UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA

JOÃO UMBIRUÇU CAMPOS MUNDIM

**USO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA O
DIMENSIONAMENTO DE FROTA PARA COLHEITA E
TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR**

São Paulo
2009

JOÃO UMBIRUÇU CAMPOS MUNDIM

**USO DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS PARA O
DIMENSIONAMENTO DE FROTA PARA COLHEITA E
TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia de Sistemas Logísticos.

Área de Concentração: Engenharia de Sistemas
Logísticos

Orientador: Prof. Dr. Rui Carlos Botter

São Paulo
2009

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

São Paulo, de abril de 2009.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Mundim, João Umbiruçu Campos

**Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar / J.U.C. Mundim. -- ed.rev. -- São Paulo, 2009.
104 p.**

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

1. Sistemas discretos (Simulação) 2. Logística 3. Transportes 4. Cana-de-açúcar I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II. t.

FOLHA DE APROVAÇÃO

João Umbiruçu Campos Mundim

Uso de Simulação de Eventos Discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção do
título de Mestre em Engenharia de Sistemas
Logísticos

Área de concentração: Sistemas Logísticos

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____ Assinatura: _____

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado a três Marias que têm sido fundamentais na minha vida:

À Maria, minha mãe, que me deu à luz, ensinou-me as primeiras letras e passos e continua a me ensinar com a sua simplicidade e amor infindável.

À Ângela Maria, minha esposa, fonte inesgotável de amor, paciência, carinho e a grande incentivadora para a minha melhoria como ser humano.

À Maria Cristina, minha sobrinha, que me ensina todos os dias o que é o amor verdadeiro e que me faz lembrar que a sapiência se revela nas coisas mais simples da vida.

Dedico ainda à memória de meu pai que, junto com minha mãe, ensinou-me o caminho da retidão e a importância do respeito ao próximo e à natureza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, quem quer que seja Ele, por nos dar a luz e o pão de cada dia.

Ao estímulo, confiança e paciência inesgotáveis de minha esposa.

À Tegma Gestão Logística S.A., que me permitiu conciliar as atividades acadêmicas e profissionais.

Ao Luciano Gabas Stuchi, com quem passei por maus momentos e aprendi muito sobre o que é ter esperança de um futuro melhor.

Ao João Eduardo A. R. da Silva, cujos alunos invejo, pela revisão do texto e pelas dicas valiosas.

Às novas amizades formadas durante as aulas do mestrado, especialmente ao Bonassa, David e Marcelo Aragão, com os quais vejo o mundo por ângulos diferentes.

Aos colegas de trabalho da Tegma, especialmente à equipe de Projetos, que muito contribuem para meu aperfeiçoamento profissional e pessoal.

Aos meus professores da Politécnica, em especial ao Prof. Dr. Cláudio Barbieri da Cunha, mestre exemplar.

Ao Elizio Rodrigues da Silva e Eduardo Kimura, que mesmo sem perceber mudaram o curso de minha vida.

E um agradecimento especial ao meu orientador Prof. Dr. Rui Carlos Botter que, com seu jeito peculiar, nunca se furtou a uma palavra de incentivo e que esteve sempre pronto para a orientação deste trabalho e sem cuja confiança eu não teria alcançado esta posição.

“Tudo que nós vividamente imaginamos,
ardentemente desejamos, sinceramente
acreditamos e entusiasticamente
colocamos ação, inevitavelmente tornar-
se-á realidade!”

Autor desconhecido

RESUMO

MUNDIM, J. U. C. **Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota de colheita e transporte de cana-de-açúcar**. 2009. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

A produção brasileira de cana-de-açúcar foi de cerca de 426 milhões de toneladas na safra 2006/2007, tendo o estado de São Paulo participado com aproximadamente 264 milhões desse total. Esses valores conferem ao país a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, comprovando a importância do setor sucroalcooleiro na economia brasileira. As paradas na indústria açucareira, caracterizadas pela interrupção da produção por falta de matéria-prima, podem afetar negativamente a qualidade do produto final. Para que o abastecimento de cana na moenda seja feito de forma contínua é importante que o dimensionamento da frota para execução das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar, até a entrega dela na usina, seja realizado de forma criteriosa, sob pena de se incorrer em elevado custo operacional. Estas operações podem ser executadas de diversas maneiras, variando parâmetros desde o tipo de corte (corte manual ou mecanizado) como o tipo de equipamento utilizado (carregadoras, colhedoras, tratores-reboque, etc.). Devido à interdependência dos processos, é possível a ocorrência de tempos não produtivos (filas) nos locais de carregamento e descarga, justamente pela quantificação desbalanceada dos recursos ou devido à variabilidade dos tempos de processo. Este trabalho aborda o problema de dimensionamento da frota de equipamentos utilizados no CCT, utilizando-se a técnica de simulação de eventos discretos. Este problema consiste, basicamente, em determinar a quantidade de equipamentos necessários ao cumprimento das operações citadas, de forma a maximizar a produção do sistema como um todo, minimizando o custo operacional. Foi desenvolvido um modelo de simulação que representa com fidelidade as operações de uma usina de cana-de-açúcar com capacidade de moagem de 19.500 t/dia. Investigou-se necessidade de equipamentos frente a diferentes políticas de despacho da frota de caminhões, comparando o despacho estático de conjuntos de caminhões por frente de corte *versus* despacho Dinâmico; avaliou-se também a adoção de sistema *drop and hook* (D&H) para as composições de transporte. O modelo desenvolvido foi capaz de mostrar como as decisões logísticas afetam a produtividade da frota e, conseqüentemente, o custo do sistema. O cenário com despacho dinâmico e sem adoção de D&H apresentou o melhor resultado de custo operacional. Os resultados indicaram também que a adoção de reboques reserva na lavoura é economicamente viável. Como o modelo é bastante flexível quanto às configurações de cenários, outras combinações de fatores podem ser avaliadas.

Palavras-chave: Sistemas Discretos (Simulação), Transportes, Logística, Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

MUNDIM, J. U. C. Use of discrete event simulation to the sizing of the harvest and transportation of sugar cane fleet f. 2009. 106 p. Essay (Master's degree) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

The Brazilian production of cane sugar was around 426 million tonnes in the 2006/2007 season, the state of São Paulo participated in about 264 million from that sum. These figures give the country the position of the world's largest sugar cane producer, showing the importance of sugar-alcohol section in the Brazilian economy. The halts on the sugar industry, characterized by the interruption of production due to the lack of raw material, may adversely affect the quality of the final product. For the supply of cane in the milling to be done on a continuous way, it is important that the size of the fleet which runs the cutting, loading and transportation of sugar cane (CCT) operations up to its delivery in the mill- is carried out carefully, under penalty of incurring high operational costs. These operations might be implemented in different ways, ranging parameters from the kind of cut (manual or mechanical cutting) as the kind of equipment (loaders, harvesters, tractors, trailers, etc.). Due to the interdependence in the processes, it is possible the occurrence of non-productive time (queues) in place of loading and unloading, due to unbalanced quantifying of resources or due to the variability of time during the process. This paper approaches the problem of the equipment fleet sizing used in the CCT, using the simulation of discrete events technique. This problem consists in determining the necessary amount of equipment to perform the above operations, in order to maximize the production of the system as a whole, minimizing the operational costs. We developed a simulation model that represents with accuracy the operations of a sugar cane plant with a milling capacity of 19,500 ton / day. The need for equipments facing different political dispatch from the fleet of trucks has been investigated, by comparing the dispatch of Static sets of trucks for each cutting front versus dynamic dispatch and the use of drop and hook system (D & H) for the transportation setting. The developed model was able to show how the logistics decisions affect the fleet productivity and, consequently, the cost of the system. The scenario with dynamic dispatch and no D & H use had the best results of operational costs. The results also indicated that the use of backup trailers in farming is economically viable. As the model is quite flexible concerning scenario settings, other combinations of factors can be evaluated.

Keywords: Discrete Systems (Simulation), Transport, Logistics, Sugar cane.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVO.....	3
1.3 MOTIVAÇÃO.....	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	5
2. SISTEMAS DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR	7
2.1 DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO SISTEMA CCT.....	7
2.2 VISÃO SISTÊMICA DO CCT	11
2.3 SUBSISTEMAS DO CCT.....	12
2.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO	15
2.5 RECURSOS DO SISTEMA.....	16
3. REVISÃO DA LITERATURA.....	17
4. O QUE É SIMULAÇÃO?.....	24
4.1 POR QUE UTILIZAR SIMULAÇÃO?	24
4.2 MODELO DE SIMULAÇÃO	26
4.3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA.....	28
4.4 O PROCESSO DE SIMULAÇÃO	29
4.5 MÉTODO DE MONTE CARLO	31
5. O PROBLEMA MODELADO POR SIMULAÇÃO	33
5.1 OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DO SISTEMA	33
5.1.1. Frentes de corte.....	34
5.1.2. Equipamentos de transporte.....	36
5.1.3. Atividades na área industrial	36
5.2 MODELO CONCEITUAL.....	37
5.3 DADOS DE ENTRADA	47
5.4 PREMISSAS ECONÔMICAS	51
6. RESULTADOS.....	52
6.1 PROJETO EXPERIMENTAL.....	52
6.2 CENÁRIO BASE	53
6.3 AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS SEM ADOÇÃO DE BATE-VOLTA.....	56
6.4 AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS COM ADOÇÃO DE BATE-VOLTA.....	71
6.4.1. Série 8 – cenário base com bate-volta	71
6.4.2. Série 9 – 32 rodotrens com bate-volta e despacho estático.....	72
6.4.3. Série 10 – 27 rodotrens com bate-volta e despacho dinâmico.....	72
7. CONCLUSÕES	81
7.1 RECOMENDAÇÕES.....	82
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
APÊNDICES.....	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática das operações de CCT	8
Figura 2 - Hilo para descarga de cana inteira.....	9
Figura 3 - Descarregamento de cana picada por báscula lateral	10
Figura 5 - Etapas de desenvolvimento de um modelo de simulação	31
Figura 6 - Colhedora de Cana.....	35
Figura 7 - Trator-transbordo.....	35
Figura 8 - Colheita da cana.....	36
Figura 9 - Transbordo da cana para o caminhão	36
Figura 10 - Módulos do simulador	38
Figura 11 - Modelo conceitual do simulador de CCT	39
Figura 12 - Módulos da rotina de cálculo de vazão.....	40
Figura 13 - Ciclo do trator transbordo	41
Figura 14 - Lógica para o cálculo da capacidade de carregamento da frente de corte	45
Figura 15 - Fluxograma conceitual da frente de corte	46

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Velocidade média do Rodotrem.....	49
Gráfico 2– Série 1:Produção e tempo de campo	57
Gráfico 3 – Série 2: 27 rodotrens com reboque reserva na lavoura.....	59
Gráfico 4– Série 3: 32 rodotrens com reboque reserva na lavoura.....	60
Gráfico 5 - Série 4: 27 rodotrens sem reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico	61
Gráfico 6 - Série 5: 27 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico.....	63
Gráfico 7 - Série 6: 32 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico.....	64
Gráfico 8 -Série 7: custo da produção vs frota de caminhões vs frota de reboques reserva....	68
Gráfico 9 - Série 7: produção diária vs frota de caminhões vs frota de reboques reserva.....	68
Gráfico 10 - Tempo de usina vs Escravo vs Reb. Usina.....	80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de caminhões (SILVA, 2006)	11
Quadro 2 - Medidas de efetividade do sistema CCT	15
Quadro 3 - Recursos do sistema CCT	16
Quadro 4 - Variável auxiliar para cálculo da vazão.....	44
Quadro 5 - Lista de fatores dos experimentos	52
Quadro 6 – Valores associados a níveis de cada fator	53
Quadro 7 - Frota de caminhões do cenário base.....	55
Quadro 8 - Fatores e níveis da série 7 de cenários	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Distância média das frentes de corte	48
Tabela 2 – Relação de itens de manutenção considerados no modelo de simulação	50
Tabela 3 - Premissas econômicas	51
Tabela 4 – Série 1: 27 rodotrens sem reboque reserva na lavoura, despacho estático	57
Tabela 5 – Série 2 – 27 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho estático	58
Tabela 6 – Série 3: 32 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho estático	60
Tabela 7 – Série 4: 27 rodotrens sem reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico.....	61
Tabela 8 – Série 5: 27 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico	62
Tabela 9 – Série 6: 32 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico	64
Tabela 10 – Série 7: 28 a 31 rodotrens, com reboque reserva e despacho dinâmico	66
Tabela 11 – Melhores resultados de cada série sem bate-volta na usina	69
Tabela 12 – Melhores resultados de cada série sem bate-volta na usina	70
Tabela 13 – Série 8: 27 cenário base com bate-volta na usina.....	73
Tabela 14 – Série 9: 32 rodotrens com e bate-volta na usina.....	73
Tabela 15 – Cenários com 27 rodotrens e diferentes quantidades de cavalo-escravo e reb. reserva na usina	74

Capítulo**1****1. INTRODUÇÃO**

O presente trabalho foi redigido como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre na especialidade de Engenharia de Sistemas Logísticos, do curso multidisciplinar dos Departamentos de Engenharia Naval, Produção e Transportes da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

1.1 APRESENTAÇÃO

A produção brasileira de cana-de-açúcar foi de cerca de 426 milhões de toneladas na safra 2006/2007, tendo o estado de São Paulo participado com aproximadamente 264 milhões desse total (UNICA, 2008). Esses valores conferem ao país a posição de maior produtor mundial de cana-de-açúcar, comprovando a importância do setor sucroalcooleiro na economia brasileira.

A safra de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil tem início no mês de maio com término no mês de novembro, período que é caracterizado pela menor incidência de chuvas e pelos melhores índices de maturação da cana, em termos do teor de sacarose.

As paradas na indústria açucareira, caracterizadas pela interrupção da produção por falta de matéria-prima, são muito prejudiciais, uma vez que a qualidade da matéria-prima e do produto final pode ser negativamente afetada, razão pela qual a moagem nas usinas deve ser ininterrupta. Além disso, o custo de reinício de operação de uma usina é bastante elevado. Visando minimizar qualquer interrupção, é necessário um trabalho conjunto entre as áreas agrícola e industrial das usinas. Ações devem ser tomadas para programar as etapas de corte, a

escolha de variedades adequadas com maiores teores de sacarose e o processamento quase que imediato da matéria-prima para evitar perdas e deterioração de açúcar.

Para que o abastecimento de cana na moenda seja feito adequadamente é importante que as operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar, até a entrega dela na usina, sejam feitas com eficiência. Estas operações podem ser executadas de diversas maneiras, variando parâmetros desde o tipo de corte (corte manual ou mecanizado) como o tipo de equipamento utilizado (carregadoras, colhedoras, tratores-reboque, etc.). Devido à interdependência dos processos, é possível a ocorrência de tempos não produtivos (filas) nos locais de carregamento e descarga, justamente pela quantificação desbalanceada dos recursos ou devido à variabilidade dos tempos de processo.

Outros procedimentos administrativos como trocas de turno, paradas para refeições e as paradas para manutenção automotiva também interferem no sistema produtivo, reduzindo a disponibilidade dos equipamentos para a plena operação.

Em muitas usinas a determinação do número de equipamentos necessários para a colheita (carregadoras, colhedoras e tratores) assim como a do número de caminhões necessários por frente de corte são feitas no início do dia pelo responsável do transporte, baseando-se geralmente no conhecimento prático, sem respaldo científico.

Embora o processo de CCT seja complexo, as operações são muito bem definidas, podendo ser detalhadas por meio de fluxogramas. SILVA (2006) afirma que outras abordagens diferentes da simulação não permitem analisar a dinâmica a interação entre os equipamentos de maneira adequada.

SILVA (2006) justificou assim a escolha de simulação para auxiliar o planejamento das operações de CCT:

A escolha de simulação para auxiliar o planejamento das operações de CCT para abastecimento contínuo de cana para moagem foi devida à complexidade destas operações; não apenas pela interação entre os equipamentos, mas pela variabilidade associada às condições ambientais (topografia, umidade, configuração de talões) em que tais equipamentos operam. Tal variabilidade é relacionada não apenas às mudanças nas condições operacionais, como também à ocorrência de eventos não esperados, como a quebra de máquinas e veículos. A simulação contempla a interação entre os equipamentos e a variabilidade das operações tal qual ocorrem no sistema real. (SILVA, J. E. A. R., 2006, p. 7)

Através de um modelo de simulação, alterações nas configurações do sistema podem ser rapidamente avaliadas, evitando-se o dispêndio de testar esses sistemas na prática, ou tomar decisões sem qualquer critério. Uma vez construído o modelo, o planejamento estratégico da produção pode ser feito com maior segurança, visto que essa ferramenta pode ser utilizada facilmente para testar o impacto de novos cenários propostos.

Face à importância do setor sucroalcooleiro na economia nacional, é de grande relevância o desenvolvimento de ferramentas de suporte à tomada de decisão que possibilitem alcançar uma redução dos custos de produção do açúcar e do álcool. Mediante análise adequada, a tecnologia de simulação permite identificar as restrições do processo de produção e auxilia na tomada de decisão sobre as ações de melhoria que devem ser implementadas. No caso específico da cana-de-açúcar, dada a dimensão do setor, comprovada pelo volume de material trabalhado ou pela quantidade de equipamentos envolvidos, qualquer alteração proposta no sentido de redução de custo representa um potencial de economia muito significativo.

1.2 OBJETIVO

Esta dissertação aborda o uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de recursos para o sistema de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar, necessários para a realização da safra.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma ferramenta computacional, baseada em simulação estocástica, capaz de representar o despacho de caminhões para o transporte de cana-de-açúcar tanto pelo método de despacho estático quanto pelo método de despacho dinâmico.

A simulação poderá ser utilizada pelos gerentes agrícolas para os planejamentos estratégicos (dimensionamento da frota, definição de modelo de equipamentos), bem como para o planejamento tático, auxiliando na definição da localização das frentes de corte.

Como objetivo secundário buscou-se comparar duas diferentes abordagens para a administração da frota de caminhões, sendo uma delas a adoção do desengate de composições na usina e outra, com a descarga direta das composições de carga tal como foram montadas na lavoura.

1.3 MOTIVAÇÃO

Conforme cita *Marcos Sawaya Jank*, presidente da ÚNICA:

A cana-de-açúcar tem quase 500 anos de história neste país, sendo que nos últimos 30 anos, graças aos empreendedores do setor sucroalcooleiro, a atividade tomou o leme da eficiência no universo da agroenergia, deixando de ser apenas uma planta alimentícia para se tornar um novo paradigma da energia limpa e renovável, na área dos combustíveis e da eletricidade.

As novas gerações de gestores das usinas de açúcar, atentos a esse movimento evolutivo, têm reconhecido que somente terão um lugar garantido nesse novo cenário se adotarem técnicas modernas de gestão e planejamento. A logística de CCT enquadra-se na categoria das atividades que requerem a adoção dessas técnicas, e é um campo no qual se percebe facilmente as vantagens da aplicação das modernas técnicas da pesquisa operacional.

Neste sentido, o uso de técnicas de modelagem matemática contribui de maneira incisiva e positiva, como ferramentas de apoio à decisão, aos executivos e gestores destas empresas.

Então, com o intuito de contribuir com a difusão de técnicas de modelagem, adotou-se esta linha de pesquisa, reforçada pelo fato de não terem sido encontrados na literatura pesquisada trabalhos relativos a dimensionamento de frota, em que estejam presentes, concomitantemente, as técnicas de simulação e rotinas de despacho de frota de composições rodoviárias.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A dissertação está organizada em 7 capítulos. O capítulo 1 apresenta o tema, sua importância dentro do contexto brasileiro, o objetivo e a motivação para o seu desenvolvimento.

O capítulo 2 trata da descrição das operações de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar.

No capítulo 3 apresenta-se a revisão bibliográfica do tema, com apresentação de aplicações de simulação computacional no setor sucroalcooleiro.

O capítulo 4 conceitua a simulação de sistemas, apresentando as terminologias utilizadas, vantagens e desvantagens de sua aplicação e a estrutura de desenvolvimento de um projeto de simulação.

No capítulo 5 são descritos o modelo de simulação de CCT desenvolvido e os parâmetros gerais de configuração de cenários.

