UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE SISTEMAS LOGÍSTICOS

NATASHA ROBERTA GALVÃO DA SILVA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE CAMINHÕES EM
CIRCUITO FECHADO PARA FORNECIMENTO DE MADEIRA**

SÃO PAULO

2015

NATASHA ROBERTA GALVÃO DA SILVA

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE CAMINHÕES EM
CIRCUITO FECHADO PARA FORNECIMENTO DE MADEIRA**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo como parte dos requisitos
exigidos para obtenção do título de
Mestre em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo
2015

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Silva, Natasha Roberta Galvão da

Análise e dimensionamento de frota de caminhões em circuito fechado para fornecimento de madeira. / N. R. G. Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2015.

128 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Logística 2.Transportes de carga 3.Madeira 4.Florestas I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

DEDICATÓRIA

Aos meus amados pais, por acreditarem nos meus sonhos e serem meus maiores incentivadores a cada novo desafio.

AGRADECIMENTOS

A Deus, minha grande certeza, meu refúgio e minha companhia constante.

Aos meus pais, Carlos e Cleide, meus exemplos, meu orgulho e minha alegria, a quem devo todas as minhas realizações pessoais e profissionais, por todo o suporte recebido e pela confiança que sempre foi depositada em mim.

Ao meu marido, Lauro, pela paciência, pelo amor, pelo cuidado e por todos os momentos felizes vividos, que, sem dúvida, me ajudaram a prosseguir.

Ao Prof. Dr. Rui Carlos Botter, pela recepção acolhedora desde o primeiro dia de aprovação no mestrado, pela convivência, pelos ensinamentos e por sempre se colocar tão disponível para sanar as dúvidas e dar a segurança necessária nos momentos decisivos.

Ao MSc. Daniel Mota, pelas trocas de ideias, pela amizade, pela orientação, pelas contribuições intelectuais indispensáveis para o desenvolvimento deste estudo e pelo suporte fornecido em todos os momentos, mesmo à distância.

Ao Dr. Newton Narciso, pelas contribuições intelectuais durante o desenvolvimento desta dissertação, pelas conversas sempre agradáveis, pela sensibilidade nos momentos difíceis e por manter sempre as portas abertas.

Aos amigos do Centro de Inovação em Logística e Infraestrutura Portuária, por se fazerem sempre presentes e por todos os momentos divertidos vividos nesses últimos 3 anos, que sem dúvida ajudaram a diminuir a saudade de casa.

Ao Prof. Dr. André Melo, por todos os ensinamentos e pela amizade durante o período de graduação e pelo apoio indispensável no processo de seleção de mestrado, que sem dúvida me ajudaram a chegar até aqui.

RESUMO

A racionalização no uso dos recursos sempre foi uma preocupação dos gestores de empresas e com a crescente competitividade entre essas organizações, faz-se necessário, portanto, um controle minucioso dos custos. Empresas do ramo florestal lidam todos os dias com problemas desde o nível estratégico, como a decisão de em quais regiões realizarem o plantio das árvores, até o nível operacional, que tem maior impacto sobre as operações diárias e que envolve as decisões de transporte de madeira. Nesse sentido, o investimento em ferramentas que garantam maior eficiência do transporte diário de madeira é considerado como ponto de partida para que essas organizações possam sustentar sua competitividade no mercado. Dessa forma, esta dissertação tem como objetivo dimensionar, através de um modelo de simulação, a frota de caminhões utilizada para o transporte diário de madeira em uma indústria de papel e celulose, com vistas a permitir um fluxo coordenado e constante de matéria prima, comparando o sistema atual com um sistema baseado em uma nova lógica de despacho de caminhões aplicada ao simulador. O modelo de simulação desenvolvido foi construído através do *software* ARENA® e conta com uma interface de dados construída com o auxílio do *Microsoft Excel*®, na qual são inseridos, de maneira estruturada, os dados de entrada necessários. Com este modelo, pretende-se auxiliar na solução de um problema operacional de transporte de madeira, uma vez que é possível determinar, em um horizonte de planejamento previamente definido, o tamanho da frota capaz de atender a uma demanda programada, permitindo maior eficiência ao sistema e redução de desperdícios.

Palavras-chave: Transporte Florestal. Transporte Principal de Madeira. Simulação de eventos discretos. Dimensionamento de Frota. Sistemas Logísticos.

ABSTRACT

The rational use of resources has always been a concern of business managers and the growing competition between companies requires a complex control of costs. Companies in the forestry sector deal with everyday problems from the strategic level, the decision on which regions make the planting of trees, to the operational level, which has a greater impact on the daily operations and decisions involving timber transport. Accordingly, investment in tools that ensure higher efficiency of daily transportation of wood is considered as the starting point for these organizations to sustain their competitiveness in the market. Thus, this thesis is designed to measure, through a simulation model, the fleet of trucks used for daily transportation of wood into a pulp and paper industry, with a view to providing coordinated and constant flow of raw material. The developed simulation model was built by ARENA ® software and has a data interface built with the help of Microsoft ® Excel, in which the input data required are inserted. With this model, we intend to assist in the solution of an operating problem of timber transport, since it is possible to determine the fleet size able to attend a scheduled demand, allowing the system more efficient and reduce waste, in a planning horizon previously defined.

Keywords: Forest Transportation. Wood Main Transport. Discret Events Simulation. Fleet sizing. Logistic Systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do VBP Florestal.	13
Figura 2 - Evolução da Balança Comercial do Setor de Florestas Plantadas	14
Figura 3 - Evolução da Balança Comercial do Segmento de Papel e Celulose	15
Figura 4 - Distribuição de florestas plantadas no país.....	20
Figura 5 - Modelo Simplificado da Cadeia Produtiva do Setor Florestal	21
Figura 6 - Custo de produção de madeira (em dólares)	23
Figura 7 - Distribuição do consumo de madeira em 2013	25
Figura 8 - Destino das exportações de papel e celulose	26
Figura 9 - Redução de viagens improdutivas.	32
Figura 10 - Etapas do planejamento de transporte operacional	34
Figura 11 - Metodologia desenvolvida para a solução do problema de fluxo	56
Figura 12 - Componentes de um ciclo de viagem de um caminhão	61
Figura 13 - Operação de carregamento nos pontos de coleta	63
Figura 14 - Operação de descarregamento no ponto de consumo	64
Figura 15 - <i>Setup</i> de limpeza do veículo	65
Figura 16 - <i>Setup</i> de amarração das toras de madeira	66
Figura 17 - <i>Setup</i> de Pesagem.....	66
Figura 18 - <i>Setup</i> de encerramento.....	67
Figura 19- Perfil de chegada caminhões à fábrica	68
Figura 20 - Perfil de chegada à fábrica por dia da semana	69
Figura 21 – Número de chegadas à fábrica, por quinzena.....	70
Figura 22 - Intervalo entre chegadas à fábrica	71
Figura 23 - Frequência dos intervalos entre chegadas à portaria	71
Figura 24 - Tempo médio de permanência na fábrica	72
Figura 25 - Perfil agregado de chegada às glebas.....	73
Figura 26 - Perfil de chegada às glebas por hora.....	74
Figura 27: Carroceria de um caminhão Tritrem.....	75
Figura 28 - Etapas de um modelo de simulação.	78
Figura 29 - Modelo conceitual da circulação de caminhões no sistema.....	89
Figura 30 - Amostra de interface de entrada de dados	92
Figura 31 – Visão de satélite da planta interna da fábrica.....	93

Figura 32 - Análise do número de viagens e utilização da frota com bolha	106
Figura 33 - Análise de tempo de ciclo e utilização da frota com bolha.....	107
Figura 34 - Análise do número de viagens e utilização da frota sem bolha	109
Figura 35 - Análise do tempo de ciclo e utilização da frota sem bolha.....	110
Figura 36- Variação da frota e tempo de ciclo com aumento do raio médio	113
Figura 37 - Cenário com lógica de despacho segundo <i>takt time</i>	116
Figura 38 - Amostra de dados da operação na fábrica com <i>outliers</i>	132
Figura 39 - Amostra de dados da operação na fábrica com <i>outliers</i>	133
Figura 40 - Exemplo das lógicas de criação dos caminhões, ida para as fazendas e da escolha do destino.	135
Figura 41 - Exemplo das lógicas de operação nas fazendas e de retorno à fábrica.	136
Figura 42 - Exemplos de entrada e saída de dados.....	137

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo dos principais estudos acerca do problema de transporte principal de madeira.	47
Quadro 2 - Síntese dos modelos de dimensionamento baseados em formulações matemáticas.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Projeções para o Setor Florestal Brasileiro.	22
Tabela 2 - Distâncias entre as etapas do ciclo de transporte.	96
Tabela 3 - Parâmetros das gruas de carregamento.	98
Tabela 4 - Comparação entre cenário e cenário real.	101
Tabela 5 - Comparação entre cenário base e cenário real por etapas.	102
Tabela 6 - Dados de saída do modelo.	104
Tabela 7 – Resultados dos cenários com mudança do raio médio.	112
Tabela 8 - Valor do <i>takt time</i> por fazenda ativa.	115
Tabela 9 - Principais resultados dos cenários simulados.	117
Tabela 10 - Valores dos <i>outliers</i> moderado e extremo para amostra de operação na fábrica	132
Tabela 11 - Tempo médio e desvio padrão das etapas do ciclo de transporte.	134

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
1.1.	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	12
1.2.	ABRANGÊNCIA E PREMISSAS DO TRABALHO	16
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	17
2.	O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO E O SEGMENTO DE CELULOSE E PAPEL	19
2.1.	O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO	20
2.2.	SEGMENTO DE CELULOSE E PAPEL	25
3.	REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA	28
3.1.	PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE FLORESTAL	29
3.1.1.	Problemas de Transporte Estratégico e Tático	29
3.1.2.	Planejamento de Transporte Operacional	33
3.1.3.	Principais Estudos Desenvolvidos acerca do Problema de Transporte Principal de Madeira	36
3.2.	DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE VEÍCULOS	48
3.2.1.	Dimensionamento de Frota a partir da Roteirização de Veículos	48
3.2.2.	Dimensionamento de Frota como um Problema de Complexidade Matemática	51
3.2.3.	Dimensionamento de Frota com Base no Tempo de Ciclo	55
3.2.4.	Conclusão da Revisão Bibliográfica	58
4.	ANÁLISE DE DADOS	60
4.1.	LINHA DO TEMPO	61
4.2.	ETAPAS DO CICLO DE TRANSPORTE	62
4.3.	ANÁLISE DO PONTO DE CONSUMO	67
5.	MODELO DE SIMULAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS	76

5.1.	SIMULAÇÃO	77
5.2.	DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE MADEIRA	80
5.2.1.	Subsistema de Carregamento.....	81
5.2.2.	Subsistema de Entrada	83
5.2.3.	Subsistema de Descarregamento	84
5.2.4.	Subsistema de Saída	86
5.3.	INTERFACE DE ENTRADA DE DADOS	89
6.	APLICAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE DE MADEIRA E RESULTADOS OBTIDOS	95
6.1.	CENÁRIO BASE	96
6.2.	INDICADORES FORNECIDOS COMO SAÍDAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO	99
6.3.	VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO	101
6.4.	RESULTADOS OBTIDOS.....	105
6.5.	ANÁLISE DE CENÁRIOS	108
6.5.1.	Eliminação do Efeito “Bolha”	108
6.5.2.	Aumento do Raio Médio para 300 km e 400 km	111
6.5.3.	Imposição de Nova Lógica de Despacho, segundo <i>Takt Time</i>	114
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	118
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
	ANEXOS	131
	ANEXO 1 – Exemplo do tratamento dos dados, com a retirada de <i>outliers</i>	131
	ANEXO 2 – Exemplo de módulos do Arena® e da interface utilizada	135

1. INTRODUÇÃO

A racionalização no uso dos recursos sempre foi uma preocupação dos gestores de empresas. Recentemente, com o aumento da capacidade computacional, problemas cada vez mais complexos têm sido investigados à luz de métodos quantitativos herdados da pesquisa operacional. Particularmente, problemas relacionados à logística e gestão da cadeia de suprimentos tem apresentado crescente interesse na gestão estratégica. Isto se deve principalmente aos significativos ganhos gerados pela utilização de modelagem matemática e análises estatísticas nos resultados operacionais e financeiros das corporações (HOFF et al., 2010).

Dentro do contexto logístico, empresas que priorizam eficiência em suas operações tentam incessantemente buscar formas inovadoras na gestão de seus ativos de forma a elevar o lucro obtido. Elas o fazem identificando desperdícios, reduzindo custos, sem prejudicar o nível de serviços exigido pelos seus clientes.

Segundo Ballou (2006), os custos logísticos são divididos em: (1) custos de transporte, (2) custos de estoque e (3) custos de processamento de pedido. Desses custos, as atividades de transporte usualmente representam o elemento com maior impacto financeiro, podendo representar de um a dois terços das despesas logísticas.

A crescente competitividade entre as empresas impõe, portanto, um controle minucioso em seus custos. Assim, os custos referentes a transporte frequentemente são desafiados a serem reduzidos.

Empresas do ramo florestal lidam todos os dias com problemas desde o nível estratégico, como a decisão de em quais regiões realizarem o plantio das árvores, até o nível operacional, que tem maior impacto sobre as operações diárias e que envolvem as decisões de transporte de madeira, desde os pontos onde as toras estão localizadas (pontos de carregamento) até o local onde

essas serão descarregadas e consumidas (fábrica). Essa operação representa uma significativa porção dos custos operacionais e é tratada como um ciclo fechado, pois a cada nova coleta nos pontos de carga e descarregamento na fábrica, inicia-se um novo ciclo para o veículo (EPSTEIN, et al., 2007).

Segundo Vega e Pérez (2007), o valor dos produtos florestais é incrementado de acordo com as diferentes atividades que ocorrem em um ciclo florestal. Os custos médios de produção se dividem aproximadamente em: 30% para a derrubada da madeira nas florestas, 42% para o transporte da carga desde os pontos de coleta até o local de consumo, 14% para a construção de estradas, 4% para o tratamento da carga e 10% para os outros processos.

Dessa forma, como a movimentação de carga entre os pontos de coleta e consumo representa a maior porção dos custos, é de vital importância que todas as operações envolvidas nesse processo (carregamento, transporte e descarregamento), sejam realizadas com eficiência. Isso porque, com a interdependência dessas operações e dos recursos envolvidos em cada uma delas, pode haver a ocorrência de tempos não produtivos, como a formação de filas, que afetariam o processo como um todo (MUNDIM, 2009).

Os tempos não produtivos podem ser motivados por processos administrativos intrínsecos à operação, mas, principalmente, pelo desbalanceamento na disponibilização de recursos. Como procedimentos administrativos, podem-se citar as trocas de turnos de trabalho, paradas para refeições, paradas para abastecimentos ou manutenções, que reduzem o nível de utilização dos equipamentos em operações verdadeiramente produtivas.

Quanto à disponibilização de recursos, a principal decisão relacionada, em uma empresa desse ramo, está basicamente ligada ao número de caminhões que deve ser inserido no sistema, capaz de atender às operações e, conseqüentemente, à demanda. O desbalanceamento ocorre, pois essa decisão é normalmente baseada no conhecimento prático da operação, sem qualquer tipo de respaldo teórico ou apoio de ferramentas, levando assim, na maioria das vezes, à inserção de um número inadequado desses recursos no sistema.

De maneira geral, as empresas que operam no setor de papel e celulose se utilizam de uma frota de caminhões terceirizada para realizar o transporte da madeira. O tamanho da frota é definido pela indústria do setor madeireiro nos contratos com as transportadoras, podendo variar, portanto de acordo com a necessidade. No caso dessa dissertação, os contratos aos quais se teve acesso estabeleciam a quantidade de veículos que deveria ser disponibilizada para o transporte de madeira e davam consideráveis margens para o incremento da frota por parte da indústria junto às transportadoras.

Nesses casos, o que se verifica é que, como não existe o uso de ferramentas adequadas, o planejamento da operação de transporte apresenta grandes deficiências. A principal delas é a solicitação excessiva de veículos para as transportadoras contratadas, com o intuito de garantir o atendimento da demanda interna da fábrica. Essa decisão, além tornar o processo mais custoso à empresa, não aumenta sua capacidade de transporte, uma vez que promove a saturação do sistema como um todo e a, conseqüente formação de filas nos mais variados pontos da operação.

Com isso, o investimento em ferramentas que garantam maior eficiência no planejamento do transporte diário de madeira é considerado como ponto de partida essencial para que essas empresas possam sustentar sua competitividade no mercado.

Segundo Stringher (2004), para que uma organização tenha um sistema de transporte competitivo, é de fundamental importância que esta possua uma frota de veículos bem dimensionada e eficiente, gerando baixos custos marginais e garantindo um nível de serviço adequado.

Nesse sentido, esta dissertação tem como objetivo dimensionar, através de um modelo de simulação, a frota de caminhões necessária para o transporte diário de madeira em uma indústria brasileira de papel e celulose, comparando o sistema atual com um sistema baseado em uma nova lógica de despacho de caminhões aplicada ao simulador. O intuito é permitir um fluxo eficiente, coordenado e constante de matéria prima, capaz de atender a demanda da fábrica. Através desse dimensionamento será possível, ainda, a contratação de

frotas mais adequadas com as empresas terceirizadas, o que naturalmente reduzirá o custo da empresa.

Portanto, será realizada a simulação do sistema de transporte atual da indústria, levando-se em consideração todos os recursos e operações envolvidos, comparando-se os resultados obtidos com um sistema similar, mas que realiza o despacho dos veículos baseado em uma lógica de *takt time*¹. Pretende-se, com essa comparação, verificar a existência de ineficiência nas atividades atualmente desenvolvidas e de um mau dimensionamento da frota utilizada.

Apesar de se tratar de um cenário complexo, com inúmeros recursos, taxas de operações distintas e demandas diferentes em cada ponto de coleta, as operações e o circuito de transporte são bem definidos e podem ser facilmente descritos por um modelo de simulação, que permite, diferentemente de outras abordagens, uma análise adequada e detalhada da interação dos diferentes equipamentos e recursos atuantes nesse processo.

O modelo de simulação desenvolvido foi construído através do *software* ARENA® e conta com uma interface de dados construída com o auxílio do *Microsoft Excel*®, na qual são inseridos, de maneira estruturada, os dados de entrada necessários ao modelo. Além disso, é nessa interface em que são gravadas as saídas obtidas em cada cenário da simulação, permitindo assim a comparação entre tais cenários e a análise detalhada de seus resultados.

Como mencionado, devido à complexidade do sistema, optou-se pelo uso de simulação de eventos discretos como metodologia, uma vez que esta possibilita um maior detalhamento de todas as etapas que envolvem o transporte de madeira entre os pontos de coleta e o ponto de consumo. Além disso, a utilização de modelos de simulação facilita a imposição de restrições e de características peculiares do processo que seriam de difícil implementação em um modelo analítico.

¹ O conceito de *Takt time* pode ser definido como o ritmo de operação necessário para o atendimento de determinada demanda.

Por fim, o problema estudado é de natureza estocástica e a ferramenta de simulação de eventos discretos é indicada para este tipo de abordagem. Na literatura estudada, foram encontrados muitos modelos de solução para esse problema de nível operacional, mas, estes apresentaram operações com configurações distintas à descrita nesse estudo e apenas em situações pontuais a simulação foi utilizada como método de solução.

Com esse modelo, é possível auxiliar na solução de um problema operacional de transporte de madeira, uma vez que é possível determinar o tamanho de frota mínima (menor custo) capaz de atender a uma demanda programada (nível de serviço), permitindo maior eficiência ao sistema (melhor utilização dos recursos) e redução de desperdícios (filas), em um horizonte de planejamento previamente definido.

1.1. MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

O tema proposto para ser desenvolvido nesse trabalho foi escolhido devido sua grande relevância e posição de destaque na economia de muitos países, assim como no Brasil. Para a economia brasileira o setor de florestas plantadas contribui com uma parcela importante na geração de produtos, tributos e empregos, além de se caracterizar como estratégico quanto ao fornecimento de matéria-prima e mercadorias para exportação (DERAL, 2012).

Para justificar essa afirmação, podem-se analisar os principais indicadores desse setor. O Valor Bruto da Produção Florestal (VBP), que é o resultado da multiplicação da quantidade produzida pelos respectivos preços dos produtos florestais se caracteriza como um dos principais indicadores de desempenho desse setor econômico (ABRAF, 2013).

Esse indicador é composto pela soma dos valores individuais dos produtos dos principais segmentos associados ao setor, que são: celulose e papel, painéis de madeira industrializada, siderurgia a carvão vegetal, madeira

mecanicamente processada e móveis. A Figura 1 analisa a evolução desse indicador desde 2009.

Analisando-se a figura, pode-se perceber uma tendência constante de aumento do VPB do setor, principalmente entre os anos de 2012 e 2013, com uma variação percentual positiva de 3,1% (IBÁ, 2014).

Figura 1 - Evolução do VBP Florestal. Fonte: Adaptado ABRAF (2013) e IBÁ (2014).

Outro indicador utilizado para a análise de desempenho do setor florestas plantadas é a geração de empregos, que inclui os empregos diretos e indiretos gerados pelo setor. Os empregos diretos correspondem à mão de obra necessária quando há aumento da produção, enquanto os empregos indiretos são os gerados nos setores que compõem a cadeia produtiva do setor, uma vez que o aumento da produção de um produto final estimula, de maneira geral, a produção de todos os insumos atrelados.

Em 2013, segundo Ibá (2014), estima-se que o setor de florestas plantadas manteve um alto número de postos de empregos, incluindo 630 mil empregos diretos e 1,33 milhão de empregos indiretos.

A participação desse setor na balança comercial nacional também é um critério utilizado para medir o desempenho. O saldo da balança comercial relacionado

à atividade florestal, apresentado na Figura 2, registrou superávit de 6,4 bilhões de dólares em 2013 que, comparado a 2012, representa um aumento de 14%.

Figura 2 - Evolução da Balança Comercial do Setor de Florestas Plantadas. Fonte: Adaptado ABRAF (2013) e Ibá (2014).

Nota-se que as importações somaram 1,9 bilhões de dólares, o que representa uma queda de 5%, quando comparado com 2012, enquanto as exportações totalizaram 8,3 bilhões de dólares, o que representa um aumento aproximadamente 7% em relação ao ano anterior.

No que se refere especificamente ao segmento brasileiro de papel e celulose, que é o segmento em que se insere a indústria abordada neste estudo, o saldo da balança comercial de 2013 foi positivo, totalizando 5,3 milhões de dólares. As exportações, quando comparadas ao ano de 2012, apresentaram uma evolução de 7,5%, totalizando 7,1 milhões de dólares, enquanto a importação totalizou 1,8 milhão, o que representa uma queda de 5,2 % quando comparada ao ano anterior. A Figura 3 apresenta a evolução da balança comercial desse setor no período de 2008 até 2013 (BRACELPA, 2014).

A análise da evolução da balança comercial do setor de papel e celulose permite a percepção da tendência de crescimento contínuo do setor, apesar das pequenas variações anuais das exportações e importações.

Figura 3 - Evolução da Balança Comercial do Segmento de Papel e Celulose. Fonte: Adaptado de BRACELPA (2014).

Dessa forma, tais resultados, comprovam e consolidam a relevância do setor de florestas plantadas e do segmento do setor de papel e celulose, e suas significativas contribuições para o desenvolvimento econômico e social do país.

A indústria de base florestal, mais especificamente do segmento de papel e celulose, contudo, depara-se, diariamente, com problemas logísticos em suas operações, que precisam ser resolvidos com precisão e rapidez para que os processos internos possam ser realizados com eficiência, para que a demanda possa ser atendida e para que os custos sejam reduzidos.

Nesse âmbito, um problema que tem grande impacto nas operações de indústrias desse segmento é o de dimensionamento de frota. Esse problema, de nível operacional, trata da quantidade de caminhões necessários, em um determinado período (dia, mês, ano etc.), para a realização do transporte da matéria prima desde os pontos de coleta de madeira (fazendas) até a entrega na fábrica (ponto de consumo).

Uma frota superdimensionada, além de gerar altos custos pela manutenção de um número excessivo de veículos em circulação, provoca congestionamento e gargalos em diversos pontos da operação, elevando os tempos e reduzindo a

capacidade do processo. Da mesma forma, operar com um número insuficiente de caminhões, também inviabiliza a eficiência da operação, impossibilitando, geralmente, o atendimento da demanda (MUNDIM, 2009).

Dentro desse contexto, ferramentas capazes de auxiliar no correto dimensionamento da frota e, portanto, na redução de custos e na eficiência das operações de transporte dessas indústrias, com a redução dos tempos de ciclos de viagens, são de grande interesse e relevância para o setor e para todos os atores envolvidos nessa cadeia logística.

