

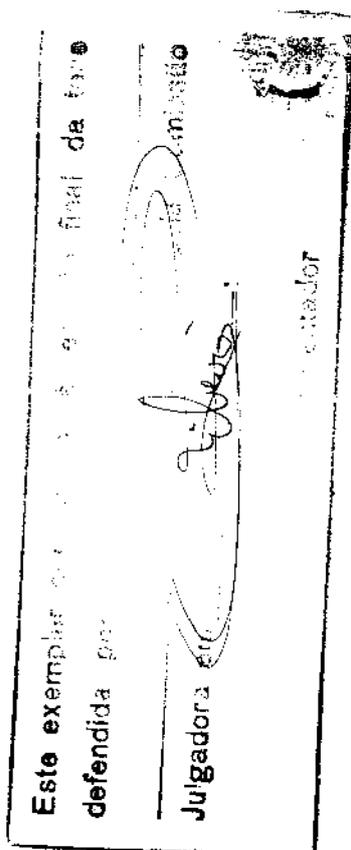
Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Elétrica

Departamento de Engenharia de Sistemas

SISTEC:

Simulador de Sistema de Transporte da Cana-de-açúcar



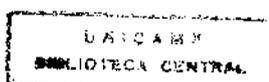
Mauro Herter Hahn

Orientador:

Prof. Dr. Raul Vinhas Ribeiro

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

- JUNHO 1994 -



Agradecimentos

A todos que colaboraram para a realização deste trabalho e em especial

- ao Raul pela orientação, pela atenção e pela franqueza em todos os diálogos
- ao Professor Oscar pelo constante apoio e interesse em todas as fases deste trabalho
- a Usina Santa Helena do Goiás pela colaboração na obtenção de dados
- aos amigos Agripa, Vitor, Cássio, Gelson e Nishi pela grande "FORÇA" em todos os sentidos
- a Darli, minha amiga Executiva, pela amizade e pelo apoio em todos os momentos
- ao Nishi pelas dicas de Simulação
- a Márcia pela ajuda burocrática
- a minha amiga coruja, Fran, pela companhia nos horários pouco convencionais e pelas inúmeras dicas ao longo deste trabalho
- ao Hamilton pelo interesse e ajuda na obtenção de dados
- a Débora pelos contatos Chilenos e a Vitória pela supervisão das rotas
- a todos os professores e funcionários do DENSIS e da CPG, que de maneira direta ou indireta colaboraram na realização deste trabalho
- a todos os amigos do DENSIS pela acolhida
- a CAPES pelo apoio financeiro.

Dedico este trabalho

a minha mãe, Nelcy, pela ausência sofrida e pelo incentivo e apoio irrestrito durante toda a minha vida;

ao Vô Alcides, que é meu maior exemplo de verdadeiro Engenheiro, cujo diploma são os milhares de inventos construídos, na sua maioria, à prego, martelo e pura engenhosidade, durante os 93 anos vividos até hoje;

e a minha esposa, Simoni, pelo carinho, compreensão e incentivo mesmo nos momentos mais difíceis deste trabalho, nos quais eu não pude dedicar-lhe toda a atenção que deveria (obrigado Baixinha).

Resumo

Este trabalho aborda o problema de planejamento a curto prazo do transporte de cana-de-açúcar em usinas de açúcar e álcool. Este problema consiste basicamente em determinar o número de caminhões, carregadoras, colhedoras e tratores necessários, em um determinado dia, para transportar a cana de vários locais de corte situados a diferentes distâncias, até uma usina central, que opera 24 horas por dia, sem que haja interrupção na moagem de cana da mesma. O SISTEC é uma ferramenta para análise do sistema de transporte de cana no período de um dia, que visa minimizar o número de equipamentos em operação através da previsão do desempenho do sistema para diversas configurações da usina, dos pontos de colheita e dos próprios equipamentos envolvidos no transporte da cana. O simulador desenvolvido é do tipo estocástico, com mecanismo de avanço de tempo orientado por eventos. A interface com o usuário é através de menus e janelas operadas por mouse, possuindo também saída gráfica dos principais parâmetros de interesse. Embora neste trabalho o SISTEC tenha sido utilizado apenas para simulação de usinas onde cada caminhão permanece alocado a uma única lavoura durante todo o dia, ele pode, com pequenas modificações, ser utilizado para determinar melhores políticas de operações do sistema. Para validação do modelo proposto são apresentados e analisados testes com dados reais de uma usina.