O capítulo 6 contempla os cenários analisados e os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 7 encontra-se a conclusão do trabalho e as considerações finais.

2. SISTEMAS DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR

2.1 DESCRIÇÃO SUMÁRIA DO SISTEMA CCT

As operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar podem ser executadas de diversas maneiras, variando-se os parâmetros, desde o tipo de corte (corte manual ou mecanizado) como o tipo de equipamento utilizado (carregadoras, colhedoras, tratores-reboque, etc.).

O corte da cana pode ser manual ou mecanizado. No sistema de corte manual, a prática mais comum é o corte da cana inteira e disposição em linhas, que é realizada após a queima do canavial, e posterior carregamento mecânico em caminhões ou carretas tracionadas por tratores. No corte mecanizado, colhedoras automotrizes executam o corte, a limpeza, a picação em toletes, e a descarga da cana em um veículo, que pode ser um caminhão ou uma carreta tracionada por um trator. Para a colheita mecânica, uma prática mais recente é a utilização de transbordos (caçambas tracionadas por tratores). Neste sistema os caminhões não entram na área de colheita e os transbordos executam um transporte intermediário: recebem a cana picada das colhedoras e transferem a carga para os caminhões que permanecem fora do talhão.

O transporte da cana é predominantemente do tipo rodoviário, com o emprego de caminhões que carregam cana inteira (colheita manual) ou cana picada em toletes de 20 a 25 cm (colheita mecânica). Há vários tipos de composições de conjuntos de transporte, sendo os

mais comuns o caminhão com um reboque (Romeu e Julieta), o caminhão com dois reboques (Treminhão) e o cavalo-mecânico com dois semi-reboques (Rodotrem). Dependendo do tipo de configuração da frota, no campo e/ou na usina, podem ser adotadas carretas-reserva como estratégias para dinamizar a produção, que potencializa o uso do cavalo-mecânico ou caminhão.

Na Figura 1 encontra-se a representação esquemática do sistema CCT.

Figura 1 - Representação esquemática das operações de CCT (Hahn (1994))

Na usina, os veículos são pesados antes e após o descarregamento, obtendo-se assim o peso real da cana pela diferença entre as duas medidas. Algumas cargas são aleatoriamente selecionadas e amostradas para posterior determinação, em laboratório, do teor de sacarose na matéria-prima.

A cana pode ser descarregada e permanecer em pátio próprio para estocagem. É possível, também, ser estocada nas próprias composições que realizaram o transporte desde a lavoura (pátio sobre rodas) ou, ainda, ser enviada para alimentação direta nas moendas. No primeiro caso, o descarregamento se dá através de pontes rolantes equipadas com garras hidráulicas ou guindaste do tipo *hilo*, em pátio aberto ou em um barracão. Tratando-se de cana picada, o estoque só pode ser feito sobre rodas.

Figura 2 - Hilo para descarga de cana inteira (Fonte: Silva (2006))

O descarregamento da cana picada é realizado com o uso de pontes rolantes, guindastes do tipo *hilo* e também através de um tombador hidráulico para basculamento lateral dos caminhões, ou ainda por pivotamento lateral de caçambas fechadas.

Figura 3 - Descarregamento de cana picada por báscula lateral (Fonte: Silva (2006))

Segundo Hahn (1994), os caminhões canavieiros podem ser classificados nas seguintes categorias:

- a) Caminhões simples (também chamado “Truck”, “Plataforma” ou “Solteiro”) - caminhão com uma carroceria própria.
- b) "Romeu e Julieta" - caminhão plataforma rebocando uma carreta, que no jargão das usinas chama-se "Julieta".
- c) "Treminhão" - caminhão plataforma rebocando duas carretas ou julieta.
- d) Caminhões do tipo Cavalo-mecânico (também chamados “Bate Volta” ou *drop-and-hook*), que não possuem carroceria própria.

Segundo Hahn (1994), o número de frentes de corte trabalhadas diariamente varia de três até mais de 12, de acordo com a quantidade de cana estimada em cada frente e a capacidade de moagem diária da usina. Estas frentes encontram-se a diferentes distâncias da usina, fazendo com que a quantidade de caminhões em direção a uma frente de corte seja diferente de outra frente com o mesmo potencial de colheita.

No Quadro 1 estão ilustrados os diferentes tipos de caminhões.

Descrição	Esquema	Nome popular
Caminhão plataforma		“Truck”
Caminhão plataforma com um reboque acoplado		“Romeu e Julieta”
Caminhão plataforma com dois reboques acoplados		“Treminhão”
Cavalo-mecânico com dois semi-reboques acoplados		“Rodotrem”

Quadro 1 - Tipos de caminhões (SILVA, 2006)

2.2 VISÃO SISTÊMICA DO CCT

Segundo Merdith, Wong, Woodhead e Wortman, citados por GUALDA (1995), um sistema pode ser definido como uma coleção de componentes, conectados por algum tipo de interação ou relacionamento, sendo capaz de responder a estímulos ou demandas, e de realizar algum propósito ou função. Cada componente responde ao estímulo de acordo com a sua natureza, porém o estímulo recebido, assim como o comportamento do componente, é condicionado pela sua interação com os demais componentes.

Dentro deste contexto o Sistema CCT abordado aqui pode ser considerado um subsistema dentro do sistema maior que é a Produção de Açúcar.

Para identificar um sistema pelo método do enfoque sistêmico devem ser considerados seus componentes (entidades) e as características (atributos) destes componentes. As entidades são os elementos do sistema que podem ser identificados e processados individualmente. Exemplos de entidades no Sistema CCT incluem os caminhões,

as carregadoras, as colhedoras, os transbordos e os tratores, enfim, todos os elementos que mudam de estado durante a execução das operações.

2.3 SUBSISTEMAS DO CCT

O sistema de produção de cana-de-açúcar pode-ser subdivido em três grandes subsistemas:

- O sistema de produção de cana, responsável pelo trato da terra e pela produção da cana-de-açúcar;
- O sistema de corte, carregamento e transporte de cana (CCT), responsável pela colheita e transporte da cana-de-açúcar;
- O sistema industrial de produção de açúcar, álcool e energia, responsável pela industrialização da cana-de-açúcar.

Neste trabalho o foco é o subsistema CCT, identificado na Figura 4, que representa a relação sistêmica entre o sistema CCT e seu ambiente.

Pela Figura 4 verifica-se que o subsistema CCT está também subdividido em outros subsistemas:

- Subsistema Carregamento: voltado para o carregamento de cana inteira e circulação de tratores dentro do talhão;
- Subsistema Corte Mecânico: relacionado ao corte mecânico da cana-de-açúcar e à circulação de tratores dentro do talhão, sendo que este último componente, embora tenha o mesmo nome de um componente do Subsistema Carregamento, apresenta característica e entidades diferentes. As entidades diferentes são as caixas de transbordo e as características são o fato de que o conjunto trator-transbordo não é desengatado;

- Subsistema Pátio de Engate: associado à formação das cargas e das composições rodoviárias de transporte;
- Subsistema Rodoviário: diz respeito às vias de circulação e às atividades de manutenção dos caminhões e juletas;
- Subsistema Recepção de Cana: representa os equipamentos presentes na indústria propriamente dita, limitando-se à parte externa da unidade industrial, ou seja, desde a balança de pesagem até a mesa alimentadora.

Na interligação destes subsistemas podem-se identificar as entidades que circulam entre eles e que passam por algum tipo de processamento ao longo do Sistema CCT.

Figura 4 - Subsistemas e componentes do sistema CCT (adaptado de Gualda (1995))

2.4 MEDIDAS DE DESEMPENHO

A modelagem de um processo tem como função básica o auxílio à tomada de decisão. Assim, torna-se necessário identificar a capacidade operacional dos equipamentos do sistema em estudo, bem como os níveis de serviço.

Nível de serviço pode ser entendido, conforme GUALDA (1995), como sendo a qualidade do serviço oferecido e, no caso deste trabalho, pode ser exemplificado pelo comprimento de uma fila de caminhões aguardando por descarga.

Já a capacidade operacional de máquinas agrícolas (para efeitos de simplificação consideram-se os caminhões como sendo máquinas agrícolas neste trabalho), conforme metodologia apresentada por Mialhe citada por SILVA (2006), representa a quantidade de trabalho capaz de se executar por unidade de tempo, podendo ser representada pela equação 1.

$$CO = \frac{QT}{T} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

CO = Capacidade Operacional

QT = Quantidade de trabalho executado ou “produção”

T = Unidade de Tempo

As medidas de desempenho do Sistema CCT adotadas neste trabalho, e seus índices de avaliação, estão listados no Quadro 2.

Medida	Índice de análise
Custo da operação	R\$/t
Produtividade dos caminhões	t.cam/dia
Produção diária	t total transportada/dia

Quadro 2 - Medidas de efetividade do sistema CCT

2.5 RECURSOS DO SISTEMA

Os recursos do sistema CCT, e suas associações com os subsistemas, estão listados no Quadro 3.

Subsistema	Recursos
Carregamento	Carregadoras
	Tratores de reboque
Corte mecânico	Colhedoras
	Tratores de reboque
	Transbordos
Pátio de engate	Reboques reservas
	Engatadores
Rodoviário	Caminhões
	Reboques
	Vias de acesso
Recepção de cana	Balança
	Amostrador de cana
	Pátio de engate / desengate
	Mesas de descarga
	Cabine de despacho
	Engatadores

Quadro 3 - Recursos do sistema CCT

3. REVISÃO DA LITERATURA

Segundo SLACK (1997), a atividade de programação é uma das mais complexas tarefas no gerenciamento da produção. Os programadores têm que lidar com tipos diferentes de recursos simultaneamente. As máquinas têm diferentes capacidades e funções e os operadores terão diferentes habilidades. De maneira mais importante, o número de programações cresce rapidamente à medida que o número de atividades e processos aumenta. A tarefa de programação deve ser repetida freqüentemente para permitir respostas às variações de mercado e às mudanças do mix de produtos. Pequenas alterações no *mix* de produtos podem fazer com que os recursos limitadores de capacidade dentro das instalações mudem bastante em um tempo curto, assim, gargalos podem mover-se pela fábrica bastante rapidamente.

KELTON (1998) afirma que, embora simulação não seja a única ferramenta que se possa usar para estudar o sistema produtivo, é um método de escolha freqüentemente utilizado. A razão para isso é que um modelo de simulação pode se tornar complexo, se necessário, para representar o sistema fielmente. Outros métodos podem requerer simplificações demais do sistema para permitir a análise, o que pode questionar a validade do modelo.

O sucesso ou o fracasso de um estudo de simulação depende do estabelecimento de um escopo e do planejamento do projeto (SADOWSKI, 1999). A especificação do estudo deve ser focada na obtenção de resultados de acordo com o escopo estabelecido. Falhas na

obtenção desses compromissos ou o estabelecimento de objetivos que são muito vagos podem levar o projeto ao fracasso.

Na visão de KELTON (1998), a maneira que a simulação é utilizada tem mudado. Ela está sendo empregada mais cedo, na fase de projeto, e está sendo freqüentemente atualizada na medida em que as mudanças estão ocorrendo nos sistemas em operação. Isto fornece um modelo de simulação vivo, que pode ser rapidamente utilizado para análise dos sistemas. A simulação também ocupou a indústria de serviços, na qual ela está sendo aplicada em muitas áreas não tradicionais, como, por exemplo, procedimentos administrativos.

KELTON (1998) também aponta que os fatores que dificultam a simulação de se tornar uma ferramenta universalmente aceita são o tempo de desenvolvimento dos modelos e o conhecimento requerido para o seu desenvolvimento. Com o objetivo de tornar a simulação mais simples de se usar por um número maior de pessoas, há a tendência de desenvolvimento de mais produtos verticais, ou seja, que podem ser customizados para um mesmo tipo de processo. Isso irá permitir aos analistas construir simulações facilmente, utilizando construções de modelagem projetadas para sua área de atuação, diretamente relacionadas com sua realidade. A primeira geração desse tipo de produto está em áreas de aplicação como comunicações, *callcenters* e processos de reengenharia.

HAHN (1994) assim definiu os métodos de despacho de caminhões:

Despacho estático é aquele onde cada caminhão é alocado a uma determinada frente de corte no início do dia. Neste caso o caminhão permanece viajando apenas para esta frente durante todo o dia. No caso de despacho dinâmico os caminhões ficam livres para viajar para qualquer frente. A decisão de qual frente o caminhão se dirigirá é tomada sempre no momento de sua saída da usina.

Abordando o assunto CCT, HAHN (1994) afirma que as usinas normalmente possuem uma frota mista com caminhões próprios e fretados. A frota pode ser homogênea ou ter várias categorias de caminhões com diferentes capacidades e características operacionais.

O transporte é efetuado de forma cíclica entre a usina e os pontos de colheita do produto primário. As principais características deste sistema são que um caminhão, a cada viagem, visita apenas um ponto de suprimento, retornando em seguida à usina. Os pontos de suprimento não são permanentes, podendo variar diariamente em número e localização. Finalmente, uma das características mais importantes deste sistema é a formação de filas, que devem ser minimizadas, tanto nos pontos de fornecimento como na usina.

O problema abordado por HAHN (1994), era o de dimensionar todos os equipamentos para o dia seguinte, sendo a simulação o ferramental utilizado para resolução do problema. A simulação permite uma previsão do que pode acontecer, baseando-se em histórico anterior. Naturalmente, não necessariamente o que foi simulado acontece no dia seguinte. Dessa forma a simulação permite um planejamento tático ou estratégico, mas para o planejamento operacional, para o qual existe a necessidade de decisão rápida do local para onde o caminhão deve ser enviado, a simulação não seria o ferramental mais adequado, uma vez que ela não oferece, necessariamente, uma solução ótima.

Ainda segundo HAHN (1994), existe grande dificuldade no gerenciamento das atividades de carregamento e transporte pois, quando ocorrem mudanças em algumas variáveis envolvidas, é necessário um rápido replanejamento, a fim de se verificar a viabilidade ou não de determinadas mudanças. O objetivo final é manter um fluxo constante de entrega de matéria-prima para moagem, durante 24 horas do dia, ao longo de toda a safra. Como os fatores envolvidos são muitos e os erros muito onerosos, acaba-se tendo uma situação de superdimensionamento dos recursos.

Segundo LOPES (1995) as operações de CCT respondem por 30% a 40% do custo da cana entregue para moagem e, na seqüência desses custos, após a moagem, o transporte é a operação mais cara, seguida pelo carregamento. Assim, chega-se a uma situação em que a

ociosidade no transporte é preferível a uma falta de cana para moagem, assim como a ociosidade de carregadoras e tratores é preferível à perda de tempo dos caminhões aguardando carregamento. Essa situação, segundo o mesmo autor, muda quando a frente de corte deixa de ter carregadoras e passa a ter colhedoras, com custo de capital e operacional bem mais elevados.

COCHRAN & WHITNEY (1977) estudaram o planejamento de um sistema de transporte de cana-de-açúcar considerando os seguintes fatores:

- Capacidade de carregamento;
- Número de equipamentos de transporte;
- Capacidade de carga de cada equipamento de transporte;
- Distância do campo até a indústria;
- Velocidade média dos equipamentos de transporte;
- Tempo gasto para descarregamento na usina.

Para dimensionar a capacidade de abastecimento de cana de um determinado sistema de transporte, os autores tomaram por base a capacidade de carregamento. Se houvesse uma disponibilidade constante de veículos de transporte no campo, o fluxo de cana entregue à indústria (De) seria igual ao fluxo de carregamento (R):

$$De = R \quad \text{(Equação 2)}$$

No entanto, existe uma probabilidade de que em parte do tempo, todos os veículos estejam na usina ou em trânsito. Assim, o fluxo de cana entregue (De) é:

$$De = R(1 - Po) \quad \text{(Equação 3)}$$

Em que $(1 - Po)$ é a probabilidade de, em um determinado momento, pelo menos um equipamento de transporte ou de carregamento estar ocioso (fila para carregamento e/ou espera de veículos).

SEIXAS & WIDMER (1993) aplicaram programação linear inteira para selecionar e dimensionar a frota de veículos para o transporte principal de madeira. Em seu estudo os autores não consideraram os equipamentos de campo, responsáveis pelo carregamento dos caminhões; neste aspecto o trabalho limitou-se a considerar o número de viagens de um veículo no período T; pelo método utilizado (programação linear) não foi possível agregar a variabilidade dos tempos dos processos ao modelo proposto.

WIDMER (1990) analisou a formação de filas nos eventos de carregamento e descarregamento de madeira e cítricos, demonstrando que técnicas de despacho estático contribuem para o baixo aproveitamento da frota. O artigo, entretanto, não indica nenhuma técnica para a análise e soluções de melhoria.

IANNONI (2000) utilizou simulação de sistemas para analisar o processo de descarga de caminhões na usina. O trabalho restringiu-se apenas ao processo de descarga, não considerando que alterações neste subprocesso do sistema CCT possam afetar o desempenho da frota de equipamentos envolvidos nesta atividade.

ARCE, GUARNIERI E MENDES (1999) desenvolveram um sistema de programação de transporte florestal objetivando a minimização de custos, utilizando programação Dinâmica composto de dois módulos sendo um deles o *Algoritmo del Modelo de Transportes* (AMT) e o outro o *Algoritmo de Designación de los Camiones* (ADC). O AMT otimiza a quantidade de madeira que deve ser transportada a partir de um determinado ponto e o ADC, por sua vez otimiza, para cada caminhão do sistema, a jornada de trabalho que se refere ao tempo de efetivo de transporte e o tempo ocioso em viagens sem carga e/ou em filas. O modelo matemático desenvolvido pelos autores considera os tempos de viagens como sendo médios, não sendo possível aplicar variabilidade a esta variável.

RAICU E TAYLOR (2002) desenvolveram um Sistema Computadorizado de Suporte à Decisão para selecionar a estratégia ótima de despacho de caminhões, com o objetivo de maximizar a utilização dos caminhões canavieiros. O sistema foi desenvolvido em Visual Fox Pro e destina-se ao planejamento operacional; não considera as variabilidades dos tempos de carregamento e trabalha apenas com as informações de *bins* (julietas) disponíveis nos locais de carregamento. Esta simplificação ocorre em função das características operacionais da indústria sucroalcooleira da Austrália, onde, por regra, o fornecedor de cana é responsável pelo carregamento dos *bins* fornecidos pela usina; o transporte ocorre durante as 24 horas do dia, enquanto que a colheita ocorre durante o período diurno (14 horas/dia) (RAICU, 2000).

GAUCHER, LE GAL E SOLER (2003) desenvolveram dois modelos complementares para simular, semanalmente, o planejamento e a operação de uma usina ao longo da safra. O primeiro modelo compara a produção semanal e total da safra, enquanto que o segundo modelo trata da cadeia logística e permite avaliar diariamente os impactos das mudanças estruturais da capacidade de colheita e transporte. A exemplo do trabalho desenvolvido por RAICU E TAYLOR (2002), os modelos desenvolvidos aplicam-se ao sistema australiano e não contemplam o subprocesso de colheita propriamente dito.

YOSHIZAKI (1989) aplicou Modelos de Redes de Filas para avaliar o desempenho operacional de sistemas logísticos, tendo como foco principal a análise da formação de filas na entrada do pátio de uma usina. Para o estudo foi considerado um dia típico de operação da usina, considerando o sistema CCT como uma cadeia fechada (caminhões da frota própria), sendo parte do sistema considerada como uma cadeia aberta (caminhões de terceiros), tendo uma simplificação bastante expressiva ao considerar a capacidade de campo (veículos carregados / minuto) como sendo infinita. O autor conclui que os modelos analíticos de redes

de fila podem ser usados para cálculos preliminares, sendo recomendada a aplicação de simulação para resultados mais precisos.

Assim, considerando a complexidade do Sistema CCT, sua natureza dinâmica aleatória e a forte correlação entre seus subsistemas, que dificilmente podem ser representadas por métodos determinísticos e por modelos de redes de fila, o autor optou por utilizar Simulação Estocástica para o desenvolvimento desta dissertação.

4. O QUE É SIMULAÇÃO?

Segundo o Dicionário Aurélio: s.f. “Ato ou efeito de simular. Experiência ou ensaio realizado com o auxílio de modelos”.

De acordo com PEGDEN (1990), “simulação é o processo de desenhar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo, com o propósito de compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias estratégias para operação do sistema”.