A proposta do trabalho é apresentar o problema de dimensionamento de frota, através da realização de um estudo em uma indústria do setor privado brasileiro atuante no segmento de papel e celulose.

1.2. ABRANGÊNCIA E PREMISSAS DO TRABALHO

Esta dissertação apresenta um modelo de simulação matemática de eventos discretos com o propósito de fornecer uma ferramenta eficiente na resolução de um problema de dimensionamento de uma frota de caminhões que opera em circuito fechado e é utilizada para o transporte de madeira em uma indústria do setor de papel e celulose.

O modelo apresentado neste estudo foi desenvolvido para uma aplicação real em uma relevante indústria do setor privado, com atuação no Brasil e exterior. A empresa forneceu todas as informações, dados e *layouts* necessários para o desenvolvimento dos cenários a serem simulados, com todas as características intrínsecas às atividades relacionadas à coleta (carregamento), transporte e entrega da matéria-prima na fábrica (descarregamento), além das características das vias utilizadas e das especificações de todos os recursos existentes no processo (caminhões, guas de carregamento e descarregamento, balança etc.). Contudo, foi solicitado à pesquisadora o sigilo quanto à veiculação da razão social da empresa.

O objetivo desta pesquisa é utilizar a ferramenta de simulação de eventos discretos para representar a circulação da frota de caminhões, considerando a coleta de matéria prima nas fazendas e o transporte dessa até a fábrica, para assim dimensionar de maneira eficiente o número de veículos necessários ao atendimento da demanda.

O modelo de simulação desenvolvido nesse trabalho deverá contribuir significativamente no planejamento e na definição de estratégias adotadas pelas indústrias do setor, no que diz respeito ao tamanho da frota necessária para a realização de suas operações.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

No sentido de alcançar os objetivos propostos, o trabalho será estruturado em 7 capítulos, organizados da seguinte forma:

O primeiro capítulo é composto pela introdução, que trata do tema e problema do estudo, assim como apresenta em linhas gerais os fatores que motivaram a pesquisa e os objetivos que pretendem ser alcançados.

O segundo capítulo apresenta uma revisão simplificada sobre o setor florestal brasileiro e sobre o segmento de papel e celulose, nos quais está inserido o tema central abordado neste estudo.

O terceiro capítulo traz a fundamentação teórica, que garante o embasamento necessário para o desenvolvimento do estudo, além de fornecer um panorama das diversas metodologias utilizadas para a solução do problema de transporte de madeira e para a resolução do problema de dimensionamento de frota.

O quarto capítulo apresenta a análise de dados, desenvolvida a partir dos dados reais obtidos junto à empresa na qual o estudo foi aplicado, com os principais parâmetros analisados e as conclusões obtidas.

O quinto capítulo apresenta algumas características da simulação de eventos discretos, além de expor justificativas que suportem a utilização dessa ferramenta na solução do problema abordado nesta dissertação. Ainda neste capítulo é apresentado o modelo conceitual construído para a simulação do sistema de transporte de madeira estudado e a interface utilizada para configuração dos cenários a serem simulados.

O sexto capítulo expõe os principais resultados obtidos com o modelo de simulação desenvolvido e as análises de cenários realizadas. Além disso, é neste capítulo em que é apresentada a proposição da nova lógica de despacho, segundo o *takt time* dos caminhões.

O sétimo capítulo, por fim, apresenta as considerações finais deste estudo a partir dos resultados obtidos com a aplicação do modelo de simulação e as recomendações para pesquisas futuras.

2. O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO E O SEGMENTO DE CELULOSE E PAPEL

Este capítulo contextualiza o setor no qual o problema estudado nesta dissertação se insere, preparando o leitor para entender o panorama atual desse mercado e os desafios enfrentados pelas empresas que atuam no segmento de papel e celulose.

A partir de uma análise da bibliografia do tema, é realizada uma revisão sobre o setor, os principais mercados consumidores de papel e celulose e outros fatores que tornam o dimensionamento da frota de veículos utilizada para o transporte da madeira, foco deste estudo, assunto de considerável relevância para o incremento da eficiência e da competitividade desse setor.

2.1. O SETOR FLORESTAL BRASILEIRO

O setor florestal brasileiro é compreendido por florestas nativas e florestas plantadas. A cobertura florestal do país é composta por 463 milhões de hectares, dos quais, estima-se que 98,7% sejam constituídos por floresta nativa, localizada predominantemente na região Norte do país. O restante (1,3%) da área corresponde às florestas plantadas, que é o foco deste estudo e se apresenta com uma porção mais ao centro-sul, como pode ser visto na Figura 4, que apresenta a distribuição dos plantios de árvores nos estados brasileiros, por classe de tamanho. Nelas, os plantios predominantes são de espécies exóticas, como por exemplo, do eucalipto e do pinus. (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2014).

Figura 4 - Distribuição de florestas plantadas no país. Fonte: Ibá, 2014.

A cadeia produtiva com base no setor florestal constitui uma atividade econômica complexa e diversificada de produtos e aplicações energéticas e industriais, que compreende a produção, a colheita e o transporte de madeira, além da obtenção dos produtos finais nos segmentos industriais de Papel e Celulose, Painéis de Madeira Industrializada, Madeira Processada Mecanicamente, Siderurgia a Carvão Vegetal e Biomassa, entre outros (MACHADO, 2014).

Essa cadeia pode ser subdividida em dois grandes grupos de produtos: Madeireiros e Não Madeireiros, que podem ser provenientes tanto de florestas nativas como plantadas. No primeiro grande grupo, pode-se destacar produtos de madeira processada mecanicamente, celulose e papel, painéis reconstituídos, dentre outros. Por outro lado, o segmento dos produtos não madeireiros abrange os produtos tais como frutas, óleos, resinas, mel e bambu, muito utilizados em indústrias farmacêuticas e alimentícias (ABIMCI, 2009). A configuração dessa cadeia é apresentada Figura 5.

Figura 5 - Modelo Simplificado da Cadeia Produtiva do Setor Florestal. Fonte - Adaptado de Serviço Florestal Brasileiro, 2014.

O setor contribui significativamente para a economia brasileira, uma vez que gera produtos para consumo direto ou para exportação, impostos e empregos para a população, além de atuar ainda na conservação e preservação dos recursos naturais (TONELLO et al., 2008).

Em 2013, correspondia a 3,5% do PIB, gerou uma receita de aproximadamente R\$ 42 bilhões e suas exportações equivaleram a 3,4% do total exportado pelo país. Segundo o Ministério do Meio Ambiente, contudo, essa é uma pequena fração das possibilidades do setor, pois uma vez dadas as condições para o seu desenvolvimento pleno, esse setor poderá no mínimo dobrar seu crescimento em dez anos, como pode ser visto na Tabela 1 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2012).

Tabela 1 - Projeções para o Setor Florestal Brasileiro.

Variável	2013	2020
Participação no PIB	3,5%	4,5%
Área em Produção	24 milhões ha	50 milhões ha
Valor de Venda Interno	R\$ 34,2 bilhões	R\$ 70 bilhões
Arrecadação de Impostos (plantações)	R\$ 7,4 bilhões	R\$ 18 bilhões
Exportações	R\$ 8,5 bilhões	R\$ 16 bilhões

Fonte - Adaptado de Ministério do Meio Ambiente, 2012.

Segundo Vieira (2008), além disso, ao se observar a indústria brasileira de base florestal, pode-se afirmar que esta tem grande expressividade no contexto da América do Sul. Esse fato fica evidenciado pela vantagem comparativa das plantações florestais, caracterizadas pelas excelentes condições climáticas brasileiras, assim como pela diversidade de produtos.

Em vários países do mundo, a atividade madeireira e a cadeia produtiva associada a ela são objeto de investimentos em tecnologias, pesquisa e desenvolvimento, e transações comerciais de elevado valor econômico. No Brasil essa dinâmica não poderia ser diferente, pois além de possuir a segunda maior cobertura florestal do mundo, o país desenvolveu tecnologias avançadas para a exploração de florestas e para a transformação industrial da madeira, o

que torna as vantagens naturais em competitividade real (JUVENAL; MATOS, 2002).

No que diz respeito especificamente às florestas plantadas, embora apresentem porção reduzida no território quando comparadas às florestas nativas, apresentam relevantes indicadores de eficiência produtiva e notória participação socioeconômica no setor, uma vez que fornecem cerca de 85% de todos os produtos de origem florestal encontrados no mercado (TOLELLO et al., 2008).

Apesar da incontestável importância econômica e socioambiental do setor de florestas plantadas para o Brasil, o ambiente de negócio para o desenvolvimento da atividade florestal no país não é dos melhores.

O fato é que a competitividade dos produtos florestais está se deteriorando frente aos seus principais concorrentes internacionais. No início desta década, o Brasil ostentava o status internacional de país com o menor custo de produção de madeira de processo. No entanto, após dez anos, já se perdem quatro posições (ABRAF, 2013). O comparativo mundial de custo de produção de madeira está apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Custo de produção de madeira (em dólares). Fonte: Adaptado de Ibá (2014).

Através da análise da figura é possível perceber que em 2013 foi mais oneroso produzir madeira no Brasil do que no Chile, Estados Unidos e Indonésia, países esses quem em 2003, apresentavam custo maior que o brasileiro. Atualmente, o Chile apresenta custo de produção de madeira cerca de 18% inferior ao do Brasil (IBÁ, 2014).

É notório que, independentemente do setor, a elevação dos preços de produção leva a uma redução de rentabilidade, já que para manter a competitividade, não é interessante o repasse desse aumento para o consumidor final. Na indústria madeireira de florestas plantadas, o aumento generalizado dos custos de produção de madeira está reduzindo significativamente a margem de lucro das empresas de tal segmento.

Segundo Ibá (2014) entre 2006 e 2013, a rentabilidade média das empresas nacionais de celulose, por exemplo, passou de 48% para 33% (15% de redução), enquanto no mesmo período, a rentabilidade média dessas empresas nos principais países competidores do Brasil passou de 28% para 22% (6% de redução), ou seja, uma redução menos expressiva.

Mesmo com essa instabilidade na economia internacional e com os problemas relacionados à competitividade dos produtos florestais brasileiros, a conjuntura atual proporciona oportunidades para a consolidação do Brasil como uma das principais potências da indústria mundial de base florestal, devido às suas reservas naturais (DERAL, 2012).

Para que isso ocorra, é importante que as empresas do setor priorizem a melhoria de seus processos industriais, da logística relacionada às suas operações, além de investimentos em inovação tecnológica. Dessa forma, será possível, dentre outras coisas, recuperar a competitividade através da redução dos custos atuais de produção, promovida pelos benefícios decorrentes dos processos de melhoria implantados.

2.2. SEGMENTO DE CELULOSE E PAPEL

Como mencionado, o foco desta dissertação é o segmento de florestas plantadas, mais especificamente o setor de papel e celulose, uma vez que o modelo de simulação desenvolvido foi aplicado em uma indústria desse setor.

Segundo a BRACELPA (2013), o setor de celulose e papel é o segmento mais bem sucedido do setor florestal brasileiro, com 220 empresas localizadas em 450 municípios de 16 estados, nas cinco regiões brasileiras. Estas empresas totalizam uma produção de 10,1 milhões de toneladas de celulose e 8,6 milhões de toneladas de papel ao ano.

A distribuição de consumo brasileiro de madeira proveniente de plantios de florestas para uso industrial em 2013 é apresentada na Figura 7, por segmento de produto. Com a análise do gráfico, é possível perceber que no ano de análise, cerca de 35% de toda a madeira de florestas plantadas produzida no país foi utilizada especificamente para a produção do setor de celulose, que inclui a produção de papel, ao passo que o restante da produção foi alocado para os outros segmentos do setor.

Figura 7 - Distribuição do consumo de madeira em 2013. Fonte: ABRAF, 2014.

Em termos quantitativos, nesse mesmo ano, o consumo brasileiro de madeira proveniente de árvores plantadas para uso industrial foi de, aproximadamente, 185,3 milhões de metros cúbicos (m³) (ABRAF, 2014).

Desde o início de suas atividades no Brasil, o segmento teve em vista as exportações e buscou operar em condições de concorrer com os grandes produtores dos países mais desenvolvidos, em razão das características desse mercado que sempre foi marcado pela competição internacional (JUVENAL; MATOS, 2003). Os principais destinos das exportações do setor são apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Destino das exportações de papel e celulose Fonte - Adaptado de Bracelpa, 2014.

Pode-se notar que os principais destinos das exportações do segmento são Europa, Ásia e América, com destaque para Estados Unidos, China, Holanda e Argentina, que são os maiores consumidores da celulose e do papel de produção brasileira.

Tratando-se especificamente da produção do setor de celulose, em 2000, o Brasil era o 5º maior produtor mundial, superado apenas pelos Estados Unidos,

Canadá, Japão e Finlândia. Atualmente, o país é o 3º maior produtor mundial de celulose, atrás apenas dos Estados Unidos e Canadá. Enquanto isso, a indústria nacional de papel ocupa a 9ª posição no ranking internacional dos maiores produtores. (BRACELPA, 2014).

Em 2013, contudo, a indústria nacional de papel e celulose registrou níveis de produção e consumo praticamente constantes quando comparados ao ano anterior. Essa relativa estabilização da produção e consumo de celulose e papel se deve ao fato de que entre 2010 e 2012, o setor vivenciou grandes turbulências em decorrência da queda nos preços internacionais desses produtos, que além de gerar um desaquecimento do mercado e uma instabilidade no cenário econômico do setor, vem impondo um ritmo de lenta recuperação (BRACELPA, 2014).

Dentro desse cenário, o principal objetivo das empresas que compõe o setor, é reduzir seus custos operacionais para a manutenção da competitividade em um cenário internacional tão volátil e acirrado.

Segundo Osório (2007), as empresas do setor de celulose e papel possuem um contingente econômico altamente oneroso ligado ao transporte de madeira. Dentro de todas as atividades realizadas em uma organização como essa, o modal rodoviário em uso é o que apresenta maior potencial latente de redução dos custos, que, sem dúvida, pode ser obtida com a racionalização das operações de transporte e de circulação interna.

3. REVISÃO DA BIBLIOGRAFIA

Existe um grande número de estudos acadêmicos que apresentam como tema central o transporte de madeira. Esses trabalhos e estudos consideram todos os horizontes de planejamento, desde o nível estratégico, que envolve o planejamento das operações de transporte com um longo período de antecedência, passam pelo nível tático, que envolve as decisões de médio prazo, até o nível operacional, na qual a maioria dessas pesquisas está centrada.

Dessa forma, apresentam-se, então, os principais problemas no transporte florestal, com uma abordagem sobre todos os horizontes de planejamento e, posteriormente, faz-se uma revisão dos trabalhos que tratam especificamente dos problemas operacionais de transporte, que é o foco deste estudo.

Dentre os trabalhos revisados, pode-se observar que há uma predominância da utilização de técnicas consagradas em busca de soluções ótimas para a configuração do transporte de madeira entre os pontos de coleta e consumo, que resultem em menores custos para as empresas envolvidas, como a otimização através de programação linear e a utilização de heurísticas.

3.1. PLANEJAMENTO DO TRANSPORTE FLORESTAL

O planejamento do fluxo de madeira em companhias florestais é um processo complexo que envolve inúmeras operações e recursos (PALMGREN et al., 2003). Segundo Epstein et al. (2007), as decisões de transporte relacionadas a esse fluxo ocorrem nos mais variados horizontes de planejamento e correspondem a maior porção dos custos de operação, devendo ser, portanto, gerenciadas de maneira eficiente.

Para Palmgren (2005) o problema de planejar o fluxo de madeira em uma indústria florestal envolve inúmeros horizontes de tempo e é, de maneira geral, tratado em três diferentes níveis: problemas de nível estratégico, nível tático e operacional.

3.1.1. Problemas de Transporte Estratégico e Tático

Os problemas de planejamento estratégico de transporte lidam com aspectos de longo prazo, com períodos maiores que um ano e tem grande impacto sobre todas as decisões relacionadas a investimentos que serão necessários para a manutenção da produção e atendimento da demanda nos períodos seguintes (CARLSSON et al., 2006).

Segundo Forsberg e Frisk (2005), o planejamento estratégico nesse setor trata de problemas relacionados ao ajuste da capacidade dos recursos que serão necessários, segundo as previsões de mudanças na produção no local de consumo, na disponibilidade nos pontos de coleta ou demanda dos consumidores.

De acordo com Palmgren (2005) é nesse nível em que são definidos quais pontos de coleta de madeira deverão ser ativados e utilizados para que haja o correto balanceamento entre suprimento e a demanda esperada. Essa decisão,

segundo a autora, está diretamente relacionada com os custos do transporte de madeira, pois somente a partir dela é que esses poderão ser levados em consideração. A partir dessa análise, pode-se perceber que no nível estratégico, segundo a perspectiva da autora, o planejamento das áreas de corte de madeira tem uma importância bastante significativa.

Para Ronnqvist (2003) o nível estratégico também está intimamente relacionado com decisões referentes à construção das estradas de acesso às áreas de coleta, além de realização de melhorias e manutenção dessas, uma vez que uma rede de estradas em condições inadequadas reduz a eficiência do transporte ou até mesmo, impede o tráfego durante certos meses do ano, principalmente nos períodos de chuva.

O planejamento de longo prazo tem se tornado de grande necessidade no setor florestal, uma vez que a antecipação de problemas futuros e o planejamento de suas soluções vêm se configurando como um grande diferencial competitivo entre as organizações do setor, assim como uma estratégia menos onerosa, quando comparada à solução dos imprevistos no momento em que estes acontecem (D'AMOURS et al., 2008).

O nível de planejamento seguinte ao estratégico é o nível tático, que pode variar entre um mês até um ano de planejamento. É nesse nível em que as regras de alocação são solucionadas, definindo quais recursos ou grupo de recursos serão utilizados nas distintas operações do transporte florestal (D'AMOURS et al., 2008).

Segundo os mesmos autores, o planejamento tático se configura como uma divisão entre o planejamento de longo prazo e o detalhado planejamento de curto prazo que tem influência e impacto diretos nas operações diárias do transporte florestal. Ou seja, o planejamento tático precisa garantir que o nível operacional subsequente está de acordo com os direcionamentos estabelecidos no planejamento estratégico.

Segundo Palmgren (2005), no nível tático são geralmente avaliadas as quantidades que deverão estar disponíveis em cada ponto ativo de coleta de madeira, definidos no nível anterior, para o atendimento da demanda projetada.

Além disso, Ronnqvist (2003) destaca que é nesse nível em que todos os recursos são balanceados para o atendimento da demanda, devendo-se definir, por exemplo, a capacidade de distribuição que a frota de transporte e os equipamentos utilizados nos pontos de coleta devem apresentar. Segundo este autor, dependendo do tipo de modal utilizado, esse planejamento pode até ser feito em um nível estratégico. O transporte por meio de navios ou trens normalmente precisa ser planejado com maior antecedência quando comparados ao transporte de madeira realizado por caminhões.

Nesse sentido, D'amours et al. (2008) destaca que uma vez que decisões referentes a recursos envolvidos são tomadas nessa etapa, normalmente é nesse nível em que também são realizadas as projeções de orçamento necessário para o próximo período, visando sempre a manutenção de um fluxo constante de entrega de madeira na fábrica.

De acordo com Palmgren (2005) uma das mais estudadas e importantes decisões tomadas nesse nível está relacionada ao planejamento da viagem retorno. No âmbito das operações florestais, a viagem retorno representa o movimento de retorno de um caminhão que, após realizar uma descarga de madeira em um ponto de consumo, deve se dirigir a um ponto de coleta para um novo carregamento de toras de madeira.

Segundo a autora, quando o caminhão que realiza essa viagem está vazio, a eficiência do transporte é de somente 50%, já que o veículo se encontra carregado apenas durante metade do ciclo realizado. O planejamento desse tipo de viagem no nível tático visa reduzir o número de viagens vazias, para que haja incremento da produtividade do veículo.

Essa redução de viagens improdutivas pode ser realizada através da busca de possíveis pontos de carregamento de madeira geograficamente próximos aos

pontos de descarregamento, reduzindo assim as distâncias percorridas por veículos vazios, como pode ser visto na Figura 9 (Ronnqvist, 2003).

Figura 9 - Redução de viagens improdutivas. Fonte: Adaptado de Ronnqvist, 2003.

Na parte esquerda da figura, existem dois fluxos diretos, que correspondem às rotas S1-D1-S1 e S2-D2-S2, onde S1 e S2 são áreas de coleta de madeira e D1 e D2, pontos de consumo (fábricas). Com essa configuração, o veículo que faz a coleta da madeira nas duas rotas, após o descarregamento nas fábricas D1 e D2, faz a uma longa viagem retorno ao ponto de coleta completamente vazio. Isso pode ser solucionado assim como apresentado na porção direita da figura. Após a descarga de madeira na fábrica D1, o caminhão, ao invés de se dirigir novamente ao ponto de coleta S1, direciona-se para o ponto de coleta S2, mais próximo ao ponto do último descarregamento, reduzindo, portanto, a distância percorrida sem carga (Epstein et al., 2007).

Ainda segundo os mesmos autores, o planejamento da redução das distâncias percorridas por caminhões vazios reduz, significativamente, os custos, com economias que podem ir de 2% a 20%. As possibilidades, contudo, de realizar esse tipo de planejamento em uma indústria desse segmento, dependem diretamente da distribuição geográfica das áreas de coleta e consumo.

Segundo Caplice e Sheffi (2003), os sistemas de transporte podem ser classificados como diretos ou consolidados. Os transportes de carga lotação (do inglês *Truckload*) operam em rotas e se deslocam entre origem e destino

sem paradas intermediárias para consolidação de carga. Já os transportes de consolidação, tais como carga fracionada (do inglês *Less-than-truckload*), necessitam de rotas programadas que contemplem a coleta de pequenas cargas para consolidação em uma carga completa.

Ainda segundo esses autores, em sistemas de cargas fracionadas há maiores possibilidades de programação de rotas que visem à redução das viagens vazias, contudo, no problema apresentado nesta dissertação, a carga é do tipo consolidada, no qual o caminhão é totalmente carregado nos pontos de coleta e tem como único ponto de consumo a indústria de papel e celulose que utiliza a madeira como matéria-prima. Assim, após o descarregamento na fábrica, a viagem de retorno do veículo para um novo ponto de coleta sempre será com carga vazia.

Segundo Seixas (1992), essa configuração é natural no transporte rodoviário do setor florestal brasileiro, em virtude da especificidade da carga e exclusividade do frete, possibilitando ao caminhão viajar carregado somente em um sentido, o que faz com que os custos tendam a ser maiores por unidade de volume do que em outros setores ou outros mercados.

3.1.2. Planejamento de Transporte Operacional

O planejamento operacional considera o transporte diário, semanal ou até mensal de toras de madeira, estando essa variação diretamente relacionada ao nível de detalhe necessário à operação de cada companhia do setor (RONNQVIST, 2003).

Segundo Palmgren (2005) esse transporte é realizado em duas etapas. A primeira envolve a movimentação das toras de madeira colhidas nas florestas para os pontos ativos de coleta (fazendas) e a segunda etapa compreende o transporte dessa madeira localizada nos pontos de coleta para o local onde a mesma será consumida. Essa duas etapas estão descritas na Figura 10.

Figura 10 - Etapas do planejamento de transporte operacional. Fonte: Adaptado de Palmgren (2005).

Essa primeira etapa é também conhecida como problema de extração de toras de madeira. Palmgren (2001) define essa operação da seguinte forma: após o corte e a colheita da madeira, as toras são organizadas em pilhas em vários pontos da floresta. Essas pilhas são transportadas para os variados pontos de coleta para que essa madeira possa, então, ser acessada pelos caminhões que irão fazer o carregamento.

O objetivo ao solucionar esse problema é encontrar rotas eficientes para a realização dessa transferência de carga desde as pilhas até os pontos de coleta. Para isso, as distâncias e os tempos de viagem entre as diferentes pilhas devem ser coletados ou medidos, para que estes possam ser utilizados em métodos de otimização na busca por boas rotas (PALMGREN, 2005).

Segundo Palmgren et al. (2004), trata-se de um problema que vem sendo estudado intensivamente nos últimos anos, uma vez que esta operação envolve altos custos operacionais e, mesmo uma redução relativamente pequena de custos, pode proporcionar grandes economias.

Ainda segundo a autora, a segunda etapa do planejamento operacional é conhecida como problema de transporte de madeira e, como mencionado, compreende o transporte dessa carga, geralmente, realizado por caminhões, desde os pontos de coleta até os pontos de consumo.