Summary

Short term planning of sugarcane transportation was studied for operational conditions found in sugar mills and destileries. The number of required trucks, loaders, harvesters and tractors is determined for a 24 hour period of uninterrupted cane crushing process at a central plant. Cane is transported from several fields located at different distances from the sugar mill. The SISTEC is an analyses type tool adequate to minimize the number of equipments needed to keep the plant working for a one day working period. The simulator is an stochastic type using event oriented time increment. The system run through mouse operated windows and menus; output of interest parameters is available through graphical display. SISTEC considers trucks working on a fixed transportation distance during the 24 h operation period, minor changes would allow better management politics. to operate the system. Field transportation data from Santa Helena de Goias sugar mill was used to validate the proposed model.

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1.1
 Parte I - O Problema de Transporte de Cana-de-Açúcar	
Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica.....	2.1
2.1 Introdução	2.1
2.2 O Planejamento de Transporte	2.2
2.3 Porque Usar Simulação ?	2.7
Capítulo 3 - O Problema de Transporte de Cana-de-açúcar em Usinas Sucro- Alcooleiras.....	3.1
3.1 Introdução	3.1
3.2 Apresentação do Problema.....	3.1
3.3 Sistema Convencional Manual.....	3.5
3.4 Sistema Convencional Mecanizado.....	3.8
Capítulo 4 - Conceitos de Simulação.....	4.1
4.1 Introdução	4.1
4.2 Simulação de Sistemas	4.1
4.3 Definição do Sistema	4.3
4.4 Geração de Números Pseudoaleatórios	4.5
4.5 Metodologias de Modelamento	4.7
4.6 Modelo Orientado a Eventos.....	4.9
4.6.1 Estrutura de Filas.....	4.10
4.6.2 Lista de Eventos Futuros	4.10
 Parte II - Um Modelo de Simulação Para o Problema de Transporte de Cana-de-Açúcar	
Capítulo 5 - Um Modelo Geral para o Planejamento de Transporte.....	5.1
5.1 Introdução	5.1
5.2 Sistema Computacional Completo.....	5.1
5.3 Considerações Gerais Sobre o Programa Implementado.....	5.6

5.3.1 Equipamento Utilizado	5.6
5.3.2 Linguagem Computacional	5.6
5.3.3 Interface para o Usuário	5.7
Capítulo 6 - Componentes Básicos do SISTEC	6.1
6.1 Introdução	6.1
6.2 Usina	6.4
6.3 Frente de Corte	6.7
6.4 Estradas de Ligação	6.10
Capítulo 7 - Entidades do SISTEC	7.1
7.1 Introdução	7.1
7.2 Caminhão	7.1
7.3 Carregadora	7.3
7.4 Descarregadeira	7.3
7.5 Trator	7.4
7.6 Turno	7.4
Capítulo 8 - Eventos e Operações do SISTEC	8.1
8.1 Introdução	8.1
8.2 Corpo Principal do Modelo	8.1
8.3 Início de Carregamento	8.2
8.4 Final do Carregamento	8.3
8.5 Chegada de Trator Para Carregar	8.3
8.6 Trator Pronto	8.4
8.7 Chegada de Caminhão em uma Frente de Corte	8.4
8.8 Início de Descarregamento	8.5
8.9 Final de Descarregamento	8.5
8.10 Chegada de Caminhão na Usina	8.5
8.11 Saída de um Caminhão da Usina	8.6
8.12 A Troca de Turno	8.8
8.13 Tempo de Manutenção dos Caminhões	8.8
Capítulo 9 - Variáveis de Desempenho do SISTEC	9.1
9.1 Introdução	9.1
9.2 Variáveis de Desempenho	9.3
 Parte III - Testes Computacionais	
Capítulo 10 - Validação do Modelo	10.1