4.1 POR QUE UTILIZAR SIMULAÇÃO?

Segundo RAVINDRAN (apud HAHN, 1994, p. 2.7)¹, recentes avanços na técnica de simulação, disponibilidade de software e de computadores mais velozes têm feito da simulação uma das ferramentas mais amplamente utilizadas e aceitas na análise de sistemas e Pesquisa Operacional, sendo que os levantamentos mais recentes neste campo científico colocam este tipo de análise (simulação) junto com a programação linear nos dois primeiros lugares entre as mais utilizadas.

PEGDEN, SHANNON, SADOWSKI (1995), SALIBY (1989) e FREITAS FILHO (2001) enumeram algumas das principais vantagens que tornam a simulação uma ferramenta tão utilizada:

¹ RAVINDRAN, A., PHILIPS, D.T., SOLBERG, J.J: Operations Research Principles and Practice, John Wiley & Sons, Second Edition, 1987.

- 1) Modelos mais realistas - a simulação permite uma maior liberdade na construção do modelo, não obrigando a enquadrar um problema a um determinado molde para que se possa obter uma solução, como ocorre, por exemplo, no caso da programação linear.
- 2) Processo e modelagem evolutivos - uma importante vantagem no processo de modelagem em simulação é o seu carácter evolutivo. Assim, começando com um modelo relativamente simples, pode-se aos poucos ir identificando de maneira mais clara as peculiaridades do problema, e em função disso ir aperfeiçoando o modelo. Mesmo depois de pronto, o modelo pode ser acrescido de novas variáveis e/ou relações, sem que isso comprometa a estrutura original dele .
- 3) Facilidade de comunicação - um modelo de simulação é, em geral, muito mais fácil de ser compreendido do que um conjunto de complicadas equações matemáticas. Atualmente muitos esforços vêm sendo dedicados ao desenvolvimento da simulação visual, mostrando-se num vídeo uma imagem animada do problema.
- 4) Sistemas complexos - a simulação torna possível o estudo e experimento de sistema com interações internas complexas tais como uma firma, uma indústria, a economia ou um subsistema componente de um desses.
- 5) Facilidade de testar regras de operação - a simulação pode testar novas políticas e regras de decisão para operação de um sistema, antes de correr o risco de implementá-las no sistema real.

- 6) Introdução de novos elementos - quando novos elementos são introduzidos no sistema, a simulação pode ser utilizada para antecipar os gargalos e outros problemas que possam surgir em seu comportamento.

4.2 MODELO DE SIMULAÇÃO

A simulação através de protótipos é, na maioria dos casos, inviável técnica ou economicamente, sendo adotada, sempre que possível, a simulação em computadores digitais por suas indiscutíveis vantagens em termos de tempo, economia e flexibilidade.

Modelo é uma representação simplificada de um sistema e modelo de simulação consiste em um conjunto de equações lógico-matemáticas capazes de descrever as principais ações e inter-relações existentes entre os diversos componentes de um sistema. Em experimentos com modelo de simulação deseja-se obter aspectos importantes do comportamento do sistema ao longo de um período de tempo.

Conforme KELTON, SADOWSKI & SADOWSKY (1998) uma determinada simulação, de acordo com o modelo desenvolvido, pode ser classificada da seguinte maneira:

- Simulação Determinística ou Estocástica (ou Probabilística) - uma simulação é determinística quando todas as variáveis envolvidas são também determinísticas, o que significa que os seus valores podem ser determinados sem incertezas. Este tipo de simulação geralmente é justificado quando aplicado a um sistema muito complexo envolvendo grande número de variáveis ou de relações. No entanto, a simulação estocástica aplica-se quando a incerteza nos valores das variáveis é determinante no funcionamento do sistema. Neste caso, o modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias, representadas por distribuições de probabilidade, com objetivo de reproduzir,

da maneira mais apropriada possível, os valores reais representados por estas variáveis.

- Simulação Estática ou Dinâmica – simulação estática se aplica quando a dimensão tempo não é relevante dentro da simulação. As aplicações deste tipo de simulação são bastante raras. A grande maioria das aplicações em simulação refere-se ao estudo de sistema ao longo do tempo, o que caracteriza uma simulação dinâmica.
- Simulação Discreta ou Contínua - uma simulação pode ser classificada em discreta ou contínua, dependendo do processo de atualização das variáveis que descrevem o estado do sistema. Na simulação contínua, a passagem do tempo é vista como se fosse realmente contínua, muito embora ela seja feita em pequenos intervalos de tempo, por imposição do método empregado e do próprio computador. Este tipo de simulação é muito útil no estudo de sistemas discretos através de equações diferenciais como, por exemplo, a simulação de sistemas elétricos. Já na simulação discreta, a passagem do tempo é feita aos "pedaços" entre um evento ou outro. Neste caso as mudanças de estado do sistema são instantâneas e acontecem apenas durante a ocorrência de eventos.

Neste trabalho será abordada a Simulação de Eventos Discretos. Isto porque no sistema estudado existe um grande número de variáveis que apresentam variabilidade (modelo estocástico), atuando ao longo do tempo (modelo dinâmico) e com mudança pontual de suas variáveis de estado (modelo discreto).

4.3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA

Componentes são subsistemas que interagem entre si por meio de entidades que fluem de um componente para outro. Cada componente desenvolve a sua atividade absorvendo certas entidades, processando-as e liberando-as posteriormente. O nível em que cada uma dessas atividades é desenvolvida define uma variável do sistema e, em geral, está relacionada com a taxa de fluxo de entrada e saída das entidades nos respectivos componentes.

As entidades são os elementos do sistema que podem ser identificados e processados individualmente (KELTON, SADOWSKI & SADOWSKY ,1998). Exemplos de entidades incluem os caminhões e os tratores, enfim, todos os elementos que mudam de estado durante a execução da simulação. As entidades que permanecem no sistema durante todo o período de simulação são denominadas entidades permanentes, e as entidades que somente passam pelo sistema são denominadas temporárias, pois deixam de ser analisadas no instante que saem do sistema. Exemplo de entidade temporária pode-se citar a cana moída na usina.

Quando diversas entidades possuem as mesmas características, elas formam uma classe de entidades (ex.: classe de caminhões, classe de tratores). As entidades de uma mesma classe apresentam características próprias que as diferenciam de outras classes; estas características são denominadas atributos (KELTON, SADOWSKI & SADOWSKY, 1998). Um atributo pode ser importante para subdividir uma classe, como no caso da distinção entre várias categorias de caminhões que podem existir na usina (atributo: tipo de caminhão), ou então, ele pode controlar o comportamento de uma classe (atributo: velocidade do caminhão).

As entidades podem ficar esperando algo acontecer em filas (ex.: fila de caminhões esperando a liberação de uma carregadora), que geralmente são do tipo FIFO (*first in, first out*

- primeiro a entrar, primeiro a sair). Neste modelo todas as filas são do tipo FIFO, exceto a fila de caminhões para descarga, para a qual os caminhões de cana picada têm prioridade mais alta que os de cana inteira.

4.4 O PROCESSO DE SIMULAÇÃO

De acordo com CHWIF & MEDINA (2006), o desenvolvimento de um modelo de simulação pode ser dividido em três grandes etapas:

- Concepção ou formulação do modelo;
- Implementação do modelo;
- Análise dos resultados do modelo.

Cada uma destas etapas, por sua vez, é composta de outras subetapas, conforme descritas a seguir:

- 1) Definição de objetivos e definição do sistema: determinação das fronteiras e restrições a serem usadas na definição do sistema (ou processo) e investigação de como o sistema trabalha;
- 2) Elaboração do modelo abstrato: como o próprio nome diz, nesta etapa o analista cria mentalmente o modelo a ser construído;
- 3) Formulação do modelo conceitual: Desenvolvimento de um modelo preliminar, graficamente (por exemplo, diagrama de blocos) ou em pseudocódigo, para definir os componentes, descrever as variáveis e interações (lógicas) que constituem o sistema;

4) Levantamento de dados de entrada: paralelamente à construção do modelo conceitual são definidos os dados a serem utilizados no modelo. Assim, a lista de dados a serem coletados é definida pelo modelo, e não o contrário, conforme citam CHWIF & MEDINA (2006). Durante esta fase devem ser selecionadas as medidas de eficiência a serem usadas, os fatores a serem variados e os níveis desses fatores a serem investigados;

5) Elaboração do modelo computacional: nesta fase o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional, sendo necessária a utilização de alguma ferramenta de programação (software) que neste trabalho será o software Arena, desenvolvido pela *Rockwell*. Desta fase fazem parte duas importantes etapas do desenvolvimento de um projeto de simulação:

- Verificação e validação: confirmação de que o modelo opera da forma que se pretende e a saída do modelo é acreditável e compatível com a saída do sistema real;

Modelo operacional: estando o modelo conceitual “escrito” em uma linguagem computacional apropriada e devidamente validado, tem-se o modelo operacional, com o qual podem ser conduzidos os experimentos ou “rodadas” de simulação;

6) Experimentação: corresponde à execução da simulação para gerar os dados desejados e executar a análise de resultados;

7) Análise e interpretação: refere-se à análise dos resultados gerados pelo modelo;

8) Implementação e documentação: colocação dos resultados em uso, registro das constatações e documentação do modelo e seu uso;

Figura 5 - Etapas de desenvolvimento de um modelo de simulação (CHWIF & MEDINA, 2006)

CHWIF & MEDINA (2006), citando Robinson, enfatizam que o processo de simulação não deve ser considerado estudo linear, devendo-se imaginar que seja um processo em espiral conforme sugere a Figura 5, sendo suas etapas repetidas até que não haja diferença nos resultados entre cada uma delas.

4.5 MÉTODO DE MONTE CARLO

PEGDEN, SHANNON, SADOWSKI (1995, p.11) afirmam que:

No coração de cada modelo de simulação estocástica repousa um mecanismo para geração dos valores daquelas variáveis aleatórias que influenciam o comportamento do sistema que está sendo analisado. Para modelos probabilísticos ou estocásticos, esse mecanismo é chamado de amostragem (ou método) de Monte Carlo. O método de Monte Carlo originou-se com o trabalho de Von Neumann e Ulam para o projeto da bomba atômica. A técnica matemática, conhecida por muitos anos, foi revivida para o projeto secreto em Los Alamos, EUA, recebendo após a sua divulgação o nome de “Método Monte Carlo”. O termo tornou-se quase sinônimo de simulação. Embora, primeiramente, seja interessante o uso do método de Monte Carlo para simular eventos probabilísticos, ele também pode ser usado em certos problemas completamente determinísticos que não podem ser resolvidos analiticamente.

Na técnica de Monte Carlo, dados artificiais são gerados através de um gerador de números aleatórios e uma distribuição cumulativa de interesse. Um gerador de números aleatórios aceitável deve ser capaz de gerar variáveis aleatórias que estejam uniformemente distribuídas no intervalo de 0 a 1. Uma vez que os números aleatórios são gerados pelo uso de um algoritmo, eles não são verdadeiramente aleatórios, sendo, então, chamados de números pseudo-aleatórios - significando que a sequência produzida é de fato reprodutível e daí não aleatória (FREITAS FILHO, 2001). Entretanto, se for comparado um conjunto de números derivados de um gerador digital de números aleatórios confiável com números que fossem verdadeiramente aleatórios, a distinção entre esses dois conjuntos não seria detectável, isto é, os dados gerados pelo computador passariam em todos os testes estatísticos para aleatoriedade.

A distribuição de probabilidade a ser amostrada pode ser uma distribuição teórica conhecida, por exemplo, normal ou exponencial, ou ela pode ser baseada em dados empíricos colhidos e/ou observados do sistema real.

Capítulo**5****5. O PROBLEMA MODELADO POR SIMULAÇÃO****5.1 OBJETIVOS E DEFINIÇÃO DO SISTEMA**

O modelo de simulação desenvolvido nesta dissertação contempla a modelagem do sistema de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar (CCT) de uma usina de porte médio (moagem de 20.000 t/dia).

Os limites do sistema avaliado, o escopo, contemplam as operações de colheita e transporte de cana-de-açúcar picada desde as áreas de produção até a mesa receptora de matéria-prima na usina; envolve os equipamentos de colheita mecânica, os conjuntos de tratores de transbordos, e as composições rodoviárias.

As operações envolvidas no processo produtivo foram determinadas em visita técnica a uma usina do interior do estado de São Paulo, sendo em seguida definido o tipo de dado a ser levantado. A coleta de dados foi realizada através de medições em campo com apontamento manual ou com base nos registros dos computadores de bordo instalados nos equipamentos (máquinas e veículos), no período da safra. Os dados de manutenção de equipamentos foram coletados nos sistemas de controle de manutenção automotiva, nos quais são registradas, rotineiramente, suas intervenções. Demais dados foram obtidos com a equipe técnica da usina. Todos estes dados foram processados para obter as distribuições estatísticas que representam cada processo, utilizando-se o *software Input Analyzer*, distribuído juntamente com o *software Arena*®.

5.1.1. Frentes de corte

As frentes de corte, conforme definido por SILVA (2006), são pontos distintos fornecedores de cana-de-açúcar e trabalhadas por uma equipe autônoma de equipamentos e funcionários.

O modelo desenvolvido neste trabalho, conforme definido no escopo, contempla somente frentes de corte de cana picada, nas quais as atividades de corte, a limpeza e picação da cana são realizadas por um único equipamento, denominado colhedora de cana, que ainda transfere os toletes de cana para os equipamentos de transbordos. Em uma frente de corte a quantidade de colhedoras varia em função da meta de produção

Os equipamentos de transbordos são caçambas tracionadas por tratores agrícolas que se deslocam ao lado das colhedoras, recebendo a cana colhida em forma de toletes. Normalmente cada trator reboca duas caçambas, havendo arranjos operacionais em que o conjunto trator-transbordo é formado por até três caçambas; no modelo desenvolvido considerou-se o conjunto com duas caçambas. Após o enchimento das caçambas os tratores deslocam-se até o local reservado para a transferência da carga para as composições rodoviárias, este local é popularmente denominado de pátio de transbordo. Nas Figuras de números 6 à 9 estão ilustradas as atividades de colheita mecânica e transbordo.

As frentes de corte não permanecem o tempo todo em um mesmo local, o que quer dizer que, após colher certa quantia de cana, os equipamentos são transferidos para uma outra área, definida com base em uma programação para aproveitar a cana com maior retorno econômico. Neste trabalho, entretanto, há uma simplificação que não considera os tempos desta mudança de local de trabalho.

Conforme descreve SILVA (2006), gargalos operacionais podem ser gerados pelo balanceamento entre os recursos mecanizados da frente de corte, o que ressalta a necessidade de abordagem do problema por uma visão holística, sendo o emprego da simulação uma melhor opção para abordar o problema, uma vez que este método trata a interação entre os recursos.

O ciclo operacional do trator transbordo está esquematizado na Figura 13.

Figura 6 - Colhedora de Cana (SILVA, 2006)

Figura 7 - Trator-transbordo (CASE IH, 2008)

Figura 8 - Colheita da cana (CASE IH, 2008)

Figura 9 - Transbordo da cana para o caminhão (TRACAN, 2009)

5.1.2. Equipamentos de transporte

As composições rodoviárias para o transporte da cana estão listadas no Quadro 1, sendo que neste trabalho foram consideradas as composições do tipo rodotrem.

5.1.3. Atividades na área industrial

A área industrial corresponde à usina propriamente dita e dela fazem parte as atividades de pesagem, amostragem da cana-de-açúcar e descarregamento. Dependendo do arranjo logístico podem estar presentes também cavalo-escravos e reboques reservas.

Os caminhões escravos são cavalos mecânicos dedicados exclusivamente à atividade de descarga e têm seu ciclo de deslocamento restrito à área industrial, conforme já destacado na Figura 1.

Os reboques reservas são conjuntos de reboques rodoviários que ficam na usina à espera de um cavalo-mecânico para serem levados à frente de corte. Tanto estes equipamentos quanto os cavalos-escravos são utilizados quando se adota o sistema de bate-volta (*drop-and-hook*), que tem por objetivo diminuir o tempo de permanência do cavalo-mecânico na usina, minimizando a formação de fila e, conseqüentemente o melhor aproveitamento da frota.

No modelo de simulação desenvolvido para este trabalho não foi considerado o uso de pátio de estocagem de cana na usina, uma vez que só foi abordado o sistema de colheita de cana picada.

5.2 MODELO CONCEITUAL

Na Figura 10 encontram-se ilustrados os módulos que compõem o modelo de simulação, com destaque para o conjunto de módulos agrupados no subtítulo “Despachador de caminhões”, que constituem a contribuição mais importante deste trabalho. Na Figura 11 encontra-se o modelo conceitual.

Figura 10 - Módulos do simulador

Figura 11 - Modelo conceitual do simulador de CCT

Na Figura 12 estão representados os módulos da rotina de cálculo da capacidade de carregamento da frente de corte.

Figura 12 - Módulos da rotina de cálculo de vazão

- **Conta colhedoras ativas:** este módulo utiliza um função interna do Arena que faz uma varredura nos recursos do tipo colhedora a fim de identificar e contar os equipamentos que estão inoperantes. Ao final da varredura grava-se a quantidade de colhedoras ativas, que é obtida subtraindo-se a quantidade de colhedoras inativas do total de colhedoras alocadas na frente de corte.
- **Cálculo da vazão das colhedoras e dos tratores:** este módulo é responsável pela medição da capacidade de carregamento das colhedoras e dos tratores; o resultado é expresso em t/hora.

Para as colhedoras a capacidade de colheita, ou vazão, é dada pela equação 4.

$$Cc = Qca * \frac{Ptb}{Tcg} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde

Qca = quantidade de colhedoras ativas (disponíveis para operação)

Tcg = tempo de carregamento do transbordo

Ptb = peso médio da carga do transbordo

- Para os tratores que rebocam os transbordos a capacidade de reboque, ou vazão, é dada pela equação 5.

$$Crb = Qta * \frac{Ptb}{Tct} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde

Crb = capacidade de reboque

Qta = quantidade de tratores ativos (disponíveis para operação)

Tct = tempo de ciclo do trator

Ptb = peso médio da carga do transbordo

Na equação 5 o valor de Tct é obtido somando-se os tempos que compõem o ciclo do trator transbordo (deslocamento vazio, carregamento, deslocamento carregado e transbordo) e, que se encontra ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Ciclo do trator transbordo (SILVA, 2006)

- O cálculo do consumo da produção pelos caminhões é obtido pela equação 6.

$$Cch = Qct * \frac{Pm}{Tch} \quad (\text{Equação 6})$$

Onde

C_{ch} = consumo da produção pelos caminhões

Q_{ct} = quantidade de caminhões em trânsito

T_{ch} = tempo de ciclo do caminhão

P_m = peso médio da carga do caminhão

A quantidade de caminhões em trânsito é obtida pela soma da quantidade de caminhões que estão se dirigindo a uma frente de corte e da quantidade de caminhões que estão sendo carregados ou aguardando carregamento.

O ciclo do caminhão equivale ao tempo decorrido entre o momento que ele deixa a usina e o momento em que ele retorna a ela. Para os cenários em que se adota bate-volta, o momento de retorno é aquele quando o caminhão chega ao pátio de desengate, se for utilizado pátio fora da usina, ou quando o caminhão é pesado carregado, se for utilizado pátio dentro da usina. Quando não se adota bate-volta o momento do retorno é caracterizado pela chegada à balança de entrada da usina. Na Figura 1 encontra-se esquematizado o ciclo de um caminhão.