Seixas (1992) define essa etapa como transporte principal de madeira, quando essa é transportada desde os pontos localizados às margens das estradas até os centros consumidores. Segundo esse autor, essa etapa do transporte florestal tem posição de destaque nas empresas do ramo, uma vez que se trata de uma operação vital para o abastecimento constante de matéria prima no ponto de consumo.

Segundo Martell et al. (1998) as principais deficiências nesse tipo de transporte são os grandes congestionamentos que normalmente ocorrem nos pontos de carga (fazendas) e no centro de consumo (fábrica), e as viagens extras que se fazem necessárias para atender a demanda, devido ao tempo perdido nos congestionamentos citados.

De acordo com Weintraub et al. (1996) o custo do transporte principal de madeira atinge até 44% do custo total de abastecimento das principais indústrias florestais do Chile, enquanto nos Estados Unidos esse custo chega a atingir entre 50 % e 60% do custo total. No Brasil, segundo Seixas e Widmer (1993), o custo do transporte principal varia entre 38% a 66% do custo final de aquisição da madeira, superando, em algumas ocasiões, o próprio valor da madeira em pé.

De acordo com Ronnqvist (2003) se trata do problema operacional que tem recebido maior atenção nos últimos anos, tanto no meio acadêmico quanto no mercado, já que corresponde a aproximadamente um terço das operações totais de transporte realizadas pelas indústrias do setor, além de envolver grandes possibilidades de redução de custos e de, conseqüentemente, grandes economias (PALMGREN et al., 2003).

O planejamento dessa segunda etapa do transporte pode ser variável entre uma companhia e outra. Há casos em que uma companhia de transporte organiza a movimentação de madeira para inúmeras companhias ou indústrias do setor, garantindo o atendimento da demanda de matéria prima em cada um desses destinos. Um segundo caso ocorre quando a própria indústria organiza e realiza um planejamento mais centralizado de sua frota de caminhões (EPSTEIN et al., 2007).

Como apresentado, esta dissertação está focada no problema de transporte principal de madeira, que, por definição, é um problema de nível operacional e o seu planejamento é realizado de maneira centralizada, uma vez que o gerenciamento da frota de caminhões utilizada é de responsabilidade da indústria de papel e celulose estudada, ponto final de consumo dessa carga.

3.1.3. Principais Estudos Desenvolvidos acerca do Problema de Transporte Principal de Madeira

Como mencionado, o problema de transporte principal de madeira é aquele que vem recebendo maior atenção há alguns anos e muitas pesquisas já foram desenvolvidas sobre o tema em diversos países como o Chile, Nova Zelândia, Finlândia e Suécia.

Weintraub et al. (1996) descrevem um sistema de simulação computadorizado denominado ASICAM, um dos primeiros e mais relevantes estudos realizados acerca do tema, que tem sido utilizado desde 1990 em grande parte das indústrias florestais do Chile.

Esse sistema gera sequências prévias de viagens individuais para cada caminhão pertencente à frota, alocando os tipos de carga que deverão ser transportadas e as viagens a serem realizadas por cada veículo, sempre satisfazendo as demandas dos pontos de coleta de madeira e dos inúmeros pontos de consumo (fábricas) que devem ser atendidos em um determinado período (COSSENS, 1993).

O processo de simulação gera um agendamento completo de viagens de um dia inteiro, sendo capaz de solucionar problemas de transporte de madeira que envolvam uma frota de 200 veículos, 40 pontos de coleta e até 15 fábricas ou pontos de consumo (WEINTRAUB et al., 1996).

O processo de solução utilizado no estudo de Weintraub et al. (1996) se trata de uma heurística e segue os seguintes passos:

1. Na primeira etapa, a componente de tempo é inicializada no instante 0;
2. São avaliadas todas as viagens possíveis para todos os caminhões que estão disponíveis, em algum instante, dentro de uma hora contada a partir do instante inicial t_0 ;
3. Nessa etapa, são alocadas todas as viagens que foram agendadas dentro do tempo $t_0 + 15$ minutos;
4. Se ainda existe alguma fábrica aberta, demandando matéria prima, a componente inicial de tempo é movida para 15 minutos e a segunda etapa é repetida. Caso contrário, o processo é finalizado.

A avaliação das viagens possíveis, que é realizada na segunda etapa, é baseada em uma série de regras heurísticas (COSSENS, 1993).

O custo de cada viagem é levado em consideração e é acrescido a esse uma penalidade de congestionamento, que entre outros fatores, depende do número de caminhões alocados ao mesmo ponto de coleta de madeira em certo instante. Essa penalidade não se trata de um custo real, mas é unicamente utilizada para avaliar as possíveis viagens em um determinado momento do processo de transporte da madeira. Após computar o custo, as viagens são escolhidas de acordo com uma lista de prioridades (PALMGREN, 2005).

Existem três tipos de prioridades que são levadas em consideração no modelo ASICAM. A primeira prioridade é dada às viagens que incluem fábricas que tem demandas urgentes. A segunda é dada às demandas em atraso e a terceira prioridade é alocada a pontos de coleta que apresentam elevado custo de estoque (EPSTEIN et al., 1996).

Na terceira etapa do processo, na qual as viagens são alocadas, o algoritmo inicia pela escolha das viagens com menor custo e que estão incluídas na primeira categoria de prioridades. Se não existir nenhuma viagem nessas condições, o processo escolhe entre as viagens que satisfazem à segunda categoria de prioridades, depois à terceira categoria e finalmente escolhe entre as viagens remanescentes disponíveis. A cada interação do modelo, o estado de cada ponto de consumo e coleta é atualizado e as prioridades são computadas novamente (PALMGREN, 2005).

O uso do ASICAM pelas indústrias do setor florestal chileno tem levado a inúmeras melhorias, dentre as quais se podem destacar:

1. Redução de filas;
2. Redução dos custos de transporte de madeira;
3. Redução do número de caminhões na frota;
4. Maior regularidade nas entregas de madeira nos pontos de consumo (RONNQVIST e RYAN, 1995).

O tempo necessário para a realização do agendamento das viagens de um dia completo é de 20 minutos em PC padrão. Em caso de quebras, paradas ou imprevistos nos ciclos dos caminhões, a central de operações realiza uma redistribuição manual dos veículos (RONNQVIST e RYAN, 1995).

Segundo Weintraub et al. (1996), além dos benefícios já mencionados, o sistema tem, ao longo dos anos, melhorado a comunicação entre as operações florestais, empresas transportadoras e os consumidores de madeira (fábricas).

Alguns autores, como Ronnqvist e Ryan (1995), destacam que a principal desvantagem de sistemas como o ASICAM é o compromisso de seguir exatamente o planejamento diário de viagens estabelecido, independente do acontecimento de mudanças, exceto em situações incomuns.

O sistema ASICAM tem sido, desde sua implementação, objeto de estudo e interesse em outros países nos quais o setor florestal tem significativa importância. Cossens (1993) verificou a adequação do sistema para no cenário florestal da Nova Zelândia e concluiu que o mesmo pode ser utilizado após a realização de algumas modificações.

Contudo, ainda para este autor, algumas companhias neozelandesas optam pela utilização de sistemas que realizam a alocação e despacho dos caminhões em tempo real, assim que cada veículo finaliza uma viagem, ao invés de sistemas que, como o ASICAM, fornecem o planejamento prévio do dia inteiro. Sistemas com alocações em tempo real, entretanto, são menos sensíveis à formação de filas, paradas, quebras de equipamentos ou qualquer outra mudança inesperada que pode ocorrer durante um dia inteiro de

operações. O estudo de Cossens (1993) ratifica a ideia de que cada companhia florestal tem necessidades peculiares que diferem entre cada país e/ou mercados e podem, portanto, adequar-se a diferentes tipos de ferramentas para planejar suas operações.

Palmgren (2005), em sua tese, também trata do problema de transporte de madeira em indústrias florestais da Suécia, através da aplicação de três métodos de solução baseados no princípio de geração de colunas. O objetivo é encontrar rotas ou sequências de coletas e entregas de mínimo custo para cada veículo que compõe a frota, de maneira a satisfazer às demandas dos pontos de consumo sem exceder o volume de madeira disponível em cada ponto de coleta.

No estudo desta autora, cada rota viável dá origem a uma coluna no modelo e uma variável binária correspondente descreve se a rota é utilizada ou não pelo caminhão. Como mencionado, uma rota é considerada viável se obedece a um número significativo de regras e restrições, como janelas de tempo, precedências e capacidade.

Os três métodos de solução utilizados na tese de Palmgren (2005) são caracterizados como heurísticos com base otimizadora, já que são baseados em sólidas metodologias de otimização, porém com alguns subproblemas sendo solucionados através de heurísticas ou de aproximações. Segundo a autora, a vantagem desses métodos é que os mesmos geram limites superiores e inferiores do valor da função objetivo, o que ajuda a medir a qualidade da solução gerada. Os métodos de solução apresentados foram testados em casos reais de companhias florestais suecas e garantiram melhores soluções que as obtidas anteriormente pelo planejamento manual das rotas.

Ainda segundo Palmgren (2005), apesar de consumirem um tempo computacional significativo, o tempo de processamento das soluções tem diminuído de maneira relativa com o rápido desenvolvimento dos *hardwares* e *softwares* utilizados.

Ronnqvist e Ryan (1995) descrevem em seu artigo uma abordagem para o planejamento do transporte principal de madeira em uma das maiores companhias da Nova Zelândia. A abordagem desses autores difere-se, contudo, da apresentada por Palmgren (2005) e Weintraub (1996), uma vez que visa à criação de sequências de viagens em tempo real. Como mencionado, em sistemas como esse, o agendamento diário completo das viagens para cada veículo não se faz necessário, uma vez que o objetivo é gerar uma viagem, em determinado instante, para cada caminhão que está disponível para o transporte.

Nos métodos apresentados por esse artigo, para que seja realizada a alocação de uma nova viagem, é necessário que o motorista do veículo, assim que estiver disponível, entre em contato com a central de operações de transporte para solicitar nova alocação (RONNQVIST; RYAN, 1995).

O método de solução proposto por esses autores envolve duas fases heurísticas e uma fase de otimização. A primeira fase utiliza uma heurística sequencial gulosa para achar a melhor viagem para cada caminhão. Essa heurística considera os veículos em uma ordem que corresponde à previsão do término das viagens atuais, ou seja, prioriza aqueles veículos que logo estarão disponíveis para a realização de uma nova entrega.

Os carregamentos e as entregas alocadas a um caminhão são considerados inviáveis para os caminhões seguintes. Essa primeira fase heurística garante a geração de soluções muito rápidas, que passam a ser consideradas como soluções iniciais (RONNQVIST; RYAN, 1995).

A segunda heurística aplicada também é gulosa, contudo nessa fase são construídas as melhores sequências de viagens para cada veículo, que incluem a próxima viagem e todas as outras necessárias para cobrir o período inteiro de operação. A primeira viagem da sequência de viagens gerada por essa segunda heurística é utilizada para atualizar a solução inicial proposta para cada caminhão (RONNQVIST; RYAN, 1995).

O tempo de solução da segunda fase é obviamente mais longo que o necessário para a primeira fase, contudo, espera-se, de maneira geral, que as soluções geradas apresentem maior qualidade (RONNQVIST; RYAN, 1995).

As sequências de viagens geradas na execução da segunda heurística são utilizadas para criar uma base inicial para a fase de otimização, em que uma relaxação do modelo matemático inicial é resolvida por um método de geração de colunas. Posteriormente, aplica-se, então, um procedimento de *branch and bound* para que soluções inteiras sejam geradas (RONNQVIST; RYAN, 1995).

A estratégia de *branch and bound* utilizada pelos autores visa à geração de soluções inteiras inicialmente para os veículos com grande prioridade, ou seja, aqueles que têm chegada prevista para um instante próximo. As primeiras duas fases do algoritmo garantem a geração rápida de viagens e, caso haja tempo hábil antes da solicitação de uma nova viagem, a terceira fase gera viagens melhores que as soluções iniciais.

Para Palmgren (2005) uma das principais desvantagens do sistema apresentado por Ronnqvist e Ryan (1995) é o fato de o mesmo não ter a capacidade de considerar filas que podem ser formadas durante as operações de coleta e entrega de madeira.

Sahlin (1998) e Carlsson et al. (1998) também apresentaram estudos tratando do problema de transporte de madeira através da alocação de viagens e despacho de caminhões em tempo real, em uma grande indústria florestal sueca. Seus processos de soluções são compostos por três estágios.

No primeiro estágio, uma heurística é utilizada somente para enumerar todas as viagens possíveis e todos os pontos de coleta e de consumo, disponíveis no instante em que o procedimento está sendo executado, são considerados. Nessa primeira fase, seis tipos de viagens são gerados, sendo um deles a opção de espera, ou seja, o veículo não é alocado a nenhuma viagem. Os outros tipos consistem em uma ou duas coletas de madeira seguidas por uma entrega em um ponto de consumo, o que caracteriza a possibilidade de coleta de carga fracionada (SAHLIN, 1998; CARLSSON et al., 1998).

Durante o segundo estágio, os custos das viagens são calculados e variam de acordo com a posição e a carga atual do veículo, além de outros fatores. Finalmente, na terceira fase, uma viagem é alocada para cada veículo disponível, caso seja possível. Cada vez que um veículo finaliza sua viagem, o motorista entra em contato com a central e uma nova viagem é alocada. Esses três estágios são repetidos durante todo o período de operação e segundo os resultados apresentados pelos estudos, garantem uma redução significativa no número de caminhões necessários para a realização do transporte de madeira (SAHLIN, 1998; CARLSSON et al., 1998).

Segundo Hachemi et al. (2011) sistemas como os apresentados por Sahlin (1998) e Carlsson et al. (1998) precisam apresentar soluções instantâneas para viabilizar a alocação eficiente de veículo, em alguns casos se faz necessário que as soluções sejam geradas em poucos segundos. Essa necessidade exige a utilização de algoritmos muito rápidos, que, por consequência impõem um *trade off* entre tempo de solução e qualidade da mesma.

Linnainmaa et al. (1995) descrevem um sistema chamado EPO, aplicado em uma grande indústria florestal da Finlândia e que lida com todos os estágios de planejamento, desde o nível estratégico até o operacional.

A indústria finlandesa opera com inúmeros pontos de coleta que devem abastecer mais de uma fábrica por dia. As cargas coletadas por cada caminhão podem ser fracionadas e uma viagem pode ser composta por inúmeras coletas sequenciais seguidas por uma entrega, sem nunca exceder a capacidade do veículo. Os dados de entrada utilizados para alimentar o sistema são obtidos, em tempo real, a partir de informações provenientes dos pontos de coleta, dos responsáveis pelo manejo das gruas de carga nesses pontos, dos motoristas dos caminhões da frota e dos pontos de consumo. Como principal dado de saída, o EPO determina um agendamento semanal de viagens para cada caminhão pertencente à frota, além de fornecer estimativas quanto à disponibilidade de madeira nos pontos de coleta e à demanda das fábricas (LINNAINMAA et al.; 1995).

Este sistema, assim como os apresentados por Ronnqvist e Ryan (1995) e Sahlin (1998) e Carlsson et al. (1998), apresenta uma abordagem de solução que combina tanto heurísticas como otimização e é composta por três fases:

1. Determinar qual ponto de coleta está reservado para qual ponto de consumo, a partir de uma heurística baseada na distância entre a fábrica e os diversos pontos nos quais a madeiras podem ser coletadas;
2. Produzir agendamentos de sequências de viagens possíveis para os veículos que compõe a frota;
3. Etapa de pós-processamento que é realizada em parte de maneira manual e que permite a solução de possíveis conflitos entre as sequências de viagens produzidas automaticamente e a visão prática dos funcionários responsáveis pelo despacho de veículos e controle da operação.

Segundo Linnainmaa et al. (1995), o principal objetivo do EPO é minimizar a distância total percorrida por cada veículo, além da minimização das distâncias vazias percorridas. As economias anuais registradas após a implementação do sistema foram estimadas em milhares de dólares e após os benefícios gerados com a aplicação no transporte rodoviário de madeira, a companhia planeja o desenvolvimento do EPO para que este possa lidar com os desafios relacionados aos modais ferroviários e marítimos, ambos também utilizados para o escoamento dos produtos florestais.

Sousa (2000), em sua tese, analisa e avalia a eficiência do transporte principal de eucalipto de quatro indústrias de celulose e papel e duas de chapa de composição atuantes no Brasil. Para isso, os autores realizam o delineamento de três modelos de transporte utilizando programação linear. As fazendas, que são as origens de madeira e as indústrias, que são as fontes consumidoras, são vistas, pelo autor, como nós interligados pela rede de estradas. O elo de ligação ou arco é medido pelo custo de transporte (R\$/t./km).

O primeiro modelo de transporte utilizado desconsidera o vínculo de propriedade entre indústrias e povoamentos, ou seja, permite-se que o abastecimento das unidades industriais seja feito por fazendas cujas

propriedades não estão registradas em nome do grupo empresarial para onde se destina a madeira, além de não definir o tipo de caminhão. Dessa forma, este modelo pode ser entendido como vários destinos, que são as indústrias, e várias origens, que são as fazendas onde as toras ficam disponíveis (SOUSA, 2000; SOUSA et al. 2002).

O segundo modelo apresentado pelo mesmo autor mantém a desconsideração deste vínculo de propriedade, mas insere a definição do tipo de caminhão utilizado na realização do transporte principal de toras de madeira. Como continua desconsiderando a propriedade, o segundo modelo também se apresenta ainda como vários destinos e várias origens (SOUSA et al. 2002).

No terceiro modelo, por fim, Sousa (2000) configura a ausência de competição na demanda por madeira, no qual cada indústria é tratada separadamente e de maneira individual, e não há mais definição do tipo de caminhão a ser utilizado no transporte. Dessa forma, este último modelo pode ser considerado com várias origens e um único destino.

Os três modelos são confrontados pelo autor com o transporte efetivamente realizado nas indústrias, o que define, conseqüentemente, quatro cenários, nos quais os resultados são analisados, comparando-se inicialmente o comportamento do conjunto das seis indústrias e posteriormente o comportamento individual de cada uma dessas indústrias.

Os resultados das soluções ótimas dos três modelos são expressos em termos de custos, toneladas transportadas e quilômetros percorridos. As soluções ótimas do primeiro e segundo modelos apresentaram para o conjunto de indústrias percentuais de trocas de fontes de abastecimento de 62,1% e 64,9% respectivamente, com reduções nos custos totais de transporte de 12,8% no primeiro modelo e 29,6% no segundo. Nas análises individuais das indústrias, estas apresentam reduções no custo total de transporte que variam entre 5% e 52,4% (SOUSA, 2000).

Além disso, o autor, ao avaliar a contribuição da variável “tipo de transporte” tanto individualmente quanto para o conjunto, concluiu que a magnitude dos

resultados obtidos leva ao questionamento do processo de terceirização do transporte principal de madeira, tão largamente difundido entre as empresas analisadas. Os resultados obtidos no estudo sugerem a verticalização do transporte principal de madeira, uma vez que se trata de uma opção administrativa que leva a significativos ganhos de competitividade.

Seixas e Widmer (1993) apresentaram em seus estudos um método para tratar do transporte principal de madeira, em uma configuração na qual existem vários pontos de coleta, um único ponto de consumo e uma rede viária definida.

Os autores aplicaram um modelo de programação linear inteira para selecionar e dimensionar a melhor frota de veículos e os resultados obtidos nos estudos de casos, desenvolvidos em uma indústria de papel e celulose, apontaram uma significativa redução no número de veículos utilizados, além de indicar os melhores tipos de caminhão para cada rota pré-estabelecida, ambos garantindo redução de custos.

Contudo, não foram considerados os equipamentos de campo, responsáveis pelo carregamento dos caminhões, além de, pela utilização do método de programação linear, não ter sido possível agregar a variabilidade dos tempos dos processos envolvidos ao modelo proposto.

O Quadro 1 abaixo apresenta uma consolidação dos estudos apresentados acerca do problema de transporte principal de madeira, quanto às características dos sistemas estudados e os principais resultados obtidos.

Autor(es)	Sistema	Resultados
Weintraub et al (1996) ASICAM: Sistema de simulação, baseado em regras heurísticas.	<ul style="list-style-type: none"> • Sequências prévias de viagens (dia completo). • Múltiplas cargas. • Múltiplos pontos de coleta e consumo. • Satisfaz restrições de pontos de coleta e demanda. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de filas. • Redução dos custos de transporte de madeira. • Redução do número de caminhões na frota. • Regularidade nas entregas nos pontos de consumo.

Autor(es)	Sistema	Resultados
Cossens (1993) Adequação para Nova Zelândia.	<ul style="list-style-type: none"> • Adequação do sistema para o cenário, podendo ser utilizado após a realização de algumas modificações. • Utilização, contudo, de sistemas com alocação e despacho em tempo real ($\neq$ planejamento prévio). 	<ul style="list-style-type: none"> • Alocações em tempo real menos sensíveis a problemas operacionais. • Cada companhia florestal tem necessidades peculiares.
Palmgren (2005) Transporte de madeira na Suécia, com três métodos de solução baseados em geração de colunas.	<ul style="list-style-type: none"> • Sequências prévias de coletas e entregas de mínimo custo. • Múltiplas cargas. • Múltiplos pontos de coleta e consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Testados em companhias florestais suecas. • Melhores soluções, comparando-se com as manuais. • Tempo de processamento aceitável.
Ronnqvist e Ryan (1995) Nova Zelândia, solução baseada em duas fases heurísticas e uma de otimização.	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de viagens em tempo real. • Múltiplas cargas. • Múltiplos pontos de coleta e consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alocações em tempo real menos sensíveis a problemas operacionais.
Sahlin e Carlsson et al (1998) Suécia, solução em três fases.	<ul style="list-style-type: none"> • Geração de viagens em tempo real. • Múltiplas cargas. • Múltiplos pontos de coleta e consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de número de caminhões.
Linnainmaa et al (1995) Finlândia, EPO.	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiplas cargas. • Múltiplos pontos de coleta e consumo. • Agendamento semanal de viagens para a frota. 	<ul style="list-style-type: none"> • Economias no transporte registradas. • Desenvolvimento do sistema para outros modais.

Autor(es)	Sistema	Resultados
Sousa (2000) Brasil, 4 indústrias de papel e celulose e 2 de chapas de composição, Programação Linear.	<ul style="list-style-type: none"> • Avaliação da eficiência do transporte principal de eucalipto. • 3 modelos de transporte com programação linear. • 1º modelo: várias origens e vários destinos. • 2º modelo: várias origens e destinos, com definição do tipo de caminhão. • 3º modelo: Várias origens e único destino. 	<ul style="list-style-type: none"> • Os resultados das soluções ótimas expressos em termos de custos, toneladas transportadas e quilômetros percorridos. • O primeiro e segundo modelos apresentaram reduções nos custos totais de transporte de 12,8% e 29,6%, respectivamente. O 3º modelo apresentou reduções variáveis no custo total de transporte entre 5% e 52,4%. • Sugestão de verticalização do transporte principal de madeira (ganhos de competitividade).
Seixas e Widmer (1993) Brasil, indústria de Papel e Celulose, Programação linear inteira.	<ul style="list-style-type: none"> • Selecionar e dimensionar a frota de veículos utilizada para o transporte de madeira. • Múltiplos pontos de coleta. • Único ponto de consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Redução do número de veículos utilizados. • Indicação dos melhores tipos de caminhões para cada rota. • Redução dos custos. • Não leva em conta equipamentos de campo e de fábrica. • Não agrega variabilidade nos tempos de processo.

Quadro 1 – Resumo dos principais estudos acerca do problema de transporte principal de madeira.

3.2. DIMENSIONAMENTO DE FROTA DE VEÍCULOS

Segundo Seixas e Widmer (1993), no estudo do problema de transporte de madeira em que já há uma rede de vias conhecida, a determinação do número de veículos necessários para compor a frota é um dos aspectos mais importantes a serem tratados, uma vez que um sistema com excesso ou falta de veículos pode impactar negativamente no fluxo constante de madeira que se deseja manter em empresas do ramo florestal.

Ainda segundo esses autores, com base na quantidade de madeira a ser retirada das diversas fazendas e na capacidade de carga dos veículos, pode-se determinar o número necessário destes para um determinado período de tempo.

Segundo Barth e Michel (2012) a literatura aborda a problemática de dimensionamento de frota de três maneiras distintas: i) como um problema de roteirização; ii) como um problema de complexidade matemática sem o envolvimento de roteamento ou *scheduling* de veículos; iii) como um problema com base no tempo de ciclo. Essas três abordagens serão tratadas a seguir.

3.2.1. Dimensionamento de Frota a partir da Roteirização de Veículos

Muitos trabalhos tratam do dimensionamento de frota de veículos como resultado de problemas de roteirização. Segundo Masiero (2008), os veículos, nesses problemas são considerados como dados de entrada para a resolução, contudo recebem pouca atenção no que se refere às descrições dos resultados e conclusões.

