1	k1 : BH → JM → RP → AD → IT → BH	436	516	516
10	5	1	k1 : BH → BC → JM → AD → IT → BH	470	550	550

O limite de tempo total do percurso de qualquer rota que parta do CD principal, já considerando o tempo de transbordo, é de 600 minutos. Já para as rotas que partem do CD de apoio é de 478, uma vez que os veículos que saem deste CD devem aguardar a chegada do veículo um para recebimento das mercadorias. O tempo final ótimo é o valor, em minutos, desde a saída do veículo 1 do CD principal até que os dois veículos tenham concluído todas as entregas e retornado ao CD do qual partiram.

Três observações devem ser consideradas: a primeira é a predominância de rota única para a maioria dos cenários, mais especificamente, oito de dez cenários, ocorrido, obviamente, pelo baixo número de vértices. O cenário mais simples, ou seja, com apenas uma rota é demonstrado, a título de exemplo, na Fig. 7, que representa o circuito ótimo de atendimento ao cenário 2.

Figura 7 – Representação gráfica da resolução do cenário 2



Fonte: autoria própria.

O segundo destaque é a situação do primeiro cenário, que, em função do número de vértices, precisou da utilização de dois veículos no atendimento de duas rotas: uma partindo do CD principal, realizada pelo veículo 1 (rota com k_1), e outra do CD de apoio, realizada com um segundo veículo (rota com k_2). A Fig. 8 ilustra como foram divididas essas rotas.

Figura 8 – Representação gráfica da resolução do cenário 1



Fonte: autoria própria.

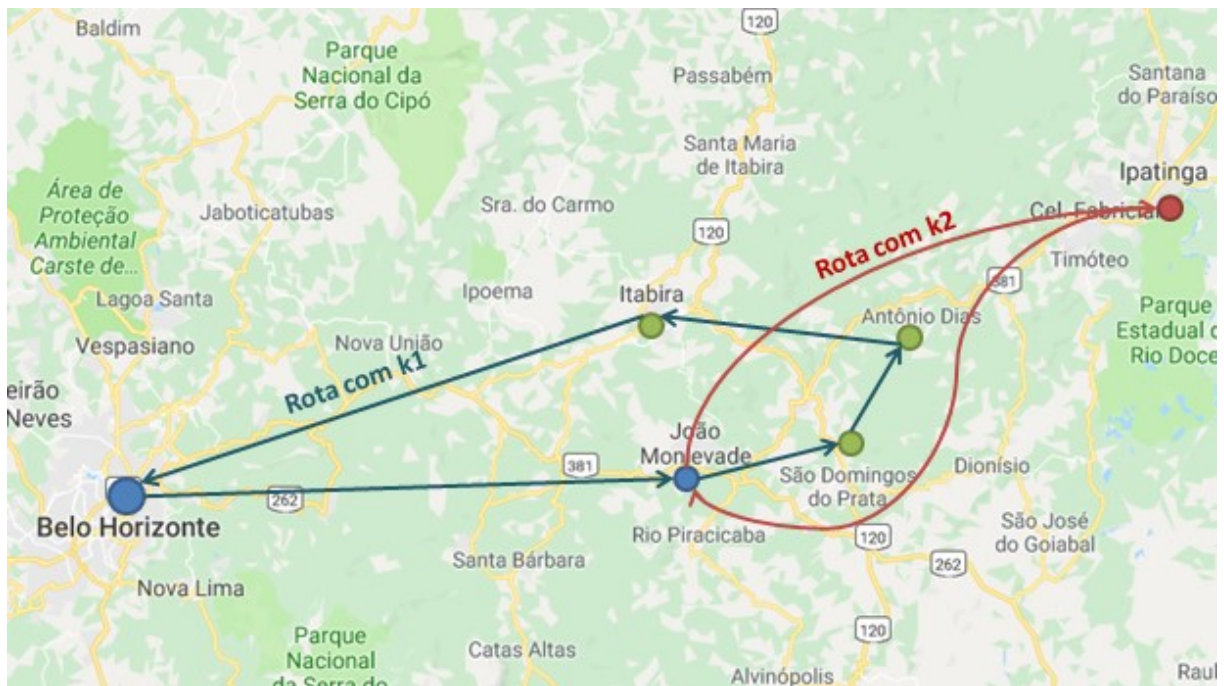
A representação gráfica apresenta a condição imposta, de que o primeiro percurso deveria ocorrer necessariamente entre as cidades que abrigam os CD: Belo Horizonte e João Monlevade. Isso viabilizaria a realização da segunda rota.

Em relação a este primeiro grupo de cenários simulados ainda cabe salientar o

resultado enviesado obtido na solução do cenário 4. Todos os cenários simulados obedecem uma regra definida para possibilitar a solução empregando-se o Solver do MS Excel. Esta regra estabelece que os quatro vértices mais próximos ao CD principal compõem o grafo para o veículo 1, incluindo o CD de apoio, quando necessário. Tal condição fez com que fosse criada uma segunda rota com apenas uma entrega, ou seja, partindo do CD de apoio até a cidade mais distante. Entretanto, neste cenário, uma das cidades constantes na primeira rota está localizada justamente entre o CD de apoio e a cidade mais distante do ponto inicial.

A solução obtida obedece aos requisitos mínimos impostos e atende à necessidade dos clientes da transportadora, mas não é um resultado satisfatório para a organização. Um problema que pode ser corrigido tacitamente, mas que deprecia a confiabilidade do mecanismo empregado para o roteamento e torna-se um problema a ser estudado e reparado. Esse conjunto de rotas é apresentado na Fig. 9.

Figura 9 – Representação gráfica da resolução do cenário 4



Fonte: autoria própria.