- Identificação do grupo restritivo: a vazão, ou capacidade de carregamento da frente de corte, está diretamente relacionada à capacidade de carregamento das colhedoras e à capacidade de reboque dos tratores de transbordo, sendo limitada pela menor capacidade dentre esses dois grupos, pois tendo as colhedoras capacidade de colher um volume de cana maior do que os tratores são capazes de transportar, não há como colher um volume maior que a capacidade dos tratores, uma vez que não existe reservatório para cana colhida nas colhedoras. O inverso também é verdadeiro, uma vez que os tratores têm

sua capacidade limitada por aquele volume que as colhedoras podem produzir, assim, o grupo restritivo é identificado pela equação 7.

$$Grt = \begin{cases} 1 & \text{se } Cc \leq Crb \\ 2 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 7})$$

- Cálculo da capacidade de vazão da frente corte é obtido pela equação 8.

$$Vf = \begin{cases} Cc & \text{se } Grt = 1 \\ Crb, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 8})$$

- Cálculo da vazão remanescente da frente corte: a vazão remanescente da frente de corte representa o valor a ser utilizado pela rotina de seleção de destino de um caminhão quando este deixa a usina e está pronto para iniciar um novo ciclo, e é obtida pela diferença entre a capacidade de vazão e o consumo da produção pelos caminhões, conforme equação 9. Valores negativos neste cálculo indicam que há uma quantidade de caminhões em trânsito, para uma dada frente, maior do que a capacidade que esta tem para atendê-lo(s). Neste caso ocorrerá fila no carregamento. Esta situação ocorre quando, após o despacho do(s) caminhão(ões), houve redução da capacidade de vazão da frente, provocada pela parada de uma colhedora ou trator para manutenção.

$$Vrm = \begin{cases} 0 & \text{se } Cch \geq Vf \\ Vf - Cch, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (\text{Equação 9})$$

Neste módulo são utilizadas variáveis matriciais e variáveis unidimensionais, descritas a seguir.

vCC: variável matricial de ordem 10 x 22. Nesta matriz cada linha representa uma frente de corte (embora o sistema estudado neste trabalho represente até cinco frentes

de corte, o modelo pode ser configurado para até onze frentes), os valores registrados nas colunas estão relacionados no Quadro 4.

Coluna	Dado armazenado
1	Quantidade de carregadoras ou colhedoras inativas na frente de corte
2	Capacidade de colheita de colheita da frente (t/hora)
3	Quantidade de tratores inativos
4	Capacidade de reboque de todos os tratores da frente (t/hora)
5	Quantidade de truck em trânsito
6	Quantidade de romeu & julieta em trânsito
7	Quantidade de treminhão em trânsito
8	Quantidade de rodotrem em trânsito
9	Tempo de ciclo do truck
10	Tempo de ciclo do romeu & julieta
11	Tempo de ciclo do treminhão
12	Tempo de ciclo do rodotrem
13	Capacidade de transporte do Truck (t/hora)
14	Capacidade de transporte do romeu & julieta (t/hora)
15	Capacidade de transporte do treminhão (t/hora)
16	Capacidade de transporte do rodotrem (t/hora)
17	Capacidade de transporte de todos os caminhões alocados (t/hora)
18	Constante 1
19	Capacidade de abastecimento da frente (t/hora)
20	Restrição (1=colhedora, 2=trator)
21	Produção remanescente (t/hora)
22	Vazão relativa da frente

Quadro 4 - Variável auxiliar para cálculo da vazão.

Figura 15 - Fluxograma conceitual da frente de corte

5.3 DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada do modelo de simulação, que constituem os parâmetros dos cenários, são os descritos abaixo:

5.3.1. Parâmetros Gerais

- Amostragem da cana-de-açúcar: percentual para sorteio das cargas a serem amostradas – adotado 30%;
- Horários de restrição ao tráfego de composições rodoviárias: em algumas regiões não é permitido o trânsito de composições maiores que 19,8m em alguns horários do dia. Quando essa restrição ocorre as composições rodoviárias trafegam com apenas um semi-reboque atrelado. Nos cenários analisados não foi considerada esta restrição.
- Capacidade de moagem: corresponde à capacidade de processamento da usina. Nos cenários analisados a meta foi estabelecida em 19.500 t/dia.
- Frota de composições rodoviárias disponível, por tipo de composição. Nos cenários em que se adota o despacho dinâmico informa-se a quantidade total de rodotrens; quando se adota o despacho estático, informa-se a frota para cada frente de corte. Quando se adota a prática de bate-volta, informa-se a quantidade de cavalos escravos e a quantidade de semi-reboques reserva na usina.
- Turnos de trabalho: a jornada de trabalho em usinas de açúcar é de 24 horas/dia. Os turnos de trabalhos dos operadores e motoristas são estabelecidos levando-se em conta as restrições legais, sendo prática corrente a adoção de três turnos, com

oito horas de duração cada um. No modelo analisado, a cada reinício de ciclo do caminhão verifica-se se houve mudança de turno em relação à viagem anterior. Tendo havido, o caminhão é retido na usina durante 40 (quarenta) minutos, sendo em seguida liberado.

5.3.2. Parâmetros das Frentes de Corte

- Quantidade de colhedoras disponíveis;
- Quantidade de tratores de reboque disponíveis;
- Distância entre a usina e a frente de corte;

Para desenvolvimento do modelo considerou-se cinco frentes de corte e transporte de cana picada, cujas distâncias até a usina estão destacadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Distância média das frentes de corte

Frente	Tipo de corte da cana	Distância (km)
1	Picada	27,0
2	Picada	35,0
3	Picada	11,0
4	Picada	18,0
5	Picada	5,0

- Velocidade dos rodotrens: velocidade média geral, para as composições vazias e carregadas. Na lógica do modelo está gravada uma função que representa a velocidade média do rodotrem. Esta função foi obtida a partir de dados de campo coletados na safra 2003/2004, tendo sido observado que a velocidade média modifica-se em função da distância percorrida, conforme demonstra o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Velocidade média do Rodotrem

- Tempo de carregamento: tempo médio para carregamento do conjunto de transbordo;
- Tempo de transbordo: tempo médio para transbordar a carga do transbordo para o rodotrem;
- Indicador de restrição ao tráfego de composição de grande porte: quando esta opção é habilitada, as composições são desmembradas e o cavalo trafega com apenas um semi-reboque; habilitando esta funcionalidade, deve-se indicar o período em que ocorre a restrição. Nos cenários analisados não se considerou esta característica;
- Quantidade de semi-reboques reservas: estes equipamentos são utilizados para permitir que se realize o bate-volta na lavoura.
- Peso médio da carga, por tipo de composição: utilizou-se histórico da safra 2003/2004 quando o peso médio foi de 62,0 t/viagem para a composição do tipo rodotrem com cana picada.

- Prioridade para despacho de caminhão: o modelo está preparado para que se configure composições do tipo rodotrem e treminhão. Esta opção de configuração permite que se priorize um determinado tipo de composição para uma frente, ou até mesmo pode bloquear o acesso de um tipo de composição. Nos cenários analisados, como foi considerado apenas o uso de rodotrem esta função não foi utilizada.

5.3.3. Parâmetros de Manutenção

Os parâmetros de manutenção das carregadoras, tratores reboque e caminhões foram obtidos através da pesquisa em base de dados da usina, bem como em levantamentos de campo.

Na Tabela 2 encontra-se a relação de eventos de manutenção considerados. Os detalhes do levantamento encontram-se nos Apêndices. Para cada um destes eventos foram analisadas a duração e o intervalo entre ocorrências.

Tabela 2 – Relação de itens de manutenção considerados no modelo de simulação

Equipamento	Manutenção
Caminhões	Abastecimento de combustível
	Reparos de borracharia
	Reparos de elétrica
	Reparos de funilaria
	Reparos de geral
	Reparos de motor
Trator de reboque	Abastecimento de combustível
	Manutenção mecânica na lavoura
	Manutenção mecânica na oficina

– continua –

– continuação –

Equipamento	Manutenção
Colhedora	Abastecimento de combustível Manutenção elétrica Manutenção geral Manutenção do elevador Reparos com solda Troca de faca Manutenção de mangueiras Lavagem

5.4 PREMISSAS ECONÔMICAS

Para a determinação do custo total de CCT foram utilizados dados de custos fixos e variáveis dos equipamentos descritos na da Tabela 3.

Tabela 3 - Premissas econômicas

Equipamento	Custo Fixo mensal	Custo variável
Rodotrem	R\$ 20.581,99	R\$ 2,17 /km
Conj. Reboques	R\$ 7.249,81	R\$ 0,28 /km
Cavalo-escravo	R\$ 20.581,99	R\$ 2,17 /km
Colhedora	R\$ 26.896,82	R\$ 165,00 /hora
Trator reboque	R\$ 16.843,85	R\$ 28,00 /hora
Conjunto transbordo	R\$ 3.770,41	R\$ 4,70 /hora

Os salários dos motoristas e operadores de máquinas agrícolas estão inclusos no custo fixo mensal.

O custo da equipe de engatadores foi considerado apenas nos cenários em que se adotou o bate-volta na usina. O custo mensal deste item é de R\$ 13.620,96

6. RESULTADOS

6.1 PROJETO EXPERIMENTAL

De acordo com FREITAS FILHO (2001) é através da experimentação que se verifica como um sistema é influenciado por uma ou mais variáveis. Este autor afirma ainda que “de acordo com o jargão da estatística, as variáveis que medem o desempenho do sistema são aquelas conhecidas como respostas, ou variáveis de resposta, enquanto que aquelas que o experimentador está manipulando são conhecidas por fatores” (FREITAS FILHO, 2001, p.249). Ainda segundo o mesmo autor, denomina-se *níveis* os valores que um fator pode assumir.

No sistema avaliado as variáveis cujos resultados se desejam avaliar são a produção diária e o seu custo. Os fatores manipulados foram os listados no Quadro 5.

Fator	Descrição
1	Quantidade de cavalos mecânicos
2	Quantidade de semi-reboques reservas
3	Quantidade de cavalos escravos
4	Tipo de despacho
5	Adoção de bate-volta e
6	Carga média

Quadro 5 - Lista de fatores dos experimentos

No Quadro 6 encontram-se os níveis aplicados aos fatores dos experimentos.

Fator	Níveis	Método de Despacho
1	Sim	Estático
2	Sim	Dinâmico
3	Sim	Estático
4	Sim	Dinâmico
5	Não	Estático
6	Não	Dinâmico

Quadro 6 – Valores associados a níveis de cada fator

O fator “Método de Despacho” refere-se à forma de despacho dos caminhões, que pode ser dinâmico ou estático.

Para cada um destes experimentos foram testados vários níveis para os fatores 1, 2 e 3, avaliando-se a produção obtida e o custo do CCT.

A quantidade de colhedoras e de tratores de transbordo foi mantida inalterada entre os cenários, assim como a distância média de cada frente.

6.2 CENÁRIO BASE

O cenário base da simulação é o cenário com despacho estático e sem adoção de bate-volta. Para a configuração desse cenário foi elaborada a quantificação determinística da frota de caminhões necessária para atender à demanda de produção. O tamanho da frota² é dado pela equação empírica descrita a seguir.

$$\text{Frota} = \frac{M_p}{C_t} \quad (\text{equação 10})$$

² O termo frota, deste ponto em diante refere-se ao conjunto cavalo-mecânico e dois semi-reboques, formando uma composição do tipo rodotrem.

Onde:

Frota = frota de caminhões

Mp = meta de produção

Ct = capacidade diária de transporte de cada caminhão

A capacidade diária de transporte de cada caminhão, por sua vez, é obtida pela equação 11.

$$Ct = \frac{Td}{Tch} * Pm \quad (\text{equação 11})$$

Onde:

Td = tempo disponível

Tch = tempo de ciclo do caminhão

Pm = peso médio da carga do caminhão

Na equação 11 o *tempo disponível* é igual a 1.230 minutos, sendo equivalente à parcela de tempo de um dia trabalho que o caminhão está disponível para transporte, descontando-se as paradas para troca de turno, para refeição dos motoristas e para reparos mecânicos.

Para obter-se o tempo de ciclo aplica-se a equação 12

$$Tch = \frac{Dist}{Vvz} + Tcp + \frac{Dist}{Vch} + Tu + Tm \quad (\text{equação 12})$$

Onde:

Tch = tempo de ciclo do caminhão

Dist = distância média da frente de corte até a usina

Vvz = velocidade do caminhão vazio

Tcp = tempo de permanência no campo

V_{ch} = velocidade do caminhão cheio

T_u = tempo de usina

T_m = tempo de manutenção

Atribuindo-se valores às equações 10 a 12, tomando como exemplo a Frente de Corte 1, obtém-se:

$$T_{ch} = \frac{27}{37,85} + 5,7 + \frac{27}{29,41} + 15,1 + 11,9 = 130,6 \text{ min}$$

Substituindo os valores de T_{ch} , T_d e P_m na equação 11, temos:

$$C_t = \frac{1230}{130,6} * 62 \cong 584 \text{ t/dia}$$

Voltando à equação 10 e substituindo os valores de suas variáveis obtemos a quantificação da frota para a Frente 1:

$$Frota = \frac{3.900}{584} \cong 7 \text{ caminhões}$$

Então, a quantificação da frota para o cenário base é a que está representada no Quadro 7.

Frente de corte	Frota
1	7
2	8
3	4
4	5
5	3

Quadro 7 - Frota de caminhões do cenário base

Para o cenário base não foi considerada a frota de reboques-reserva da lavoura.

O resultado deste cenário foi uma produção de 16.245 t/dia, não atingindo a meta de produção.

6.3 AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS SEM ADOÇÃO DE BATE-VOLTA

A partir do cenário base a frota de caminhões foram geradas diversas séries de cenários. Na primeira fase da análise foram avaliados cenários sem adoção de bate-volta na usina.

6.3.1. Série 1 – 27 a 46 rodotrens, sem reboque reserva³ na lavoura, despacho estático

Na primeira série foram analisados quatro cenários, todos sem bate-volta e com despacho estático; para calcular a nova configuração de quantidade de caminhões de cada novo cenário aplicou-se regra de três simples, à razão direta da produtividade.

Os resultados da primeira série, exibidos na Tabela 4, indicaram que aumentando somente a frota de caminhões não é possível atender à demanda. O Gráfico 2 mostra que o tempo de permanência no campo aumentou significativamente a cada aumento da frota de caminhões, indicando um gargalo na capacidade de corte e carregamento. Observa-se que do cenário 42 para o 46 o aumento da frota não reflete em aumento da produção, mas reflete no aumento do custo. Embora não seja o objetivo deste trabalho, o modelo também poderia ser utilizado para eliminar gargalos, como por exemplo, testando o aumento do número de colhedoras ou a troca deste recurso por outro de maior capacidade.

³ A partir deste ponto quando se utilizar o termo reboque reserva estará se referindo a um conjunto formado por dois semi-reboques conectados por um dolly. Este conjunto de semi-reboques acoplados ao cavalo-mecânico forma a composição do tipo rodotrem

Tabela 4 – Série 1: 27 rodotrens sem reboque reserva na lavoura, despacho estático

Cenário	Frota	Produção	Custo operação		Tempo de Campo
		(t/dia)	Safra (x 1000)	R\$/t	(min)
1	27	16.245	R\$ 37.335	R\$ 11,27	30
2	32	17.836	R\$ 40.150	R\$ 11,03	40
3	37	18.677	R\$ 42.062	R\$ 11,04	56
4	42	18.974	R\$ 43.458	R\$ 11,23	74
5	46	19.116	R\$ 44.323	R\$ 11,37	85

Gráfico 2– Série 1:Produção e tempo de campo

6.3.2. Série 2 – 27 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho estático

Considerando que se encontrou o limite máximo de produção sem adoção de reboques reserva na lavoura, elaborou-se a segunda série de cenários, na qual foram adicionados equipamentos desta classe à frota.

Os resultados desta série, exibidos na Tabela 5, mostram que o uso de reboques reserva na lavoura contribuem de maneira decisiva para a melhoria da produtividade dos

caminhões. Este aumento de produtividade está evidente quando se compara o cenário 1 com o 6, notando-se um acréscimo de 1.962 t na produção diária, ou 12% de incremento. Observa-se ainda na Tabela 5 que o tempo de permanência no campo reduziu-se quase pela metade, de 30 minutos no cenário 1, para 16 minutos no cenário 6.

Analisando ainda na série 2 os cenários de número 7 em diante, verifica-se que incrementos de reboque reserva além da quantidade de 10 unidades não trazem benefício à produção diária e que o tempo de campo também se estabiliza. Além destas observações, nota-se que o custo de produção aumenta.

Os resultados mostram também que a frota de 27 rodotrens não é suficiente para atender a demanda prevista.

Tabela 5 – Série 2 – 27 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho estático

Cenário	Frota		Produção (t/dia)	Custo operação		Tempo de campo (min)
	Caminhões	Reb. reserva na lavoura		Safra (x 1000)	R\$/t	
1	27	0	16.245	R\$ 37.335	R\$ 11,27	30
6	27	5	18.207	R\$ 36.172	R\$ 9,74	16
7	27	10	18.891	R\$ 36.173	R\$ 9,39	11
8	27	15	18.900	R\$ 36.451	R\$ 9,45	10
9	27	20	18.974	R\$ 36.650	R\$ 9,47	9
10	27	25	19.030	R\$ 36.954	R\$ 9,52	9
11	27	30	19.030	R\$ 37.212	R\$ 9,59	9
12	27	35	19.158	R\$ 37.518	R\$ 9,60	9
13	27	40	19.139	R\$ 37.761	R\$ 9,67	9
14	27	45	19.122	R\$ 38.050	R\$ 9,75	9
15	27	50	19.059	R\$ 38.219	R\$ 9,83	9

Nota-se que a partir do cenário 9 o tempo de campo se estabiliza, Cabe ressaltar que do cenário 10 ao 15 ocorre uma flutuação nos valores de produção. Uma análise estatística da média obtida em cada cenário, utilizando o Minitab, demonstrou que não se pode rejeitar a igualdade desses valores.

Gráfico 3 – Série 2: 27 rododrens com reboque reserva na lavoura

6.3.3. Série 3 – 32 rododrens, com reboque reserva na lavoura, despacho estático

Constatando-se que a frota de 27 caminhões não é suficiente para atender à demanda diária de produção, elaborou-se a série 3, para a qual foram adotados 32 caminhões com reboques reserva na lavoura, variando-se a quantidade destes últimos equipamentos de 5 a 50 unidades por cenário, com incremento de cinco unidades entre cada um.

Pelos resultados desta série, relacionados na Tabela 6, nota-se que a meta de produção foi atingida e a um custo de R\$ 9,51/t – cenário 18, tendo sido utilizados quinze conjuntos de reboque reserva na lavoura. A produção deste cenário é 20% maior que a produção do cenário base.

É importante observar também que o tempo de campo para os caminhões é de onze minutos neste cenário 18, o que indica que há uma pequena formação de fila na lavoura, com duração e torno de 5,3 minutos, quando se compara com tempo de campo previsto de 5,7 minutos por composição (equação 12).

Tabela 6 – Série 3: 32 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho estático

Cenário	Frota			Custo operação		Tempo de campo (min)
	Caminhões	Reb.reserva na lavoura	(t/dia)	Safra (x 1000)	R\$/t	
1	27	0	16.245	R\$ 37.335	R\$ 11,27	30
6	32	5	19.301	R\$ 39.112	R\$ 9,93	25
7	32	10	19.459	R\$ 37.911	R\$ 9,55	15
18	32	15	19.560	R\$ 37.956	R\$ 9,51	11
19	32	20	19.581	R\$ 38.246	R\$ 9,57	12
20	32	25	19.519	R\$ 38.419	R\$ 9,65	11
21	32	30	19.524	R\$ 38.551	R\$ 9,68	11
22	32	35	19.591	R\$ 38.847	R\$ 9,72	10
23	32	40	19.565	R\$ 39.180	R\$ 9,82	10
24	32	45	19.599	R\$ 39.419	R\$ 9,86	10
25	32	50	19.632	R\$ 39.640	R\$ 9,90	10

Os comentários da Tabela 5 também se aplicam aos resultados da Tabela 6

Gráfico 4– Série 3: 32 rodotrens com reboque reserva na lavoura

6.3.4. Série 4 – 27 a 46 rodotrens, sem reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

Na quarta série de cenários iniciam-se os testes para verificar a melhoria do desempenho da frota com o despacho dinâmico.

Foram repetidas as séries 1 a 3, alterando apenas o critério de despacho.

Na série 4, que se compara com a série 1, foram utilizados 27 rodotrens, sem reboque reserva na lavoura. Assim como na série 1, não foi possível atingir a meta de produção. Como a produção obtida na série 1 estava muito abaixo da meta não se esperava que o despacho dinâmico, por si só, fosse capaz de reverter este quadro.

Os resultados desta série estão representados na Tabela 7 e no Gráfico 5, e são muito parecidos com os resultados da Série 1.