O termo roteirização de veículos é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” para designar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou sequências de paradas a serem cumpridos por

veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento (Cunha, 1997).

Segundo Cunha (2000), sob a ótica de otimização, os problemas de roteirização de veículos, pertencem à categoria conhecida como NP-difícil (do inglês “NP-hard”), o que significa que possuem ordem de complexidade exponencial. Em outras palavras, o esforço computacional para a sua resolução cresce exponencialmente com o tamanho do problema (dado pelo número de pontos a serem visitados e atendidos) e é impossível obter soluções ótimas para os problemas de roteamento encontrados na prática, sendo necessária a aplicação de heurísticas para resultados aproximados.

Um dos primeiros trabalhos que trata da classificação dos problemas de roteirização e programação de veículos foi descrito por Bodin et al. (1983) apud Masiero (2008). Nesse estudo são expostos os principais algoritmos, estratégias de solução e aplicações conhecidas até então e ainda hoje é apresentado como umas das mais importantes referências sobre o assunto.

Cunha (1991) propôs em seu trabalho de dissertação uma formulação matemática do Problema de Roteamento e Programação (PRP), levando em consideração diversas restrições como múltiplos veículos, frota heterogênea, janela de tempo e regras de precedência. O principal objetivo de seu estudo era definir a rota com menor custo, que a partir de um depósito central fosse capaz de atender diversos pontos de demanda em janelas de tempo pré-estabelecidas.

Para solução, o autor baseou-se em otimização linear, porém, pela complexidade e porte do problema, Cunha (1991) utilizou duas heurísticas para a resolução do PRP, com um algoritmo baseado em programação dinâmica e um segundo com base no algoritmo de etiquetamento permanente generalizado para o problema do caminho mínimo com janelas de tempo.

Cunha (1997), como continuidade de seus estudos, desenvolveu em sua tese o problema de roteirização de veículos com restrições de janelas de tempo e

duração máxima de jornada de trabalho. Para a solução, o autor desenvolveu duas heurísticas baseadas em relaxação lagrangeana de algumas restrições inerentes ao modelo.

Teixeira (2001) buscou uma solução para o problema de roteamento e dimensionamento de frota heterogênea em seus estudos. Esse autor modelou seu trabalho como um Problema de Circulação em Custo Mínimo e, para sua solução, desenvolveu uma heurística baseada no algoritmo *Out of Kilter* (HOK), levando em consideração a interação de busca de circulação em uma rede capacitada.

O objetivo do autor era definir a composição da frota e a roteirização de veículos para atender a um conjunto de nós de demanda, visando à minimização dos custos de distribuição, levando em consideração os custos fixos e variáveis para cada veículo e suas capacidades de transporte.

Mourad (2005) considerou um problema de roteirização e programação de veículos com carga completa e janelas de tempo, com viagens diretas entre os pontos de origem e destino. Esse autor desenvolveu um algoritmo de minimização de custo total de distribuição e considerou inúmeras restrições práticas, como paradas para manutenção dos veículos, entre outras. Os resultados finais obtidos foram decorrentes da aplicação de heurísticas baseadas em busca Tabu e se mostraram satisfatórios.

No mesmo ano, Bonasser (2005), abordou o problema de roteirização com múltiplos depósitos, frota heterogênea, restrições de capacidade e distância, aplicado às operações desenvolvidas na Força Aérea Brasileira (FAB). O objetivo de seu estudo era encontrar uma solução de custo mínimo total e para solução o autor utilizou quatro métodos, que foram: adaptação da heurística de Clarke e Wright, meta-heurística de colônia de formigas, meta-heurística de busca Tabu e uma nova meta-heurística desenvolvida a partir das três anteriores.

Araújo (2008) tratou de um problema de roteirização de veículos sem restrições de janela de tempo e com uma frota homogênea e infinita. Para a solução o

autor se baseou em um algoritmo genético, com algumas propostas de alteração e, em suas conclusões, descreveu resultados satisfatórios na resolução do problema.

Roco (2010) aborda em seus estudos um problema de roteirização, levando em consideração o carregamento dos veículos, até então dois assuntos tratados de forma independente. Para a solução o autor utiliza heurísticas para tratar o problema de carregamento e uma meta-heurística de busca Tabu para tratar da roteirização, com vistas a utilizar uma abordagem de solução aproximada.

3.2.2. Dimensionamento de Frota como um Problema de Complexidade Matemática

Segundo Barth e Michel (2012), estes modelos de dimensionamento de frota foram bastante desenvolvidos ao longo dos últimos 50 anos e são classificados por serem de grande complexidade matemática.

Araújo (2002) apresenta em seu estudo, os principais autores que trataram do tema, segundo esses modelos. Segundo o autor, Kirby (1959), foi um dos primeiros a tratar do problema de otimização e dimensionamento de frota, considerando uma demanda com variação sazonal e uma frota homogênea. O trabalho de Kirby buscava descobrir se a frota utilizada era do tamanho certo.

Segundo Kirby (1959) apud Araújo (2002) caso a frota utilizada seja muito grande, o índice de utilização do veículo seria baixo e, portanto, haveria grande ociosidade. Caso a frota fosse reduzida, esta seria insuficiente para o atendimento da demanda.

O autor resolveu o problema a partir de formulações algébricas, que levam em consideração apenas os custos fixos envolvidos no processo, sem tratar dos custos variáveis.

Wyatt (1961) apud Araújo (2002) desenvolveu um estudo que foi considerado uma extensão do trabalho apresentado por Kirby (1959), uma vez que acrescentou à análise anterior a consideração dos custos variáveis de uma frota.

O método proposto por Wyatt (1961) apud Barth e Michel (2012) foi aplicado para casos de demanda determinística e em frotas homogêneas, o que o torna análogo ao estudo de Kirby (1959).

Gould (1969) apud Barth e Michel (2012) é o primeiro autor que considera uma demanda determinística, com o uso de frotas heterogêneas quanto à capacidade de transporte (tipo e peso das cargas), o que ampliou a abrangência dos estudos anteriores, que se detiveram ao estudo de frotas homogêneas.

As aproximações utilizadas por Kirby (1959) e Wyatt (1961) são de difícil utilização para o tratamento de frotas heterogêneas e, por esta razão, Gould (1969) desenvolveu um modelo em programação linear que atendesse esse objetivo.

Segundo Barth e Michel (2012), muitos autores utilizaram como base os trabalhos de Kirby (1959) e Wyatt (1961) para a solução do problema de dimensionamento de frotas. Mole (1975) apud Araújo (2002) estende os trabalhos desses dois autores no que se refere ao tratamento do conceito de que a frota ótima é dependente do tempo, já que demanda, custos fixos e variáveis da frota própria e/ou custos de aluguel de veículos, normalmente variam ao longo do tempo.

Em seu estudo, Mole (1975) apud Araújo (2002) se utilizou de programação dinâmica para a identificação das frotas ótimas específicas de cada período.

Parikh (1977) inovou ao abordar o problema de dimensionamento, pois o tratou não como uma investigação da frota ótima sob o ponto de vista do custo mínimo, tratamento aplicado nos estudos anteriores, mas sim segundo a visão da frota necessária para se atender a um determinado nível de serviço pré-

estabelecido, medido através do percentual máximo de atendimentos realizados com atraso.

Segundo Araújo (2002), essa alteração no tipo de abordagem acabou exigindo uma mudança também na forma de especificação da demanda, que até este momento era tratada de maneira determinística. A partir dos estudos de Parikh (1977), surge o primeiro modelo de dimensionamento de frota que trata a demanda como um padrão estocástico.

O nível de serviço era medido pelo autor em termos da fração de pedidos de clientes atrasados em função da indisponibilidade eventual de veículos para o atendimento dessas demandas.

O modelo de Parikh (1977) assim como o modelo de Gould (1975), permite aplicações a problemas que envolvam frotas heterogêneas, restringindo-se sua utilização apenas em situações em que seja possível alugar veículos por determinado período.

Rocha (2001) cita o trabalho de Etezadi e Beasley (1983) que desenvolveram um estudo que trata do processo de distribuição física, que envolve um centro de distribuição único atendendo a diversos clientes, tanto em sistemas de viagens pendulares, que considera o atendimento de um único cliente por viagem, com origem e destino no centro de distribuição, quanto para viagens de atendimento múltiplo, com o atendimento de diversos clientes, após o início da viagem no centro de distribuição.

O modelo apresentado pelos autores é tratado como um problema de programação linear mista, com variáveis inteiras e reais, constituído de um algoritmo de um sistema linear de equações e inequações que representam as restrições do sistema e de uma função objetivo.

Segundo Rocha (2001), o modelo apresentado pelos dois autores não se aplica a decisões que levem em consideração questões de curto prazo, como a avaliação do melhor veículo para atendimento de um determinado cliente ou do melhor roteiro em determinado período, mas sim como um suporte a decisões

de longo prazo, como a avaliação do número e tipo de veículos a serem utilizados em um dado sistema de distribuição física.

O Quadro 2 apresenta uma síntese dos principais modelos de dimensionamento de frota tratados.

Segundo Barth e Michel (2012) outros modelos encontrados na literatura para o problema de dimensionamento de frota é o BPP, da versão inglesa *Bin Packing Problem*. Segundo os autores, este modelo se refere ao problema de empacotamento e a ideia consiste em alocar objetos de diferentes dimensões em um número infinito dos denominados *bins*, que podem ser caixas, pallets, trens ou até mesmo caminhões, que possuem restrições de capacidade e volume que devem ser obrigatoriamente atendidas. O objetivo geral de modelos como esse é minimizar o número de *bins* que consigam transportar todos os objetos ou cargas.

Ainda segundo esses autores, um modelo de *Bin Packing* varia de acordo com o número de vetores e pode ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional e é considerado um problema de difícil resolução, sendo classificado, assim como os problemas de roteirização, como NP-difícil (do inglês *NP-hard*).

Autores	Frota	Demanda	Método	Algoritmo
Kirby (1959)	Homogênea Própria ou Alugada	Determinística Cliente único	Fórmula Algébrica	Otimização sem alocação de roteiros
Wyatt (1961)	Homogênea Própria ou Alugada	Determinística Cliente único	Fórmula Algébrica	Otimização sem alocação de roteiros
Gould (1969)	Heterogênea Própria ou Alugada	Determinística Cliente único	Programação Linear	Otimização sem alocação de roteiros
Mole (1975)	Homogênea Própria ou Alugada	Determinística Cliente único	Programação Dinâmica	Otimização sem alocação de roteiros
Parikh (1977)	Heterogênea Própria	Estocástica Múltiplos clientes	Teoria de Filas	Aproximação matemática com alocação de roteiros
Etezadi e Beasley (1983)	Heterogênea Própria ou Alugada	Determinística Múltiplos clientes	Programação Linear	Simulação com alocação de roteiros

Quadro 2 - Síntese dos modelos de dimensionamento baseados em formulações matemáticas Fonte: Adaptado de Araújo, 2002.

3.2.3. Dimensionamento de Frota com Base no Tempo de Ciclo

Stringher (2004) apresentou em sua dissertação de mestrado um modelo de dimensionamento de frota baseado nos tempos de ciclo dos veículos pertencentes a uma frota de um fabricante de linha branca.

O autor aborda que a principal motivação para o desenvolvimento de seu estudo é a escassa literatura relacionada ao transporte rodoviário de cargas de lotação, uma vez que a bibliografia relacionada existente tem como principal foco na carga fracionada e em soluções baseadas em algoritmos de roteirização. Dessa forma, destaca Stringher (2004), há um grande potencial para desenvolvimento de pesquisas em sistemas com essa característica de carga consolidada, com novas abordagens de solução.

Esse autor apresenta um problema de otimização relacionado à designação de rotas de cargas consolidadas para uma frota própria homogênea, visando à minimização dos custos de transporte em uma rede de distribuição composta por fábrica uni-produto, centros de distribuição e clientes finais. As rotas foram alocadas de forma conjugada, formando um ciclo fechado de viagens, para garantir a otimização do tempo por meio de um fluxo contínuo desta frota.

Stringher (2004) desenvolveu um algoritmo que combinava dois subproblemas: geração de caminhos e custeio desses trajetos. Após a resolução desses dois subproblemas, o autor aplicou um modelo de programação linear inteira que forneceu como saída um fluxo em rede, com a otimização dos pares de viagens origem-destino, distribuídos tanto em caminhos diretos quanto combinados (ciclos). A metodologia desenvolvida para a solução do problema está representada na Figura 11.

Figura 11 - Metodologia desenvolvida para a solução do problema de fluxo
 Fonte - Stringher, 2004.

O dimensionamento da frota ideal foi inserido na etapa de custeador de caminhos e foi realizado em três etapas: cálculo do tempo de ciclo, cálculo da produtividade e cálculo da quantidade necessária de veículos. Para cada rota, foi calculado o tempo de ciclo do veículo com base nos tempos que compõem uma viagem completa (tempos de ida e volta), de acordo com a equação (1).

$$T_{ciclo} = T_{carregamento_{ida}} + T_{viagem_{ida}} + T_{descarga_{ida}} + T_{carregamento_{volta}} + T_{viagem_{volta}} + T_{descarga_{volta}} + T_{esperas} \quad (1)$$

Onde:

- T_{ciclo} : Dado em horas por ciclo;
- $T_{carregamento_{ida}}$: Tempo para carregar o veículo no depósito de saída;
- $T_{viagem_{ida}}$: Tempo de trânsito entre depósitos de saída e de destino;
- $T_{descarga_{ida}}$: Tempo para descarregar o caminhão com a carga do depósito de saída;
- $T_{carregamento_{volta}}$: Tempo para carregar o caminhão no depósito de destino;
- $T_{viagem_{volta}}$: Tempo de trânsito na rota de volta do depósito de destino para o depósito de saída;

- $T_{descarga_volta}$: Tempo para descarregar o veículo com a carga do depósito de destino;
- $T_{esperas}$: Somatório de tempos ociosos inerentes ao ciclo, como tempo de espera para descarga, tempo de espera para início do carregamento, tempos parados para fiscalização, etc.

Esse tempo de ciclo pode variar em situações bem específicas, quando não existe, por exemplo, cargas de retorno. Em seguida, o autor faz o cálculo da produtividade de cada rota de acordo com a equação (2), que é a relação entre o tempo disponível e o tempo de ciclo.

$$P_{unit} = \frac{T_{disponível}}{T_{ciclo}} \quad (2)$$

Onde:

- P_{unit} : Produtividade unitária;
- $T_{disponível}$: Tempo disponível para a realização da rota, em horas por mês;

Finalmente, a quantidade de veículos necessária foi calculada com base no número de viagens realizadas por mês, que é definida como D e está apresentada na equação (3).

$$N_{veículos} = \frac{D}{P_{unit}} \quad (3)$$

Onde:

- $N_{veículos}$: Quantidade de veículos necessários de um mesmo tipo para a realização da rota;
- D : Quantidade de viagens planejadas/necessárias em um mês.

Após essas etapas de dimensionamento de frota, Stringher (2004) identificou as rotas mais atrativas a partir de um modelo de custeio da operação.

Os principais resultados do estudo, além dos resultados econômicos favoráveis, foram a regra de formação de caminhos desenvolvida, o limite estabelecido para a conjugação de rotas em uma rede de distribuição e o desenvolvimento de uma estrutura para o custeio de caminhos conjugados.

3.2.4. Conclusão da Revisão Bibliográfica

A partir da revisão bibliográfica, observou-se que o transporte principal de madeira é um tema de significativa importância para os estudos e pesquisas elaborados há alguns anos, com aplicação em diversos países. É comum aos trabalhos, contudo, a afirmação de que as operações diretamente relacionadas ao transporte de madeira em nível operacional são as que apresentam os custos mais representativos.

De acordo com a revisão realizada, a segunda etapa do transporte, que é definida como transporte principal de madeira, é a que tem recebido maior atenção nos últimos anos por apresentar grandes possibilidades de implementação de técnicas e ferramentas que garantam economias consideráveis através de operações mais eficientes e recursos melhor dimensionados.

Os principais estudos desenvolvidos acerca do transporte principal de madeira apresentam objetivos e enfoques variados, que envolvem, por exemplo, a geração prévia de sequências de viagens para caminhões pertencentes à frota, geração de viagens em tempo real, criação de rotas de entregas e coletas e, quando há rotas previamente conhecidas, o dimensionamento da frota utilizada.

Nota-se, também, uma grande variedade de métodos utilizados para a solução desses enfoques, como a utilização de técnicas de programação matemática, heurísticas e técnica de simulação. Cabe ressaltar, contudo, que o único trabalho a utilizar a técnica de simulação apresenta um sistema de

configuração diferente do sistema de transporte de madeira estudado nesta dissertação.

Nesse âmbito, deve-se frisar que foi possível inferir que a configuração do sistema estudado determina os principais objetivos e análises que devem ser realizadas para o incremento da eficiência das operações, ou seja, nota-se que os métodos de solução propostos são, dentre outros motivos, influenciados por essa configuração.

Outro ponto que merece destaque é o fato de que o desenvolvimento de modelos determinísticos para a solução do problema de transporte principal de madeira é, de maneira geral, baseado na simplificação de um sistema bastante complexo. A consideração da natureza estocástica desse problema, portanto, é capaz de garantir maior fidelidade e confiabilidade aos resultados obtidos.

Assim, com base na revisão bibliográfica, na qual não se encontrou nenhum trabalho que utilizasse a técnica de simulação para o dimensionamento de frota baseado no tempo de ciclo dos veículos, buscou-se aplicar essa ferramenta no problema do transporte principal de madeira, principalmente por ser possível considerar a aleatoriedade e as incertezas das variáveis do sistema.

4. ANÁLISE DE DADOS

Este capítulo apresenta a análise de dados relacionada ao comportamento comum aos caminhões que realizam o transporte de madeira na indústria de papel e celulose na qual o estudo foi aplicado, com uma descrição detalhada de todas as operações envolvidas no processo.

O objetivo dessa análise de dados é entender todas as características e peculiaridades do sistema de transporte estudado, com vistas a garantir o desenvolvimento de um modelo de simulação capaz de representar a realidade com a maior fidelidade possível.

As variáveis em estudo serão apresentadas de maneira agregada, pois independentemente do ponto de coleta (fazenda) ou do veículo que realiza a operação, todos os equipamentos de carregamento nas fazendas e caminhões possuem capacidades compatíveis e operações bastante semelhantes.

A coleta dos dados foi realizada no período de oito semanas referentes aos meses de fevereiro e março de 2013, através de visita na planta da fábrica e do recebimento de bases de dados dos períodos. Nessas bases são listados todos os tempos desenvolvidos pelos caminhões no ciclo de transporte de madeira, segundo um sistema de rastreamento GPS (*Global Positioning System*) instalado em cada veículo. Os dados coletados e recebidos foram tratados, com a retirada dos *outliers*², e estruturados para possibilitar o uso no modelo de simulação. O Anexo 1 traz um exemplo da retirada dos *outliers* para uma etapa do ciclo.

Além disso, ressalta-se que toda a análise realizada é feita com base no conceito de linha de tempo, uma vez que foi definido em capítulo anterior que o dimensionamento da frota desenvolvido neste estudo é com base no tempo de ciclo do caminhão.

² Em um levantamento de dados podem estar presentes valores não usuais, conhecidos como *outliers*.

4.1. LINHA DO TEMPO

O ciclo de transporte estudado tem início na portaria da fábrica, ou seja, o início de uma nova viagem tem sempre a fábrica como ponto de partida. Após a saída, é realizada uma limpeza do caminhão nas proximidades do local. Em seguida, o veículo se dirige à fazenda de destino, onde realiza o carregamento e posterior amarração das toras de madeira na carroceria, para evitar que a carga se solte na estrada, na viagem de retorno. Ao chegar à fábrica, dirige-se à pesagem da carga e, após isso, à fila para a descarga da madeira. Após a descarga, o caminhão se movimenta até a portaria para realizar o fechamento da viagem.

A linha do tempo do processo estudado pode ser decomposta nas seguintes etapas conforme o diagrama abaixo (Figura 12).

Figura 12 - Componentes de um ciclo de viagem de um caminhão. Fonte: Adaptado de MOTA; PEREIRA; BOTTER; MEDINA, 2013.

Esta linha do tempo é utilizada para evidenciar cada componente da movimentação do veículo no sistema. Cada cor é identificada no próprio diagrama e usada para a percepção visual do tempo que um veículo aguarda

em fila, permanece em trânsito ou a duração da operação de carga e descarga, por exemplo.

Assim, pode-se definir que os componentes do ciclo são:

- Trânsito: tempo de movimentação do veículo entre o ponto de consumo (fábrica) e o ponto de coleta (fazenda);
- *Setup*: tempo gasto com manutenção do veículo, aferição de peso nas balanças, amarração da madeira na carroceria do caminhão, entre outros;
- Fila: tempo de espera do veículo em diversos pontos do sistema;
- Operação: tempo em que o veículo está sendo carregado ou descarregado nos pontos de consumo ou coleta.

Ressalta-se que os dados analisados com base na linha do tempo do veículo foram coletados com o intuito de analisar todas as variações e peculiaridades do sistema real, buscando garantir, assim, que o modelo de simulação represente satisfatoriamente esse sistema.

4.2. ETAPAS DO CICLO DE TRANSPORTE

Como mencionado, as etapas se referem aos processos desenvolvidos pelo caminhão durante o ciclo de transporte e englobam as operações, os *setups*, as filas e o trânsito. Destaca-se que as análises das etapas do ciclo de transporte apresentam a média de cada uma das oito semanas de coleta de dados para cada um dos processos.

A partir dos valores de cada uma das semanas, foi possível a obtenção do tempo médio dispendido em cada um dos processos pelo veículo que realiza o ciclo.

Primeiramente foram analisadas as operações, que compreendem o carregamento de madeira nos pontos de coleta (fazendas) e o descarregamento no ponto de consumo (fábrica). O processo de carregamento nas fazendas se mostrou bastante estável, conforme pode ser analisado segundo a Figura 13. Através da observação do gráfico pode-se perceber que o processo é bem balanceado, sem grandes variabilidades, com tempo médio de 17 minutos.

Figura 13 - Operação de carregamento nos pontos de coleta. Fonte: Dados da pesquisa.

Durante a coleta de dados, inferiu-se que a demanda diária, considerando 24 horas, no ponto de consumo (fábrica) é de 2.800 m³ de madeira. Sendo assim, a atividade de carregamento nos pontos de coleta demonstra consistência com a operação, pois, baseada na análise do tempo médio dessa operação e sabendo-se que os veículos utilizados no sistema tem a capacidade de 53 m³, conclui-se que a capacidade máxima de carregamento nos pontos de coleta pode atingir, aproximadamente em um cenário ideal, 4500 m³ durante as 24 horas.

Logicamente, faz-necessário o descarte de tempos ociosos, como por exemplo, manutenções corretiva e preventiva, tempo de parada de funcionário encarregado pelo carregamento, entre outras interrupções.

A operação de descarregamento na fábrica também apresentou bons padrões de controle e regularidade, com um tempo médio de 13 minutos, conforme Figura 14. De maneira geral, já era esperado que a operação da fábrica apresentasse um desempenho melhor por estar sobre constante fiscalização por parte dos encarregados da empresa estudada e também pelo fato do descarregamento se tratar de uma operação mais simples, uma vez que a acomodação das toras de madeira na carroceria do veículo facilita o manuseio dessas.

Figura 14 - Operação de descarregamento no ponto de consumo. Fonte: Dados da pesquisa.

Os períodos de manutenção e ajustes durante a viagem, classificados como *setup*, foram analisados em relação ao sentido do caminhão, ou seja, se este se destina à fazenda ou à fábrica (carregamento ou descarregamento).

O *setup* de limpeza ocorre próximo à portaria da fábrica, logo após a saída dos caminhões e é utilizado para a realização de uma rápida inspeção e análise das condições do veículo, assim como para retirar resíduos de carga antes do início da próxima viagem. Apesar de apresentar uma dispersão ligeiramente maior que as operações de carregamento e descarregamento, este *setup* possui um tempo bastante estável, com média de 12 minutos (Figura 15).

Figura 15 - Setup de limpeza do veículo. Fonte: Dados da pesquisa.

O *setup* de amarração ocorre nas fazendas após o carregamento das toras de madeira nos caminhões e é realizado para garantir que a carga não se solte do veículo durante a viagem de retorno à fábrica. Esse processo, conforme Figura 16, apresentou um tempo médio de aproximadamente 90 minutos, que é considerado excessivamente alto para a atividade desempenhada. Stein, Guerreiro e Caraschi (2013) apontam em seu estudo que o tempo médio de amarração de toras de madeira em um caminhão tritem, que é o modelo utilizado para o transporte na indústria estudada, é de aproximadamente 18 minutos, o que leva a conclusão de que essa etapa do processo apresenta bastante ineficiência.