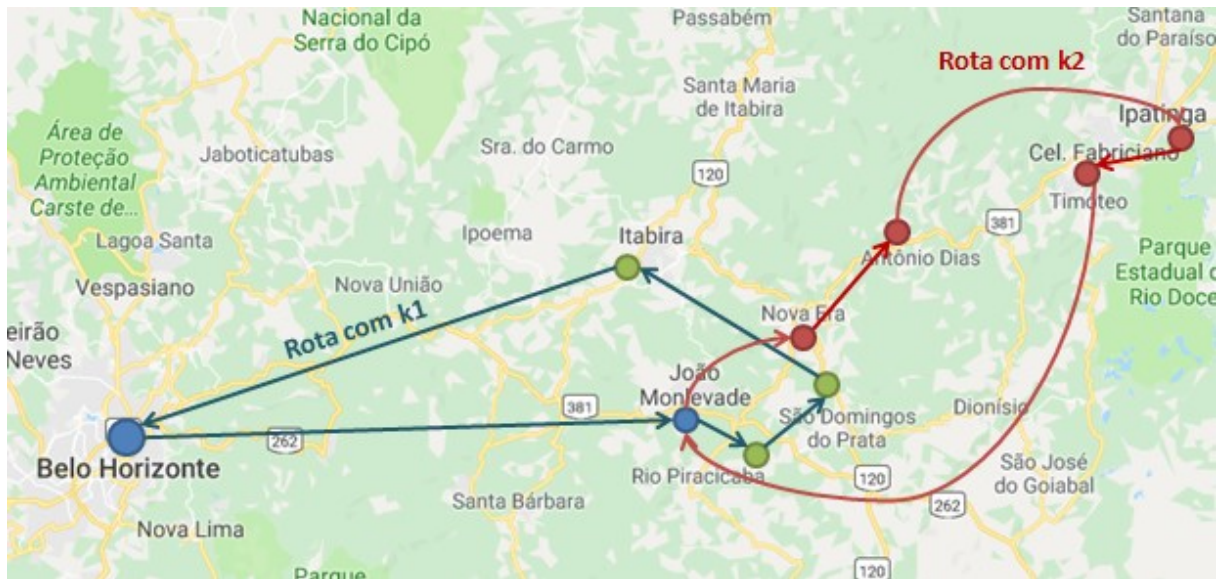
O segundo grupo de cenários, elaborado justamente como uma previsão de ampliação da atuação da empresa na referida rota, possui em todos os cenários a necessidade de utilização do CD de apoio. Os resultados gerais são apresentados conforme Tab. 4.

Tabela 4 – Conjunto de resultados obtidos para o segundo grupo de cenários

Cenário	Vértices	Veículos empregados	Rotas por veículos (k)	tempo de trajeto por veículo (min)	Tempo com transb. (min)	Tempo final ótimo (min)
11	9	2	k1 : BH → JM → RP → SD → IT → BH k2 : JM → NE → AD → IP → TM → JM	390 258	470 338	480
12	10	3	k1 : BH → JM → SG → BC → NU → BH k2 : JM → IT → NE → SD → JM k3 : JM → AD → CF → JM	349 291 222	429 371 262	513
13	9	2	k1 : BH → JM → AV → IT → BC → BH k2 : JM → NE → AD → IP → CF → JM	485 253	565 333	565
14	9	2	k1 : BH → JM → SG → BC → NU → BH k2 : JM → IT → NE → AD → TM → JM	349 286	429 366	508
15	7	2	k1 : BH → JM → AV → NE → IT → BH k2 : JM → AD → IP → JM	434 237	514 277	514
16	7	2	k1 : BH → JM → NE → IT → SG → BH k2 : JM → AD → IP → JM	375 237	455 277	455
17	8	2	k1 : BH → JM → SD → SG → BC → BH k2 : JM → IT → IP → AD → JM	396 289	476 369	511
18	9	2	k1 : BH → JM → SD → SG → CT → BH k2 : JM → IT → IP → AD → NE → JM	379 297	459 377	519
19	8	2	k1 : BH → JM → SD → BC → SG → BH k2 : JM → IT → AD → AV → JM	345 291	425 371	513
20	8	2	k1 : BH → JM → IT → SG → CT → BH k2 : JM → NE → AD → SP → JM	368 292	448 372	514

No segundo grupo de cenários, houve, como já esperado, a necessidade da utilização dos dois CD. Além disso, em oito dos dez cenários o tempo final ótimo, que aponta o tempo completo do processo, foi maior que o tempo dos veículos em movimento. O padrão é de duas rotas por cenário, a exemplo da demonstração na Fig. 10, exceto no cenário 12, situação na qual foi necessário o uso de três veículos, representado na Fig. 11.

Figura 10 – Representação gráfica da resolução do cenário 11



Fonte: autoria própria.

A fig. 10 representa, genericamente, a predominância do uso dos CD principal e de apoio e do uso de dois veículos para o cumprimento das rotas identificadas através da simulação. A grande exceção deste grupo foi o cenário 12 que, em função da quantidade de cidades, extrapola o tempo estabelecido como limite e, em função disso, precisou trabalhar com três rotas. A representação desta última condição é apresentada na Fig. 11.

Figura 11 – Representação gráfica da resolução do cenário 12



Fonte: autoria própria.

A relação das rotas salienta a importância, inclusive geográfica, do CD de apoio que fica situado na cidade de João Monlevade. A cidade, por estar aproximadamente centralizada

em relação ao conjunto de cidades, favorece o processo de distribuição para situação com maior número de vértices.

Ao final da aplicação da programação linear inteira na resolução dos cenários simulados, utilizando os recursos computacionais disponíveis e baseado no modelo matemático adaptado, pode-se alcançar um resultado aceitável, em que apenas um dos 20 cenários não obteve um resultado satisfatório, ou seja, 95% dos cenários obtiveram respostas válidas e úteis para o processo.

4.5 Proposição da interface para a ferramenta de roteamento

Compreendendo que a simples resolução de um grupo de cenários simulados não seria suficiente para atender aos requisitos da empresa estudada, considerou-se necessário criar um mecanismo que permitisse operacionalizar, diariamente, o modelo de cálculo que conduziria ao aprimoramento do processo da transportadora Correia Martins.

Foi proposta a elaboração de uma interface que pudesse ser facilmente operada pela equipe da empresa, possuindo visual enxuto e, ao mesmo tempo, sendo um sistema de baixo ônus para a organização. Tal interface foi elaborada em planilha do MS Excel com ferramentas de VBA. O modelo foi nomeado como Sistema de Controle de Movimentações – SCM e pode ser visto na Fig. 12.

Figura 12 – Painel de entrada do programa de roteamento SCM para Correia Martins



Fonte: autoria própria.

Através do painel de entrada do programa modelo, há acesso a outros quatro painéis

na qual a ideia é que as informações neles contidas sejam complementares e auxiliem na tomada de decisão pelos gestores. O painel de roteamento de veículos é proposto apenas como ferramenta de entrada de dados e apresentação dos resultados. Este painel é apresentado na Fig. 13.

Figura 13 – Painel de roteamento do programa SCM para Correia Martins

The screenshot shows the 'ROTEAMENTO DE VEÍCULOS' interface within a Microsoft Excel window. The interface is titled 'Correia Martins ROTEAMENTO DE VEÍCULOS'. It includes the following elements:

- Logo:** Correia Martins logo.
- Inputs:**
 - 'Defina o número de localidades atendidas:' with a value of 8.
 - 'Indicação de modelo de roteamento:' with a text box containing: 'Considerando o número de cidades indicada, é sugestivo a utilização do Modelo 2 para a resolução do roteamento.'
 - 'Insira a localidade do CD principal:' with 'Belo Horizonte'.
 - 'Insira a localidade do CD de apoio:' with 'João Monlevade'.
- Buttons:** 'Modelo 1' and 'Modelo 2' buttons.
- City Selection:** A grid of 15 cities for selection:

1. Itabira	6. Antônio Dias	11. [shaded]
2. João Monlevade	7. Ipatinga	12. [shaded]
3. Rio Piracicaba	8. Timóteo	13. [shaded]
4. São Domingos do Prata	9. [shaded]	14. [shaded]
5. Nova Era	10. [shaded]	15. [shaded]
- Results:** 'Resultado resumido das rotas:' section showing:
 - Rota 1: BH ... JM ... RP ... SD ... IT ... BH
 - Rota 2: JM ... NE ... AD ... IP ... TM ... JM
 - Rota 3: [empty]

Fonte: autoria própria.