Tabela 7 – Série 4: 27 rodotrens sem reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

Cenário	Frota		Produção (t/dia)	Custo operação	
	Caminhões	Reb. reserva na lavoura		Safra (x 1000)	R\$/t
26	27	0	16.425	R\$ 37.516	R\$ 11,20
27	32	0	17.656	R\$ 39.934	R\$ 11,09
28	37	0	18.471	R\$ 41.873	R\$ 11,11
29	42	0	18.792	R\$ 43.185	R\$ 11,26
30	46	0	19.014	R\$ 44.171	R\$ 11,39

Gráfico 5 - Série 4: 27 rodotrens sem reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

6.3.5. Série 5 – 27 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

Na quinta série de cenários foram adicionados reboques reserva na lavoura.

Na Tabela 8 verifica-se que nesta série também, como já havia ocorrido com a Série 2, não foi possível atingir a meta de produção mesmo com a adoção de despacho dinâmico.

Comparando os resultados, o custo da produção é menor que aquele obtido na Série 2, mostrado na Tabela 5, indicando que a despacho dinâmico traz algum benefício à operação.

Tabela 8 – Série 5: 27 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

Cenário	Frota		Produção (t/dia)	Custo operação		Tempo de campo (min)
	Caminhões	Reb. reserva na lavoura		Safra (x 1000)	R\$/t	
31	27	5	18.524	R\$ 36.375	R\$ 9,63	13
32	27	10	19.184	R\$ 36.393	R\$ 9,30	9
33	27	15	19.235	R\$ 36.540	R\$ 9,31	8
34	27	20	19.216	R\$ 36.746	R\$ 9,37	8
35	27	25	19.193	R\$ 36.985	R\$ 9,45	8
36	27	30	19.411	R\$ 37.434	R\$ 9,45	8
37	27	35	19.091	R\$ 37.351	R\$ 9,59	8
38	27	40	19.263	R\$ 37.810	R\$ 9,62	8
39	27	45	19.241	R\$ 38.046	R\$ 9,69	8
40	27	50	19.085	R\$ 38.208	R\$ 9,81	8

Gráfico 6 - Série 5: 27 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

6.3.6. Série 6 – 32 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

A sexta série de cenários foi elaborada para verificar como o despacho dinâmico da frota contribui para a melhoria da produção, e para a redução dos custos, em relação à série 3, que foi a primeira série em que se atingiu a meta de produção.

Os resultados da Tabela 9 mostram que houve sucesso na adoção do despacho dinâmico, uma vez que se obteve resultado (cenário 42) com custo de produção melhor que o custo do cenário 18, até então o cenário mais barato (dentre aqueles em que a meta de produção foi atingida).

No cenário 42 o custo de produção é de R\$ 9,45/t, enquanto que o cenário 18 tem custo de R\$ 9,51/t, para a mesma produção diária. Esta diferença de custos equivale à economia de R\$ 266 mil na safra.

Em relação à frota, no cenário 42 foram alocados 10 conjuntos de reboque reserva na lavoura, enquanto que no cenário 18 foram utilizados 15 conjuntos.

Ao comparar os resultados do cenário 16, da Tabela 6, com o cenário 41, da Tabela 9, nota-se que a meta de produção é atingida sem que se altere a capacidade da colheita e da recepção. Os resultados destas duas tabelas (6 e 9) indicam também que a frota de 32 rodotrens com 5 conjuntos de reboques-reservas na lavoura operam bem no transporte, mas são restritas pela capacidade de colheita e/ou recepção.

Tabela 9 – Série 6: 32 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

Cenário	Frota		Produção (t/dia)	Custo operação	
	Caminhões	Reb. reserva na lavoura		Safra (x 1000)	R\$/t
41	32	5	19.524	R\$ 38.933	R\$ 9,78
42	32	10	19.551	R\$ 37.690	R\$ 9,45
43	32	15	19.562	R\$ 37.822	R\$ 9,48
44	32	20	19.596	R\$ 38.101	R\$ 9,53
45	32	25	19.601	R\$ 38.348	R\$ 9,59
46	32	30	19.616	R\$ 38.587	R\$ 9,64
47	32	35	19.618	R\$ 38.835	R\$ 9,70
48	32	40	19.637	R\$ 39.048	R\$ 9,75
49	32	45	19.643	R\$ 39.249	R\$ 9,79
50	32	50	19.659	R\$ 39.568	R\$ 9,87

Gráfico 7 - Série 6: 32 rodotrens com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

6.3.7. Série 7 – 27 a 31 rodotrens, com reboque reserva na lavoura, despacho dinâmico

Ao contrário do despacho estático, em que se aloca uma determinada quantidade de caminhões para cada frente, no despacho dinâmico há um bloco de caminhões que ficam livres para serem alocados para qualquer frente de corte, conforme definido no capítulo 3.

No despacho estático, como cada grupo de caminhões é despachado para a frente de corte para a qual foi inicialmente designado, reduzir um caminhão de uma determinada frente de corte pode comprometer o resultado da produção daquela frente e, quando a frota já está no limite de sua capacidade, os resultados para a produção global são danosos. Esta situação (redução de um equipamento da frota) já não acontece com o despacho dinâmico; pelo menos não é tão sensível como no despacho estático, uma vez que esta técnica consegue distribuir melhor os equipamentos, prevenindo a formação de filas, principalmente, no campo.

A fim de avaliar qual a menor frota possível para atender a demanda de produção, utilizando o despacho dinâmico e reboques reserva na lavoura, criou-se a sétima série de cenários, cujos resultados estão listados Tabela 10. Nesta série foram avaliados quarenta cenários, utilizando os fatores *frota de caminhões* e *frota de reboques reserva* e adotando-se os níveis descritos no Quadro 8.

Fator	Níveis	Intervalo de variação dos níveis
Frota de caminhões	28 a 31	unidade
Frota de reb. Reserve na lavoura	5 a 50	cinco

Quadro 8 - Fatores e níveis da série 7 de cenários

Como era esperado, encontrou-se uma configuração de frota menor que todos os cenários analisados, atendendo a demanda prevista e com o menor custo dentre todos os cenários analisados até então. Estes resultados foram obtidos com a configuração do cenário

56, em que se utilizou uma frota de 29 rodotrens e 10 reboques reserva. O custo deste cenário é de R\$ 9,30 / t, custo este 2,3% menor que o do cenário 18, representando uma economia de R\$ 920,87 mil na safra.

Tabela 10 – Série 7: 28 a 31 rodotrens, com reboque reserva e despacho dinâmico

Cenário	Frota		Produção (t/dia)	Custo operação	
	Caminhões	Reb.reserva na lavoura		Safra (x 1000)	R\$/t
51	28	5	19.147	R\$ 37.421	R\$ 9,58
52	29	5	19.301	R\$ 37.899	R\$ 9,63
53	30	5	19.437	R\$ 38.265	R\$ 9,65
54	31	5	19.478	R\$ 38.627	R\$ 9,72
55	28	10	19.392	R\$ 36.712	R\$ 9,28
56	29	10	19.525	R\$ 37.035	R\$ 9,30
57	30	10	19.542	R\$ 37.233	R\$ 9,34
58	31	10	19.571	R\$ 37.449	R\$ 9,38
59	28	15	19.442	R\$ 36.956	R\$ 9,32
60	29	15	19.550	R\$ 37.187	R\$ 9,32
61	30	15	19.568	R\$ 37.432	R\$ 9,38
62	31	15	19.601	R\$ 37.627	R\$ 9,41
63	28	20	19.551	R\$ 37.303	R\$ 9,35
64	29	20	19.550	R\$ 37.459	R\$ 9,39
65	30	20	19.596	R\$ 37.721	R\$ 9,44
66	31	20	19.566	R\$ 37.925	R\$ 9,50
67	28	25	19.511	R\$ 37.552	R\$ 9,43
68	29	25	19.590	R\$ 37.750	R\$ 9,45
69	30	25	19.590	R\$ 37.928	R\$ 9,49
70	31	25	19.570	R\$ 38.170	R\$ 9,56
71	28	30	19.545	R\$ 37.763	R\$ 9,47
72	29	30	19.544	R\$ 37.953	R\$ 9,52
73	30	30	19.590	R\$ 38.207	R\$ 9,56
74	31	30	19.607	R\$ 38.386	R\$ 9,60
75	28	35	19.614	R\$ 38.077	R\$ 9,52
76	29	35	19.540	R\$ 38.240	R\$ 9,59
77	30	35	19.588	R\$ 38.450	R\$ 9,62
78	31	35	19.619	R\$ 38.663	R\$ 9,66
79	28	40	19.550	R\$ 38.240	R\$ 9,59
80	29	40	19.586	R\$ 38.495	R\$ 9,63

- continua -

- continuação -

Cenário	Caminhões	Frota	Produção (t/dia)	Custo operação	
		Reb.reserva na lavoura		Safra (x 1000)	R\$/t
81	30	40	19.604	R\$ 38.636	R\$ 9,66
82	31	40	19.635	R\$ 38.924	R\$ 9,72
83	28	45	19.581	R\$ 38.538	R\$ 9,65
84	29	45	19.577	R\$ 38.721	R\$ 9,70
85	30	45	19.618	R\$ 38.873	R\$ 9,71
86	31	45	19.648	R\$ 39.082	R\$ 9,75
87	28	50	19.557	R\$ 38.763	R\$ 9,72
88	29	50	19.617	R\$ 39.026	R\$ 9,75
89	30	50	19.643	R\$ 39.219	R\$ 9,79
90	31	50	19.647	R\$ 39.401	R\$ 9,83

A fim de facilitar a visualização dos resultados utilizou-se o gráfico de contorno (Gráficos 8 e 9). Este tipo de gráfico é empregado quando se deseja avaliar o relacionamento entre três variáveis, que neste caso foram custo de produção, a frota de rodotrem e a frota de reboques reserva. O gráfico apresenta, a partir de duas das três variáveis selecionadas, uma região de respostas viáveis para a combinação dessas duas variáveis. Para interpretar este tipo de gráfico utilizam-se duas retas perpendiculares entre si. Cada uma dessas retas cruza um dos eixos do gráfico, também perpendiculares ao eixo em que tocam. No cruzamento entre as duas retas encontra-se a terceira dimensão, ou o resultado procurado. Nos Gráficos 8 e 9 as duas retas vermelhas foram desenhadas para exemplificar a interpretação dos resultados; neste exemplo uma frota de 30 caminhões e 30 reboques reserva produz entre 19.500 e 19.600 t/dia e o custo da operação está entre R\$ 9,50 e R\$ 9,60/t. Para se chegar a estes dois valores é preciso correlacionar a cor da região onde as retas se cruzam com a legenda do gráfico.

Gráfico 8 -Série 7: custo da produção vs frota de caminhões vs frota de reboques reserva

Gráfico 9 - Série 7: produção diária vs frota de caminhões vs frota de reboques reserva

6.3.8. Comparação dos cenários sem bate-volta na usina

Na Tabela 11 encontram agrupados o melhor resultado de cada uma das séries analisadas, tendo sido considerados somente cenários em que se atingiu a meta de produção.

Tabela 11 – Melhores resultados de cada série sem bate-volta na usina

Cenário	Série	Frota		Produção	Custo		Despacho
		Caminhões	Reb.reserva na lavoura	(t/dia)	R\$/t	Safra (x 1000)	
1	Base	27	0	16.245	R\$ 11,27	R\$ 37.334	Estático
18	3	32	15	19.559	R\$ 9,51	R\$ 37.955	Estático
42	6	32	10	19.551	R\$ 9,45	R\$ 37.689	Dinâmico
56	7	29	10	19.525	R\$ 9,30	R\$ 37.034	Dinâmico

É importante notar na Tabela 11 que das sete séries analisadas em apenas três se conseguiu atender a demanda de produção (o cenário base foi listado apenas para comparação). Outra observação que chama a atenção é o fato de que só constam cenários com reboque reserva.

É prática corrente para a quantificação da frota aplicar um percentual de acréscimo à frota calculada deterministicamente; este percentual normalmente é de 30%, atribuído ao tempo de manutenção. Além deste percentual para “tempo de manutenção”, costuma-se calcular a quantidade de reboque reserva como sendo equivalente a 30% da frota estimada. Assim, a partir do cenário base, aplicando estes dois fatores, a frota alocada teria 32 rodotrens e 10 conjuntos reserva. Esta frota corresponde ao cenário 42. Comparando o cenário 42 com o cenário 56, o de menor custo, verifica-se que o custo de produção seria R\$ 0,15/t mais caro, o que representaria um dispêndio de R\$ 654,67 mil na safra.

Confrontando o despacho estático *versus* despacho dinâmico, cenários 18 e 56, respectivamente, a diferença de custos é ainda mais significativa, atingindo R\$ 920,87 mil na safra.

6.3.9. Comparação dos cenários sem bate-volta na usina, com relaxação da meta de produção diária

Considerando uma margem de tolerância de 5% para a produção diária, quando o limite mínimo passa a ser de 18.525 t/dia, elaborou-se uma nova lista com sete cenários, selecionando-se o cenário de menor custo de cada série (Tabela 12). O cenário 56, embora não seja o de menor custo na série 7, neste novo agrupamento de resultados, foi mantido na tabela para facilitar a comparação.

É importante frisar que a perda de receita provocada pela menor quantidade de cana moída não foi computada em nenhum cenário, por não fazer parte do escopo desta dissertação.

Tabela 12 – Melhores resultados de cada série sem bate-volta na usina

Cenário	Série	Frota		Produção (t/dia)	Custo		Despacho
		Caminhões	Reb.reserva na lavoura		R\$/t	Safra (x 1000)	
1	Base	27	0	16.245	R\$ 11,27	R\$ 37.335	Estático
4	1	42	0	18.974	R\$ 11,23	R\$ 43.458	Estático
7	2	27	10	18.891	R\$ 9,39	R\$ 36.173	Estático
18	3	32	15	19.560	R\$ 9,51	R\$ 37.956	Estático
29	4	42	0	18.792	R\$ 11,26	R\$ 43.185	Dinâmico
32	5	27	10	19.184	R\$ 9,30	R\$ 36.393	Dinâmico
42	6	32	10	19.551	R\$ 9,45	R\$ 37.690	Dinâmico
55	7	28	10	19.392	R\$ 9,28	R\$ 36.712	Dinâmico
56	7	29	10	19.525	R\$ 9,30	R\$ 37.035	Dinâmico

Os resultados da Tabela 12, com exceção cenário 1, indicam que, relaxando a meta de produção em 5%, é possível transportar a cota diária de cana sem adotar despacho dinâmico e sem utilizar reboques reserva (cenários 1, 2 e 3), porém, o custo do CCT pode ser até 17,5% maior que no cenário 56 e a frota tem até 13 rodotrens a mais, o que certamente será mais trabalhoso para administrar. Ao custo adicional do CCT devem ser somados ainda a

receita perdida com os produtos que deixarão de ser fabricados com as 101.854 t de cana que não serão transportadas.

Com esta nova regra, ou este novo limitador de produção, o cenário de menor custo passa a ser o 55, com custo de produção de R\$ 9,28/t, ou 0,9% menor que o custo do cenário 56. Neste novo melhor cenário, entretanto, transportam-se 133 t/dia a menos que no cenário 56. Considerando-se 204 dias úteis de safra, a quantidade de cana não transportada é equivalente a 24.546 t, ou 1,26 dias de moagem.

Na comparação do cenário 55, de menor custo, com o cenário 4, o de maior custo, verifica-se a diferença de R\$ 7.285 mil na safra, para uma produção equivalente.

6.4 AVALIAÇÃO DE CENÁRIOS COM ADOÇÃO DE BATE-VOLTA

Após avaliar as respostas ao dimensionamento sem adoção de bate-volta na usina, uma nova sequência de cenários foi desenvolvida a fim de verificar se há algum ganho operacional e/ou econômico com o desengate das composições na usina.

6.4.1. Série 8 – cenário base com bate-volta

O primeiro cenário avaliado nesta nova série foi configurado a partir do cenário base, em que se adotou o despacho estático e não foram utilizados reboques reserva na lavoura. Pelos resultados listados na Tabela 13, verifica-se que somente a adoção de bate-volta na usina não foi capaz de melhorar a produtividade dos rodotrens, ocorrendo apenas o aumento do custo de produção uma vez que novos equipamentos foram agregados à frota.

A quantidade de cavalos escravos e reboques reserva da usina foram propositalmente configuradas para 10 equipamentos. O propósito desta escolha foi o de facilitar a geração dos cenários, pois se constatasse que, com esta quantidade exagerada de equipamentos, mantidos

os demais parâmetros de configuração, não fosse possível transportar a cana necessária outros cenários com quantidades menores de equipamentos não precisariam ser analisados, como de fato ocorreu.

6.4.2. Série 9 – 32 rodotrens com bate-volta e despacho estático

Na sequência foram avaliados os cenários com 32 rodotrens. Esta quantidade de rodotrens foi escolhida por ter sido a configuração do cenário 18, que foi o de menor custo dentre os cenários com despacho estático. Conforme se verifica pelos resultados listados na Tabela 14, para a configuração com 32 rodotrens também não foi possível reduzir o custo de produção adotando-se o bate-volta na usina.

6.4.3. Série 10 – 27 rodotrens com bate-volta e despacho dinâmico

Constatado pela série 8 que uma frota de 27 rodotrens, sem reboque reserva na lavoura, não é suficiente para transportar a produção necessária, foi elaborada uma nova série com 96 cenários. Nesta série a quantidade de cavalos escravo variou entre 5 e 12 e a quantidade de reboques reserva entre 2 e 10. Foram testados os dois métodos de despacho.

Pelos resultados listados na tabela 15 verifica-se que nenhum dos cenários apresentou custo menor que aquele obtido no cenário 56, concluindo-se que, para esta configuração de usina, a adoção de bate-volta na usina não é economicamente viável.

No Gráfico 10 está ilustrado o relacionamento entre tempo de usina *versus* quantidade de cavalos escravo *versus* quantidade de reboques reserva na usina.