Uma vez que os veículos circulam em um ciclo fechado, esse tipo de ineficiência nos processos leva, de maneira geral, a um prejuízo da regularidade do sistema como um todo, provocando a formação de filas e, consequentemente, a elevação do tempo de ciclo total de transporte.

Figura 16 - *Setup* de amarração das toras de madeira. Fonte: Dados da pesquisa.

No sentido de retorno dos caminhões à fábrica, os eventos de *setup* considerados compreendem o processo de pesagem dos veículos carregados, bem como o processo de fechamento da viagem, após o término do descarregamento de madeira. A análise referente ao *setup* de pesagem é apresentada através da Figura 17.

Figura 17 - *Setup* de Pesagem. Fonte: Dados da pesquisa.

Como se pode perceber, esse *setup* não apresenta grandes variações no que se refere à padronização dos tempos, apresentando-se como um processo bastante estável, com tempo médio de 11 minutos.

O último *setup* do ciclo de transporte é o de encerramento, que engloba tanto o fechamento de um documento de transporte, como a abertura de outro documento para a nova viagem, reiniciando, dessa forma, o ciclo. Como se pode verificar através da Figura 18, também é uma atividade estável, com um tempo médio de 11 minutos.

Figura 18 - Setup de encerramento. Fonte: Dados da pesquisa.

Com a análise das etapas do ciclo de transporte, pode-se perceber que os tempos de todas as etapas apresentam estabilidade, exceto pelo *setup* amarração, que apresenta maior dispersão e um tempo de execução muito acima do praticado nesse setor. Ressalta-se que as filas não foram analisadas, pois se configuram como respostas do sistema e não como dados de entrada para o modelo de simulação. Da mesma forma, os trânsitos também não foram analisados, porque as velocidades e as distâncias entre a fábrica e as fazendas é que são utilizadas como dados de entrada.

4.3. ANÁLISE DO PONTO DE CONSUMO

Além da análise de cada etapa do ciclo de transporte, fizeram-se necessárias, ainda, as análises apresentadas a seguir, para a correta compreensão das

operações dentro da fábrica, bem como para a construção adequada dos índices de desempenho.

Primeiramente, foi analisada a quantidade diária de caminhões que dá entrada na fábrica e pôde-se observar que essa chegada apresenta grande aleatoriedade, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19- Perfil de chegada caminhões à fábrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Esse perfil de chegada observado foi estratificado em dias da semana, conforme pode ser observado na Figura 20. Assim, tem-se nitidamente a percepção de um padrão muito bem definido das chegadas dos caminhões. Esses veículos chegam à fábrica de forma conjunta próximo às duas horas da manhã, induzindo uma falta de caminhão às três horas. A partir deste momento o sistema funciona de maneira relativamente estável. Às 12 horas, uma nova falta de caminhões é observada, induzindo, assim, a um novo aumento às 13 horas. Esse aumento gera uma falta de caminhões quase tão agressiva quanto à falta durante a madrugada, induzindo um novo pico às 17 horas. Esse pico é, então, diluído pelo progressivo esvaziamento do sistema até que um novo pico é atingido à uma hora da madrugada do dia seguinte.

Este fenômeno de constante aumento e redução do número de caminhões é tratado neste estudo como “bolha”, e tem um efeito extremamente nocivo ao sistema de transporte a ele associado.

Figura 20 - Perfil de chegada à fábrica por dia da semana. Fonte: Dados da pesquisa.

Esse comportamento foi atribuído ao fato de que, por enfrentarem incertezas quanto ao momento em que devem realizar suas trocas de turno, os motoristas realizam um planejamento informal, visando sempre terminar o ciclo de viagens em períodos regulares e constantes. Quando se faz um paralelo com a análise das etapas do ciclo de transporte apresentada anteriormente, pode-se inferir que o *setup* de amarração é o momento utilizado por esses motoristas para retardar a viagem de retorno e garantir a chegada à fábrica nos horários “programados”.

Trata-se, portanto, de um comportamento criado e alimentado diariamente que gera, como consequência, a chegada dos caminhões em comboio em momentos previsíveis. É um efeito considerado extremamente prejudicial ao sistema de transporte de madeira em estudo, uma vez que induz a formação de filas tanto nos pontos de carregamento como no ponto de descarregamento visitados pelos veículos, além de contradizer qualquer política de operação eficiente em sistemas logísticos.

Além da análise por dia da semana, buscou-se entender com mais detalhe como ocorre a chegada dos veículos na fábrica, através do gráfico apresentado na Figura 21. Esse gráfico analisa a quantidade de veículos que dá entrada na fábrica, por dia, hora a hora. Pode-se perceber que existe uma flutuação que

se mostrou persistente ao longo do tempo. Neste gráfico consegue-se observar nitidamente os elevados picos, nos quais a portaria chega a receber 30 caminhões em uma mesma hora. Isso é um resultado que se deve buscar minimizar tendo em vista que esta chegada em comboio gera filas e prejudica todo o sistema.

Figura 21 – Número de chegadas à fábrica, por quinzena. Fonte: Dados da pesquisa.

Outra forma utilizada para analisar as chegadas à fábrica foi através do estudo do intervalo entre chegadas, conforme apresentado na Figura 22. Para esta análise, verificou-se qual o intervalo de tempo decorrido a contar a partir da chegada do veículo anterior até a chegada do veículo atual. Este indicador verifica, segundo a teoria de filas, o grau de saturação do sistema. Caso o intervalo médio entre as chegadas seja menor que a capacidade do recurso atender os caminhões o sistema entra em colapso, gerando grandes filas.

Como apresentado na linha do tempo, após o trânsito de retorno da fazenda, o caminhão é submetido à pesagem da carga na balança. Dessa forma, a chegada de veículos na fábrica está diretamente ligada ao processo de pesagem que, como apresentado anteriormente, apresenta tempo médio de 11 minutos. Na Figura 22, percebe-se que existe uma faixa de concentração entre chegadas de aproximadamente 7 minutos, porém existem intervalos expressivos algumas vezes superiores a 1 hora até a chegada do próximo

caminhão. Assim, caso fosse considerada a média de intervalo entre chegadas, que é de aproximadamente 15 minutos, o valor seria razoável, porém, ao examinar em detalhes, percebe-se que existe uma saturação não desprezível nessa etapa do ciclo.

Figura 22 - Intervalo entre chegadas à fábrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Em virtude da percepção do intervalo entre chegadas, foi construído um histograma para se verificar a frequência de chegada dos caminhões no mesmo período analisado anteriormente. O resultado é apresentado através da Figura 23.

Figura 23 - Frequência dos intervalos entre chegadas à portaria. Fonte: Dados da pesquisa.

Através da análise do histograma é possível identificar que, aproximadamente, 75% das viagens chegam à fábrica com intervalo de até 7 minutos e meio. Isso é uma frequência muito alta para um processo com média de 11 minutos (*setup* de pesagem).

Quanto ao tempo de permanência na fábrica, percebe-se, através da Figura 24 que o comportamento é análogo ao das chegadas, ou seja, no período de saturação do sistema, quando todos os caminhões chegam agrupados, esses entram na fábrica, mas nela se acumulam formando filas. Em contrapartida, nos momentos seguintes o tempo de permanência na fábrica é mais baixo, pois existem poucos caminhões a ser atendidos.

Figura 24 - Tempo médio de permanência na fábrica. Fonte: Dados da pesquisa.

Da mesma forma, foi realizada uma análise quanto ao perfil de chegada de caminhões nos pontos de carregamento de madeira, como é apresentado através da Figura 25. Essa análise considerou todas as fazendas ativas de maneira agregada, ou seja, não há diferenciação quanto ao destino do caminhão.

Figura 25 - Perfil agregado de chegada às glebas. Fonte: Dados da pesquisa.

Através da análise do gráfico, pode-se perceber o quanto o comportamento das chegadas dos veículos nas fazendas, assim como na fábrica, é planejado. Este comportamento pulsante observado em todas as fazendas demonstra que os motoristas, independente do ponto de carregamento, provocam atrasos no sistema.

Com esse comportamento de chegada de veículos, assim como na fábrica, há momentos nos quais os pontos de carregamento apresentam baixa produtividade por falta de caminhões, enquanto em outros apresentam grandes filas provocadas pelas chegadas em comboio. Entende-se, portanto, que tal comportamento é também o principal causador das filas nas fazendas, uma vez que não há o escalonamento adequado de chegadas de veículos.

Através Figura 26, pode-se perceber os picos de chegada de caminhões nestas fazendas, por hora.

Figura 26 - Perfil de chegada às glebas por hora. Fonte: Dados da pesquisa.

Cada fazenda tem recurso (grua) com capacidade de atendimento de, aproximadamente, três caminhões por hora, portanto a quantidade horária de veículos que chega aos pontos de carregamento deveria ser bem próxima a essa capacidade. O que se observa, contudo, são picos com 15 caminhões chegando à mesma hora, que naturalmente induzem à formação de filas.

Sendo assim, é possível inferir e ratificar que o fenômeno denominado “Bolha” afeta diretamente todas as etapas do ciclo de transporte, gerando atrasos e filas no sistema de maneira generalizada.

Por fim, outro ponto que deve ser destacado na etapa de análises de dados diz respeito à frota utilizada no transporte de madeira. A frota utilizada é composta em sua totalidade por caminhões tritrens (Figura 27).

Como se pode perceber através da figura, um caminhão tipo tritrem é composto por quatro unidades, que são: um cavalo mecânico, com três semi-reboques tracionados. Apesar de haver variação no modelo do cavalo utilizado pela frota da indústria estudada, os semi-reboques tracionados a esses cavalos apresentam características bastante semelhantes e, segundo, apurado na

análise de dados, capacidade de transporte de aproximadamente 53 m³ por viagem. Dessa forma, pela similaridade dos reboques e pela baixa variação no volume transportado apurada nos dados, a frota estudada foi considerada como homogênea.

Figura 27: Carroceria de um caminhão tritrem.

Como base de comparação, Stein, Guerreiro e Caraschi (2013), em seus estudos, apuraram que o volume de eucalipto transportado por caminhões do tipo tritrem é de, aproximadamente, 51, 97 m³, valor esse bem próximo ao encontrado na análise de dados dessa dissertação.

5. MODELO DE SIMULAÇÃO PARA DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE VEÍCULOS

Este capítulo apresenta a modelagem conceitual do sistema de transporte de madeira estudado e uma descrição do modelo de simulação desenvolvido.

Inicialmente, é apresentada uma breve revisão da metodologia de aplicação da técnica de simulação por eventos discretos, assim como algumas justificativas para a aplicação dessa técnica para o dimensionamento de uma frota de caminhões.

Ainda nesse capítulo, também serão apresentados os subsistemas que fazem parte do sistema de transporte de madeira e seus componentes, além de ser descrita a lógica de despacho de caminhões aplicada ao simulador.

Por fim é apresentada a interface de entrada de dados utilizada para a configuração dos cenários e para a análise dos resultados gerados pelo modelo.

5.1. SIMULAÇÃO

A simulação pode ser definida como o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de entender seu comportamento e avaliar estratégias para sua operação ao longo do tempo, além de entender e analisar seu comportamento quando submetido a vários cenários e alternativas operacionais (Pegden et al., 1995).

Segundo Law e Kelton (1991) apud Castro Neto (2006), soluções analíticas utilizam técnicas tradicionais de matemática e estatística para realizar análises e obter informações exatas sobre o sistema em estudo.

Contudo, ainda de acordo com os autores, quando um modelo apresenta elevada complexidade, torna-se inviável a utilização de soluções analíticas, uma vez que as relações matemáticas ficam muito extensas e os cálculos se tornam complexos. Em situações como essa, procura-se utilizar ferramentas de simulação, possibilitando a modelagem destas características complexas de um sistema, sem distanciar-se de maneira significativa da matemática elementar e conceitos de probabilidade.

Destaca-se que a simulação referida neste estudo é denominada de simulação de eventos discretos, que se diferencia de outros tipos de simulação, como a de Monte Carlo e a simulação contínua (Chwiff e Medina, 2007).

A simulação de eventos discretos corresponde à perspectiva de um fluxo de entidades, voltada à visão centrada em processos. Um sistema de eventos discretos pode ser definido como uma coleção de entidades que agem e interagem juntas através de processos no sistema, buscando um fim lógico. Tradicionalmente, esse tipo de simulação é aplicado na modelagem de sistemas complexos (especialmente logísticos), uma vez que é capaz de replicar com fidelidade o comportamento de quase qualquer sistema, provendo ao tomador de decisão valiosas informações de como o sistema pode ser modificado ou qual poderia ser seu desempenho (BRITO; BOTTER, 2014)

Para a definição do modelo de simulação de eventos discretos, foram consideradas as etapas propostas por Chwif e Medina (2007), que estratificam a elaboração do modelo da seguinte forma (Figura 28):

1. Concepção: etapa na qual são definidos os sistemas e os objetivos, além de se realizar o levantamento de dados e a modelagem conceitual;
2. Implementação: nesta etapa é elaborado o modelo computacional propriamente dito, sua verificação e validação;
3. Análise: etapa em que são realizadas as simulações desejadas além das análises de sensibilidade e análises de resultados.

Figura 28 - Etapas de um modelo de simulação. Fonte: Chwif e Medina, 2007.

Cada uma dessas etapas, ainda segundo os autores, é composta, por sua vez, de outras sub-etapas, conforme descrição a seguir:

1. Definição dos objetivos e sistemas: determinação das fronteiras e restrições que serão utilizadas e investigação do funcionamento do sistema ou processo que se deseja estudar;
2. Elaboração do modelo abstrato: criação mental do modelo a ser construído;

3. Formulação do modelo conceitual: desenvolvimento de um modelo preliminar, de maneira gráfica ou em um pseudocódigo, para a definição dos componentes, descrição das variáveis e interações que constituem o sistema;
4. Levantamento de dados de entrada: realizado simultaneamente à construção do modelo conceitual. Dessa forma, segundo Chiwf e Medina (2007) a coleta de dados é definida pelas necessidades do modelo conceitual;
5. Elaboração do modelo computacional: conversão do modelo conceitual em um modelo computacional, através de um *software*, que nesta dissertação, como mencionado, será o Arena®. Após essa etapa, são conduzidas as verificações e validações do modelo, que visam garantir que o mesmo está representado de maneira adequada o sistema;
6. Modelo operacional: com o modelo computacional devidamente validado, tem-se o modelo operacional com o qual podem ser conduzidos os experimentos e testados os cenários de simulação;
7. Resultados experimentais: referente à execução da simulação para a geração dos dados desejados e execução da análise dos resultados. Após a geração dos dados, deve-se realizar a análise e interpretação dos mesmos.

Segundo Mundim (2009) apud Chwif e Medina (2007), a simulação não deve ser considerada como um processo linear, mas sim como uma atividade em espiral, já que suas etapas devem ser repetidas até que não haja diferença nos resultados apresentados em cada uma delas.

A simulação de eventos discretos foi adotada como ferramenta para a solução do problema tratado nesta dissertação por apresentar vantagens consideráveis em relação a outras técnicas já desenvolvidas.

Segundo Ferreira Netto (2012), dentre tais vantagens, pode-se destacar: a possibilidade de avaliar rapidamente a efetividade das estratégias propostas, a maior facilidade para detalhamento de um sistema complexo (sendo possível levar em consideração um grande número de restrições e especificidades), a

compreensão de quais variáveis tem real influência no sistema analisado, a identificação dos “gargalos” do sistema e uma representação bastante aproximada do cenário real, com a interligação dos subsistemas e a avaliação de suas interdependências.

Além disso, este mesmo autor afirma que a simulação de eventos discretos não exige grandes simplificações do sistema real, que, de maneira geral, são adotadas para a resolução de modelos analíticos, que utilizam de programação matemática.

Como apresentado na revisão da bibliografia, nenhum estudo utilizou a simulação de eventos discretos para o dimensionamento de uma frota de caminhões baseado no tempo de ciclo dos veículos. O modelo de simulação de eventos discretos desenvolvido nessa dissertação permite dimensionar a frota de caminhões homogênea utilizada para o transporte de madeira em uma indústria de papel e celulose, levando em consideração as inúmeras restrições e configurações existentes em um cenário como esse.

5.2. DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE TRANSPORTE DE MADEIRA

O modelo de simulação desenvolvido nesta dissertação aborda a modelagem do sistema de transporte de madeira de uma indústria de grande porte de papel e celulose do setor privado.

O sistema avaliado contempla as operações de transporte de madeira desde as fazendas (pontos de consumo) até as mesas receptoras dessa matéria-prima na fábrica, que se configura como único ponto de consumo desse sistema. A empresa realiza um gerenciamento centralizado da frota de caminhões, que é homogênea e terceirizada em sua totalidade. Nas operações diárias, os veículos são alocados de maneira equivalente entre os prestadores de serviço, sem a observação, contudo, do *status* da fazenda de destino

quanto à fila, trocas de turno e sem um controle adequado quanto ao atendimento da demanda mínima de madeira disponível em cada fazenda.

As operações e os subsistemas envolvidos no processo foram determinados a partir de descrições técnicas da planta da indústria e da análise de dados realizada, ambos necessários para o desenvolvimento de um modelo de simulação bem próximo da realidade do sistema de transporte de madeira existente nessa indústria.

Para o desenvolvimento da simulação, realizou-se a modelagem do sistema de fornecimento de madeira para fábrica de papel e celulose, que é caracterizado segundo quatro subsistemas: (1) subsistema de carregamento; (2) subsistema de entrada; (3) subsistema de descarregamento; (4) subsistema de saída.

5.2.1. Subsistema de Carregamento

O subsistema de carregamento é composto por pontos de coleta ou fazendas, pelas vias utilizadas para o transporte e por pontos de limpeza, abastecimento e manutenção dos caminhões. As características e detalhes considerados para cada um desses componentes no modelo de simulação serão descritas a seguir.

Segundo o histórico de dados apresentados pela indústria, o volume de madeira disponível em cada uma das fazendas é bastante alto e não impõe limitações ao fluxo constante de abastecimento da fábrica. Dessa forma, para o modelo, considera-se que sempre há madeira disponível em cada uma das fazendas para o carregamento dos veículos, devendo-se, contudo, atender à demanda mínima diária estabelecida para cada fazenda.

Em cada ponto de coleta, o regime de atendimento da fila de veículos para carregamento é FIFO, ou seja, o primeiro caminhão a chegar a uma fazenda também será o primeiro a receber atendimento. Durante o carregamento, não existe conflito entre as posições dos caminhões, o que implica que o

atendimento de um veículo não será, em nenhuma hipótese, bloqueado pela má disposição de veículos na fazenda. Essa premissa foi adotada, pois, apesar de ser possível a ocorrência de obstrução de uma área de carregamento pelo mau posicionamento de um veículo, esse acontecimento foi considerado esporádico e, portanto, passível de ser desconsiderado no modelo.

Após o carregamento dos veículos, os motoristas iniciam o processo de amarração das toras de madeira. Essa operação é baseada em uma distribuição de probabilidade e é definida individualmente para cada fazenda.

Em um dado período de operação, em cada fazenda, está alocado um número de guas ativas, que são os equipamentos responsáveis pela operação de carregamento das toras de madeira nos caminhões. A produtividade de cada grua ativa é dada pela taxa de carregamento (quantidade/período de tempo) em cada um dos pontos de coleta.

A cada grua também estão relacionados tempos de paradas, que foram definidas como paradas corretivas e paradas administrativas. Os tempos de paradas corretivas são referentes às manutenções e ao abastecimento necessários ao correto funcionamento desses equipamentos. Já as paradas administrativas se referem às trocas de turno e períodos de alimentação que devem ser realizados pelos operadores das guas diariamente, em cada uma das fazendas.

As vias pelas quais os veículos realizam o transporte de madeira são compostas por trechos de terra e de asfalto e o tipo de pavimento impacta diretamente no tempo de trânsito entre pontos de coleta e a fábrica. Dessa forma, a cada tipo de trecho (terra e asfalto) foi atribuída uma velocidade média específica que deve ser desenvolvida pelos veículos e que tem impacto significativo no tempo de ciclo total do sistema.

As distâncias entre a fábrica e cada um dos pontos de coleta são previamente conhecidas e definidas e os trajetos, de ida e volta, foram adotados como iguais no modelo. No trajeto de ida para as fazendas, são previstos três tipos

de paradas que podem ser realizadas pela frota, uma voltada para a limpeza do veículo, uma para o abastecimento e outra para as possíveis manutenções.

De acordo com informações fornecidas, as paradas para limpeza ocorrem antes do início de todas as viagens e tem por objetivo retirar resíduos da madeira transportada na viagem anterior. As paradas para abastecimento são realizadas a cada três viagens e as paradas para manutenção, a cada 10. Uma viagem é considerada como a realização de um ciclo completo, que envolve o trajeto de ida, o carregamento em uma fazenda, a viagem de retorno e o descarregamento na fábrica.

5.2.2. Subsistema de Entrada

O subsistema de entrada é composto pelas balanças utilizadas para a pesagem dos caminhões na entrada da fábrica e pelo sistema de medição volumétrica *Logmeter*.

Ao retornar de um carregamento em uma fazenda, o caminhão dá entrada na planta da fábrica. Antes de se dirigir para o descarregamento, o mesmo passa pelo procedimento de pesagem, para a realização da conferência do volume de madeira transportado. No sistema existem três balanças funcionando simultaneamente e o tempo dispendido no processo foi baseado nos históricos coletados.

O regime de atendimento nas balanças segue uma fila FIFO e, portanto, o primeiro caminhão a chegar para a pesagem será o primeiro a receber atendimento e, posteriormente, liberado para os procedimentos seguintes.

Após a pesagem nas balanças, os veículos devem passar por um sistema conhecido como *Logmeter*. Esse sistema utiliza tecnologia laser 3D juntamente com um *software* de reconhecimento de imagens para medir o volume sólido de madeira carregada sobre os caminhões em menos de um minuto. Para cada

caminhão que chega à planta, o sistema gera essas imagens, configurando-se como uma segunda medição quanto ao volume transportado.

Em alguns casos, por falha nessa leitura a laser, faz-se necessário que o veículo retorne ao sistema para que seja feito um novo reconhecimento do volume. Para considerar esse percentual de falhas, foi atribuída uma distribuição de probabilidade associada a essa necessidade de retornar ao *Logmeter*, estabelecido no modelo como um percentual de retrabalho.

O tempo de deslocamento entre o ponto de entrada do caminhão na fábrica e as balanças e entre as balanças e o *Logmeter* foram considerados no modelo, sendo obtidos a partir da coleta de dados realizada. Após esses procedimentos de medição e pesagem, os caminhões são liberados para o descarregamento da madeira transportada.

É também na chegada à fábrica que o fenômeno denominado “Bolha” foi identificado. Como mencionado, refere-se a um atraso generalizado dos veículos, provocado pela incerteza dos motoristas quanto à determinação do local e do horário das trocas de turnos.

Para que seja verificado o seu impacto, esse fenômeno foi considerado no modelo e será representado através de uma retenção dos veículos em determinado ponto do sistema, com duração e intervalos programáveis, provocando uma chegada de veículos em comboio na fábrica, como ocorre no sistema real.

5.2.3. Subsistema de Descarregamento

O subsistema de descarregamento é composto pela fábrica propriamente dita, onde são realizados todos os procedimentos de descarregamento da madeira coletada nas fazendas.

A fábrica é dividida em 4 pontos de descarregamento que são as mesas da linha 1, mesas da linha 2, mesas da linha 3 e o pátio, sendo que cada linha é composta por duas mesas, totalizando seis mesas disponíveis. Nessas mesas as madeiras são descarregadas para posterior processamento e utilização na produção de papel e celulose.

Quando todas as mesas estão ocupadas, os veículos, que aguardam em fila no pátio, são designados a realizar o descarregamento da madeira no próprio local. Esse procedimento de descarregamento no pátio é adotado para evitar a formação de grandes filas no interior da fábrica e, assim, liberar mais rapidamente os caminhões para novos carregamentos. O tempo que cada caminhão espera em fila para o descarregamento em uma mesa, antes de ser alocado ao pátio, é configurável no modelo, podendo assumir o valor desejado, segundo a estratégia da fábrica.

A madeira que é descarregada no pátio deve ser posteriormente levada para as mesas, para que possa ocorrer o seu processamento. Esse procedimento é denominado Recheio e a fábrica possui caminhões específicos para sua realização, ou seja, a frota utilizada para a realização das viagens até as fazendas não considera esses veículos. É um procedimento muito importante, adotado no sistema real estudado e que busca garantir que nunca falte madeira em processamento nas mesas.