O painel “roteamento de veículos” apresenta-se como uma interface de entrada de dados e apresentação dos resultados, sendo utilizada, portanto, unicamente para comunicação com as planilhas de cálculo, ou seja, nesta página de interface o usuário poderá inserir os dados relativos às localidades que deverão ser atendidas em um determinado dia de trabalho, estas informações são imediatamente alimentadas em planilhas auxiliares, porém ocultas, onde ocorrem o correlacionamento das distâncias entre as cidades baseadas em uma matriz de referência e, ao selecionar o botão para o cálculo, estas informações serão rodadas utilizando a ferramenta do Solver do MS Excel, que devolverá, então, a resposta para o problema nesta mesma tela.

Embora possua uma concepção simples, o programa gerado em planilha do MS Excel é suficiente para atuar de forma rápida e fácil, facilitando o uso diário. Além disso, atende à organização, alvo do estudo, dentro de suas necessidades e especificidades, uma vez que todos os parâmetros utilizados para criá-la foram baseados nos dados dessa empresa. Por se tratar de uma planilha do Excel, pode ser utilizado por qualquer funcionário da empresa, em qualquer lugar, desde que se tenha um computador disponível.

5. CONCLUSÃO

O problema de roteamento de veículos é um tipo de problema de grande complexidade e que há mais de 50 anos vem sendo amplamente estudado. Ao longo desse período, vários estudos trouxeram a tona uma série de variações considerando perspectivas específicas de diversas organizações que utilizam a logística como processo principal ou como um processo auxiliar às suas atividades. Este estudo buscou agregar novo conhecimento, identificando uma nova variação do problema e trazendo uma forma de tratamento para o mesmo.

A revisão da bibliografia trouxe informações importantes e relevantes para a aplicação do trabalho, podendo ser enxergada com duas grandes discussões: a primeira, extremamente alinhada aos aspectos logísticos que influenciam o trabalho de uma transportadora, e a segunda, trazendo discussão sobre as aplicações matemáticas para resolução dos mais diversos tipos de problemas de transporte e de roteamento de veículos.

Neste ponto é válido destacar que a compreensão acerca de como as condições das vias, do tráfego, do volume da malha e da importância do transporte terrestre podem interferir o trabalho de planejamento de uma transportadora e influenciar no percurso e no tempo da realização do transporte de cargas, influenciando também a definição das rotas.

Ao mesmo passo que se apresentou que há vertentes diferentes de roteamento de veículos, de modo que cada processo de cada organização pode se enquadrar em um tipo específico de roteirização, o que indica, de fato, o quanto se faz necessário o conhecimento de modelos matemáticos existentes, bem como as técnicas atuais para solução destes tipos de problemas, sobretudo por se tratarem de problemas de grande complexidade.

Uma vez compreendido os aspectos teóricos já difundidos sobre o tema amplo, o trabalho buscou a identificação pormenorizada da situação de trabalho da empresa alvo do estudo. Ao identificar o nível de atendimento da transportadora Correia Martins partindo da RMBH, optou-se pela escolha da região de maior relevância e maior desafio operacional para a empresa. A rota especificada envolve o conjunto de cidades acessadas via as BR 381, BR 262 e BR 120 no sentido leste, além de outras estradas estaduais e de ligação.

A percepção das características específicas de atendimento desta grande rota foi primordial para trazer a maior relevância deste estudo ao possibilitar a identificação de uma nova variante para o PRV: Problema de roteamento de veículos com depósito de apoio e restrição de duração (em inglês, *Vehicles Routing Problem with Support Deposit and*

Duration Constraints – SD-DCVRP)

O SD-DCVRP se assemelha, em alguns aspectos, ao roteamento de veículos com múltiplos depósitos (MDVRP), uma vez que possui mais de um centro de distribuição à disposição do processo operacional. Contudo, o SD-DCVRP possui como peculiaridade a diferença do nível de importância entre os CD, na qual necessariamente todas as mercadorias devem partir do CD principal. Além disso, há apenas dois CD, sendo um principal e outro de apoio. Estas condições se diferem completamente do MDVRP, que não faz distinção de importância dos depósitos, bem como pode possuir n depósitos relacionados.

O SD-DCVRP possui similaridade também com roteamento de veículos com restrição de duração (LDVRP ou VRPDC). Porém, no caso deste estudo, a duração total das rotas sofre influência do depósito de partida e da soma do número de entregas para uma mesma localidade.

Sendo assim, considera-se a inserção da nova variante como uma proposição de grande valia, uma vez que inicia uma discussão e métodos apropriados para solucionar um problema com especificidades muito bem delimitadas. A variante vem somar às muitas outras existentes, como forma de aprimorar o fluxo logístico para uma condição particular de operacionalização.

Toda compreensão relacionada, tanto ao estudo teórico, como às condições específicas da empresa estudada, possibilitou que todos os objetivos traçados para a presente dissertação pudessem ser alcançados.

Com o estudo foi possível identificar as diversas variáveis existentes nos processos de movimentação de materiais da empresa e, com base nessas informações, indicar o problema de roteamento da organização como sendo o SD-DCVRP.

Ao mesmo tempo em que se distinguia as características específicas desta variante em função do tipo de trabalho realizado pela transportadora, se assumia que tais características restringiam a operação dentro de determinadas condições. Estas restrições técnicas foram primordiais para determinar o modelo matemático característico, capaz de resolver o SD-DRVRP, e, ainda, a possibilidade de adaptar modelos matemáticos existentes para resolução simplificada do problema.

A partir dos dados da organização, foram criados modelos simulados das distribuições, divididos em dois grupos de dez cenários cada. O primeiro grupo de cenários simulados é relativo a uma condição atual de atendimento da transportadora. O segundo grupo de cenários simulados foi proposto como uma previsão estratégica de atendimento almejado pela organização para períodos futuros breves, totalizando 20 simulações, as quais foram

submetidas ao conjunto de modelos matemáticos adaptados.

O estudo computacional de cada um dos 20 cenários, a partir desses modelos, permitiu otimizar o tempo total de atendimento dos clientes desta organização e estabelecer, matematicamente, as rotas específicas (simuladas) a serem percorridas com os veículos da transportadora.