10.1	Introdução	10.1
10.2	Verificação do Modelo Computacional	10.1
10.3	Validação do Modelo: Simulação do Sistema de Transporte da Usina Santa Helena	10.2
10.3.1	Primeiro Dia de Simulação	10.6
10.3.2	Segundo Dia de Simulação	10.10
10.3.3	Terceiro Dia de Simulação	10.12
10.3.4	Quarto Dia de Simulação	10.14
10.4	Minimização dos Equipamentos na Usina Santa Helena	10.16
10.5	Curva de Cana no Pátio da Usina	10.19
Capítulo 11 - Testes Computacionais Complementares		11.1
11.1	Introdução	11.1
11.2	Simulação do Sistema de Transporte em uma Usina de Grande Porte	11.2
Capítulo 12 - Conclusão.....		12.1
 Apêndice à Parte II		
Apêndice A1	- Corpo Principal do Programa	A.1
Apêndice A2	- Inicialização da Simulação	A.3
Apêndice A3	- Rotinas do Modelo Implementado	A.4
Apêndice A4	- Rotina Para Anotar Tempo de Espera em Uma Fila	A.14
 Apêndice à Parte III		
Apêndice B1	- Tempos Médios de Operações dos Caminhões.....	B.1
Apêndice B2	- Velocidade Média dos Caminhões	B.2
Referências Bibliográficas		R.1

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de computadores de baixo custo e alto desempenho, vem ampliando nos últimos anos as possibilidades de atuação para pessoas ligadas ao gerenciamento de sistemas. Os computadores modernos permitem que o analista explore rapidamente grande diversidade de opções antes de tomar uma decisão. Esta rapidez na resolução de problemas complexos que envolvem grande volume de dados é de extrema importância para o gerenciador de sistemas.

As operações de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar em usinas, é responsável aproximadamente por 30% do custo da matéria prima colocada na esteira da usina enquanto o custo desta matéria prima representa em torno de 60% dos custos dos produtos finais, álcool e açúcar. Em vista dos valores envolvidos, fica evidente a importância de despende esforços no desenvolvimento de ferramentas para o planejamento e minimização dos custos do transporte de cana em usinas.

Segundo Ackoff[1974] o planejamento em uma empresa pode ser dividido em três tipos que serão descritos sucintamente a seguir:

- **Planejamento Estratégico** - relaciona-se com objetivos a longo prazo e com maneiras e ações para alcança-los que afetam a empresa como um todo. No caso de uma usina de cana poderíamos citar como exemplo o traçado de uma meta a longo prazo para expansão da área de cana plantada, da capacidade de transporte e da capacidade de moagem da usina.
- **Planejamento Tático** - tem por objetivo tomar decisões de médio prazo que afetam áreas da empresa e não a empresa como um todo. É desenvolvido em

níveis organizacionais inferiores tendo como principal meta a utilização eficiente dos recursos disponíveis para a construção de objetivos previamente fixados, segundo uma estratégia predeterminada. No caso de transporte de cana o planejamento tático estaria relacionado com questões do tipo quantos e que tipos de caminhões próprios e fretados a usina deve operar em um período de um mês ou de um ano.

- **Planejamento Operacional** - refere-se a decisões a curto prazo e pode ser considerado como a formalização das metodologias de desenvolvimento e implantação estabelecidas. Visa a obtenção dos planos de ação ou planos operacionais. No transporte de cana, o planejamento operacional está envolvido com o planejamento do transporte no dia-a-dia da usina. Questões do tipo quantos e quais equipamentos (caminhões, carregadoras, tratores) devem ser alocados a cada local de fornecimento de cana e qual a política de operação específica a ser seguida por estes em um determinado dia para que o fornecimento na usina seja garantido.

O trabalho desenvolvido nesta tese tem como objetivo básico criar uma ferramenta computacional de apoio nas tomadas de decisões diárias, relativas ao planejamento operacional do transporte de cana-de-açúcar em usinas.