O recheio ocorre quando o tamanho da fila de caminhões existente na fábrica (vindos das fazendas) para descarregamento nas mesas é menor ou igual a um valor previamente estabelecido na interface. Diante dessa situação, o modelo gera um determinado número de veículos, configurado na interface, para que seja realizada a transferência de madeira do pátio até as mesas. Os tempos de carregamento e descarregamento desses veículos são os mesmos considerados nas fazendas e mesas e o tempo de deslocamento é desconsiderado, por ser muito baixo.

A cada mesa, de cada uma das três linhas (L1, L2 e L3), está alocado um número pré-determinado de guias que são utilizadas para a retirada da madeira do caminhão e disposição dessa na mesa em que opera. Cada mesa

tem uma capacidade específica de consumo de madeira, que é dada pela produtividade da grua que a ela está alocada.

Ao pátio também é alocado um número de gruas dedicadas, que possuem taxas de produtividade específicas. A capacidade de estocagem de toras de madeira no pátio foi adotada como um valor bem alto, pois essa não se configura como fator de restrição para os descarregamentos.

Às gruas que operam no pátio ou nas mesas também foram atribuídos tempos de paradas corretivas e administrativas, da mesma forma que foram definidas para as gruas que operam nas fazendas. Os tempos de paradas corretivas também são referentes às manutenções e ao abastecimento necessários ao correto funcionamento desses equipamentos, e as paradas administrativas se referem às trocas de turno e períodos de alimentação que devem ser realizados pelos operadores das gruas. Os tempos de ambas as paradas foram definidos individualmente por grua.

O regime de filas tanto para o descarregamento nas mesas como no pátio é FIFO e, assim como no carregamento, o modelo não considera a possibilidade de existência de conflito físico entre caminhões durante o descarregamento.

Como mencionado, somente após os procedimentos de medição (balanças e *Logmeter*) é que os veículos são liberados para o descarregamento. O tempo de deslocamento entre o *Logmeter* e o pátio foi considerado no modelo, sendo obtido a partir da coleta de dados realizada. Os tempos de deslocamento entre o pátio e as mesas foram considerados desprezíveis, por se tratarem de distâncias pouco significativas.

5.2.4. Subsistema de Saída

O subsistema de saída é composto pela portaria, ponto que é obrigatoriamente visitado pelo motorista ao término do ciclo e antes do início de uma nova viagem.

Como mencionado, a portaria é visitada pelos caminhões para procedimentos administrativos de término e início de uma nova viagem, após o descarregamento da madeira transportada. Ao chegar à mesma, os motoristas realizam a entrega da CEM (Controle de Entrega de Madeira), que é um documento recebido no início de cada viagem e que deve ser entregue ao final dessa para que seja formalizado o seu fechamento. É também na portaria em que são alocadas as fazendas de destino dos caminhões.

O atendimento dos motoristas e designação de novas viagens na portaria segue um regime de fila FIFO e há apenas um operador para a realização dos procedimentos de recebimento e expedição de uma nova CEM e alocação das fazendas. O tempo de atendimento é baseado nos dados históricos coletados.

Nesse subsistema, também merece destaque a lógica de despacho utilizada no modelo de simulação para alocar os caminhões às fazendas a que estes devem seguir para realizar um novo carregamento.

A lógica de despacho utilizada leva em consideração a quantidade de demanda que já foi atendida em cada fazenda em relação à sua demanda diária, ou seja, o envio de um caminhão para uma determinada fazenda em determinado instante será definido de acordo com o percentual de atendimento da demanda diária de cada ponto de coleta. O cálculo é dado pela equação (4).

$$At.fazenda\ i = \frac{D.atendida_fazenda\ i}{D.diária_fazenda\ i} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

- *At.fazenda i*: Percentual de atendimento da fazenda i;
- *D. atendida _fazenda i*: Demanda já atendida da fazenda i;
- *D. diária_fazenda i*: Demanda diária da fazenda i.

Para determinar qual a fazenda de destino do próximo caminhão, o modelo realiza esse cálculo para verificar, dentre todas as fazendas ativas, a que apresenta o menor percentual de atendimento da sua demanda e que, portanto, configura-se como a mais atrativa para ser alocada como destino à próxima viagem.

Da mesma forma, quanto maior for o percentual de atendimento de uma fazenda em um determinado instante, menor será sua atratividade para o recebimento de um novo veículo. Ao mesmo tempo em que isso acontece, em um instante seguinte, essa fazenda passará novamente a ser a mais atrativa, pois outros pontos de coleta que, até então tinham prioridade, deixarão de ter por já terem realizado muitos carregamentos. Essa atualização termina quando a demanda de todas as fazendas tiver sido atendida.

Deve-se salientar que no instante 0, quando a primeira alocação de um caminhão será realizada no modelo, o percentual de atendimento de todos os pontos de consumo é 0, uma vez que não foram realizados carregamentos em nenhuma das fazendas. Assim, para a lógica de despacho não há diferença de atratividade entre os pontos de consumo e, nesse caso, a alocação é realizada de maneira aleatória pelo modelo.

Essa lógica de despacho busca aproximar o modelo do sistema real quanto ao método de envio dos caminhões até as fazendas de destino. Tal procedimento de envio será comparado, em um capítulo seguinte, com uma nova lógica, que irá considerar o *takt time* dos veículos para a realização do despacho.

Além de todos os componentes detalhados, um componente de grande relevância e que é integrante dos quatro subsistemas tratados, é a frota de caminhões. No modelo são criadas as entidades caminhões em uma quantidade definida na interface de entrada de dados. Sobre esses veículos devem ser detalhadas, também na interface, algumas características, como a capacidade de carga, em um determinado período, para compor a frota. Apesar da capacidade ser um parâmetro configurável, a frota estudada nesse sistema é homogênea, ou seja, com veículos de mesma configuração e capacidade.

O fluxograma que representa o modelo conceitual do sistema de transporte de madeira na indústria é apresentado na Figura 29.

Figura 29 - Modelo conceitual da circulação de caminhões no sistema. Fonte: Dados da pesquisa.

O modelo conceitual desenvolvido serve como base para a codificação do modelo de simulação a ser construído, garantindo que o mesmo contenha todos os eventos existentes, na sequência em que estes ocorrem no sistema real.

5.3. INTERFACE DE ENTRADA DE DADOS

Para realizar a configuração dos cenários de maneira prática e fácil para os usuários do modelo foi desenvolvida uma interface de entrada de dados, como uma ferramenta de apoio ao modelo de simulação.

Essa ferramenta de entrada de dados foi construída em planilha eletrônica do *software* Microsoft Excel ® para garantir uma utilização rápida e certa generalidade ao modelo, uma vez que seus parâmetros não ficam limitados a valores previamente estabelecidos. Essa possibilidade de diferentes configurações permite a simulação dos mais diferentes cenários e as mais variadas análises.

As seguintes informações devem ser parametrizadas na interface para a configuração dos cenários de análise:

- Velocidade média de asfalto: nesse campo da interface é definida a velocidade média que os veículos desenvolvem nos trechos da viagem que tem o pavimento de asfalto. Como mencionado anteriormente, nesse tipo de pavimento os caminhões conseguem atingir velocidades maiores que nos trechos de terra;
- Velocidade média em estrada de terra: configura-se a velocidade média que será desenvolvida nos trechos em que o pavimento da estrada é de terra. Deve-se entender que ambas a definição de ambas as velocidades (asfalto e terra) impactam diretamente no tempo de ciclo total do veículo;
- Número de viagens até abastecimento: deve-se determinar o número de viagens que o veículo irá realizar até que seja necessária uma parada no ponto de abastecimento. No modelo, considera-se que o veículo realizou uma viagem quando o mesmo desenvolve um ciclo completo (carregamento e descarregamento);
- Número de viagens até manutenção: da mesma forma, é estabelecido o número de viagens que o veículo realiza até que seja necessária uma parada para a realização de manutenções no caminhão;
- Número de caminhões de recheio: a interface deve ser preenchida com o número de caminhões que deve ser gerado no modelo para a realização da operação de recheio. Como mencionado anteriormente, esse número de caminhões é gerado pelo modelo de forma independente à frota estabelecida para a realização das viagens até a fazenda;
- Percentual de retrabalho do Logmeter: neste campo se deve configurar o percentual de retrabalho no sistema de medição de volume por imagens (Logmeter). Quanto maior o percentual de retrabalho, mais caminhões deverão ficar retidos por mais tempo no subsistema de entrada para a realização dessa medição, o que pode gerar mais fila e maior tempo de ciclo desses veículos.

- Capacidade máxima do pátio: configura-se a quantidade máxima de madeira (m^3) que pode ser descarregada no pátio no interior da fábrica quando não é possível o descarregamento direto nas mesas.
- Tempo máximo de tolerância para descarregamento no pátio: refere-se ao tempo máximo que os veículos podem ficar retidos em fila para descarregamento da madeira nas mesas. Quando esse tempo máximo é atingido, o veículo é retirado da fila e realizado o descarregamento no pátio da fábrica;
- Tamanho da fila para realizar recheio: a operação de recheio é realizada quando o número de caminhões em fila para descarga nas mesas (vindos das fazendas) for menor ou igual ao valor desse parâmetro;
- Capacidade do caminhão: a partir da configuração desse parâmetro, determina-se a capacidade de carga dos caminhões utilizados para a coleta de madeira nas fazendas. Para este modelo de simulação, considera-se que todos os caminhões tem a mesma capacidade;
- Intervalo de ocorrência de bolha: a configuração desse parâmetro determina, em horas, o intervalo de ocorrência do fenômeno de bolha, identificado no sistema real estudado, ou seja, a chegada em comboio de caminhões na fábrica em momentos previsíveis;
- Duração da bolha: além da determinação do intervalo de ocorrência, deve-se especificar a duração da ocorrência desse fenômeno no modelo. Esse valor também é determinado em horas;
- Início da bolha: em relação a esse fenômeno, deve-se determinar, por fim, o momento de início do mesmo, ou seja, a que altura da simulação ele deve ocorrer. Esse parâmetro também é configurado em horas.

A Figura 30 apresenta uma amostra do preenchimento desses dados na interface.

ID	Parâmetros	Valores	Unidades
1	Velocidade Média Asfalto	50	km/h
2	Velocidade Média Estrada de Terra	30	km/h
3	Número de Viagens até Abastecimento	5	#
4	Número de Viagens até Manutencao	10	#
5	Número de caminhões de recheio	0	#
6	Paradas Ativadas (0-Não; 1-Sim)	0	#
7	Percentual de Re-trabalho do Logmeter	15	%
8	Capacidade Máxima do Pátio	99999	m ³
9	Tempo Máximo de Tolerância para Descarregamento no Pátio	60	minutos
10	Tempo de deslocamento da grua do pátio para as mesas	10	minutos
11	Tamanho da Fila para realizar Recheio	10	#
13	Capacidade do Caminhão	53	m ³

Figura 30 - Amostra de interface de entrada de dados. Fonte: Dados da pesquisa.

- Quantidade de caminhões por transportadora: em uma aba específica da planilha é definida a quantidade de veículos disponível no sistema, por transportadora contratada pela fábrica. O total de caminhões representa o tamanho da frota utilizada;
- Número de guas na fábrica: determina-se a quantidade de guas existentes no pátio e nas mesas de processamento, para a movimentação de madeira.
- Número de recursos na fábrica: esse parâmetro caracteriza a quantidade de cada recurso na fábrica, ou seja, determina o número de balanças, Logmeter, pátio e mesas disponíveis.
- Tempo de trânsito interno: para configurar o tempo de movimentação dos caminhões dentro da fábrica (Figura 31), devem-se definir os tempos de trânsito entre as seguintes áreas:
 - Entrada da fábrica (portaria) e balança
 - Balança e o Logmeter;
 - Logmeter e pátio;
 - Pátio e as mesas;
 - Mesas e Saída da Fábrica (portaria).

Figura 31 – Visão de satélite da planta interna da fábrica.

- Produtividade interna: esse parâmetro permite a configuração da produtividade individual das guias alocadas na fábrica, portanto, essa produtividade só será lida no modelo se houver a alocação prévia de um número de guias;
- Paradas corretivas e administrativas internas: são configurados na interface os tempos entre paradas corretivas e administrativas e a duração de tais paradas, para todos os recursos existentes (balança, Logmeter, guias e mesas);
- Fazendas ativas: as fazendas de coleta não ficam ativas durante o ano todo, devido à disponibilidade de madeira. Todas as fazendas que fazem parte do complexo da indústria estudada foram mapeadas, mas sua ativação ou desativação deve ser feita na interface para a simulação dos cenários desejados;

- Número de guias por fazenda: a cada fazenda também deve ser atribuída uma quantidade específica de guias, que irão realizar o carregamento das toras de madeira nos veículos;
- Madeira disponível por fazenda: cada ponto de coleta possui uma quantidade de madeira disponível para carregamento. Esse é um parâmetro configurável e a unidade utilizada pelo modelo está em m^3 .
- Produtividade da guia da fazenda: cada guia tem uma produtividade de carregamento, em m^3 . Essa produtividade deve ser configurada e impacta diretamente no tempo de retenção dos veículos nas fazendas;
- Paradas corretivas e administrativas nas fazendas: as guias utilizadas nas fazendas têm paradas administrativas e corretivas. Devem ser configurados, portanto, os tempos entre paradas corretivas e administrativas e a duração de tais paradas;
- Distâncias: devem ser configuradas na interface as distâncias entre a fábrica e as fazendas, assim como entre os pontos de paradas (abastecimento e manutenção). Os valores devem ser fornecidos em quilômetros, especificando os trechos de terra e asfalto, uma vez que a velocidade desenvolvida pelos veículos é variável para cada tipo de pavimento.
- Tempo de abastecimento: configura-se na interface o tempo que os caminhões ficam retidos no ponto de abastecimento;
- Tempo de manutenção: configura-se na interface o tempo que os caminhões ficam retidos no ponto de manutenção;
- Tempo de limpeza: configura-se na interface o tempo que os caminhões ficam retidos no ponto de limpeza, antes de iniciar cada nova viagem;
- Tempo de amarração: configura-se na interface o tempo gasto na operação de amarração das toras de madeiras na fazenda, antes do início da viagem de retorno à fábrica.

6. APLICAÇÃO DO MODELO DE TRANSPORTE DE MADEIRA E RESULTADOS OBTIDOS

Este capítulo apresenta as principais análises e os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo de simulação do transporte principal de madeira em ciclo fechado para abastecimento de uma indústria de papel e celulose, com único ponto de consumo e vários pontos de fornecimento de matéria prima.

Para isso, em um primeiro momento, são apresentados os dados utilizados como parâmetros de entrada do modelo, obtidos através da análise de dados realizada no capítulo 4, para a simulação de um cenário base.

A partir do cenário base serão realizadas algumas análises de sensibilidade consideradas importantes para o planejamento atual e futuro das operações de transporte da indústria estudada.

O período considerado para as simulações foi de um mês. Esse período foi replicado dez vezes, para que se obtivesse um intervalo de confiança estatística de 95%, obtendo-se, assim, estabilidade nas principais respostas geradas pelo modelo e validade na utilização destas para a execução de um planejamento na fábrica.

Ressalta-se que o Anexo 2 traz exemplos dos subsistemas criados no *software* Arena ® e da interface utilizada para a leitura dos dados de entrada e análise das saídas geradas nos cenários de simulação.

6.1. CENÁRIO BASE

Para construir o cenário base, que busca representar de maneira bastante aproximada o sistema de transporte real estudado, foram utilizados, como mencionado, os dados obtidos a partir da análise dos dados fornecidos pela indústria estudada, que atua no estado de São Paulo e cuja identidade, a pedido da empresa, será mantida em sigilo.

Para o abastecimento de madeira da fábrica existem 26 pontos de carregamento disponíveis (fazendas), que revezam suas atividades ao longo do tempo de acordo com a disponibilidade de madeira. O mês utilizado para a simulação do cenário base foi o de fevereiro e, neste período, três fazendas estavam ativas para o fornecimento de madeira.

As fazendas ativas se localizam a uma distância conhecida do ponto de descarregamento (fábrica) e, como tratado anteriormente, no trajeto para a fazenda, os caminhões podem visitar pontos de abastecimento e/ou manutenção. Para a simulação dos cenários, adotou-se que os veículos obrigatoriamente visitam a cada 5 viagens o ponto de abastecimento e a cada 10 viagens o de manutenção. Esses pontos também têm distâncias conhecidas, consideradas no modelo.

A Tabela 2 apresenta as distâncias percorridas pelos veículos na realização do ciclo de transporte.

Tabela 2 - Distâncias entre as etapas do ciclo de transporte.

Trecho	Distâncias (km)	Fazendas Ativas		
		16	23	25
1	Fábrica - Fazenda (Asfalto)	81,70	367,80	200,60
2	Fábrica – Abastecimento (Asfalto)	40,85	183,90	100,30
3	Fábrica – Manutenção (Asfalto)	81,70	367,80	200,60
4	Abastecimento – Manutenção (Asfalto)	40,85	183,90	100,30
5	Manutenção – Fazenda (Terra)	126,30	52,00	371,50
6	Fazenda – Fábrica (Terra)	126,30	52,00	371,50
7	Fazenda – Fábrica (Asfalto)	81,70	367,80	200,60

Fonte: Dados da pesquisa.

Como mencionado anteriormente, o trânsito entre a fábrica e as fazendas é realizado através de vias compostas por trechos de terra e por trechos de asfalto. Aos trechos de asfalto foi atribuída a velocidade média de 50 km/h e para os trechos de terra, atribuiu-se a velocidade de 30 km/h.

O trecho 1 e 3 apresentam valores iguais, pois o trecho entre a fábrica e a fazenda no qual a via é composta por asfalto corresponde exatamente à distância entre a fábrica e o ponto de manutenção dos veículos.

O trecho 2 e 4 são iguais, porque o ponto de abastecimento se localiza antes do ponto de manutenção, exatamente no meio do trajeto entre a fábrica e o fim do trecho de asfalto (manutenção). Os trechos 6 e 7 são trechos de retorno do caminhão após o carregamento e foi admitido que as distâncias percorridas nas viagens até às fazendas são as mesmas executadas nas viagens de retorno para o descarregamento.

Os tempos médios em que os veículos fazem as paradas nos pontos de abastecimento e manutenção adotados foram, respectivamente, 2 e 10 minutos, aproximadamente. Quanto à parada para limpeza, que ocorre no início de cada viagem, foi adotado valor médio de 12 minutos. Para tais tempos, foi adotada uma distribuição de probabilidade triangular.

Cada fazenda ativa possui uma demanda mínima de madeira disponível que deve ser carregada e um recurso (grua), com certa produtividade, alocado ao ponto para a realização dessa operação nos caminhões que o visitam. A quantidade diária de madeira disponível nas fazendas 16, 23 e 25 é de, respectivamente, 2800 m³, 5000 m³ e 4000 m³. As fazendas 23 e 25, pela grande disponibilidade de madeira, possuem duas gruas para realizar a operação de carregamento dos veículos, enquanto que a fazenda 16, de menor demanda, possui apenas um recurso para realizar essa operação.

Como tratado na descrição dos subsistemas (item 5.2), às gruas que operam nas fazendas são atribuídos três parâmetros: produtividade, tempos entre paradas corretivas e administrativas, e a duração de tais paradas. A Tabela 3 apresenta tais parâmetros.

Tabela 3 - Parâmetros das guas de carregamento.

Parâmetros (por grua)	Fazendas		
	16	23	25
Produtividade (m ³ /h)	200	190	190
MTTR Corretiva (hora)	0,09	0,09	0,09
MTBF Corretiva (hora)	0,33	0,33	0,33
MTTR Administrativa (hora)	0,03	0,03	0,03
MTBF Administrativa (hora)	0,17	0,17	0,17

Fonte: Dados da pesquisa.

Os valores atribuídos ao MTTR referem-se ao tempo de duração da parada e aqueles atribuídos a MTBF tratam do tempo entre uma parada e a seguinte. Ressalta-se que estes são valores médios e a tais parâmetros também foi atribuída uma distribuição de probabilidade triangular, que foi a que melhor se adequou aos dados analisados.

À fábrica são atribuídos recursos de descarregamento de madeira, semelhantes aos utilizados nas fazendas. No pátio da fábrica foram alocadas 6 guas e, em cada uma das mesas das 3 linhas para descarregamento, foi alocada uma grua. A produtividade de cada grua do pátio é de 280 m³/h, das mesas da linha 1 de 165 m³/h, das 2 mesas da linha 2 de 260 m³/h e das 2 mesas da linha 3 de 260 m³/h.

Além dos recursos, também foram adotados valores para o tempo dispendido em trânsito pelos veículos no interior da fábrica. Os tempos médios de movimentação interna entre os pontos visitados pelos caminhões, adotados no modelo de simulação, foram os seguintes:

- Portaria e Balança: 5 minutos
- Balança e Logmeter: 4 minutos
- Logmeter e Pátio: 6 minutos
- Mesas de Processamento e Saída: 14 minutos

O tempo de trânsito entre o pátios e as 6 mesas de descarregamento e processamento de madeira é muito baixo e considerado desprezível para o modelo, por isso nenhum valor foi adotado.

Para o cenário base, buscou-se a maior proximidade possível com sistema real de transporte de madeira estudado. Para isso, também foi inserido na simulação desse cenário o fenômeno da “Bolha”, uma vez que a análise dos dados apontou claramente que se trata de um comportamento típico e intrínseco às operações. A desconsideração de tal comportamento poderia representar menor aderência do modelo com a realidade. Definiu-se, portanto, baseado nas análises realizadas e no comportamento dos gráficos, que o início do efeito ocorre no instante zero, o intervalo entre a ocorrência das bolhas é de 8 horas e a duração desse fenômeno é de 1 hora.

A capacidade dos caminhões que compõe a frota utilizada no transporte de madeira é de 53 m³, que operam durante 24 horas por dia, nos 7 dias da semana. O cenário base foi simulado com uma frota 153 veículos de mesma capacidade, uma vez que esta era a quantidade de caminhões disponibilizadas pela indústria estudada para a realização de suas operações.

6.2. INDICADORES FORNECIDOS COMO SAÍDAS DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Para analisar os resultados gerados pelo modelo, foram considerados alguns indicadores de desempenho. As respostas obtidas em cada rodada do modelo de simulação são:

- Tempo de ciclo total;
- Percentual de utilização da frota;
- Filas nos pontos de consumo e matéria-prima;
- Número de viagens realizadas.

O tempo de ciclo total é avaliado através da medida do tempo em que um veículo leva para completar um ciclo completo, desde a coleta em um ponto de

matéria prima até a descarga da madeira no ponto de consumo. Esse tempo é resultado dos tempos de trânsito entre os pontos, dos tempos de operação e das filas enfrentadas em cada uma das etapas da linha do tempo.

O percentual de utilização analisa a capacidade efetivamente ocupada da frota, ou seja, a razão entre a quantidade de fato movimentada e quantidade máxima de carga capaz de ser transportada pela frota.

As filas nos pontos de fornecimento de matéria-prima e na fábrica são indicadores do comportamento do sistema em relação às perturbações que acontecem no mesmo ao longo do período de processamento do modelo. Auxiliam a compreensão quanto ao nível de ociosidade ou saturação dos recursos disponíveis.

Por fim, o indicador do número de viagens realizadas pelos veículos da frota é definido a partir da quantidade total de viagens realizadas durante o período de análise pela frota em operação. Ele tem como objetivo principal medir se a demanda total requerida para um determinado período está sendo atendida.

A cada rodada, a partir do cenário base, são simulados cenários alternativos considerando quantidades distintas de veículos na frota com o objetivo de, a partir de análises de sensibilidade dos indicadores de desempenho, definir a frota mais adequada para o sistema de transporte em estudo.

Além desses indicadores, o modelo gera um detalhamento completo de todas as viagens realizadas durante as rodadas por meio do arquivo “Log de viagens”, que é lido na interface. Esse arquivo fornece, por exemplo, a quantidade de carga transportada, o raio médio percorrido pelos veículos da frota, entre outros resultados importantes para avaliação dos cenários e do modelo em si.

6.3. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Com o modelo construído e com a realização da rodada do cenário base, faz-se necessário a confirmação de que o modelo desenvolvido opera da forma que se pretendia e que suas saídas são confiáveis e representam o modelo real. Segundo Chwif e Medina (2014), a etapa de verificação e validação é essencial para o processo e considerada de fundamental importância para que um estudo de simulação seja bem-sucedido.

O processo de verificação busca analisar se o programa computacional teve desempenho de acordo com o esperado e pretendido, fornecendo, desta forma, uma correta representação lógica do modelo. Verificar significa, portanto, eliminar elementos que possam estar causando mau funcionamento do modelo (LOPES, 2008).