Neste estudo, seja para o primeiro grupo simulado, seja para o segundo, foi perceptível que o número de localidades envolvidas é relativamente pequeno, o que necessita de pouco esforço computacional para sua resolução. Este fato justifica a utilização de métodos exatos para a resolução dos problemas. Faz-se compreender, portanto, que até aqui não há necessidade de aplicação de métodos heurísticos ou meta-heurísticos para a resolução do problema ora apresentado.

Ainda em relação à resolução computacional, pôde-se perceber que a limitação imposta pela combinação do modelo matemático escolhido e a ferramenta utilizada para solucionar o problema, o Solver do MS Excel, trouxe, dentre os vinte cenários, uma única resolução insatisfatória que, embora atenda a todos os requisitos impostos e permita o atendimento ao cliente dentro dos prazos adequados, causaria o deslocamento desnecessário de um veículo em um determinado trecho da rota. Ainda assim, a resposta final alcançou resultado satisfatório em 95% dos cenários avaliados.

Considerando que os programas convencionais de roteamento disponíveis no mercado não são capazes de atender, na plenitude, as especificidades existentes para o atendimento do problema identificado na rota leste realizada por esta transportadora, e que a aquisição de softwares personalizados pode requerer um determinado tempo para serem criados e testados, além de serem onerosos, a solução proposta apresenta-se viável para a organização.

Portanto, considera-se o trabalho como um todo de grande valia para a ampliação das discussões variadas do problema de roteamento de veículos, trazendo um ganho científico para este campo de estudo, além de criar um novo modelo matemático na solução de uma vertente específica. Ao mesmo tempo, considera-se um trabalho amplamente válido em termos técnicos, uma vez que possibilitou conhecer detalhadamente este tipo específico de movimentação, permitindo aprimorar o processo de distribuição realizado pela transportadora Correia Martins.

5.1 Propostas de trabalhos futuros

È de suma importância destacar que este estudo deve ser tratado, ainda, como o princípio da discussão e resolução dos problemas aqui apresentados.

Cabe a busca pelo aprimoramento dos recursos da organização estudada, na aplicação dos métodos de roteamento de veículos, também considerando as outras regiões de atendimento da empresa (regiões norte, oeste e sudeste), de modo que a ferramenta possa atender a qualquer condição de trabalho da organização.

O aprimoramento do processo de gestão das rotas pode vir, ainda, por meio do desenvolvimento de um software específico, utilizando o modelo matemático padrão para o SD-DCVRP.

No campo científico, cabe a proposta de estudos futuros que permitam avaliar como seria o comportamento do SD-DCVRP para um número muito grande de vértices ou que exijam maior número de veículos utilizados, na qual a aplicação de métodos heurísticos e meta-heurísticos sejam necessários e, de modo a elucidar se o modelo matemático aqui apresentado pode se comportar bem com novas condições de variação para o problema.

REFERÊNCIAS

- ABREU, R. C. **Métodos de otimização para o problema de roteamento de veículos periódico com frota heterogênea.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Viçosa – UFV. Viçosa, 2016.
- ALVES, F. S. **Problemas de roteamento de veículos aplicados no planejamento logístico do transporte escolar da cidade de Coxim – MS.** Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2015.
- BALLOU, R. H. **Logística empresarial: transportes, administração de materiais e distribuição física.** 1. Ed. São Paulo: Atlas, 2011.
- BATEMAN, R. E. *et. al.* **Simulação de sistemas: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- BERTAGLIA, P. R. **Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento.** São Paulo: Saraiva, 2003.
- BERTAZZI, L.; MAGGIONI, N. **Faster rollout search for the vehicle routing problem with stochastic demands and restocking.** In: European Journal of Operational Research. No. 270, p. 487-497, 2018.
- BRANDSTÄTTER, C.; REIMANN, M. **The Line-haul Feeder Vehicle Routing Problem: Mathematical model formulation and heuristic approaches.** In: European Journal of Operational Research. No. 270, p. 157-270, 2018.
- BRAYSY, O.; GENDREAU, M. **Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms.** In: Transportation Science. nº 39(1), p. 104-118. 2005.
- CHIAVENATO, I. **Planejamento e Controle da Produção.** 2. ed. Barueri: Manole, 2008.
- CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos.** 3. Ed. Câmara Brasileira do Livro: São Paulo, 2010.
- CIANCIO, C.; LAGANAÁ, D.; VOCATURO, F. **Branch-price-and-cut for the Mixed Capacitated General Routing Problem with Time Windows.** In: European Journal of Operational Research. No. 267, p. 187-199, 2018.
- CINAR, D.; GAKIS, K.; PARDALOS, P. M. **A 2-phase constructive algorithm for cumulative vehicle routing problems with limited duration.** In: Expert Systems With Applications. No. 56, p. 48-58, 2016.
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Atlas do Transporte.** 1ª ed. Brasília: CNT, 2006.
- CNT – CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. **Transporte Rodoviário: desempenho do setor, infraestrutura e investimentos.** Brasília: CNT, 2017.
- COLAVITE, A. S.; KONISHI, F. **A matriz do transporte no Brasil: uma análise comparativa para a competitividade.** In: XII Simpósio de Excelência em Gestão e

Tecnologia. Resende: AEDB, 2015.

COSTA, M. T. D.; PAIVA, E. J. de; BARCELOS, B. F. **Aplicação combinada de técnicas de simulação na avaliação de arranjos organizacionais.** *In: Anais do XXVI Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP.* 2018.

CREVIER, B., CORDEAU, J. F., LAPORTE, G. **The multi-depot vehicle routing problem with inter-depot routes.** *In: European Journal of Operational Research,* 176(2), 756–773, 2007.

DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. **The truck dispatching problem.** *In: Management Science,* 6(1), 80-91, 1959.

DE PAULA, R. R. **Método de Monte Carlo e Aplicações.** Monografia. Universidade Federal Fluminense – UFF. Volta Redonda, 2014.

DESROCHERS, M.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. **A new optimization algorithm for the vehicle routing problem with time windows.** *In: Operations Research.* Vol. 40, N° 2, p. 342-354, 1992.

DESROCHERS, M.; LENSTRA, J. K.; SAVELSBERGH, M. W. P. **A classification scheme for vehicle routing and scheduling problems.** (Designing decision support systems notes). Vol. 8801. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1988.

ERERA, A. C.; MORALES, J.; SAVELSBERGH, M. **The Vehicle Routing Problem with Stochastic Demand and Duration Constraints.** *In: Transportation Science.* N° 44. p. 474-492, 2009.

FRANCISCO, R. P; CAMPOS, D. P; FRAZZON, E. M; MACHADO, R. L. **On the application of modelling and simulation to compare human- and automation-based order-picking systems.** *In: IFAC - International Federation of Automatic Control - Papers Online.* 2016.