Tabela 13 – Série 8: 27 cenário base com bate-volta na usina

.	.	Frota				Produção	Custo operação	Custo da safra	Despacho
Cenário	Série	Caminhões	Reb.reserva na lavoura	Escravo	Reb. Usina	(t/dia)	R\$/t	(x 1000)	
1	8	27	0	0	0	16.245	R\$ 11,27	R\$ 37.335	Estático
91	8	27	0	10	10	16.245	R\$ 11,84	R\$ 39.227	Dinâmico

Tabela 14 – Série 9: 32 rodotrens com e bate-volta na usina

.	.	Frota				Produção	Custo operação	Custo da safra	Despacho
Cenário	Série	Caminhões	Reb.reserva na lavoura	Escravo	Reb. Usina	(t/dia)	R\$/t	R\$	
18	8	32	15	0	0	19.560	R\$ 9,51	R\$ 37.956	Estático
92	8	32	0	10	10	18.877	R\$ 11,31	R\$ 43.544	Estático
93	8	32	5	10	10	19.308	R\$ 10,57	R\$ 41.639	Estático
94	8	32	10	10	10	19.544	R\$ 10,04	R\$ 40.042	Estático
95	8	32	15	10	10	19.451	R\$ 10,12	R\$ 40.136	Estático
96	8	32	20	10	10	19.597	R\$ 10,12	R\$ 40.464	Estático
97	8	32	25	10	10	19.549	R\$ 10,21	R\$ 40.706	Estático

Tabela 15 – Cenários com 27 rodotrens e diferentes quantidades de cavalo-escravo e reb. reserva na usina

Cenário	Série	Caminhões	Frota		Reb. Usina	Produção (t/dia)	Custo operação R\$/t	Custo da safra R\$	Despacho	Tempo de usina (min)
			Reb.reserva na lavoura	Escravo						
98	48	27	10	5	4	13.933	R\$ 11,39	R\$ 32.382	Dinâmico	67
99	22	27	10	5	5	13.910	R\$ 11,50	R\$ 32.620	Estático	60
100	49	27	10	5	5	13.918	R\$ 11,43	R\$ 32.464	Dinâmico	68
101	50	27	10	5	6	13.938	R\$ 11,43	R\$ 32.503	Dinâmico	68
102	51	27	10	5	7	13.930	R\$ 11,45	R\$ 32.539	Dinâmico	68
103	52	27	10	5	8	13.914	R\$ 11,48	R\$ 32.584	Dinâmico	67
104	53	27	10	5	9	13.913	R\$ 11,51	R\$ 32.674	Dinâmico	67
105	54	27	10	5	10	13.934	R\$ 11,50	R\$ 32.701	Dinâmico	67
106	55	27	10	6	4	16.346	R\$ 10,45	R\$ 34.857	Dinâmico	43
107	23	27	10	6	5	16.310	R\$ 10,53	R\$ 35.045	Estático	39
108	56	27	10	6	5	16.346	R\$ 10,46	R\$ 34.889	Dinâmico	44
109	57	27	10	6	6	16.327	R\$ 10,48	R\$ 34.907	Dinâmico	44
110	58	27	10	6	7	16.366	R\$ 10,49	R\$ 35.007	Dinâmico	44
111	59	27	10	6	8	16.352	R\$ 10,50	R\$ 35.034	Dinâmico	44
112	60	27	10	6	9	16.353	R\$ 10,52	R\$ 35.080	Dinâmico	44
113	61	27	10	6	10	16.352	R\$ 10,54	R\$ 35.144	Dinâmico	44

- continua -

- continuação -

Cenário	Série	Caminhões	Frota		Reb. Usina	Produção (t/dia)	Custo operação R\$/t	Custo da safra R\$	Despacho	Tempo de usina (min)
			Reb.reserva na lavoura	Escravo						
114	62	27	10	7	4	18.431	R\$ 9,86	R\$ 37.090	Dinâmico	28
115	24	27	10	7	5	18.429	R\$ 9,92	R\$ 37.302	Estático	23
116	63	27	10	7	5	18.472	R\$ 9,86	R\$ 37.141	Dinâmico	28
117	64	27	10	7	6	18.542	R\$ 9,84	R\$ 37.209	Dinâmico	28
118	65	27	10	7	7	18.503	R\$ 9,87	R\$ 37.242	Dinâmico	28
119	66	27	10	7	8	18.527	R\$ 9,89	R\$ 37.366	Dinâmico	28
120	67	27	10	7	9	18.519	R\$ 9,89	R\$ 37.352	Dinâmico	28
121	68	27	10	7	10	18.506	R\$ 9,92	R\$ 37.438	Dinâmico	27
122	69	27	10	8	4	19.485	R\$ 9,62	R\$ 38.222	Dinâmico	22
123	29	27	5	8	5	19.399	R\$ 9,85	R\$ 38.970	Dinâmico	17
124	25	27	10	8	5	19.534	R\$ 9,65	R\$ 38.439	Estático	18
125	28	27	10	8	5	19.550	R\$ 9,61	R\$ 38.320	Dinâmico	21
126	30	27	10	8	5	19.550	R\$ 9,61	R\$ 38.320	Dinâmico	21
127	70	27	10	8	5	19.550	R\$ 9,61	R\$ 38.320	Dinâmico	21
128	31	27	10	8	6	19.545	R\$ 9,64	R\$ 38.454	Dinâmico	21
129	71	27	10	8	6	19.545	R\$ 9,64	R\$ 38.454	Dinâmico	21
130	32	27	10	8	7	19.546	R\$ 9,63	R\$ 38.418	Dinâmico	21

- continuação -

Cenário	Série	Caminhões	Frota		Reb. Usina	Produção (t/dia)	Custo operação R\$/t	Custo da safra R\$	Despacho	Tempo de usina (min)
			Reb.reserva na lavoura	Escravo						
131	72	27	10	8	7	19.546	R\$ 9,63	R\$ 38.418	Dinâmico	21
132	33	27	10	8	8	19.526	R\$ 9,66	R\$ 38.470	Dinâmico	21
133	73	27	10	8	8	19.526	R\$ 9,66	R\$ 38.470	Dinâmico	21
134	34	27	10	8	9	19.539	R\$ 9,67	R\$ 38.546	Dinâmico	21
135	74	27	10	8	9	19.539	R\$ 9,67	R\$ 38.546	Dinâmico	21
136	35	27	10	8	10	19.537	R\$ 9,71	R\$ 38.686	Dinâmico	22
137	75	27	10	8	10	19.537	R\$ 9,71	R\$ 38.686	Dinâmico	22
138	76	27	10	9	4	19.555	R\$ 9,63	R\$ 38.421	Dinâmico	21
139	26	27	10	9	5	19.554	R\$ 9,69	R\$ 38.664	Estático	18
140	36	27	10	9	5	19.555	R\$ 9,65	R\$ 38.492	Dinâmico	21
141	77	27	10	9	5	19.555	R\$ 9,65	R\$ 38.492	Dinâmico	21
142	37	27	10	9	6	19.560	R\$ 9,66	R\$ 38.531	Dinâmico	21
143	78	27	10	9	6	19.560	R\$ 9,66	R\$ 38.531	Dinâmico	21
144	38	27	10	9	7	19.562	R\$ 9,68	R\$ 38.619	Dinâmico	21
145	79	27	10	9	7	19.562	R\$ 9,68	R\$ 38.619	Dinâmico	21
146	39	27	10	9	8	19.560	R\$ 9,68	R\$ 38.610	Dinâmico	21
147	80	27	10	9	8	19.560	R\$ 9,68	R\$ 38.610	Dinâmico	21

- continuação -

Cenário	Série	Caminhões	Frota		Reb. Usina	Produção (t/dia)	Custo operação R\$/t	Custo da safra R\$	Despacho	Tempo de usina (min)
			Reb.reserva na lavoura	Escravo						
148	40	27	10	9	9	19.560	R\$ 9,70	R\$ 38.705	Dinâmico	21
149	81	27	10	9	9	19.560	R\$ 9,70	R\$ 38.705	Dinâmico	21
150	41	27	10	9	10	19.562	R\$ 9,71	R\$ 38.754	Dinâmico	21
151	82	27	10	9	10	19.562	R\$ 9,71	R\$ 38.754	Dinâmico	21
152	14	27	10	10	2	18.925	R\$ 9,83	R\$ 37.938	Estático	21
153	15	27	10	10	3	19.241	R\$ 9,78	R\$ 38.382	Estático	19
154	16	27	10	10	4	19.473	R\$ 9,74	R\$ 38.673	Estático	17
155	83	27	10	10	4	19.551	R\$ 9,66	R\$ 38.539	Dinâmico	21
156	17	27	10	10	5	19.554	R\$ 9,72	R\$ 38.772	Estático	18
157	27	27	10	10	5	19.554	R\$ 9,72	R\$ 38.772	Estático	18
158	42	27	10	10	5	19.555	R\$ 9,68	R\$ 38.625	Dinâmico	21
159	84	27	10	10	5	19.555	R\$ 9,68	R\$ 38.625	Dinâmico	21
160	18	27	10	10	6	19.509	R\$ 9,77	R\$ 38.874	Estático	16
161	43	27	10	10	6	19.562	R\$ 9,68	R\$ 38.611	Dinâmico	20
162	85	27	10	10	6	19.562	R\$ 9,68	R\$ 38.611	Dinâmico	20
163	19	27	10	10	7	19.547	R\$ 9,76	R\$ 38.914	Estático	17
164	44	27	10	10	7	19.561	R\$ 9,70	R\$ 38.721	Dinâmico	21
165	86	27	10	10	7	19.561	R\$ 9,70	R\$ 38.721	Dinâmico	21

- continuação -

Cenário	Série	Caminhões	Frota		Reb. Usina	Produção (t/dia)	Custo operação R\$/t	Custo da safra R\$	Despacho	Tempo de usina (min)
			Reb.reserva na lavoura	Escravo						
166	20	27	10	10	8	19.560	R\$ 9,75	R\$ 38.917	Estático	17
167	45	27	10	10	8	19.556	R\$ 9,71	R\$ 38.748	Dinâmico	21
168	87	27	10	10	8	19.556	R\$ 9,71	R\$ 38.748	Dinâmico	21
169	21	27	10	10	9	19.557	R\$ 9,76	R\$ 38.959	Estático	17
170	46	27	10	10	9	19.557	R\$ 9,73	R\$ 38.831	Dinâmico	21
171	88	27	10	10	9	19.557	R\$ 9,73	R\$ 38.831	Dinâmico	21
172	8	27	0	10	10	17.238	R\$ 11,55	R\$ 40.628	Estático	7
173	9	27	5	10	10	19.443	R\$ 10,09	R\$ 40.036	Estático	9
174	10	27	10	10	10	19.560	R\$ 9,79	R\$ 39.072	Estático	17
175	47	27	10	10	10	19.565	R\$ 9,74	R\$ 38.893	Dinâmico	21
176	89	27	10	10	10	19.565	R\$ 9,74	R\$ 38.893	Dinâmico	21
177	11	27	15	10	10	19.565	R\$ 9,82	R\$ 39.202	Estático	18
178	12	27	20	10	10	19.613	R\$ 9,86	R\$ 39.439	Estático	18
179	13	27	25	10	10	19.544	R\$ 9,96	R\$ 39.722	Estático	17
180	90	27	10	11	4	19.542	R\$ 9,71	R\$ 38.707	Dinâmico	21
181	91	27	10	11	5	19.556	R\$ 9,70	R\$ 38.715	Dinâmico	22
182	92	27	10	11	6	19.559	R\$ 9,72	R\$ 38.781	Dinâmico	21

- continuação -

Cenário	Série	Caminhões	Frota		Reb. Usina	Produção (t/dia)	Custo operação R\$/t	Custo da safra R\$	Despacho	Tempo de usina (min)
			Reb.reserva na lavoura	Escravo						
183	93	27	10	11	7	19.559	R\$ 9,73	R\$ 38.803	Dinâmico	20
184	94	27	10	11	8	19.563	R\$ 9,76	R\$ 38.935	Dinâmico	20
185	95	27	10	11	9	19.561	R\$ 9,77	R\$ 38.968	Dinâmico	21
186	96	27	10	11	10	19.563	R\$ 9,78	R\$ 39.050	Dinâmico	21
187	97	27	10	12	4	19.545	R\$ 9,73	R\$ 38.806	Dinâmico	21
188	98	27	10	12	5	19.550	R\$ 9,75	R\$ 38.891	Dinâmico	21
189	99	27	10	12	6	19.557	R\$ 9,77	R\$ 38.974	Dinâmico	21
190	100	27	10	12	7	19.566	R\$ 9,76	R\$ 38.940	Dinâmico	21
191	101	27	10	12	8	19.565	R\$ 9,78	R\$ 39.037	Dinâmico	21
192	102	27	10	12	9	19.565	R\$ 9,80	R\$ 39.109	Dinâmico	22
193	103	27	10	12	10	19.561	R\$ 9,80	R\$ 39.113	Dinâmico	21

Gráfico 10 - Tempo de usina vs Escravo vs Reb. Usina

7. CONCLUSÕES

A dissertação atingiu o objetivo de desenvolver uma ferramenta computacional, baseada em simulação estocástica, que fosse capaz de representar a despacho de caminhões para o transporte de cana-de-açúcar, tanto pelo método dinâmico como pelo método estático e que permitisse, também, avaliar a adoção de sistema de *drop and hook* das composições na usina.

O modelo permitiu ainda avaliar como a produção e seu custo operacional são afetados pelo tamanho da frota de caminhões e de semi-reboques.

As respostas à adoção de reboques reserva, e de despacho dinâmico não seriam possíveis de serem obtidas por métodos determinísticos, uma vez que por este método de quantificação não é possível saber, *a priori*, como estas duas variáveis afetam o desempenho da frota, ou, como se comportam os tempos de permanência no campo e na usina.

Verificou-se que, para uma usina com as condições e custos operacionais como as consideradas neste trabalho, a opção de menor custo para o CCT é aquela em que se adota o despacho dinâmico, com descarregamento direto das composições rodoviárias, ou seja, sem adoção de *drop and hook*.

7.1 RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se a adoção da simulação para análises de sistemas em que estejam presentes interações entre processos, entre recursos, e entre estes dois componentes simultaneamente.

A simulação é indicada como ferramenta de apoio à tomada de decisão, principalmente em planejamentos estratégicos e para a análise de sistemas, especialmente aqueles ainda não implementados.

Como o custo de um estudo de simulação é relativamente alto, pois requer a presença de especialistas e um longo tempo de desenvolvimento, desde a decisão pela análise do problema até a obtenção dos resultados finais, recomenda-se que durante a fase de definição dos sistema seja dada atenção ao uso futuro do modelo, de forma a prolongar a sua vida útil, diluindo assim o investimento.

Por outro lado, como lembra SILVA (2006), é importante que se mantenha o foco no propósito do estudo, sob pena de se desviar do objetivo inicial traçado.

Este trabalho só foi possível de ser realizado, em grande parte, em função da experiência do autor com as atividades de CCT, bem como com o desenvolvimento de sistemas computacionais, em especial um sistema para despacho de caminhões. Ainda assim foi necessário, e recomenda-se, que haja uma forte participação de técnicos que vivenciam o dia-a-dia do sistema em análise.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho avaliou-se a política de despacho de caminhões e a adoção de sistema *drop and hook*, considerando-se somente um tipo de sistema de colheita – cana picada.

Com base no modelo desenvolvido, outros estudos podem ser conduzidos, como por exemplo a avaliação de outros tipos de composição, frentes de corte de cana inteira interagindo com frentes de corte de cana picada, análise do impacto da variação das características agrônômicas da cana-de-açúcar ao longo da safra (variação dos teores de açúcar e fibra), entre outros fatores.

No campo da avaliação econômica, outras abordagens podem também ser avaliadas, como a terceirização da frota, quando parte dos custos são suportados pela usina e parte por empresas prestadoras de serviços.

Ainda no âmbito da avaliação econômica pode-se avaliar o custo da falta de cana, buscando não a minimização do custo, mas a maximização do lucro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCE, J.E, CARNIEIRI, C., MENDES, J.B **Un sistema de programación del transporte forestal principal objetivando la minimización de costos.** Investigación Operativa, Brasil, v. 8, n. 1, 2 y 3, p. 51-61, 1999.

CAIXETA FILHO, JOSÉ VICENTE. **Estrutura de modelagem para programação de colheita de laranja.** São Paulo, 1993. (Tese de Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

CASE IH, folheto promocional de produtos, 2008.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos:** Teoria e Aplicações. 1. ed. São Paulo: Bravarte, 2006. v. 1. 255 p.

COCHRAN, B.J. & WHITNEY, R.W. **A technique for designing transport systems for sugarcane.** In: International Society of Sugar Cane Technologists Congress, 16. São Paulo, 1977. Anais. São Paulo, ISSCT, 1977. p. 2069-79.

FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas** com aplicações em Arena, *Visual Books*, 2001.

GAUCHER, S., LE GAL, P. Y. , SOLER, G. **Modelling supply chain management in the sugar industry**, in Annual Congress - South African Sugar Technologists' Association, 2003 (No. 77) 542-554.

GUALDA, N.D. F. **Terminais de transporte:** contribuição ao Planejamento e ao Dimensionamento Operacional. Tese apresentada para a Escola Politécnica da USP para o Concurso de Livre Docência. São Paulo, 1995

HAHN, M. H. **SISTEC:** Simulador de sistema de transporte da cana-de-açúcar. Dissertação (Mestrado em Eng. Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.

IANNONI, A. P. **Análise do sistema logístico de descarga de cana-de-açúcar:** Um Estudo de Caso em uma Grande Usina na Região de Ribeirão Preto. Dissertação (Mestrado em Eng. Produção) - Departamento de Eng. de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

KELTON, W.D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKY, D. A. **Simulation with Arena.** McGraw-Hill, New York, 1998.

LOPES M. B. **Simulação de um sistema de carregamento e transporte de cana-de-açúcar.** Dissertação (Mestrado em Eng. Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

PEGDEN, C. D., SHANNON, R. E., SADOWSKI, R. P.: **Introduction to simulation using SIMAN.** 2.ed. McGraw-Hill, New York, 1995.

RAICU, R. ,TAYLOR, M. A. P. **Computerised decision support system for the operational management of transportation of sugar cane.** In Taylor, M A P (ed). *Transportation and Traffic Theory in the 21st Century.* (Elsevier-Pergamon: Oxford), pp.197-218, 2002.

SADOWSKY, D. A.; GRABAU, M. R. **Tips for successful practice of simulation.** Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, 1999.

SALIBY, E. **Repensando a simulação:** a amostragem descritiva. São Paulo; 1989, Editora da UFRJ.

SEIXAS, F. & WIDMER, J.A. **Seleção e dimensionamento da frota de veículos rodoviários para o transporte principal de madeira utilizando-se programação linear não inteira,** *IPEF*, n. 46, p. 107-118, 1993.

SILVA, J. E. A. R. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.** São Paulo. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos, 2006.

SLACK, N. *et alli* **Administração da produção.** Editora Atlas. São Paulo, 1997.

TRACAN <<http://www.tracan.com.br/produtos.htm>> visitado em 08/02/2009

ÚNICA <<http://www.unica.com.br/userFiles/estatisticas/produção%20Brasil%203.xls>> visitado em 03/02/2008.

WIDMER, J.A. **A influência de técnicas de despacho e processamento de caminhões na formação de filas no transporte agrícola,** VI Congresso Panamericano de Ingeniería de Tránsito e Transporte, p. 107 – 119, 1990.

YOSHIZAKI, H. T. Y. **Análise de Desempenho Operacional de Sistemas Logísticos e de Transportes:** Aplicações de Redes de Filas. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Eng. Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1989.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Distribuições estatísticas dos tempos de manutenção dos caminhões

Evento	Tamanho da amostra	Mínimo	Média	Máximo	Ajuste
Abastecimento - intervalo	-	-	450	-	-
Abastecimento - duração	262	9.1	14.8	22.7	$9 + 14 * \text{BETA}(0.976, 1.33)$
Borracharia – intervalo	452	18	5430	43200	$18 + \text{WEIB}(4.82\text{e}+003, 0.806)$
Borracharia – duração	516	8	165	176	$8 + \text{WEIB}(141, 1.09)$
Eétrica – intervalo	777	10	3570	59500	$10 + \text{EXPO}(3.56\text{e}+003)$
Elétrica – duração	805	3	95	490	$3 + \text{LOGN}(100, 163)$
Funilaria – intervalo	509	28	4630	40900	$28 + \text{WEIB}(4\text{e}+003, 0.92)$
Funilaria - duração	560	9	143	999	$9 + \text{LOGN}(165, 365)$
Geral - intervalo	623	131	4490	18900	$100 + \text{GAMM}(3.13\text{e}+003, 1.4)$
Geral - duração	696	6	257	1880	$6 + \text{EXPO}(251)$
Motor – intervalo	617	11	4450	53400	$11 + \text{EXPO}(4.44\text{e}+003)$
Motor – duração	687	5	192	1760	$5 + \text{LOGN}(235, 633)$

APÊNDICE B – Distribuições estatísticas dos tempos de manutenção dos tratores de transbordo

Evento	Tamanho da amostra	Mínimo	Média	Máximo	Ajuste
Abastecimento - intervalo	115	120	360	1440	$120 + 1.2e+003 * \text{beta}(0.713, 2.89)$
Abastecimento – duração	165	5	13	50	$4 + \text{expo}(9.09)$
Manut. Lavoura – intervalo	87	-	1656	-	$\text{Disc}(0.17, 200, 0.37, 500, 0.69, 1200, 0.86, 2000, 1.00, 5700)$
Manut. Lavoura – duração	87	300	801	2850	$300 + \text{weib}(480, 0.908)$
Rep. Mecânico – intervalo	208	-	705	-	$\text{Disc}(0.12, 50, 0.28, 180, 0.50, 450, 0.66, 650, 0.81, 900, 0.93, 1500, 1.00, 2174)$
Rep. Mecânico – duração	197	11	118	300	$11 + \text{gamm}(76.3, 1.4)$

APÊNDICE C – Distribuições Estatísticas dos tempos operacionais na usina

EVENTO	Tamanho da amostra	Mínimo	Médio	Máximo	Ajuste
Pesagem vazio	92	0,725	1,5	2,3	$0.7+1.6*\text{Beta}(1.94,1.93)$
Pesagem carregado	82	0,725	1,5	2,3	$0.7+1.6*\text{Beta}(1.94,1.93)$
Deslocamento p/ sonda	96	0,668	1,77	2,78	$0.45+2.55*\text{Beta}(9.07,8.43)$
Sonda-tempo de 1 amostragem* (30%)	92	0,5	0,901	1,48	Norm(0.901,0.17)
Deslocamento sonda-descarga	88	2,11	3,86	4,59	$2.1+2.5*\text{Beta}(4.05,1.68)$
Deslocamento pesagem-descarga	75	3,35	4,99	6,09	Norm(4.99,0.485)
Descarga	94	4,1	4,7	5,71	Norm(4.7,0.309)
Deslocamento descarga-balança	91	1,3	1,9	2,54	Norm(1.9,0.205)

- Multiplicar pelo número de amostragens realizadas.