O processo de validação está relacionado ao modelo conceitual e busca verificar se o modelo construído representa de forma adequada o sistema real a ser simulado (BOTTER 2001 apud LOPES, 2008). Para Pidd (2000) apud Chwiff e Medina (2014), em um processo de validação, deve-se checar se o modelo se comporta como o mundo real sob as mesmas condições. Em caso positivo, o modelo é considerado válido, caso contrário não terá validade.

Dessa forma, foi realizada a comparação dos principais indicadores de desempenho obtidos a partir da rodada do cenário base com os dados reais das operações de transporte estudadas, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação entre cenário e cenário real.

Indicadores de Desempenho	Dados	Modelo	Unidade	Diferença	Desvio
Número de viagens	6.194	6.236	#/mês	42	1%
Tempo de ciclo	11,1	11,6	(hora)	0,5	5%
Tempo de Fila	2,7	3,0	(hora)	0,4	14%
Total de Carga Transportada	321.514	330.508	(m ³ /mês)	8.994	3%
Total de Carga Planejada	330.400	330.400	(m ³ /ano)	0	0%
Raio Médio	108	108	(km)	0	0%

Fonte: Dados da pesquisa.

Ressalta-se que no cenário base foram simuladas as mesmas condições do período de análise de dados, ou seja, o mesmo número de dias de operação, horas trabalhadas, número de veículos na frota, comportamento de atraso generalizado dos veículos (“bolha”), entre outras características.

A coluna de “Dados” refere-se aos valores reais, obtidos a partir da análise dos dados da indústria, enquanto que a coluna “Modelo” faz referência aos resultados obtidos com a simulação do cenário base. O desvio médio de todos os indicadores de desempenho analisados na tabela é de 4%.

Além dos indicadores de desempenho, também foi realizada uma análise, etapa a etapa, da linha do tempo dos veículos da frota no ciclo fechado de transporte. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Comparação entre cenário base e cenário real por etapas.

Linha do Tempo - Etapas	Dados	Modelo	Unidade	Diferença	Desvio
<i>Setup</i> de Limpeza	0,2	0,2	(hora)	0,0	0%
Percurso para Fazenda	3,5	3,1	(hora)	0,4	11%
Fila na Fazenda	1,7	2,3	(hora)	0,6	35%
Operação	0,3	0,3	(hora)	0,0	0%
Amarração	1,5	1,5	(hora)	0,0	0%
Percurso para Fábrica	2,8	2,9	(hora)	0,1	4%
Fila na Balança	0,2	0,1	(hora)	0,1	50%
<i>Setup</i> para descarga	0,2	0,2	(hora)	0,0	0%
Fila para descarregamento	0,7	0,6	(hora)	0,1	14%
Descarregamento	0,2	0,2	(hora)	0,0	0%
<i>Setup</i> para Portaria	0,2	0,2	(hora)	0,0	0%

Fonte: Dados da pesquisa.

Os dois grandes desvios apresentados entre os dados reais e os resultados apresentados pelo modelo (fila na fazenda e fila na balança) são atribuídos a procedimentos diferentes adotados nos apontamentos de dados, que em muitos casos incluíam etapas anteriores às filas de fato.

De maneira geral, a diferença entre os dados reais e as saídas obtidas com a simulação do cenário base se manteve baixa, com desvio médio de todas as etapas de 10%.

O desvio médio total das duas análises (Tabela 4 e Tabela 5) é de 7%, desvio esse considerado bastante aceitável para que o modelo de simulação de transporte principal de madeira desenvolvido seja considerado válido, com boa capacidade de representação do sistema real.

Para saber qual a variância estimada dos resultados obtidos através do modelo e se a quantidade de replicações utilizadas (10) para a construção do cenário base está adequada para atingir determinada precisão, alguns experimentos foram construídos e técnicas foram utilizadas para analisar as saídas do modelo.

O sistema abordado neste estudo é considerado terminal, que segundo Chwiff e Medina (2014), pode ser definido como um sistema que tem o momento exato no tempo para sua simulação ser finalizada e exige que dois tipos de valores sejam determinados: duração da simulação e número de replicações.

Ainda segundo esses autores a análise de dados de saída de sistemas terminais pode ser dividida em seis etapas, que são estas:

1. Estabelecer as medidas de desempenho adequadas;
2. Escolher a confiança estatística e a precisão com que se pretende trabalhar;
3. Construir uma “amostra-piloto” e estimar o intervalo de confiança;
4. Determinar o número de replicações necessárias;
5. Rodar o modelo novamente;
6. Calcular o novo intervalo de confiança.

A medida de desempenho de maior interesse no modelo de simulação do transporte principal de madeira abordado neste estudo é a de tempo de ciclo total, uma vez que através desta medida é possível determinar, por exemplo, quantas viagens podem ser realizadas durante um dia e, conseqüentemente, a quantidade total de madeira (m^3) que o sistema é capaz de movimentar para o abastecimento do ponto de consumo.

O intervalo de confiança estatística escolhido é de 95%, com uma precisão tal que o tamanho da metade do intervalo h seja de, no máximo, 1 hora.

O cenário base foi construído com a realização de 10 replicações e a Tabela 6 apresenta os resultados obtidos em relação ao tempo de ciclo total no sistema de transporte de madeira.

Tabela 6 - Dados de saída do modelo.

Replicação	Tempo de ciclo (horas)
1	9,80
2	8,72
3	9,18
4	10,50
5	11,12
6	12,19
7	11,60
8	11,67
9	11,33
10	11,59
Média	10,77
Desvio Padrão	1,17

Fonte: Dados da pesquisa

Através destes dados é possível a construção de um intervalo de confiança para a média obtida. Para isso, foi utilizada a tabela de distribuição t de Student, com $\alpha = 0,05$ (intervalo de confiança de 95%) e $n = 10$ replicações (número de replicações realizadas na amostra piloto), obtendo-se os seguintes resultados (equação 5):

$$t_{n-1; \frac{\alpha}{2}} = t_{10-1; \frac{0,05}{2}} = 2,26 \quad (5)$$

O tamanho da metade do intervalo pode ser calculado segundo a equação (6):

$$h = t_{n-1; \frac{\alpha}{2}} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (6)$$

$$h = 2,26 * \frac{1,17}{\sqrt{10}} = 0,56$$

Esse valor de h está dentro da precisão desejada de 1 hora. Assim, a partir desse último valor de h foi possível construir o seguinte intervalo de confiança para a média, apresentado na equação (7):

$$\bar{x} - h \leq \mu \leq \bar{x} + h \quad (7)$$

$$10,77 - 0,84 \leq \mu \leq 10,77 + 0,84$$

$$9,93 \leq \mu \leq 11,61$$

Como o resultado obtido a partir das 10 replicações do cenário base atenderam a precisão desejada, não se fez necessário determinar o número de replicações necessárias, rodar o modelo novamente e calcular o novo intervalo de confiança.

Dessa forma, pode-se analisar que existe uma probabilidade de 95% de que o intervalo [9,93; 11,61] contenha a média do tempo de ciclo total do sistema.

6.4. RESULTADOS OBTIDOS

A partir do cenário base, foram simulados 16 cenários alternativos, considerando quantidades distintas de veículos na frota. Para cada cenário foram realizadas 10 replicações, ou seja, em cada cenário analisado houve a repetição da simulação do modelo, com a mesma configuração, a mesma duração e com os mesmos parâmetros de entrada, mas com uma semente de geração dos números aleatórios diferente.

Ressalta-se que esse primeiro cenário foi construído com as entradas de dados descritas no item 6.1 e a partir dele é possível a realização de análises de sensibilidade e o dimensionamento da frota de caminhões mais adequada.

Nos cenários simulados, a quantidade de veículos na frota variou de 153 (quantidade real que opera na indústria) até 78 caminhões. Com essa variação imposta ao modelo foi possível analisar o comportamento dos principais indicadores de desempenho do modelo. Os resultados obtidos a partir da simulação dos 16 cenários são apresentados através da Figura 32.

Com a análise dos resultados gerados pelo modelo de simulação para este cenário, é possível inferir que o número de frota mínima, capaz de realizar as 6.236 viagens mensais necessárias para o atendimento da demanda do cenário simulado, é de 93 veículos, uma vez que a partir de uma frota de 88 veículos, o número de viagens mensais já não é mais atingido.

Figura 32 - Análise do número de viagens e utilização da frota com bolha. Fonte: Dados da pesquisa.

Esse tamanho de frota, contudo, não é recomendável devido sua elevada taxa de utilização de 94%, o que representa que os veículos estariam operando próximo ao limite de suas capacidades e qualquer variação no sistema não seria suportada.

Além disso, através da Figura 33, é possível notar que à medida que a frota é reduzida, o tempo médio de realização do ciclo sofre significativa redução. Essa observação permite inferir que a frota atual utilizada na indústria estudada está superestimada, situação esta que leva a uma taxa de utilização relativamente baixa dos veículos, maior tempo em fila e, conseqüentemente, maior tempo de ciclo. Essa redução do tempo de ciclo justifica-se, portanto,

pelo fato de que veículos em excesso sobrecarregam um sistema, reduzindo eficiência e gerando custos desnecessários.

Figura 33 - Análise de tempo de ciclo e utilização da frota com bolha. Fonte: Dados da pesquisa.

Assim, a frota de 153 caminhões utilizada na empresa e que foi validada pelo modelo de simulação apresenta ociosidade e a fila observada nas fazendas demonstra que os veículos adicionais estão parados neste ponto, o que não acontece para frota com 123 ou menos caminhões, onde o tempo se estabiliza em 0,3 horas.

Dessa forma, a frota mais adequada para esse cenário deve estar na faixa de 123 e 128 veículos (considerando uma margem de 5 veículos a mais na operação), que representa uma taxa de utilização da frota de 75%, pois, dentro desse intervalo, o número de viagens necessárias para o atendimento da demanda é atendido, o tempo médio de ciclo é de aproximadamente 9,6 horas e a taxa de utilização é considerada mais razoável em termos de ocupação de recursos.

6.5. ANÁLISE DE CENÁRIOS

A realização de uma análise de cenários tem o objetivo de apresentar diferentes possibilidades para o sistema de transporte de madeira estudado, impondo possíveis variações que podem ocorrer ao longo do tempo neste sistema.

Para isso, a partir do cenário base, foram feitas alterações em algumas variáveis para verificar o impacto que tais mudanças causariam nos resultados gerados pelo modelo. As análises que foram feitas estão descritas a seguir:

- Eliminação do fenômeno de atraso generalizado dos veículos (“Bolha”);
- Aumento do raio médio percorrido pelos veículos, para 300 km e 400 km;
- Imposição de uma lógica de envio de caminhões, baseada no *takt time*;

6.5.1. Eliminação do Efeito “Bolha”

Como mencionado, o cenário base considera a existência do comportamento de atraso generalizado dos veículos (“Bolha”) identificado nas análises dos dados fornecidos. Como se trata de um comportamento induzido pelos motoristas, extremamente prejudicial ao sistema de transporte de madeira e que, portanto, deve ser eliminado das operações realizadas diariamente na fábrica, realizou-se a simulação de outros 16 cenários, com variação de frota, desconsiderando, contudo, a presença desse fenômeno.

Para isso, os campos da interface referentes ao tempo de intervalo de ocorrência e o tempo de duração da “Bolha”, que no cenário base assumiram, respectivamente, 8 horas e 1 hora, foram zerados. Dessa forma, o modelo de simulação deixou de impor aos veículos do sistema esse comportamento.

Essa nova análise de cenários foi realizada para verificar, através dos diferentes tamanhos de frota, como os indicadores de desempenho fornecidos pelo modelo se comportariam sem a imposição desse fenômeno no sistema de transporte. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 34.

Figura 34 - Análise do número de viagens e utilização da frota sem bolha. Fonte: Dados da pesquisa.

Com a análise do gráfico, pode-se perceber que a ocupação por volta dos 75% (entre 74% e 77%) é obtida com uma quantidade menor de veículos na frota, ou seja, a mesma taxa de ocupação dos veículos do cenário com “bolha” é mantida, contudo, com uma frota menor de caminhões nesse novo cenário.

Essa percepção permite concluir que além do congestionamento do sistema causado pelo excesso de veículos, o comportamento de “bolha” também contribui para uma frota superestimada.

O gráfico apresentado na Figura 35 aponta o comportamento do tempo de ciclo e de algumas das filas mais relevantes enfrentadas pelos caminhões no sistema. Pode-se perceber que há uma ligeira redução do tempo de ciclo e das filas, mas que com a redução da frota se estabilizam em valores similares ao do cenário com “bolha”.

Com a análise dos dois gráficos, pode-se perceber que para esse cenário, a frota mais adequada estaria entre 113 e 118 veículo, frota esta que atende ao número de viagens necessárias, com taxa de ocupação aceitável e tempo de ciclo de aproximadamente 9,3 horas.

Figura 35 - Análise do tempo de ciclo e utilização da frota sem bolha. Fonte: Dados da pesquisa.

Comparando-se com o cenário anterior, em que a faixa indicada foi de 123 a 128 veículos, há uma redução significativa de, aproximadamente, 10 veículos. Quando se leva em consideração a frota que realmente opera na fábrica, que é de 153 veículos, essa redução é ainda mais expressiva, por volta de 40 caminhões.

6.5.2. Aumento do Raio Médio para 300 km e 400 km

Como mencionado, a simulação de um cenário base visava reproduzir as operações atuais do sistema real estudado. Contudo, o modelo desenvolvido neste estudo, também tem por objetivo auxiliar os planejadores no horizonte de planejamento de longo prazo.

Atualmente sabe-se que, devido a crescente demanda, a tendência das indústrias do setor madeireiro é de buscar sua matéria prima em regiões cada vez mais distantes de seu centro produtivo. Esse cenário é motivado pela escassez de toras no prazo de maturação adequado para colheita, que dura por volta de 6 a 7 anos. Dessa forma, para não realizar a derrubada e posterior transporte principal de madeira aos centros produtores antes do momento correto, há uma necessidade de expansão da área de plantio que acaba por impor maiores distâncias a serem percorridas pelos veículos da frota.

A distância a ser percorrida pelos veículos é um dos principais componentes de custo de transporte e diante disto, acredita-se que a simulação de cenários que levem em conta a ampliação do raio médio tem significativa importância para o planejamento das operações.

No cenário base e no cenário sem “bolha”, o raio médio percorrido pelos veículos é de aproximadamente 100 km e, para esta análise, esse raio foi aumentado para 300 km e 400 km. Para isso, foram utilizadas as mesmas configurações e parâmetros dos cenários anteriores, apenas com a alteração das distâncias das fazendas ativas, apresentadas no item 6.1 desta dissertação. Ressalta-se que nessas análises de aumento de raio médio o fenômeno de bolha não foi considerado, pois, como já explicado, trata-se de um comportamento que deve ser sanado.

Assim, de maneira análoga às análises anteriores, foram rodados 16 cenários alternativos com a variação da quantidade de veículos na frota. A Tabela 7 apresenta as saídas geradas pelo modelo para as análises das duas variações

de raio. Cada uma delas considera variações diferentes no tamanho da frota, por se tratarem de distâncias distintas.

Tabela 7 – Resultados dos cenários com mudança do raio médio.

Análises	Cenários	Frota	Número de viagens	Tempo de ciclo (h)	Tempo em fila (h)	Utilização
Raio Médio 300 km	1	263	6.236	20,35	0,70	72%
	2	258	6.236	20,15	0,50	72%
	3	253	6.236	20,09	0,45	74%
	4	248	6.236	20,05	0,40	75%
	5	243	6.236	20,03	0,35	76%
	6	238	6.236	20,01	0,34	78%
	7	233	6.236	20,01	0,32	80%
	8	228	6.236	20,01	0,29	81%
	9	223	6.236	20,01	0,29	83%
	10	218	6.236	20,00	0,26	85%
	11	213	6.236	19,99	0,24	89%
	12	208	6.236	19,97	0,23	91%
	13	203	6.226	19,95	0,22	94%
	14	198	6.218	19,93	0,22	96%
	15	193	6.113	19,88	0,21	97%
	16	188	5.970	19,85	0,19	98%
Raio Médio 400 km	1	328	6.236	26,05	0,66	71%
	2	323	6.236	25,94	0,54	72%
	3	318	6.236	25,86	0,47	72%
	4	313	6.236	25,84	0,42	74%
	5	308	6.236	25,82	0,40	76%
	6	303	6.236	25,78	0,38	77%
	7	293	6.236	25,73	0,34	80%
	8	288	6.236	25,70	0,33	83%
	9	283	6.236	25,68	0,31	84%
	10	278	6.236	25,65	0,28	86%
	11	273	6.236	25,64	0,29	87%
	12	268	6.236	25,60	0,27	89%
	13	263	6.235	25,57	0,25	90%
	14	258	6.207	25,50	0,24	92%
	15	253	6.138	25,45	0,23	93%
	16	248	6.030	25,43	0,23	95%

Fonte: Dados da pesquisa.

A partir da análise dessa tabela, pode-se perceber que para o raio médio de 300 km, a frota mais adequada estaria na faixa entre 248 e 243 veículos, que é capaz de atender às 6.236 viagens esperadas, além de apresentar uma taxa de ocupação em torno de 75%.

Em contrapartida, para o raio de 400 km, a faixa de frota entre 313 e 308 veículos pode ser considerada mais recomendável, uma vez que com essa frota, os veículos operam com uma taxa de 75% de ocupação, mantendo o número de viagens esperadas.

O gráfico apresentado na Figura 36 demonstra o aumento da frota e do tempo de ciclo com relação à variação do raio. Os valores apresentados para o raio atual de 100 km se referem ao cenário sem “bolha”. Pode-se perceber uma elevação de 120 veículos quando comparado o raio atual com o de 300 km e de 190 veículos quando comparado com o de 400 km. Essa constatação ratifica a importância da utilização de um modelo de simulação para o planejamento de longo prazo dessa indústria de papel e celulose.

Figura 36- Variação da frota e tempo de ciclo com aumento do raio médio. Fonte: Dados da pesquisa.

Outro ponto importante que pode ser percebido é que o tempo de ciclo em ambos os cenários apresenta expressivo aumento quando comparado àqueles de raio médio de 100 km. Apesar disso, pode-se concluir que esse tempo está basicamente ligado ao maior tempo em trânsito, uma vez que as filas tem pouca representatividade no tempo total da viagem.

Nos cenários de 100 km, a redução do tempo de ciclo é considerável à medida que a frota diminui, uma vez que o tempo em fila tem grande influência no tempo total da viagem, o que não acontece nos cenários de maior raio.

Entende-se, portanto, que a redução do tempo de fila em todas as etapas do ciclo está diretamente ligada ao aumento do raio, pois uma vez que as distâncias entre a fábrica e as fazendas ativas aumentam, a possibilidade de haver congestionamento nas operações de carregamento e descarregamento é menor.

6.5.3. Imposição de Nova Lógica de Despacho, segundo *Takt Time*

Em todas as análises de sensibilidade realizadas anteriormente, assim como no cenário base, a decisão de envio dos caminhões para as fazendas ativas era realizada pelo modelo com base na lógica de despacho descrita no item 5.2.4 deste estudo, baseado, primordialmente, na demanda mínima a ser atendida em cada fazenda ativa.

Para a realização de outra análise, optou-se pelo cálculo do *takt time* dos veículos para cada fazenda, ou seja, calculou-se a periodicidade com a qual os caminhões deviam ser enviados aos pontos de fornecimento de matéria-prima. Ressalta-se que para essa análise, foi considerado o raio atual de 100 km.

Segundo Duanmu e Taaffe (2007) o *takt-time* é definido a partir da demanda a ser atendida e do tempo disponível, configurando-se, dessa forma, como o ritmo de operação necessário para atender a demanda. Matematicamente,

resulta da razão entre o tempo disponível para produção e a demanda requerida.

No caso deste estudo, o tempo disponível para a produção foi considerado como o tempo disponível para a realização do transporte de madeira. O cálculo do *takt time* foi realizado de acordo com a equação 8:

$$Takt\ time = \frac{\frac{Tempo\ disponível}{Demanda\ diária}}{Capacidade\ do\ caminhão} \quad (8)$$

Onde:

- *Tempo disponível*: quantidade de minutos diários em que a operação pode ser realizada. No caso deste estudo, o tempo de operação é de 24 horas por dia;
- *Demanda diária*: disponibilidade, em m³, de madeira em cada fazenda. Essa quantidade é variável por ponto de fornecimento de matéria-prima;
- *Capacidade do caminhão*: capacidade de transporte, em m³, de cada caminhão. No caso deste estudo, a frota é homogênea e, portanto, todos os veículos possuem a mesma capacidade.

A demanda de cada fazenda ativa e o respectivo *takt time* são descritos através da Tabela 8.

Tabela 8 - Valor do *takt time* por fazenda ativa.

Fazendas Ativas	Madeira disponível (m ³)	<i>Takt time</i> (minutos)
Fazenda 16	2800	00:27
Fazenda 23	5000	00:15
Fazenda 25	4000	00:19

Fonte: Dados da pesquisa.

O *takt time* representa a periodicidade com que os veículos devem ser enviados pelo modelo para cada uma das fazendas para a realização das operações de carregamento. Com esse tipo de cenário, busca-se garantir maior regularidade das chegadas às fazendas e, portanto, menores tempos de

fila, com consequente menor tempo de ciclo e maior eficiência do sistema como um todo.

Para esse cenário também foram realizadas 10 replicações, contudo não foi imposta a variação de frota, uma vez que com uma demanda e *takt time* fixos, buscou-se definir qual a frota mínima capaz de realizar as operações de transporte e, portanto, de atender a demanda. Ressalta-se que nessa análise o efeito “bolha” não foi considerado.

Além disso, buscou-se analisar cada uma das etapas do ciclo de transporte para entender como a regularidade do envio de veículos pode impactar nas filas existentes no sistema. Os dados referentes à análise com *takt time* são apresentados na Figura 37.

Através do gráfico, pode-se perceber que os tempos em fila são praticamente nulos, o que ratifica a ideia de que um envio regular de caminhões, por meio de uma lógica de despacho que garanta esse comportamento, é claramente benéfico, pois, acima de tudo, reduz significativamente os congestionamentos em todas as etapas do ciclo fechado de transporte de madeira.

Figura 37 - Cenário com lógica de despacho segundo *takt time*. Fonte: Dados da pesquisa.

Com a imposição da nova lógica de despacho, o modelo utilizou para o atendimento da demanda das três fazendas ativas uma frota de 93 veículos, que foi capaz de realizar as 6.236 viagens mensais necessárias, com uma taxa de utilização de 88% e um tempo de ciclo de 8,80 horas.

Essa mesma frota de 93 caminhões, na análise com a eliminação do efeito bolha, apresenta um tempo de ciclo de 9,1 horas e uma taxa de utilização de 94%, parâmetros esses que exemplificam o ganho obtido com a implementação de uma lógica de despacho baseada no *takt time*.

A Tabela 9 apresenta os principais resultados obtidos nos cenários simulados.

Tabela 9 - Principais resultados dos cenários simulados.

Cenário	Frota	Número de viagens	Tempo de ciclo (h)	Tempo em fila (h)	Utilização
Com bolha	128	6.236	9,69	0,85	73%
	123	6.236	9,53	0,69	77%
Sem bolha	118	6.236	9,39	0,60	74%
	113	6.236	9,32	0,53	77%
Raio 300 km	248	6.236	20,05	0,40	75%
	243	6.236	20,03	0,35	76%
Raio 400 km	313	6.236	25,84	0,42	74%
	308	6.236	25,82	0,40	76%
<i>Takt Time</i>	93	6.236	8,80	0,11	88%

Fonte: Dados da pesquisa.

Quando se realiza uma comparação entre os cenários sem “bolha”, em que é aplicada a lógica de despacho baseada na demanda, com o cenário em que foi utilizada a lógica de *takt time*, nota-se o incremento da eficiência das operações, através da significativa redução no tamanho da frota.

Os cenários de aumento de raio médio, como descrito anteriormente, foram simulados para fornecer suporte ao planejamento de longo prazo do sistema de transporte.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O estudo desenvolvido nesta dissertação foi aplicado a um problema real, de uma empresa brasileira de papel e celulose, com o objetivo de analisar suas operações de transporte principal de madeira.

O modelo de simulação apresentou uma validação bastante satisfatória, tendo em vista que seus resultados são bem próximos aos valores reais para uma frota de 153 caminhões.

O cenário base (153 caminhões) reflete as operações que eram realizadas nessa empresa. Como exposto, o principal problema encontrado no sistema real foi o comportamento de “bolha”, que induz a chegadas de caminhões em comboios e posterior esvaziamento nos pontos de carregamento e descarregamento. Esse fenômeno, que é provocado pelo planejamento informal dos motoristas visando terminar o ciclo de viagens em períodos regulares, tem um efeito extremamente prejudicial ao sistema de transporte a ele associado.