Uma usina possui uma capacidade diária de moagem de cana, que é suprida, normalmente, pela cana obtida de lavouras, chamadas frentes de corte, localizadas a distâncias variáveis da usina. Esta cana é transportada por uma frota heterogênea de caminhões que podem ser próprios ou fretados e operam em geral 24 horas por dia durante todo o período da safra. As distâncias das frentes de corte podem variar diariamente e para cada dia deve ser determinado quantas carregadoras ou colhedoras (no caso de corte mecanizado) devem ser alocadas a cada frente, bem como o número de caminhões de cada tipo e número de tratores, caso exista necessidade de reboque de carretas.

Esta tarefa de alocação diária de caminhões, carregadoras e tratores envolve um número grande de variáveis que acaba levando a um super dimensionamento da frota, devido a dificuldade de se prever com certa precisão o comportamento futuro do sistema e garantir, conseqüentemente, que não haverá interrupção no fornecimento de cana para a usina.

O software desenvolvido nesta tese, **SISTEC** (SIMulador do Sistema de TransportE de Cana) é um simulador estocástico que utiliza avanço de tempo variável de acordo com a técnica do próximo evento. O modelo desenvolvido é bastante versátil e permite considerar, entre outras, as seguintes características do sistema:

- vários tipos de caminhões com diferentes capacidades e tempos de operação,

- a mudança dos equipamentos de uma frente de corte encerrada para outra que inicia o transporte,
- a diferença entre frentes que operam com carregadoras e frentes que operam com colhedoras,
- podem ser consideradas várias trocas de turno por período,
- o tempo perdido diariamente pelos caminhões em manutenção,
- a capacidade máxima de estocagem na usina.

A partir dos parâmetros de entrada, número de caminhões de cada tipo, número de carregadoras e número de tratores alocados a cada frente de corte o **SISTEC** fornece, entre outros, os seguintes dados de saída: quantidade de cana transportada de cada frente durante o dia; tempo total perdido pelos caminhões nas filas de cada frente de corte e na usina; tempo ocioso das carregadoras, colhedoras e tratores em cada frente; e tempo durante o qual a usina permaneceu sem cana para moagem.

A interface com o usuário é bastante amigável, através de menus e janelas que podem ser operadas através do mouse. Existe ainda uma saída gráfica que permite a análise das filas em cada frente de corte e na usina, bem como o estoque de cana na usina ao longo do dia.

Este trabalho está dividido em três partes que agrupam os capítulos relacionados com o problema de transporte de cana, com o modelo de simulação desenvolvido e com os testes computacionais realizados, respectivamente.

A Parte I desta tese é composta pelos capítulos 2,3 e 4. No capítulo 2 é feita uma revisão geral nos problemas de transporte e justificado a abordagem de simulação para resolução do problema. No capítulo 3 é descrito detalhadamente o problema de transporte de cana em usinas. No capítulo 4 são apresentados ao leitor os conceitos básicos sobre simulação de sistemas.

A Parte II contém os capítulos 5,6,7,8 e 9. No capítulo 5 é proposto um sistema computacional geral para resolver o problema do planejamento operacional do transporte de cana e também alguns aspectos sobre a implementação do **SISTEC**. Nos capítulos 6,7 e 8 é descrito o modelo de simulação desenvolvido através dos componentes, entidades, eventos e operações do sistema. O capítulo 9 apresenta as variáveis de desempenho do modelo.

A Parte III é composta dos capítulos 10,11 e 12. No capítulo 10 é feita a validação do modelo através de testes computacionais com dados de sistemas reais obtidos em duas usinas. No capítulo 11 é apresentada uma bateria de testes computacionais realizados numa seleção de problemas onde são analisados diversos aspectos dos mesmos. Por último, no capítulo 12, são apresentadas as conclusões finais deste trabalho e sugeridas propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

Este capítulo visa situar para o leitor o problema de transporte de cana-de-açúcar em relação aos diversos problemas de **planejamento de transporte** encontrados na literatura. Apresentaremos também as primeiras idéias a respeito da abordagem de **simulação de sistemas** para resolução de problemas, em particular o problema de transporte de cana.

Na seção 2.2 comentaremos diversos problemas de análise em transportes, e que esforços tem sido ou podem virem a serem feitos no sentido de minimizar custos. Não é objetivo deste capítulo fazer um revisão profunda a respeito de nenhum dos problemas apresentados, mas apenas fornecer uma visão geral, ao leitor, dos diversos problemas existentes na área de transportes. O problema de transporte da cana-de-açúcar é apresentado sucintamente e localizado em relação aos demais problemas.