APÊNDICE D – Distribuições Estatísticas dos tempos de manutenção das colhedoras

EVENTO	Tamanho da amostra	Mínimo	Média	Máximo	Ajuste
ABASTECIMENTO E LUBRIFICAÇÃO	3142	10	23	96	10+WEIB(8.89,0.582)
	3279	120	463	899	120+780*BETA(1.15,1.46)
REPARO ELÉTRICO NA MÁQUINA	94	10	25	50	10+EXPO(15)
	68	110	3100	7800	109+7.89E+003*BETA(0.507,0.816)
LAVAGEM MÁQUINA/IMPLEMENTO	202	15	42	100	15+EXPO(27.7)
	176	1240	11500	40100	1.25E+003+WEIB(6.65E+003,0.484)
REPARO MECÂNICO MÁQUINA CAMPO	285	5	104	650	4+LOGN(105,145)
	287	15	628	3550	15+3.53E+003*BETA(0.782,3.73)

APÊNDICE G – Código fonte em linguagem SIMAN, da rotina de despacho de caminhões, gerado pelo software Arena

```

; Model statements for module: Station 1
5$ STATION, st_SEMAFORO;
131$ TRACE, -1,"-Arrived to station st_SEMAFORO\n":NEXT(6$);
; Model statements for module: Batch 1
6$ QUEUE, SEMAFORO_Q;
134$ COMBINE: v_num_frentes,Last;
138$ TRACE, -1,"-Formed a permanent batch of size v_num_frentes\n":;
135$ DELAY: 0.000,,Other:NEXT(57$);
; Model statements for module: Delay 4
57$ TRACE, -1,"-Delaying for time 0.1\n":;
146$ DELAY: 0.1,,Other:NEXT(8$);
; Model statements for module: Signal 2
8$ TRACE, -1,"-Sending signal SINALVERDE\n":;
147$ SIGNAL: SINALVERDE,1:NEXT(9$);
; Model statements for module: Dispose 2
9$ TRACE, -1,"-Disposing entity\n":;
148$ DISPOSE: Yes;
; Model statements for module: Station 3
49$ STATION, st_Estacionamento2;
150$ TRACE, -1,"-Arrived to station st_Estacionamento2\n":NEXT(45$);
; Model statements for module: Assign 14
45$ TRACE, -1,"-Making assignments\n":;
152$ ASSIGN: aPrioridade_trafego=1:NEXT(46$);
; Model statements for module: Duplicate 1
46$ TRACE, -1,"-Duplicating entities\n":;
153$ DUPLICATE, 100:
1,50$,0:NEXT(98$);
; Model statements for module: Choose 41
98$ TRACE, -1,"-Choosing from 2 options\n":;
154$ BRANCH, 1:
If,vBate_volta==1.and.(aTipo==rod_pic .or. aTipo == rod_d_pic),99$,Yes:
Else,113$,Yes;
; Model statements for module: Leave 25
99$ DELAY: 0.00,,Other:NEXT(181$);
181$ ASSIGN: M=st_Estacionamento2;
166$ DELAY: 0,,Other:NEXT(192$);
192$ TRACE, -1,"-Transferred to station st_Estacionamento3\n":;
168$ ROUTE: 0,st_Estacionamento3;
; Model statements for module: Wait 5
113$ QUEUE, q_espera_trafego:MARK(QueueTime);
206$ WAIT: sg_espera_trafego,1;
207$ TALLY: q_espera_trafego Queue Time,INT(QueueTime),1:NEXT(44$);
; Model statements for module: Leave 5
44$ DELAY: 0.00,,Other:NEXT(235$);
235$ ASSIGN: M=st_Estacionamento2;

```



```

220$    DELAY:      0.,Other:NEXT(246$);
246$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_trafego3\n";
222$    ROUTE:      0.2,st_trafego3;
;    Model statements for module: Signal 5
50$     TRACE,      -1,"-Sending signal DECISAOTOMADA\n";
260$    SIGNAL:      DECISAOTOMADA:NEXT(51$);
;    Model statements for module: Delay 3
51$     TRACE,      -1,"-Delaying for time 0.5\n";
261$    DELAY:      0.5,,Other:NEXT(47$);
;    Model statements for module: Release 3
47$     TRACE,      -1,"-Releasing resources\n";
262$    RELEASE:     r_CONTROLEDETRAFEGO,1:NEXT(48$);
;    Model statements for module: Dispose 3
48$     TRACE,      -1,"-Disposing entity\n";
263$    DISPOSE:     Yes;
;    Model statements for module: Station 4
58$     STATION,     st_inicio_trafego:MARK(achega_na_usina_s);
265$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_inicio_trafego\n":NEXT(13$);
;    Model statements for module: Station 2
13$     STATION,     st_Trafego:MARK(ch_controle);
268$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_Trafego\n":NEXT(119$);
;    Model statements for module: Assign 49
119$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
270$    ASSIGN:      aEstacao=m:
                aDESTINO=22:NEXT(111$);
;    Model statements for module: Choose 46
111$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
271$    BRANCH,      1:
                If,nq(q_espera_trafego) >= 1,118$,Yes:
                Else,110$,Yes;
;    Model statements for module: Assign 48
118$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
272$    ASSIGN:      aEstacao=m:
                aDESTINO=22:NEXT(126$);
;    Model statements for module: Signal 18
126$    TRACE,      -1,"-Sending signal sg_espera_trafego\n";
273$    SIGNAL:      sg_espera_trafego,1:NEXT(112$);
;    Model statements for module: Leave 26
112$    DELAY:      0.00,,Other:NEXT(300$);
300$    ASSIGN:      M=st_Trafego;
285$    DELAY:      0.,Other:NEXT(311$);
311$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Estacionamento4\n";
287$    ROUTE:      0,st_Estacionamento4;
;    Model statements for module: Station 8
110$    STATION,     st_trafego2;
326$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_trafego2\n":NEXT(43$);
;    Model statements for module: Choose 14
43$     TRACE,      -1,"-Choosing from 4 options\n";
328$    BRANCH,      1:
                If,aFrente == 0,56$,Yes:

```

```

    If,vControle_trafego==0,52$,Yes:
    If,nr(r_CONTROLEDETRAFEGO) >= 1 .or. ne(st_trafego3) >= 1,121$,Yes:
    Else,12$,Yes;
;   Model statements for module: Assign 22
56$   TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
329$   ASSIGN:    vErroVetor=800:NEXT(59$);
;   Model statements for module: Dispose 4
59$   TRACE,      -1,"-Disposing entity\n";
330$   DISPOSE:   Yes;
;   Model statements for module: Leave 12
52$   DELAY:      0.00,,Other:NEXT(357$);
357$   ASSIGN:    M=st_trafego2;
342$   DELAY:      0.,,Other:NEXT(368$);
368$   TRACE,      -1,"-Transferred to station st_SEGUE_USINA\n";
344$   ROUTE:      0,st_SEGUE_USINA;
;   Model statements for module: Leave 27
121$   DELAY:      0.00,,Other:NEXT(408$);
408$   ASSIGN:    M=st_Trafego;
393$   DELAY:      0.,,Other:NEXT(419$);
419$   TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Estacionamento4\n";
395$   ROUTE:      0,st_Estacionamento4;
;   Model statements for module: Assign 4
12$   TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
433$   ASSIGN:    aHaDestino=0:
        aPrioridade_trafego=0:
        aRetorna_trafego=0:
        aJa_passou_ordena=0:
        aFrente=20:
        aDESTINO=0:NEXT(2$);
;   Model statements for module: Seize 1
2$   QUEUE,      q_TRAFEGO:MARK(QueueTime);
434$   SEIZE,      ,Other:
        r_CONTROLEDETRAFEGO,1:NEXT(439$);
439$   ASSIGN:    j=j;
435$   TALLY:     q_TRAFEGO Queue Time,INT(QueueTime),1:NEXT(122$);
;   Model statements for module: Choose 48
122$   TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
440$   BRANCH,    1:
        If,vBate_volta==1.and.(aTipo==rod_pic .or. aTipo == rod_d_pic),123$,Yes:
        Else,0$,Yes;
;   Model statements for module: Choose 49
123$   TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
441$   BRANCH,    1:
        If,nq(q_cj_vz_u) >= 1,0$,Yes:
        If,nq(q_semi_vz_u) >=1 .and. nq(q_reb_vz_u) >= 1,0$,Yes:
        Else,124$,Yes;
;   Model statements for module: Signal 1
0$   TRACE,      -1,"-Sending signal saidadecaminhao\n";
442$   SIGNAL:     saidadecaminhao:NEXT(10$);
;   Model statements for module: Wait 1

```

```

10$      QUEUE,      q_SINALVERDE;
443$     WAIT:       SINALVERDE,1;
445$     DELAY:      0.000,,Other:NEXT(4$);
4$       FINDJ,      1,v_num_frentes:MAX(vVazao(J,1)):NEXT(1$);
;   Model statements for module: Assign 3
1$       TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
446$     ASSIGN:     aJa_passou_ordena=0:
                aDESTINO=J+6:
                aVazaodestino=vCc(aDESTINO,22):
                aPrioridade_trafego=1:
                aPassada=1:
                aDESTINADO=0:
                vTemp5=aDestino:NEXT(89$);
;   Model statements for module: Choose 40
89$      TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
447$     BRANCH,      1:
                If,vBate_volta==1.and.(aTipo==rod_pic .or. aTipo == rod_d_pic),lbRodotrem,Yes:
                Else,14$,Yes;
;   Model statements for module: Choose 33
lbRodotrem TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
448$     BRANCH,      1:
                If,aVazaodestino>=1,75$,Yes:
                Else,100$,Yes;
;   Model statements for module: Assign 44
75$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
449$     ASSIGN:     aHaDestino=1:NEXT(60$);
;   Model statements for module: Choose 34
60$      TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
450$     BRANCH,      1:
                If,vPrioriza(aDestino,7)==1.and.aRestricao==0,76$,Yes:
                If,vPrioriza(aDestino,7)==1,67$,Yes:
                Else,70$,Yes;
;   Model statements for module: Choose 38
76$      TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
451$     BRANCH,      1:
                If,nq(q_cj_vz_u) >= 1,80$,Yes:
                If,nq(q_semi_vz_u) >=1 .and. nq(q_reb_vz_u) >= 1,79$,Yes:
                Else,94$,Yes;
80$      REMOVE:     1,q_cj_vz_u,Match_cj L2:NEXT(108$);
;   Model statements for module: Choose 45
108$     TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
452$     BRANCH,      1:
                If,vCc(7,22)>=1.or.vCc(8,22)>=1.or.vCc(9,22)>=1.or.vCc(10,22)>=1,109$,Yes:
                Else,64$,Yes;
;   Model statements for module: Signal 16
109$     TRACE,      -1,"-Sending signal sg_espera_trafego\n";
453$     SIGNAL:     sg_espera_trafego,1:NEXT(64$);
;   Model statements for module: Signal 11
64$      TRACE,      -1,"-Sending signal DECISAOTOMADA\n";
454$     SIGNAL:     DECISAOTOMADA:NEXT(66$);

```

```

; Model statements for module: Delay 9
66$    TRACE,      -1,"-Delaying for time 0.1\n";
455$    DELAY:      0.1,,Other:NEXT(63$);
; Model statements for module: Release 7
63$    TRACE,      -1,"-Releasing resources\n";
456$    RELEASE:    r_CONTROLEDETRAFEGO,1:NEXT(65$);
; Model statements for module: Leave 18
65$    DELAY:      0.00,,Other:NEXT(483$);
483$    ASSIGN:     M=st_trafego2;
468$    DELAY:      0,,Other:NEXT(494$);
494$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_SEGUE_cavalo\n";
470$    ROUTE:      0,st_SEGUE_cavalo;
79$    REMOVE:      1,q_semi_vz_u,78$;
81$    REMOVE:      1,q_reb_vz_u,78$:NEXT(108$);
; Model statements for module: Batch 3
78$    TRACE,      -1,"-Waiting for batch size of 2\n";
509$    COMBINE:     2,Last;
513$    TRACE,      -1,"-Formed a permanent batch of size 2\n";
510$    DELAY:      0.000,,Other:NEXT(Match_cj L2);
; Model statements for module: Leave 23
94$    DELAY:      0.00,,Other:NEXT(547$);
547$    ASSIGN:     M=st_trafego2;
532$    DELAY:      0,,Other:NEXT(558$);
558$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Estacionamento2\n";
534$    ROUTE:      0,st_Estacionamento2;
; Model statements for module: Choose 36
67$    TRACE,      -1,"-Choosing from 5 options\n";
572$    BRANCH,      1:
        If,TDIA>=vHRst(1,1).AND.TDIA<=vHRst(1,2),82$,Yes:
        If,TDIA>=vHRst(2,1).AND.TDIA<=vHRst(2,2),82$,Yes:
        If,(TDIA+tavg(tl_rod_vz(aDestino)))>=vHrst(1,1).and.TDIA<=vHrst(1,2),82$,Yes:
        If,(TDIA+tavg(tl_rod_vz(aDestino)))>=vHrst(2,1).and.TDIA<=vHrst(2,2),82$,Yes:
        Else,76$,Yes;
; Model statements for module: Choose 39
82$    TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
573$    BRANCH,      1:
        If,nq(q_semi_vz_u) >=1,83$,Yes:
        If,nq(q_cj_vz_u) >= 1,88$,Yes:
        Else,97$,Yes;
83$    REMOVE:      1,q_semi_vz_u,Match_cjd L2:NEXT(106$);
; Model statements for module: Choose 44
106$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
574$    BRANCH,      1:
        If,vCc(7,22)>=1.or.vCc(8,22)>=1.or.vCc(9,22)>=1.or.vCc(10,22)>=1,107$,Yes:
        Else,85$,Yes;
; Model statements for module: Signal 15
107$    TRACE,      -1,"-Sending signal sg_espera_trafego\n";
575$    SIGNAL:      sg_espera_trafego,1:NEXT(85$);
; Model statements for module: Signal 12
85$    TRACE,      -1,"-Sending signal DECISAOTOMADA\n";

```

```

576$    SIGNAL:    DECISAOTOMADA:NEXT(87$);
;    Model statements for module: Delay 10
87$    TRACE,     -1,"-Delaying for time 0.1\n";
577$    DELAY:     0.1,,Other:NEXT(84$);
;    Model statements for module: Release 8
84$    TRACE,     -1,"-Releasing resources\n";
578$    RELEASE:   r_CONTROLEDETRAFEGO,1:NEXT(86$);
;    Model statements for module: Leave 21
86$    DELAY:     0.00,,Other:NEXT(605$);
605$    ASSIGN:    M=st_trafego2;
590$    DELAY:     0,,Other:NEXT(616$);
616$    TRACE,     -1,"-Transferred to station st_SEGUE_cavalo_d\n";
592$    ROUTE:     0,st_SEGUE_cavalo_d;
88$    REMOVE:    1,q_cj_vz_u,Match_cjd2 L2:NEXT(104$);
;    Model statements for module: Choose 43
104$    TRACE,     -1,"-Choosing from 2 options\n";
630$    BRANCH,    1:
        If,vCc(7,22)>=1.or.vCc(8,22)>=1.or.vCc(9,22)>=1.or.vCc(10,22)>=1,105$,Yes:
        Else,91$,Yes;
;    Model statements for module: Signal 14
105$    TRACE,     -1,"-Sending signal sg_espera_trafego\n";
631$    SIGNAL:    sg_espera_trafego,1:NEXT(91$);
;    Model statements for module: Signal 13
91$    TRACE,     -1,"-Sending signal DECISAOTOMADA\n";
632$    SIGNAL:    DECISAOTOMADA:NEXT(93$);
;    Model statements for module: Delay 11
93$    TRACE,     -1,"-Delaying for time 0.1\n";
633$    DELAY:     0.1,,Other:NEXT(90$);
;    Model statements for module: Release 9
90$    TRACE,     -1,"-Releasing resources\n";
634$    RELEASE:   r_CONTROLEDETRAFEGO,1:NEXT(92$);
;    Model statements for module: Leave 22
92$    DELAY:     0.00,,Other:NEXT(661$);
661$    ASSIGN:    M=st_trafego2;
646$    DELAY:     0,,Other:NEXT(672$);
672$    TRACE,     -1,"-Transferred to station st_SEGUE_cavalo_d2\n";
648$    ROUTE:     0,st_SEGUE_cavalo_d2;
;    Model statements for module: Leave 24
97$    DELAY:     0.00,,Other:NEXT(712$);
712$    ASSIGN:    M=st_trafego2;
697$    DELAY:     0,,Other:NEXT(723$);
723$    TRACE,     -1,"-Transferred to station st_Estacionamento2\n";
699$    ROUTE:     0,st_Estacionamento2;
;    Model statements for module: Choose 37
70$    TRACE,     -1,"-Choosing from 2 options\n";
737$    BRANCH,    1:
        If,aJa_passou_ordena==0,ordena_rod,Yes:
        Else,62$,Yes;
;    Model statements for module: Ordena 2
ordena_rod STATION,    st_ordena_rod;

```

```

749$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_ordena_rod\n":NEXT(739$);
739$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
751$    ASSIGN:      i=1:NEXT(746$);
746$    WHILE:       i<=4:NEXT(741$);
741$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
752$    ASSIGN:      varord(i)=vvazao(i,1):
                vNovaordem(i)=i:
                i=i+1:NEXT(747$);
747$    ENDWHILE:NEXT(742$);
742$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
753$    ASSIGN:      i=1:NEXT(744$);
744$    WHILE:       i<=4;
738$    FINDJ,      i,4:max(varord(j)):NEXT(740$);
740$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
754$    ASSIGN:      troca=varord(j):
                troca2=vNovaordem(j):
                varord(j)=varord(i):
                vNovaordem(j)=vNovaordem(i):
                varord(i)=troca:
                vNovaordem(i)=troca2:
                i=i+1:NEXT(745$);
745$    ENDWHILE:NEXT(743$);
743$    DELAY:       0.00,,Other:NEXT(766$);
766$    DELAY:       0.,,Other:NEXT(793$);
793$    TRACE,      -1,"-Transferred to next module\n":NEXT(71$);
;    Model statements for module: Assign 42
71$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
806$    ASSIGN:      aJa_passou_ordena=1:NEXT(62$);
;    Model statements for module: Assign 40
62$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
807$    ASSIGN:      aPassada=aPassada+1:NEXT(61$);
;    Model statements for module: Choose 35
61$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n"::;
808$    BRANCH,     1:
                If,aPassada > v_num_frentes,100$,Yes:
                Else,68$,Yes;
;    Model statements for module: Assign 47
100$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
809$    ASSIGN:      aDESTINO=22:NEXT(69$);
;    Model statements for module: Leave 19
69$    DELAY:       0.00,,Other:NEXT(836$);
836$    ASSIGN:      M=st_trafego2;
821$    DELAY:       0.,,Other:NEXT(847$);
847$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Estacionamento2\n"::;
823$    ROUTE:      .1,st_Estacionamento2;
;    Model statements for module: Assign 41
68$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n"::;
861$    ASSIGN:      aDESTINO=vNovaordem(aPassada)+6:
                aVazaodestino=vCc(aDestino,22):
                vTemp5=aDestino:NEXT(lbRodotrem);