GAUR, D. R.; SINGH, R. R. **A heuristic for cumulative vehicle routing using column generation.** *In: Discrete Applied Mathematics.* No. 228, p. 140-157, 2016.

GLOAGUEN, P; ÉTIENNE, M. P; LECORFF, S. **Online sequential Monte Carlos moother for partially observed diffusion processes.** *In: EURASIP Journal on Advances in Signal Processing.* 2018.

GOOGLE MAPAS. Disponível em: [Http://mapas.google.com](http://mapas.google.com). Acessado em: 20 de dezembro de 2018.

GUIMARÃES, T. A.; PEREIRA, L. G.; MEDEIROS, W.J.N. **Simulação de Monte Carlo e Métodos Heurísticos paralelizados para a resolução do problema do roteamento de veículos capacitados: uma comparação entre abordagens.** *In: Simpósio de Pesquisa Operacional da Marinha – SPOLM.* 2015.

HERNANDEZ, F.; FEILLET, D.; GIROUDEAU, R.; NAUD, O. **A new exact algorithm to solve the multi-trip vehicle routing problem with time windows and limited duration.** *In: Operation Research.* N° 12, p. 235–259, 2013.

HERRERA, O. J.; ALARCON, D. C. **Modelo de ruteo del centro de acopio de la Asociación de Recicladores de Bogotá empleando el método heurístico Clarke & Wright**

y **simulación de las rutas propuestas**. In: SERNA, M. E.. Desarrollo e innovación en ingeniería. Medellín: IAI, 2017.

HINTSCH, T.; IRNICH, S. **Large multiple neighborhood search for the clustered vehicle-routing problem**. In: European Journal of Operational Research. No. 270, p. 118-131, 2018.

JORDAN, W. C.; BURNS, L. D. **Truck backhauling on two terminal networks**. In: Transportation Research Part B: Methodological. Vol. 18(6), 487–503, 1984.

KRAMER, R. H. F. R.; SUBRAMANIAN, A.; PENNA, P. H. V. **Problema de roteamento de veículos assimétrico com frota heterogênea limitada: um estudo de caso em uma indústria de bebidas**. In: Gestão e Produção. Vol.23. Nº1, p. 165-176, 2016.

LACHTERMACHER, Gerson. **Pesquisa Operacional na tomada de decisões: Modelagem em Excel**. 4 ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall Brasil, 2009.

LAPORTE, G. **The Vehicle Routing Problem: An overview of exact and approximate algorithms**. In: European Journal of Operational Research. No 59, p. 345-358, 1992.

LAPORTE, G. **Fifty Years of Vehicle Routing**. In: Transportation Science. No 04, p. 408-416, 2009.

LAPORTE, G.; NOBERT, Y.; TAILLEFER, S. (1988). **Solving a Family of Multi-Depot Vehicle Routing and Location-Routing Problems**. Transportation Science, No 22(3), 161-172, 1988.

LI, H.; ZHANG, L.; LV, T.; CHANG, X. **The two-echelon time-constrained vehicle routing problem in linehaul-delivery systems**. In: Transportation Research Part B. No. 94, p. 169-188, 2016.

LI, H.; CHANG, X.; ZHAO, W.; LU, Y. **The vehicle flow formulation and savings-based algorithm for the rollon-rolloff vehicle routing problem**. In: European Journal of Operational Research. No. 257, p. 859-869, 2016.

LIMA, F. M. S.; PEREIRA, D. S.; CONCEIÇÃO, S. V. NUNES, N. T. R. **Mixed load capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet: Algorithms for the Brazilian context**. In: Expert Systems with Applications. Vol. 56, p. 320-334, 2016.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Fundamentos de metodologia científica**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

MARINCONI, V; MARRAB, G; ALTAMIRANO-MEDINAA, H. **Development of predictive models for the probabilistic moisture risk assessment of internal wall insulation**. In: Building and Environment. 2018.

MARINS, F. A. S. **Introdução à pesquisa operacional**. 1. ed. São Paulo: Universidade Paulista (Unesp), 2011.

MLODINOW, Leonard. **O andar do bêbado: como o acaso determina nossas vidas**. Rio de Janeiro: Zahar, 2009.

MONTEIRO, N. J. **Roteirização de Multi-Veículos e Multi-Produtos com Estoque e Transbordo: Um Estudo de Caso**. Dissertação (Mestrado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ. Rio de Janeiro, 2017.

- MONTOYA-TORRES, J. R.; LÓPES, J. F.; NIETO IZASA, S.; JIMÉNES, H. F.; HERAZO-PADILLA, N. **A literature review on the vehicle routing problem with multiple depots.** In: Computers and Industrial Engineering, n° 79, 115-129, 2015.
- MORAIS, V. W. C. de. **Algoritmos para o Problema de Roteamento de Veículos com Cross-Docking.** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2012.
- MOREIRA, D. A. **Pesquisa Operacional: Curso Introductório.** 2. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.
- NACCACHE, S.; CÔTÉA, J. F.; COELHO, L. C. **The multi-pickup and delivery problem with time Windows.** In: European Journal of Operational Research. No. 269, p. 353-362, 2018.
- NOORIZADEGAN, M.; CHEN, B. **Vehicle routing with probabilistic capacity constraints.** In: European Journal of Operational Research. No. 270, p. 544-555, 2018.
- NOVAES, A. G. **Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição.** 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.
- OLIVEIRA, R. A. C.; DELGADO, K. V. **Capacitated Vehicle Routing System applying Monte Carlo Methods.** In: XI Brasíliam Symposium on Information System, Goiânia, 2015.
- OLIVEIRA, R. A. C.; DELGADO, K. V.; MOREIRA, D. A. M. **Sistema para roteamento de veículos capacitados aplicando Métodos de Monte Carlo.** In: iSys – Revista Brasileira de Sistemas de Informação, Rio de Janeiro, vol. 8, No. 3, p. 42-63, 2015.
- OSMAN, I. H. **Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem .** In: Annals of Operations Research. No 4, p. 421-451, 1993.
- PORTAL BRASIL. **ANTT registra quase 500 mil transportadores de carga no País.** 2014. Disponível em: < <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/01/antt-registra-quase-500-mil-transportadores-de-carga-no-pais>> acesso em: 18 de julho de 2017.
- PRADO, D. S. do. **Teoria das Filas e da Simulação.** 5. ed. Nova Lima: Falconi Editora, 2014.
- PRINS, C. **A simple and effective evolutionary algorithm for the vehicle routing problem.** In: Computers & Operations Research. N° 31, p. 1985–2002, 2004.
- RAFF, S. **Routing and scheduling of vehicles and crews.** In: Computers & Operations Research, v. 10, n. 2, p. 63-211, 1983.
- RAZOLLINI FILHO, Edelvino. **Logística Empresarial no Brasil: Tópicos Especiais.** 2. ed. Curitiba: Ibpex, 2011.
- ROCHAT, Y.; SEMET, F. **A Tabu Search Approach for Delivering Pet Food and Flour in Switzerland.** In: The Journal of the Operational Research Society, Vol. 45, N° 11, p. 1233-1246, 1994.
- ROSA, Rodrigo de Alvarenga. **Gestão logística.** Florianópolis: UFSC / UAB, 2012.
- SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da Produção.** 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SULTANA, T.; AKHAND, M. A. H.; RAHMAN, M. M. H. **A Variant Fisher and Jaikumar Algorithm to Solve Capacitated Vehicle Routing Problem.** In: 8th International Conference on Information Technology (ICIT). IEEE, Bhubaneswar (Índia), 2017.