Na seção 2.3 serão apresentadas algumas vantagens e características do método de simulação para resolução de problemas em geral. Discutiremos ainda as características do problema de planejamento operacional do transporte de cana-de-açúcar que o tornam apropriado para o tratamento através de simulação.

2.2 O Planejamento de Transporte

Um dos problemas que envolve custos anuais de grande ordem é o de transporte e armazenamento de grãos. Este tipo de problema envolve análises para determinar os locais e dimensões dos depósitos que podem minimizar os custos de transporte. Outro problema é o de determinar a capacidade máxima de escoamento para época de safra de determinado produto e os pontos de estrangulamento do sistema rodoviário. Também podem ser feitas análises comparativas entre os custos dos diferentes meios de transporte já disponíveis (rodoviário, ferroviário e marítimo) ou os custos e benefícios de investimentos para criar novas vias, duplicar ou recuperar a rede já existente. Este tipo de análise é feita sempre para médio e longo prazo. Esta classe de problema normalmente é analisada através da modelagem em redes e maiores informações podem ser obtidas nos trabalhos de Wright[1980], Koo[1985] e Novakovic et al.[1986].

Semelhante ao comentado acima, é o problema de determinar a localização de indústrias, depósitos ou garagens de maneira a minimizar os custos de transporte. Este nível de análise pode ser classificada como **decisões estratégicas** de uma empresa.

Um nível de decisão relativa ao transporte em empresas, classificado como de **decisões táticas**, é o de composição da frota. A palavra composição é usada aqui para denotar o tipo de veículo usado juntamente com o número de veículos de cada tipo. No problema de composição da frota não se está interessado em decisões a curto prazo, tais como determinar o veículo específico que deve suprir um certo cliente, mas sim com decisões a "médio e longo prazo" como o número e tipo de veículos que a frota deve operar. Neste tipo de problema é comum também se estar interessado em determinar o balanço mais econômico entre o número de veículos próprios e fretados na empresa. As primeiras tentativas de enfrentar o problema de otimização do tamanho da frota foram feitas por Kirby[1959]. Ele estudou o problema de evitar a baixa utilização de vagões próprios em um sistema ferroviário, evitando assim o oneroso aluguel de vagões extras. Koenigsberg e Lam[1975] abordaram o problema de frotas de navios para transporte de gás natural líquido operando entre um porto de carga e um ou dois portos de descarga. Este é um caso de veículos operando em ciclos fechados entre um número pequeno de terminais. Eles desenvolveram um modelo de filas cíclicas para representar a operação desta frota. Para vários sistemas específicos ele obteve o número de embarcações previstas em cada estágio, o número de embarcações na condição de espera e o tempo de espera previsto no porto.

Etezadi e Beasley[1983] enfrentaram o problema de decidir a composição ótima de uma frota operando a partir de um depósito central que precisa suprir um certo número de clientes. Neste problema, deve ser decidido o tipo de veículo a ser usado e o número de

veículos de cada tipo. O modelo desenvolvido para o problema foi de programação inteira-mista, com objetivo de desenvolver uma sistemática para resolução deste tipo de problema, sem a utilização de simulação. Os autores não apresentaram resolução de nenhum problema exemplo. Acreditamos, que para este trabalho justificasse suas suposições a respeito do tempo computacional de resolução do problema pela abordagem por programação inteira-mista, em relação a simulação, deveria apresentar resultados computacionais, gerados pelas duas abordagens, para vários problemas hipotéticos o reais, com diferentes níveis de complexidade, apresentando a comparação dos tempos computacionais de resolução e também salientando as simplificações exigidas para o modelamento do problema em cada abordagem.

Turnquist e Jordan[1986] desenvolveram um modelo para dimensionamento de uma frota de containers utilizada para transportar peças de uma indústria de manufatura até um grupo de fábricas montadoras. As peças são produzidas em um ciclo de produção determinístico, mas os tempos de viagens dos containers são estocásticos. Eles desenvolveram equações relacionando o tamanho da frota com a probabilidade de falta de containers. Através destas equações foi possível determinar qual o número necessário de containers para efetuar o transporte com determinado grau de segurança.