```

```

; Model statements for module: Choose 2
14$    TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
862$    BRANCH,      1:
        If,aVazaodestino>=1,53$,Yes:
        If,aHadestino == 1,55$,Yes:
        Else,37$,Yes;
; Model statements for module: Assign 20
53$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
863$    ASSIGN:      aHaDestino=1:NEXT(15$);
; Model statements for module: Choose 3
15$    TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
864$    BRANCH,      1:
        If,vPrioriza(aDestino,aTipo)==1.and.aRestricao==0,115$,Yes:
        If,vPrioriza(aDestino,aTipo)==1,29$,Yes:
        Else,41$,Yes;
; Model statements for module: Choose 47
115$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
865$    BRANCH,      1:
        If,vCc(7,22)>=1.or.vCc(8,22)>=1.or.vCc(9,22)>=1.or.vCc(10,22)>=1,116$,Yes:
        Else,20$,Yes;
; Model statements for module: Signal 17
116$    TRACE,      -1,"-Sending signal sg_espera_trafego\n";
866$    SIGNAL:      sg_espera_trafego:NEXT(20$);
; Model statements for module: Signal 3
20$    TRACE,      -1,"-Sending signal DECISAOTOMADA\n";
867$    SIGNAL:      DECISAOTOMADA:NEXT(22$);
; Model statements for module: Delay 1
22$    TRACE,      -1,"-Delaying for time 0.1\n";
868$    DELAY:      0.1,,Other:NEXT(19$);
; Model statements for module: Release 1
19$    TRACE,      -1,"-Releasing resources\n";
869$    RELEASE:      r_CONTROLEDETRAFEGO,1:NEXT(23$);
; Model statements for module: Choose 6
23$    TRACE,      -1,"-Choosing from 10 options\n";
870$    BRANCH,      1:
        If,aornec==1,27$,Yes:
        If,aTipo ==truck,27$,Yes:
        If,aTipo==Rj_int,25$,Yes:
        If,aTipo==rj_pic,25$,Yes:
        If,aTipo==tre_int,24$,Yes:
        If,aTipo==Tre_pic,24$,Yes:
        If,aTipo==rod_int,28$,Yes:
        If,aTipo==rod_pic,28$,Yes:
        If,aTipo==rod_d_int,26$,Yes:
        Else,26$,Yes;
; Model statements for module: Assign 9
27$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
871$    ASSIGN:      aPassada=0:
        Picture=toco_vz:NEXT(21$);
; Model statements for module: Leave 1

```

```

21$      DELAY:      0.00,,Other:NEXT(898$);
898$      ASSIGN:      M=st_trafe2;
883$      DELAY:      0.,,Other:NEXT(909$);
909$      TRACE,      -1,"-Transferred to station st_SEGUE_USINA\n";
885$      ROUTE:      0,st_SEGUE_USINA;
;   Model statements for module: Assign 7
25$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
923$      ASSIGN:      Picture=ro_ju_vz:
                aPassada=0:NEXT(21$);
;   Model statements for module: Assign 6
24$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
924$      ASSIGN:      aPassada=0:
                Picture=trem_vz:NEXT(21$);
;   Model statements for module: Assign 10
28$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
925$      ASSIGN:      Picture=rod_int_vz:
                aPassada=0:NEXT(21$);
;   Model statements for module: Assign 8
26$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
926$      ASSIGN:      Picture=rodotrem_d_int_vz:
                aPassada=0:NEXT(21$);
;   Model statements for module: Choose 7
29$      TRACE,      -1,"-Choosing from 4 options\n";
927$      BRANCH,      1:
                If,vRestricao(aDestino,1)==0,115$,Yes:
                If,aTipo==4.or.aTipo==5,18$,Yes:
                If,aTipo==6.or.aTipo==7,31$,Yes:
                Else,115$,Yes;
;   Model statements for module: Choose 5
18$      TRACE,      -1,"-Choosing from 5 options\n";
928$      BRANCH,      1:
                If,TDIA>=vHRst(1,1).AND.TDIA<=vHRst(1,2),41$,Yes:
                If,TDIA>=vHRst(2,1).AND.TDIA<=vHRst(2,2),41$,Yes:
                If,(TDIA+tavg(tl_tre_vz(aDestino)))>=vHrst(1,1).and.TDIA<=vHrst(1,2),41$,Yes:
                If,(TDIA+tavg(tl_tre_vz(aDestino)))>=vHrst(2,1).and.TDIA<=vHrst(2,2),41$,Yes:
                Else,115$,Yes;
;   Model statements for module: Choose 13
41$      TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
929$      BRANCH,      1:
                If,aJa_passou_ordena==0,ordena_tre,Yes:
                Else,17$,Yes;
;   Model statements for module: Ordena 1
ordena_tre  STATION,      st_ordena_tre;
941$      TRACE,      -1,"-Arrived to station st_ordena_tre\n":NEXT(931$);
931$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
943$      ASSIGN:      i=1:NEXT(938$);
938$      WHILE:      i<=4:NEXT(933$);
933$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
944$      ASSIGN:      varord(i)=vvazao(i,1):
                vNovaordem(i)=i:

```



```

        i=i+1:NEXT(939$);
939$    ENDWHILE:NEXT(934$);
934$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
945$    ASSIGN:      i=1:NEXT(936$);
936$    WHILE:      i<=4;
930$    FINDJ,      i,4:max(varord(j)):NEXT(932$);
932$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
946$    ASSIGN:      troca=varord(j):
        troca2=vNovaordem(j):
        varord(j)=varord(i):
        vNovaordem(j)=vNovaordem(i):
        varord(i)=troca:
        vNovaordem(i)=troca2:
        i=i+1:NEXT(937$);
937$    ENDWHILE:NEXT(935$);
935$    DELAY:      0.00,,Other:NEXT(958$);
958$    DELAY:      0.,,Other:NEXT(985$);
985$    TRACE,      -1,"-Transferred to next module\n":NEXT(42$);
; Model statements for module: Assign 13
42$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
998$    ASSIGN:      aJa_passou_ordena=1:NEXT(17$);
; Model statements for module: Assign 5
17$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
999$    ASSIGN:      aPassada=aPassada+1:NEXT(16$);
; Model statements for module: Choose 4
16$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
1000$    BRANCH,    1:
        If,aPassada > v_num_frentes,30$,Yes:
        Else,32$,Yes;
; Model statements for module: Choose 8
30$    TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
1001$    BRANCH,    1:
        If,aTipo==4.or.aTipo==5,39$,Yes:
        If,aTipo==6.or.aTipo==7,40$,Yes:
        Else,37$,Yes;
; Model statements for module: Choose 10
39$    TRACE,      -1,"-Choosing from 5 options\n";
1002$    BRANCH,    1:
        If,TDIA>=vHRst(1,1).AND.TDIA<=vHRst(1,2),35$,Yes:
        If,TDIA>=vHRst(2,1).AND.TDIA<=vHRst(2,2),35$,Yes:
        If,(TDIA+tavg(tl_tre_vz(aDestino)))>=vHrst(1,1).and.TDIA<=vHrst(1,2),35$,Yes:
        If,(TDIA+tavg(tl_tre_vz(aDestino)))>=vHrst(2,1).and.TDIA<=vHrst(2,2),35$,Yes:
        Else,37$,Yes;
; Model statements for module: Signal 4
35$    TRACE,      -1,"-Sending signal DECISAOTOMADA\n";
1003$    SIGNAL:      DECISAOTOMADA:NEXT(38$);
; Model statements for module: Delay 2
38$    TRACE,      -1,"-Delaying for time 0.1\n";
1004$    DELAY:      0.1,,Other:NEXT(34$);
; Model statements for module: Release 2

```

```

34$      TRACE,      -1,"-Releasing resources\n";
1005$    RELEASE:    r_CONTROLEDETrafego,1:NEXT(36$);
; Model statements for module: Assign 12
36$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1006$    ASSIGN:     aRetorna_trafego=1:NEXT(33$);
; Model statements for module: Leave 2
33$      DELAY:      0.00,,Other:NEXT(1033$);
1033$    ASSIGN:     M=st_trafego2;
1018$    DELAY:      0.,,Other:NEXT(1044$);
1044$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_DESENGATE_USINA\n";
1020$    ROUTE:      1.5,st_DESENGATE_USINA;
; Model statements for module: Leave 3
37$      DELAY:      0.00,,Other:NEXT(1084$);
1084$    ASSIGN:     M=st_trafego2;
1069$    DELAY:      0.,,Other:NEXT(1095$);
1095$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Estacionamento2\n";
1071$    ROUTE:      .1,st_Estacionamento2;
; Model statements for module: Choose 11
40$      TRACE,      -1,"-Choosing from 5 options\n";
1109$    BRANCH,     1:
      If,TDIA>=vHRst(1,1).AND.TDIA<=vHRst(1,2),35$,Yes:
      If,TDIA>=vHRst(2,1).AND.TDIA<=vHRst(2,2),35$,Yes:
      If,(TDIA+tavg(tl_rod_vz(aDestino)))>=vHrst(1,1).and.TDIA<=vHrst(1,2),35$,Yes:
      If,(TDIA+tavg(tl_rod_vz(aDestino)))>=vHrst(2,1).and.TDIA<=vHrst(2,2),35$,Yes:
      Else,37$,Yes;
; Model statements for module: Assign 11
32$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1110$    ASSIGN:     aDESTINO=vNovaordem(aPassada)+6:
      aVazaodestino=vCc(aDestino,22):
      vTemp5=aDestino:NEXT(14$);
; Model statements for module: Choose 9
31$      TRACE,      -1,"-Choosing from 5 options\n";
1111$    BRANCH,     1:
      If,TDIA>=vHRst(1,1).AND.TDIA<=vHRst(1,2),41$,Yes:
      If,TDIA>=vHRst(2,1).AND.TDIA<=vHRst(2,2),41$,Yes:
      If,(TDIA+tavg(tl_rod_vz(aDestino)))>=vHrst(1,1).and.TDIA<=vHrst(1,2),41$,Yes:
      If,(TDIA+tavg(tl_rod_vz(aDestino)))>=vHrst(2,1).and.TDIA<=vHrst(2,2),41$,Yes:
      Else,115$,Yes;
55$      FINDJ,      1,v_num_frentes:MAX(vVazao(J,1)):NEXT(54$);
; Model statements for module: Assign 21
54$      TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1112$    ASSIGN:     aDESTINO=J+6:
      vTemp5=aDestino:NEXT(30$);
; Model statements for module: Leave 28
124$     DELAY:      0.00,,Other:NEXT(1139$);
1139$    ASSIGN:     M=st_Trafego;
1124$    DELAY:      0.,,Other:NEXT(1150$);
1150$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Estacionamento2\n";
1126$    ROUTE:      0,st_Estacionamento2;
; Model statements for module: Trafego Pic 1

```

```

1194$    CREATE,      1,,6:,1:NEXT(1201$);
1201$    TRACE,      -1,"-Entity Created\n";
1195$    ASSIGN:      aEscolhido=0:
aFrente=7;
1198$    ASSIGN:      Picture=CONTROLE:NEXT(1164$);
1164$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1202$    ASSIGN:      aNUMERODACARREG=1:NEXT(1165$);
1165$    QUEUE,      q_saidadecaminhao_7;
1203$    WAIT:        saidadecaminhao;
1205$    DELAY:       0.000,,Other:NEXT(1176$);
1176$    TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
1206$    BRANCH,      1:
If,vControle_trafego == 0,1172$,Yes:
If,vCarreg(aFrente) == 0,1172$,Yes:
Else,1175$,Yes;
1172$    TRACE,      -1,"-Duplicating entities\n";
1207$    DUPLICATE,   100:
1,1167$,0:NEXT(1173$);
1173$    DELAY:       0.00,,Other:NEXT(1219$);
1219$    DELAY:       0,,Other:NEXT(1245$);
1245$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_SEMAFORO\n";
1221$    ROUTE:       0,st_SEMAFORO;
1167$    QUEUE,      q_SINALVERMELHO7;
1259$    WAIT:        DECISAOTOMADA;
1261$    DELAY:       0.000,,Other:NEXT(1191$);
1191$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1262$    ASSIGN:      vCc(aFrente,1)=0:
vCc(aFrente,2)=0:
vCc(aFrente,4)=0:
vCc(aFrente,22)=0:
vVAZAO(aFrente-6,1)=0:NEXT(1165$);
1175$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1263$    ASSIGN:      vCc(aFrente,1)=vCc(aFrente,1) + (10-vCarreg(aFrente)
):NEXT(1192$);
1192$    TRACE,      -1,"-Choosing from 3 options\n";
1264$    BRANCH,      1:
If,aNUMERODACARREG>=11,1190$,Yes:
If,IRF(MEMBER ( COLHEITA_7_S, aNUMERODACARREG)) >= 1,1189$,Yes:
Else,1193$,Yes;
1190$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1265$    ASSIGN:      aNUMERODACARREG=1:
vCc(aFrente,2)=(NUMMEM ( COLHEITA_7_S)-
vCc(aFrente,1))*(60/vCG(aFrente))*tavg(tl_peso(aFrente)):
vTrat_aux(aFrente)=
(60/(vCg(aFrente)+vDvt(aFrente)+vDct(aFrente)+(vTt(aFrente)*2)+vAcg(aFrente)))*tavg(tl_
peso(aFrente)):
vCc(aFrente,4)=(vQtde_trat(aFrente)-vCc(aFrente,3))*vTrat_aux(aFrente):
vCc(aFrente,9)=

```

tavg(tl_truck_ch(aFrente))+tavg(tl_truck_vz(aFrente))+vDvt(aFrente)+vDct(aFrente)+(vTt(aFrente)*2)+vAcg(aFrente):
vCc(aFrente,10)=

tavg(tl_rj_ch(aFrente))+tavg(tl_rj_vz(aFrente))+vDvt(aFrente)+vDct(aFrente)+(vTt(aFrente)*2)+vAcg(aFrente):
vCc(aFrente,11)=

tavg(tl_tre_ch(aFrente))+tavg(tl_tre_vz(aFrente))+vDvt(aFrente)+vDct(aFrente)+(vTt(aFrente)*2)+vAcg(aFrente):
vCc(aFrente,12)=

tavg(tl_rod_ch(aFrente))+tavg(tl_rod_vz(aFrente))+vDvt(aFrente)+vDct(aFrente)+(vTt(aFrente)*2)+vAcg(aFrente)
:NEXT(1177\$);

1177\$ TRACE, -1,"-Making assignments\n":;

1266\$ ASSIGN:

vCc(aFrente,13)=(vCc(aFrente,5)*tavg(tl_peso_truck(aFrente))*60)/vCc(aFrente,9):
vCc(aFrente,14)=(vCc(aFrente,6)*tavg(tl_peso_rj(aFrente))*60)/vCc(aFrente,10):
vCc(aFrente,15)=(vCc(aFrente,7)*tavg(tl_peso_tre(aFrente))*60)/vCc(aFrente,11):
vCc(aFrente,16)=(vCc(aFrente,8)*tavg(tl_peso_rod(aFrente))*60)/vCc(aFrente,12):

vCc(aFrente,17)=vCc(aFrente,13)+vCc(aFrente,14)+vCc(aFrente,15)+vCc(aFrente,16):
vCc(aFrente,18)=1:NEXT(1169\$);

1169\$ TRACE, -1,"-Choosing from 2 options\n":;

1267\$ BRANCH, 1:

If,(vCc(aFrente,18) * vCc(aFrente,2))<vCc(aFrente,4),1170\$,Yes:

Else,1187\$,Yes;

1170\$ TRACE, -1,"-Making assignments\n":;

1268\$ ASSIGN: vCc(aFrente,19)=vCc(aFrente,2):

vCc(aFrente,20)=1:NEXT(1180\$);

1180\$ TRACE, -1,"-Choosing from 2 options\n":;

1269\$ BRANCH, 1:

If,vCc(aFrente,20) == 1,1181\$,Yes:

Else,1184\$,Yes;

1181\$ TRACE, -1,"-Choosing from 2 options\n":;

1270\$ BRANCH, 1:

If,vCc(aFrente,2)*1.1 > vCc(aFrente,17),1182\$,Yes:

Else,1183\$,Yes;

1182\$ TRACE, -1,"-Making assignments\n":;

1271\$ ASSIGN: vCc(aFrente,21)=(vCc(aFrente,19)*1.1) -
vCc(aFrente,17):NEXT(1179\$);

1179\$ TRACE, -1,"-Choosing from 2 options\n":;

1272\$ BRANCH, 1:

If,vCc(aFrente,17) == 0,1178\$,Yes:

Else,1186\$,Yes;

1178\$ TRACE, -1,"-Making assignments\n":;

1273\$ ASSIGN: vCc(aFrente,22)=101:

vVAZAO(aFrente-6,1)=vCc(aFrente,22):NEXT(1172\$);

```

1186$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
1274$    BRANCH,      1:
        If,vCc(aFrente,20) == 1,1171$,Yes:
        Else,1174$,Yes;
1171$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1275$    ASSIGN:
vCc(aFrente,22)=(vCc(aFrente,19)*vSatura(aFrente))/vCc(aFrente,17):
        vVAZAO(aFrente-6,1)=vCc(aFrente,22):NEXT(1172$);
1174$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1276$    ASSIGN:
vCc(aFrente,22)=(vCc(aFrente,19)*vSatura(aFrente))/(vCc(aFrente,17)*vCc(aFrente,18)):
        vVAZAO(aFrente-6,1)=vCc(aFrente,22):NEXT(1172$);
1183$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1277$    ASSIGN:      vCc(aFrente,21)=0:NEXT(1179$);
1184$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
1278$    BRANCH,      1:
        If,vCc(aFrente,4)*1.1 > (vCc(aFrente,17)*vCc(aFrente,18)),1185$,Yes:
        Else,1188$,Yes;
1185$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1279$    ASSIGN:      vCc(aFrente,21)=(vCc(aFrente,19)*1.1) -
(vCc(aFrente,17)*vCc(aFrente,18)):NEXT(1179$);
1188$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1280$    ASSIGN:      vCc(aFrente,21)=0:NEXT(1179$);
1187$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1281$    ASSIGN:      vCc(aFrente,19)=vCc(aFrente,4):
        vCc(aFrente,20)=2:NEXT(1180$);
1189$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1282$    ASSIGN:      vCc(aFrente,1)=vCc(aFrente,1)+1:
        aNUMERODACARREG=aNUMERODACARREG+1:NEXT(1192$);
1193$    TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1283$    ASSIGN:
aNUMERODACARREG=aNUMERODACARREG+1:NEXT(1192$);
;   Model statements for module: Station 7
74$     STATION,      st_Estacionamento3;
1285$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_Estacionamento3\n":NEXT(73$);
;   Model statements for module: Assign 43
73$     TRACE,      -1,"-Making assignments\n";
1287$    ASSIGN:      aPrioridade_trafego=1:NEXT(101$);
;   Model statements for module: Choose 42
101$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
1288$    BRANCH,      1:
        If,aDestino <> 22,95$,Yes:
        Else,117$,Yes;
;   Model statements for module: Wait 3
95$     QUEUE,      q_espera_conj:MARK(QueueTime);
1289$    WAIT:      sg_espera_escravo,1;
1290$    TALLY:      q_espera_conj Queue Time,INT(QueueTime),1:NEXT(72$);
;   Model statements for module: Leave 20
72$     DELAY:      0.00,,Other:NEXT(1303$);
1303$    DELAY:      0.,,Other:NEXT(1329$);

```

```

1329$    TRACE,      -1,"-Transferred to station st_Trafego\n";
1305$    ROUTE:      1,st_Trafego;
;   Model statements for module: Duplicate 5
117$    TRACE,      -1,"-Duplicating entities\n";
1343$    DUPLICATE,   100:
          1,113$,0:NEXT(102$);
;   Model statements for module: Wait 4
102$    QUEUE,      q_espera_vazao:MARK(QueueTime);
1344$    WAIT:      sg_espera_vazao,1;
1345$    TALLY:      q_espera_vazao Queue Time,INT(QueueTime),1:NEXT(129$);
;   Model statements for module: Dispose 8
129$    TRACE,      -1,"-Disposing entity\n";
1347$    DISPOSE:    Yes;
;   Model statements for module: Station 9
120$    STATION,    st_Estacionamento4;
1349$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_Estacionamento4\n":NEXT(98$);
;   Model statements for module: Station 10
128$    STATION,    st_trafego3;
1352$    TRACE,      -1,"-Arrived to station st_trafego3\n":NEXT(125$);
;   Model statements for module: Choose 50
125$    TRACE,      -1,"-Choosing from 2 options\n";
1354$    BRANCH,     1:
          If,vBate_volta==1.and.(aTipo==rod_pic .or. aTipo == rod_d_pic),127$,Yes:
          Else,110$,Yes;
;   Model statements for module: Signal 19
127$    TRACE,      -1,"-Sending signal sg_espera_vazao\n";
1355$    SIGNAL:     sg_espera_vazao,1:NEXT(110$);

```