TOTH, P.; VIGO, D. **Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem.** In: Discrete Applied Mathematics. Nº 123, p. 487–512, 2002.

VALENTE, A. M. *et al.* **Qualidade e produtividade nos transportes.** São Paulo: Cengage Learning, 2008.

WANKE, P; FLEURY, P. F. **Transporte de cargas no Brasil: Estudo exploratório das principais variáveis relacionadas aos diferentes modais e às suas estruturas de custos.** *In:* Estrutura e Dinâmica do Setor de Serviços no Brasil. 2017.

WEYLAND, D.; MONTEMANNI, R.; GAMBARDELLA, L. M. **Heuristics for the probabilistic traveling salesman problem with deadlines based on quasi-parallel Monte Carlo Sampling.** In: Computers & Operational Research. No. 40, p. 1661-1670, 2013.

Apêndice A – Cidades atendidas durante o período avaliado

ORIGEM	DESTINO	
A Belo Horizonte	1 Itabirito	25 Aparecida de Goiânia
B Contagem	2 Belo Horizonte	26 Divinópolis
C Itabirito	3 Contagem	27 Piumhi
D Confins	4 Itabira	28 Serro
E Betim	5 Mariana	29 Timóteo
F João Monlevade	6 João Monlevade	30 Carmo do Cajuru
G Mariana	7 Betim	31 Santana do Paraíso
H Ipatinga	8 Anônio Dias	32 São João Del Rei
I Vespasiano	9 Nova Lima	33 São Joaquim de Bicas
J Ibité	10 Ipatinga	34 Barbacena
K São D. do Prata	11 Vespasiano	35 Bom Despacho
L Itabira	12 Nova Era	36 Caeté
M Santa Luzia	13 São D. do Prata	37 Catas Altas
N Barão de Cocais	14 Ibité	38 Inhapim
O Ouro Branco	15 Almenara	39 Itauna
P Alvinópolis	16 Capitólio	40 Jequitinhonha
Q Coronel Fabriciano	17 São Gonçalo R.A.	41 Lagoa Santa
R Gov. Valadares	18 Alvinópolis	42 Muniz Freire
S Igarapé	19 Itaobim	43 Nova União
T Nova Era	20 Confins	44 Raposos
U Nova Lima	21 Sabará	45 Ribeirão das Neves
V Anônio Dias	22 Barão de Cocais	46 Rio Piracicaba
W Congonhas	23 Coronel Fabriciano	47 Santo Antônio do Campo
X São Gonçalo R.A.	24 Santa Luzia	48 Teófilo Otoni

Apêndice B – Relação do total de entregas por origem-destino

A1	147
A2	386
A3	74
A4	29
A5	36
A6	31
A7	34
A8	28
A9	25
A10	11
A11	16
A12	9
A13	12
A14	8
A15	8
A16	8
A17	1
A18	6
A19	7
A20	4
A21	5
A22	3
A23	1
A24	4
A25	3
A26	3
A27	3
A28	3
A30	2
A32	2
A33	2
A34	1
A35	1
A36	1

A38	1
A39	1
A40	1
A41	1
A44	1
A45	1
A46	1
A47	1
A48	1
B1	303
B2	7
B3	5
B4	39
B5	14
B6	16
B8	2
B10	10
B12	5
B17	4
B18	1
B23	3
B29	3
B37	1
B43	1
C1	10
C2	15
C3	11
C7	5
C14	2
D1	13
D4	17
D5	9
D17	1
E1	9

E3	1
E5	6
E20	2
E22	1
F2	18
G2	10
H2	6
H6	2
I1	8
J1	7
K2	6
L2	1
L3	1
L5	2
L10	1
M1	1
M4	1
M5	2
M17	1
N2	1
N5	2
N17	1
O4	1
O5	3
P2	2
Q2	1
Q4	1
R2	2
S2	2
T2	2
U8	2
V2	1
W2	1
X2	1

Apêndice C – Siglas para as cidades consideradas no estudo

BH	RMBH
IT	Itabira
JM	João Monlevade
AD	Antônio Dias
IP	Ipatinga
NE	Nova Era
SD	São D. do Prata
SG	São Gonçalo do R. A.
AV	Alvinópolis
SB	Sabará
BC	Barão de Cocais
CF	Coronel Fabriciano
TM	Timóteo
SP	Santana do Paraíso
CT	Caeté
CA	Catas Altas
NU	Nova União
RP	Rio Piracicaba