Esse comportamento era inerente às operações, alimentado diariamente e induzia à formação de filas nos pontos visitados pelos caminhões. Além disso, essa ineficiência levava a um maior tempo de ciclo causado pela maior retenção dos veículos, assim como, a uma frota superestimada.

Segundo o resultado inicial desta pesquisa apresentado na Figura 33, que trata da análise dos resultados do cenário base, a frota de 153 caminhões utilizada também era superior à necessária, o que tornava o sistema de transporte ainda mais saturado e congestionado. Dessa forma, a simulação do cenário base, já possibilitaria um dimensionamento mais adequado, uma vez que esta indicou que uma frota entre 123 e 128 caminhões seria capaz de atender a demanda da fábrica, mesmo com as ineficiências provocadas pela “bolha”. Ou seja, em um primeiro momento, já seria possível realizar uma redução de aproximadamente 25 caminhões, que representaria, também, uma redução de quase 2 horas no tempo de ciclo.

O fato de a frota ser superior à necessária, conforme mencionado acima, foi alvo de uma investigação qualitativa e preliminar pela pesquisadora junto à empresa, tendo em vista que a eficiência no uso de recursos (caminhões) deveria ser uma meta da organização estudada. Para isso, o seguinte questionamento foi feito a três pessoas associadas ao setor responsável pelas operações de transporte: como é realizado o dimensionamento da frota para um conjunto de fazendas ativas, em um determinado período de tempo?

A resposta obtida foi que inicialmente a frota era estipulada com base na demanda total ponderada pelas distâncias de transporte e era, posteriormente, incrementada por fatores presenciados na rotina da operação, tais como: falta de carga junto à fábrica, tendência de diminuição de estoques, paradas por períodos chuvosos, entre outros. A conclusão da pesquisadora, embora não possa ser confirmada metodologicamente, foi de que o incremento da frota era realizado como margem de segurança. Porém, sem que a empresa tomasse conhecimento, esse incremento, a partir de um determinado número de caminhões, só provocava a retenção dos mesmos nas fazendas.

Mesmo com os ganhos de redução de frota aplicadas ao cenário base, buscou-se através da proposição de cenários apresentada na subseção 6.5, eliminar o efeito “bolha”, que contradiz qualquer política de operação eficiente em sistemas logísticos. Com a análise dos resultados obtidos através desse novo cenário, chegou-se à conclusão de que a frota mais adequada estaria entre a faixa de 118 a 113 veículos, que representa uma redução de aproximadamente 35 veículos (cerca de 22%), quando comparada à frota de 153 veículos até então utilizada.

Outros cenários propostos no capítulo 6 trataram de análises futuras, com aumento do raio médio percorrido pelos caminhões. Esses cenários foram considerados e simulados, pois a elevação das distâncias entre fábrica e fazendas é um progresso natural e previsível neste tipo de indústria e a ferramenta de simulação desenvolvida é capaz de fornecer suporte para planejamentos de longo prazo como este.

Além dessas análises, outro problema do sistema de transporte estudado se referia à lógica de despacho utilizada para o envio dos caminhões aos pontos de carregamento. Tratava-se de uma lógica baseada somente na análise da demanda mínima que deveria ser atendida em cada uma das fazendas ativas.

Como esse tipo de lógica não leva em consideração a regularidade no envio dos caminhões, pode ocorrer, por exemplo, o despacho de muitos veículos ao mesmo tempo. A não regularidade e os picos de chegadas dos caminhões nas fazendas podem levar à formação de filas e consequente congestionamento em vários pontos do sistema. Essa lógica de despacho baseada na demanda foi utilizada nos cenários base, sem “bolha” e de aumento do raio médio.

Com o objetivo de garantir maior regularidade no envio dos caminhões a partir da fábrica e, portanto, a redução direta de filas nas fazendas e no sistema como um todo, um novo cenário foi simulado, com a utilização de uma lógica de despacho segundo o cálculo do *takt time* dos caminhões, cálculo este que considera, além da demanda a ser atendida em cada fazenda, o tempo disponível para a realização do transporte e a capacidade do caminhão. O *takt time* representa, portanto, a periodicidade fixa com que os caminhões serão enviados às fazendas para o carregamento de madeira.

Com os resultados obtidos a partir da simulação desse cenário com nova lógica, pôde-se perceber que todas as filas antes existentes no sistema foram praticamente extintas. Essa percepção ratificou a suposição de que um envio regular de caminhões aos pontos de carregamento proporcionariam operações mais estáveis, pela eliminação de picos de chegadas de veículos, que levavam a uma saturação dos pontos de carregamento, por superarem a capacidade de atendimento dos recursos.

A frota utilizada pela lógica do *takt time* foi de 93 veículos, que teve capacidade de atender toda a demanda, com uma ocupação de 88%. Quando comparado com a frota original, o dimensionamento através dessa nova lógica de despacho leva a uma redução muito expressiva de 60 veículos na frota.

Cabe observar que a ocupação da frota passa de 75% (cenário base com redução de frota pra faixa entre 128 e 123 veículos) para 88%, o que indicaria um uso mais racional dos recursos. Para atingir um nível de ocupação mais próximo aos 75%, além da eliminação do efeito da “bolha” e da introdução do *takt time* como lógica de despacho, a empresa, necessariamente, deveria investir em um sistema de comunicação/informação entre fábrica, caminhões e fazendas.

A ausência desse tipo de sistema atrelada à ocorrência de paradas nas fazendas (quebras, manutenção etc.), que interrompem a operação, mas não o fluxo de chegada de caminhões, levariam a um desbalanceamento no fluxo de transporte de madeira. Esse desbalanceamento, como por exemplo, a falta de carga na fábrica, provocaria como reflexo um incremento de frota. Com um sistema de informação adequado seria possível realizar, quando da ocorrência de eventos de bloqueio nas fazendas, o redirecionamento de caminhões em tempo real, minimizando o desbalanceamento do fluxo e, conseqüentemente, evitando o excesso de frota.

Com o desenvolvimento deste estudo, pode-se concluir, portanto, que a simulação de eventos discretos é uma ferramenta adequada para a análise e o dimensionamento de uma frota de caminhões em circuito fechado para fornecimento de madeira, permitindo, através da análise de cenários, a proposição de um modelo de transporte mais eficiente, com menos perdas.

A metodologia aplicada corrobora ainda para confirmar os conceitos básicos de logística, onde a busca pela eficiência e racionalização dos recursos se dá pelo dimensionamento adequado dos subsistemas envolvidos (colheita, transporte, estoques), associados à questão da informação em toda a cadeia.

Alguns pontos não foram explorados com maior detalhamento nesta dissertação e podem ser tratados em pesquisas futuras, dentre os quais se podem destacar:

- Refinamento da lógica de despacho com *takt time*, que represente/ “simule” o sistema de informação acima mencionado. O modelo atual

considera um percentual de falhas dos recursos operantes nas fazendas, mas não retém o envio dos veículos durante tais falhas. Esse refinamento exigiria um fluxo dinâmico de informações no sistema, que permitiria o impedimento do envio durante a parada do recurso e a normalização do fluxo com o retorno da operação, a partir do cálculo de um novo *takt time*. Dessa forma, a frota indicada de 93 caminhões poderia ser ainda mais reduzida ou poderia apresentar uma menor ocupação;

- Avaliação da utilização de uma frota heterogênea, permitindo, assim que as fazendas ativas pudessem ser visitadas por diferentes veículos, para uma análise de capacidade de atendimento da demanda quando comparada à frota homogênea;
- Nesta pesquisa, não foi abordada uma análise de custo total do sistema (colheita, transporte e estoque na fábrica), pois, por se tratar de uma frota em ciclo fechado, acredita-se que ocorra uma proporcionalidade entre o aumento da frota e o aumento de custo de transporte, considerando que os recursos de colheita estão fixos e a demanda da fábrica está sendo atendida. No entanto, é recomendável que uma avaliação de custos seja inserida, até mesmo porque ela pode ser decisiva no refinamento da faixa de frota que deve ser utilizada no sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MADEIRA PROCESSADA MECANICAMENTE (ABIMCI). **Estudo setorial**. 2009.

ARAUJO, C. E. G. **Algoritmos genéticos híbridos sem delimitadores de rotas para problemas de roteirização de veículos**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2008.

ARAUJO, Roberto Manhães. **Modelo de simulação para avaliação do fluxo de transporte rodoviário de sondas de perfuração terrestre de poços de petróleo**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Balança comercial do setor**: ano base 2014. Disponível em: <<http://www.bracelpa.org.br/bra2/sites/default/files/estatisticas/rm39balancacomercial58-fevereiro2014.pdf>> acesso em: 27 dez. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CELULOSE E PAPEL (BRACELPA). **Relatório Estatístico Florestal**: ano base 2005. Disponível em: <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/bitstream/handle/123456789/7745/Bracelpa-Relatorio_Estatistico_Florestal-2005.pdf?sequence=1> acesso em: 27 dez. 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF**: ano base 2012. Disponível em: <http://www.abraflor.org.br/estatisticas/ABRAF13/ABRAF13_BR.pdf>. Acesso em: 24 ago. 2013.

BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/ Logística Empresarial**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BARTH, Mateus Bergesch; MICHEL, Fernando Dutra. **Dimensionamento de uma frota de veículos com foco na redução de custos**: estudo de caso. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2012.

BONASSER, U. O. **Meta-heurísticas híbridas para solução do problema de roteirização de veículos com múltiplos depósitos e frota heterogênea fixa:** aplicação na Força Aérea Brasileira. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2005.

BRITO, Tiago Barros; BOTTER, Rui Carlos. **Uma comparação conceitual entre as metodologias de simulação discreta e a contínua como elemento impulsionador da simulação híbrida.** Revista Eletrônica Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento, v.6, n.2, p. 202-225, Rio de Janeiro.

CAPLICE, C. G.; SHEFFI, Y. **Optimization based procurement for transportation services**, Journal of Business Logistics, v. 24, p.109-128, 2003.

CARLSSON, D.; D'AMOURS, S.; MARTEL, A.; RONNQVIST, M. **Supply chain management in the pulp and paper industry.** Interuniversity Research Center on Enterprise Networks, Logistics and Transportation (CIRRELT), Université Laval, Canada, 2006.

CARLSSON, D.; RÖNNQVIST, M; WESTERLUND, A. **Extraction of logs in forestry using operations research techniques.** Dept of Mathematics, Linköpings Universitet, 1998.

CASTRO NETO, L. R. **Modelagem e Simulação da Cadeia Produtiva do Minério de Ferro.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CHWIF, Leonardo; MEDINA, Afonso. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos.** 2ª ed. São Paulo: Ed. Leonardo Chwif, 2007.

_____. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos.** 4ª ed. São Paulo: Ed. Leonardo Chwif, 2014.

COSSENS, P. **Evaluation of ASICAM for truck scheduling in New Zealand.** Logging Industry Research Organisation, v. 18, 1993.

CUNHA, C. B. **Algoritmos para roteamento e programação de veículos no contexto da distribuição física.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica

da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 1991.

_____. **Uma contribuição para o problema de roteirização de veículos com restrições operacionais.** Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 1997.

_____. **Aspectos práticos da aplicação de modelos de roteirização de veículos a problemas reais.** *Transportes*, v. 8, p. 51 – 74, 2000.

D'AMOURS, Sophie; RONNQVIST, Mikael; WEINTRAUB, Andres. **Using Operational research for supply chain planning in the forest products industry.** *Information Systems and Operational Research Journal (INFOR)*, v. 46, p. 265-281, 2008.

DEPARTAMENTO DE ECONOMIA RURAL (DERAL). **Análise da conjuntura agropecuária:** outubro, 2012. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/produtos_flor_estais_2012_2013.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2014.

DUANMU, Jun; TAAFE, Kevin. **Measuring Manufacturing Throughput Using Takt Time Analysis and Simulation.** *Winter Simulation Conference*, 2007.

EPSTEIN, R.; MORALES, R.; SERON, J.; TRAVERSO, P.; WEINTRAUB, A. **A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries.** *Interfaces*, v. 26, p. 1-12, 1996.

EPSTEIN, Rafael; RONNQVIST, Mikael; WEINTRAUB, Andres. **Forest Transportation.** *Handbook Of Operations Research In Natural Resources International Series*, v. 99, p. 391-403, 2007.

FERREIRA NETO, João. **Modelo de Simulação para o dimensionamento da frota de contêineres movimentada por navios em rota dedicada.** Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FORSBERG, M.; FRISK, M. **FlowOpt:** a decision support tool for strategic and tactical transportation planning in forestry. *International Journal of Forest Engineering*, v. 16, p. 101-114, 2005.

GOULD, J. **The Size and Composition of a Road Transportation Fleet.** Operational Research Quarterly, v. 20, 1969.

HACHEMI, Nizar El; GENDREAU, Michel; ROUSSEAU, Louis Martin. **A hybrid constraint programming approach to the log-truck scheduling problem.** Annals of Operations Research, v. 184, p. 163-178, 2011.

HOFF, A.; ANDERSSON, H.; CHRISTIANSEN, M.; HASLEC, G.; LOKKETANGEN, A. **Industrial Aspects and Literature Survey: Fleet Composition and Routing.** Computers & Operations Research, v. 37, n. 12, p. 2041-2061, 2010.

JUVENAL, Thaís; MATTOS, René. **O setor florestal no Brasil e a importância do reflorestamento** – BNDES Setorial, Rio de Janeiro, 2002.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBA). Relatório de Indicadores de desempenho do setor: ano base 2014. Disponível em: <http://www.iba.org/shared/iba_2014_pt.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2015.

KIRBY, D. **Is Your Fleet the Right Size.** Operational Research Quarterly, v. 10, 1959.

LINNAINMAA, S.; SAVOLA, J.; JOKINEN, O. **EPO: A knowledge based system for wood procurement management.** Trabalho apresentado na Annual Conference on Artificial Intelligence, Montreal, 1995.

LOPES, Harlenn dos Santos. **Modelagem e Simulação como Ferramentas ao Diagnóstico Operacional de Sistemas:** Estudo Aplicado ao Transporte de Minério de Ferro na Hidrovia do Araguaia-Tocantins. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008.

MACHADO, Leandro Ruiz. **Dimensionamento de corte, carregamento e transporte do eucalipto.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Economia de São Paulo, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2014.

MASIERO, Livia Sanches. **Proposta de dimensionamento de frota para uma transportadora.** Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Brasil com Florestas:** Oportunidades para o desenvolvimento de uma economia florestal e reestruturação necessária do setor, 2012.

MOLE, R. H. **Dynamic Optimization of Vehicle Fleet Size.** Operational Research Quarterly, v. 26, 1975.

MOTA, D. de O.; PEREIRA, N. N.; BOTTER, R. C.; MEDINA, A. C. **Physical objects on navigation channel simulation models.** Simulation Conference (WSC), 2013 Winter (pp. 3475–3485).

MOURAD, F. **O problema de roteirização de veículos com carga completa e janelas de tempo.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2005.

MUNDIM, João Umbiruçu Campos. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para a colheita e transporte de cana-de-açúcar.** Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OSÓRIO, Estela Gonçalves. **Indústria de papel e celulose:** estudo de caso da implantação da VCP florestal no extremo sul do Rio Grande do Sul. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) – Departamento de Ciências Econômicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

PALMGREN, M.; RONNQVIST, M.; VARBRAND, P. **A near-exact method for solving the log-truck scheduling problem.** International Transactions in Operational Research, v. 11, p. 447- 464, 2004.

PALMGREN, Myrna. **Optimal Truck Scheduling:** Mathematical Modeling and Solution by the column generation principle. Tese (PHD) – Department of Mathematics, Linköping Institute of Technology, Sweden, 2005.

PALMGREN, Myrna. **Optimisation Methods for Log Truck Scheduling,** Linköpings Universitet, Suécia, 2001.

PALMGREN, Myrna; RONNQVIST, Mikael; VARBRAND, Peter. **A solution approach for log truck scheduling based on composite pricing and branch and bound.** International Transactions in operational research. v.10, p. 433-447, 2003.

PARIKH, S. C. **On a Fleet Sizing and Allocation Problem**. Management Science, v. 23, p. 972-977, 1997.

PEGDEN, C. D.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. **Introduction to simulation using SIMAN**. New York: Ed. McGraw-Hill, 1995.

ROCHA, Pedro P. F. **Modelo de Dimensionamento de Frota de Helicópteros para um Sistema de Distribuição Física de Pessoas Voltado às Atividades Offshore de Exploração e Produção de uma Bacia Petrolífera**: Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Produção Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis (2001).

ROCO, A. **Uma abordagem de resolução integrada para os problemas de roteirização e carregamento de veículos**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

RÖNNQVIST, M.; RYAN, D. **Solving truck despatch problems in real time**. Trabalho apresentado na 31ª *Annual Conference of the Operational Research Society of New Zealand*, 165-172, 1995.

RONNQVIST, Mikael. **Optimization in forestry**. Mathematical Programming Journal. v. 97, p.267-284, 2003.

SAHLIN, H. **A solution approach for dispatch problems arising in vehicle routing**. Dept of Mathematics, Linköpings Universitet, 1998.

SEIXAS, Fernando. **Uma metodologia de seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira**. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1992.

SEIXAS, Fernando; WIDMER, João Alexandre. **Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira utilizando-se de programação linear não inteira**. IPEF, v. 46, p.107-118, 1993.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. **Sistema Nacional de Informações Florestais**, 2014. Disponível em: <<http://www.florestal.gov.br/snif/>>. Acesso em 30 dez. 2014.

SOUSA, Roberto Antonio Ticle de Melo. **Análise do Fluxo de Transporte Rodoviário de Toras Curtas de Eucalipto para algumas Indústrias de Celulose e de Chapas de Composição no Estado de São Paulo**. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

SOUSA, Roberto Antonio Ticle de Melo; RODRIGUEZ, Luiz Carlos Estraviz; SEIXAS, Fernando; CAIXETA FILHO, José Vicente. **Eficiência e Otimização do Transporte Principal de Toras Curtas de Eucalipto**. Scientia Forestalis, n.62, p. 130-146, 2002.

STEIN, Gustavo Henrique; GUERREIRO, Érico Daniel R.; CARASCHI, José C. **Análise operacional do carregamento de toras de Eucalyptus**. Revista da Madeira, n.135, 2013.

STRINGHER, F. G. **Designação de Rotas para Frota Dedicada em uma Rede de Distribuição de Linha Branca**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

TEIXEIRA, Roberto G. **Heurísticas para o Problema de Dimensionamento Roteirização de uma Frota Heterogênea Utilizando o Algoritmo Out-of-Kilter**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2001.

TONELLO, Kelly Cristina; COTTA, Michele Karina; ALVES, Ricardo Ribeiro; RIBEIRO, Carmelita de F. Amaral; POLLI, Henrique Quero. **O Desenvolvimento do Setor Florestal Brasileiro**. Revista da Madeira, São Paulo, v.112, 2008.

VEGA, Daniel Andrés Marinado; PÉREZ, Mónica Alicia Matamala. **Reprogramación de la asignación de camiones para el transporte de productos forestales bajo um enfoque multiobjetivo**. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Industrial, Concepción, 2007.

VIEIRA, L. A. N. **Setor florestal em Minas Gerais: caracterização e dimensionamento**. Monografia (Graduação em Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

WEINTRAUB, A.; EPSTEIN, R.; MORALES, R.; SERON, J.; TRAVERSO, P. **A truck scheduling system improves efficiency in the forest industries.** Interfaces, v. 26, p. 1-12, 1996.

WYATT, J. K. **Optimal Fleet Size.** Operational Research Quarterly, v. 12, 1961.

ANEXOS

ANEXO 1 – Exemplo do tratamento dos dados, com a retirada de *outliers*

Neste anexo é apresentado o método aplicado para a retirada dos *outliers* das bases de dados recebidas. Para isso, a amostra de dados referente à operação da fábrica (descarregamento das toras de madeira no ponto de consumo) será utilizada como exemplo.

Segundo Chwif e Medina (2015) todo levantamento de dados está sujeito a valores não usuais, que são conhecidos como *outliers* e as razões mais comuns para o seu surgimento são erros na coleta de dados ou eventos raros.

Para a identificação de *outliers* na amostra de dados dessa dissertação foi utilizado o método indicado por esses dois autores, que consiste na construção de um intervalo de valores a partir dos quartis da amostra.

O primeiro quartil (Q1) é o valor que deixa 25% dos dados à sua esquerda, o segundo quartil (Q2) é a mediana da amostra e o terceiro quartil (Q3) deixa 75% dos dados à sua esquerda. Para a aplicação desse método se faz necessário considerar a diferença entre Q3 e Q1, que é definida como A, amplitude interquartil (equação 9).

$$A = Q3 - Q1 \quad (9)$$

Na amostra referente à etapa de operação na fábrica, utilizada como exemplo, os valores encontrados foram:

- Primeiro Quartil: $Q1 = 8 \text{ minutos}$
- Terceiro Quartil: $Q3 = 15 \text{ minutos}$
- Amplitude Interquartil: $A = 7 \text{ minutos}$

Um valor é considerado como *outlier* moderado se estiver abaixo de $Q1 - 1,5A$ (limite inferior) ou acima de $Q3 + 1,5A$ (limite superior) e considerado como *outlier* extremo qualquer valor que estiver abaixo de $Q1 - 3A$ ou acima de

$Q3 + 3A$ (CHWIF; MEDINA, 2015). Na Tabela 10 são apresentados os valores para os *outliers* moderado e extremo.

Tabela 10 - Valores dos *outliers* moderado e extremo para amostra de operação na fábrica

Tipo de <i>Outlier</i>	Limite inferior	Limite Superior
Moderado	- 0,002	00:25:30
Extremo	- 0,004	00:36:00

Fonte: Dados da pesquisa

Com a análise da tabela, pode-se perceber que os limites inferiores apresentaram valores negativos e, como os dados da amostra se referem a tempos de operação, tais limites foram desconsiderados, adotando-se somente os superiores. Para a operação na fazenda, portanto, todas as observações que apresentarem tempo superior a 25 minutos e 30 segundos serão consideradas como *outlier* moderado e todas aquelas que apresentarem tempo superior a 36 minutos serão consideradas como *outlier* extremo.

A Figura 38 traz um gráfico com os dados referentes à operação na fábrica, durante as 8 semanas de análise e, pode-se perceber visualmente que de fato existem valores discrepantes na amostra.

Figura 38 - Amostra de dados da operação na fábrica com *outliers*. Fonte: Dados da pesquisa

Com a análise do gráfico é possível perceber que existem observações em que o tempo de operação na fábrica foi superior a 2 horas. Segundo Chwif e Medina (2015) apesar de normalmente ser necessário eliminar todos os *outliers* encontrados, nem sempre esse é o procedimento mais correto, pois, às vezes, trata-se de um valor que reflete uma característica própria do sistema. Os autores sugerem que, nesse momento, aspectos como o bom senso e a honestidade devem ser levados em consideração.

Dessa forma, de comum acordo com os responsáveis pela operação na indústria de papel e celulose em estudo, definiu-se que somente os valores superiores a uma hora deveriam ser retirados da amostra. Segundo esse critério, de um conjunto de dados de mais de 2000 observações relacionadas à operação de descarregamento na fábrica, foram retirados 13 *outliers*. A Figura 39 traz a análise da amostra com a retirada desses outliers.

Figura 39 - Amostra de dados da operação na fábrica com *outliers*. Fonte: Dados da pesquisa

Esse procedimento foi adotado para cada uma das etapas do ciclo de transporte apresentadas no capítulo 4. A Tabela 11 apresenta a média e o desvio padrão de cada uma dessas etapas.

Tabela 11 - Tempo médio e desvio padrão das etapas do ciclo de transporte.

Etapas	Média	Desvio Padrão
Operação Fazenda	0:17:35	00:00:38
Operação Fábrica	0:13:30	00:00:40
Setup Limpeza	0:12:08	00:01:57
Setup Amarração	1:27:30	00:08:00
Setup Pesagem	0:11:17	00:00:46
Setup Encerramento	0:11:11	00:01:16

Fonte: Dados da pesquisa

ANEXO 2 – Exemplo de módulos do Arena® e da interface utilizada

Como mencionado, o anexo 2 traz exemplos dos principais módulos do modelo desenvolvido em Arena® para a simulação do sistema de transporte principal de madeira da indústria de papel e celulose estudada. Além disso, traz a exemplos da interface utilizada na leitura dos dados de entrada e saída do modelo.

Figura 40 - Exemplo das lógicas de criação dos caminhões, ida para as fazendas e da escolha do destino.