Apêndice D - Resultado da simulação do primeiro grupo

Simulação 1		Simulação 2		Simulação 3		Simulação 4		Simulação 5	
0,756385	Mariana	0,468481	Itabirito	0,339288	Itabirito	0,409157	Itabirito	0,107794	Itabirito
0,738808	Mariana	0,124616	Itabirito	0,636813	Itabira	0,43755	Itabirito	0,779841	João Monlevade
0,860832	Nova Lima	0,520731	Itabirito	0,357919	Itabirito	0,03184	Itabirito	0,637243	Itabira
0,572656	Itabirito	0,500505	Itabirito	0,988417	Ouro Branco	0,184577	Itabirito	0,797569	João Monlevade
0,694901	Mariana	0,9397008	Alvinópolis	0,364826	Itabirito	0,127261	Itabirito	0,141386	Itabirito
0,499616	Itabirito	0,399955	Itabirito	0,381026	Itabirito	0,866686	Ipatinga	0,510388	Itabirito
0,360715	Itabirito	0,218499	Itabirito	0,634183	Itabira	0,225306	Itabirito	0,289986	Itabirito
0,086933	Itabirito	0,8917401	Nova Era	0,083807	Itabirito	0,204002	Itabirito	0,693847	Mariana
0,796822	João Monlevade	0,6343945	Itabira	0,198704	Itabirito	0,778165	João Monlevade	0,100588	Itabirito
0,935105	Nova Era	0,721973	Mariana	0,638153	Itabira	0,577298	Itabirito	0,564792	Itabirito
0,969579	São G. R. Abaixo	0,700968	Mariana	0,660492	Itabira	0,909551	São D. do Prata	0,671333	Itabira
0,845079	Antônio Dias	0,646018	Itabira	0,403507	Itabirito	0,6591	Itabira	0,299553	Itabirito
0,489945	Itabirito	0,933292	Alvinópolis	0,372935	Itabirito	0,604462	Itabira	0,403393	Itabirito
0,208433	Itabirito	0,560629	Itabirito	0,719515	Mariana	0,827444	Anônio Dias	0,492191	Itabirito
0,677142	Itabira	0,977391	São João Del Rei	0,952646	Sabará	0,782405	João Monlevade	0,021126	Itabirito
0,90086	Ipatinga	0,316749	Itabirito	0,87331	Ipatinga	0,373847	Itabirito	0,650764	Itabira
Simulação 6		Simulação 7		Simulação 8		Simulação 9		Simulação 10	
0,070169	Itabirito	0,483321	Itabirito	0,255018	Itabirito	0,733204	Mariana	0,956719	Barão de Cocais
0,939534	Alvinópolis	0,632682	Itabira	0,833396	Anônio Dias	0,369457	Itabirito	0,435948	Itabirito
0,543405	Itabirito	0,884648	Ipatinga	0,405144	Itabirito	0,450915	Itabirito	0,105079	Itabirito
0,925548	São Gonçalo R.A.	0,786368	João Monlevade	0,351757	Itabirito	0,782405	João Monlevade	0,507374	Itabirito
0,723726	Mariana	0,282647	Itabirito	0,688562	Mariana	0,300613	Itabirito	0,04581	Itabirito
0,033384	Itabirito	0,38241	Itabirito	0,124393	Itabirito	0,073921	Itabirito	0,423642	Itabirito
0,251521	Itabirito	0,696432	Mariana	0,480575	Itabirito	0,052036	Itabirito	0,521048	Itabirito
0,612834	Itabira	0,406854	Itabirito	0,877077	Ipatinga	0,033754	Itabirito	0,650764	Itabira
0,70937	Mariana	0,178618	Itabirito	0,564448	Itabirito	0,378102	Itabirito	0,224618	Itabirito
0,258965	Itabirito	0,122617	Itabirito	0,968866	Timóteo	0,986635	Rio Piracicaba	0,793345	João Monlevade
0,426405	Itabirito	0,135197	Itabirito	0,737211	Mariana	0,832031	Anônio Dias	0,212466	Itabirito
0,934317	Alvinópolis	0,410654	Itabirito	0,742706	Mariana	0,37045	Itabirito	0,526981	Itabirito
0,738328	Mariana	0,743809	Mariana	0,682241	Mariana	0,696592	Mariana	0,824975	Anônio Dias
0,786368	João Monlevade	0,396376	Itabirito	0,944245	Confins	0,194949	Itabirito	0,114161	Itabirito
0,244343	Itabirito	0,520289	Itabirito	0,517703	Itabirito	0,693503	Mariana	0,788375	João Monlevade
0,086667	Itabirito	0,109846	Itabirito	0,061714	Itabirito	0,657751	Itabira	0,362208	Itabirito

Apêndice E – Tabela da função de probabilidade das entregas

Destino	Nº	Função de probabilidade	Função cumulativa
Itabirito	499	59,6%	59,6%
Itabira	68	8,1%	67,7%
Mariana	56	6,7%	74,4%
João Monlevade	47	5,6%	80,0%
Anônio Dias	30	3,6%	83,6%
Nova Lima	25	3,0%	86,6%
Ipatinga	21	2,5%	89,1%
Nova Era	14	1,7%	90,8%
São Domingos do Prata	12	1,4%	92,2%
São Gonçalo do Rio Abaixo	8	1,0%	93,2%
Alvinópolis	7	0,8%	94,0%
Confins	6	0,7%	94,7%
Sabará	5	0,6%	95,3%
Barão de Cocais	4	0,5%	95,8%
Coronel Fabriciano	4	0,5%	96,3%
Santa Luzia	4	0,5%	96,8%
Timóteo	3	0,4%	97,1%
Divinópolis	3	0,4%	97,5%
Carmo do Cajuru	2	0,2%	97,7%
São João Del Rei	2	0,2%	98,0%
Santana do Paraíso	2	0,2%	98,2%
Caeté	1	0,1%	98,3%
Catas Altas	1	0,1%	98,4%
Nova União	1	0,1%	98,6%
Rio Piracicaba	1	0,1%	98,7%
Catas Altas	1	0,1%	98,8%
Ouro Branco	1	0,1%	98,9%
Barbacena	1	0,1%	99,0%
Raposos	1	0,1%	99,2%
São Joaquim de Bicas	1	0,1%	99,3%
Bom Despacho	1	0,1%	99,4%
Itaúna	1	0,1%	99,5%
Santo Antônio do Campo	1	0,1%	99,6%
Lagoa Santa	1	0,1%	99,8%
Muniz Freire	1	0,1%	99,9%
Ribeirão das Neves	1	0,1%	100,0%

Apêndice F – Resultado da simulação do segundo grupo

Simulação 11		Simulação 12		Simulação 13		Simulação 14		Simulação 15	
0,6479329	Ipatinga	0,9219764	Barão de Cocais	0,7411555	Nova Era	0,2788817	Itabira	0,7042159	Ipatinga
0,5744722	Antônio Dias	0,0488709	Itabira	0,3979724	João Monlevade	0,080414	Itabira	0,68054	Ipatinga
0,7663329	Nova Era	0,4778134	João Monlevade	0,2175262	Itabira	0,8336693	São Gonçalo R.A.	0,7409276	Nova Era
0,9667614	Timóteo	0,7801660	São D. do Prata	0,5699620	Antônio Dias	0,9426533	Nova União	0,2548562	Itabira
0,0145392	Itabira	0,798333	São D. do Prata	0,342783	João Monlevade	0,5961081	Antônio Dias	0,5557655	Antônio Dias
0,9970213	Rio Piracicaba	0,7145191	Nova Era	0,9183537	Barão de Cocais	0,012381	Itabira	0,188331	Itabira
0,3791216	João Monlevade	0,8299942	São Gonçalo R.A.	0,318454	João Monlevade	0,154474	Itabira	0,27774	Itabira
0,8202172	São D. do Prata	0,5128136	Antônio Dias	0,8768730	Alvinópolis	0,9738307	Timóteo	0,1557	Itabira
0,496293	Antônio Dias	0,560198	Antônio Dias	0,574391	Antônio Dias	0,9441087	Coronel Fabriciano	0,647557	Ipatinga
0,343054	João Monlevade	0,9334991	Coronel Fabriciano	0,9333547	Coronel Fabriciano	0,6901805	Ipatinga	0,3885836	João Monlevade
0,15735	Itabira	0,290471	Itabira	0,148588	Itabira	0,176746	Itabira	0,8717529	Alvinópolis
0,010991	Itabira	0,791671	São D. do Prata	0,6918844	Ipatinga	0,592076	Antônio Dias	0,038836	Itabira
0,615624	Antônio Dias	0,442817	João Monlevade	0,350388	João Monlevade	0,3022165	João Monlevade	0,026034	Itabira
0,36642	João Monlevade	0,9446509	Nova União	0,282404	Itabira	0,377421	João Monlevade	0,632986	Ipatinga
0,356811	João Monlevade	0,420302	João Monlevade	0,935605	Coronel Fabriciano	0,9231081	Barão de Cocais	0,027979	Itabira
0,156715	Itabira	0,024813	Itabira	0,087251	Itabira	0,487399	João Monlevade	0,266685	Itabira
Simulação 16		Simulação 17		Simulação 18		Simulação 19		Simulação 20	
0,7307870	Nova Era	0,9216789	Barão de Cocais	0,4959284	Antônio Dias	0,6209054	Antônio Dias	0,7580526	Nova Era
0,0380866	Itabira	0,6022422	Antônio Dias	0,9825328	Caeté	0,8418387	São Gonçalo R.A.	0,1601080	Itabira
0,8566001	São Gonçalo R.A.	0,7800377	São D. do Prata	0,8113823	São D. do Prata	0,2969817	João Monlevade	0,9793863	Santana do Paraíso
0,722423	Nova Era	0,537528	Antônio Dias	0,547152	Antônio Dias	0,8758997	Alvinópolis	0,017222	Itabira
0,039872	Itabira	0,3871414	João Monlevade	0,7568836	Nova Era	0,50992	Antônio Dias	0,105064	Itabira
0,219932	Itabira	0,34503	João Monlevade	0,1995053	Itabira	0,8965509	Sabará	0,4838028	João Monlevade
0,5917051	Antônio Dias	0,394985	João Monlevade	0,815364	São D. do Prata	0,331052	João Monlevade	0,5809115	Anônio Dias
0,122037	Itabira	0,8477987	São Gonçalo R.A.	0,4896421	João Monlevade	0,458301	João Monlevade	0,43341	João Monlevade
0,733757	Nova Era	0,7040704	Ipatinga	0,8359209	São Gonçalo R.A.	0,9195178	Barão de Cocais	0,8683824	São Gonçalo R.A.
0,531327	Antônio Dias	0,437274	João Monlevade	0,56258	Antônio Dias	0,383081	João Monlevade	0,785843	Nova Era
0,267831	Itabira	0,0802953	Itabira	0,784338	São D. do Prata	0,423486	João Monlevade	0,500953	João Monlevade
0,4374878	João Monlevade	0,209987	Itabira	0,77424	São D. do Prata	0,414892	João Monlevade	0,294365	Itabira
0,763312	Nova Era	0,021253	Itabira	0,6275901	Ipatinga	0,919632	Barão de Cocais	0,498312	João Monlevade
0,6390843	Ipatinga	0,638972	Ipatinga	0,66103	Ipatinga	0,837134	São Gonçalo R.A.	0,022384	Itabira
0,078739	Itabira	0,26256	Itabira	0,081131	Itabira	0,501775	Antônio Dias	0,9831032	Caeté
0,345557	João Monlevade	0,247464	Itabira	0,470008	João Monlevade	0,0787361	Itabira	0,345702	João Monlevade

Apêndice G – Tabela da função de probabilidade para rota leste

Destino	Nº	Função de probabilidade	Função cumulativa
Itabira	68	29,7%	29,7%
João Monlevade	47	20,5%	50,2%
Anônio Dias	30	13,1%	63,3%
Ipatinga	21	9,2%	72,5%
Nova Era	14	6,1%	78,6%
São Domingos do Prata	12	5,2%	83,8%
São Gonçalo do Rio Abaixo	8	3,5%	87,3%
Alvinópolis	7	3,1%	90,4%
Sabará	5	2,2%	92,6%
Barão de Cocais	4	1,7%	94,3%
Coronel Fabriciano	4	1,7%	96,1%
Timóteo	3	1,3%	97,4%
Santana do Paraíso	2	0,9%	98,3%
Caeté	1	0,4%	98,7%
Catas Altas	1	0,4%	99,1%
Nova União	1	0,4%	99,6%
Rio Piracicaba	1	0,4%	100,0%

Apêndice H – Tempo (min) entre cidades da rota leste

	RMBH	Itabira	João Monlevade	Anônio Dias	Ipatinga	Nova Era	São D. do Prata	São Gonçalo do R. A.	Alvinópolis	Sabará	Barão de Cocais	Coronel Fabriciano	Timóteo	Santana do Paraíso	Caeté	Catas Altas	Nova União	Rio Piracicaba
RMBH	–	118	122	175	209	142	148	95	169	25	108	212	210	229	58	130	78	146
Itabira	139	–	49	79	110	44	66	43	99	141	67	111	107	215	104	187	80	67
João Monlevade	157	49	–	76	114	40	43	39	63	173	69	105	104	136	128	80	85	27
Anônio Dias	206	78	76	–	54	44	65	96	100	227	119	51	51	81	172	142	147	61
Ipatinga	240	116	107	54	–	77	99	127	135	259	157	20	22	27	208	178	194	103
Nova Era	174	44	40	44	82	–	27	58	66	174	87	76	78	105	140	107	114	33
São D. do Prata	176	66	43	65	106	27	–	60	73	174	89	93	93	125	143	108	118	36
São Gonçalo do R. A.	126	43	39	96	137	58	60	–	83	123	37	124	124	153	89	57	50	51
Alvinópolis	196	99	63	102	144	66	73	83	–	192	110	130	130	157	162	100	139	32
Sabará	25	116	131	185	213	147	168	114	186	–	122	228	228	260	57	148	73	161
Barão de Cocais	134	67	69	124	165	87	89	37	110	122	–	152	152	180	75	25	56	78
Coronel Fabriciano	233	105	95	51	20	69	93	124	130	228	152	–	20	43	199	167	184	97
Timóteo	232	107	98	51	22	78	93	124	130	228	152	20	–	53	207	233	192	104
Santana do Paraíso	266	205	127	81	27	105	125	153	157	260	180	43	53	–	231	199	216	129
Caeté	65	124	128	167	208	145	143	83	162	57	75	199	196	223	–	100	45	130
Catas Altas	153	87	80	142	183	107	108	57	100	148	25	167	227	132	100	–	94	95
Nova União	95	80	85	142	194	104	105	50	139	73	56	170	169	196	45	94	–	89
Rio Piracicaba	170	67	27	70	111	33	36	51	32	153	78	97	97	129	130	95	106	–