Roy[1989] apresentou uma aplicação de programação matemática para resolver o problema de planejamento de produção e distribuição com otimização da frota para uma indústria petroquímica. Ele apresentou um modelo de decisão global em forma de uma rede que representa simultaneamente a produção multiproduto e a otimização da rede de distribuição com decisões de localização em todos os níveis bem como otimização da frota de transporte. Ele resolveu o problema com o software de programação matemática XGEN ("Matrix-Generator for Network-like Problems").

Beaujon e Turnquist[1991] abordaram de forma integrada o problema do planejamento do número de veículos de uma frota e da otimização na utilização dos mesmos. Uma característica importante deste trabalho foi considerar o aspecto dinâmico das demandas que podem se alterar ao longo do tempo e a incerteza nos tempos de viagens e na previsão das demandas futuras. Eles desenvolveram um modelo geral de otimização incluindo interação entre dimensionamento da frota e a alocação dos veículos, bem como a dinâmica e a incerteza dos elementos do problema. No trabalho foi apresentado um problema exemplo de uma pequena transportadora que possui 5 pontos de demanda para suprir. As ligações entre estes pontos formam uma rede e foram considerados, entre cada par de pontos com ligações, o lucro líquido de uma viagem, a multa por não suprir uma demanda, o custo de viajar com um caminhão vazio, o tempo de viagem e a variação deste tempo. Para

resolução deste problema, o modelo implementado gastou em torno 12 minutos em um computador PS/2 386.

No nível de **planejamento operacional** de transporte em uma empresa são tomadas várias decisões envolvendo roteamento e "scheduling" (escalonamento ou sequenciamento de horários) dos veículos para entregas e ou recolhimento de mercadorias a curto prazo. O problema de roteamento de veículos consiste basicamente na determinação eficiente de rotas que uma frota de veículos deve percorrer afim de satisfazer um conjunto de pontos de demandas (clientes). A definição dos pontos de demanda e da ordem na qual estes são servidos por um dado veículo define uma rota. Cada veículo opera em apenas uma rota. O problema de roteamento é considerado um problema espacial onde as únicas restrições temporais que podem afetar a decisão sobre a definição de rotas dizem respeito ao tempo total de percurso das mesmas, ou seja, não existem restrições sobre quando ou em que ordem os pontos de demanda devem ser visitados. Entre os problemas clássicos de roteamento pode-se apontar o Problema do Caixeiro Viajante que consiste em encontrar a rota de custo mínimo para um único veículo que deve visitar um conjunto de clientes distribuídos em diversas cidades.

Problemas de "scheduling" de veículos podem serem vistos como uma extensão do problema de roteamento com restrições adicionais de tempo, onde são determinados os horários em que cada atividade é realizada. Neste tipo de problema o tempo é associado a cada atividade. O sequenciamento das atividades de veículos simultaneamente no espaço e no tempo é o coração do problema de "scheduling" de veículos. Referências sobre o problema de roteamento e "scheduling" de veículos podem ser obtidos em um "survey" publicado por Bodin et al.[1983]. Golden e Assad[1986], em seu trabalho, apresentam uma revisão sobre o problema de roteamento de veículos, onde discutem algumas implementações bem sucedidas, avanços no realismo dos modelos e nos algoritmos.

Um problema amplamente abordado nesta área é o de roteamento de veículos com restrições de janelas de tempo. A versão mais simples deste problema consiste em uma frota fixa de veículos com capacidades de transporte limitadas, operando a partir de um depósito central. Os veículos são responsáveis por servir um conjunto de clientes que possuem demandas conhecidas; cada cliente deve ser visitado em uma determinada janela de tempo, que consiste em uma faixa de tempo limitada por um horário inferior e um horário superior, e dentro da qual deve ocorrer a visita. No problema do caixeiro viajante, por exemplo, a entrega em cada cidade poderia estar restrita a um determinado período de tempo.

Solomon[1985] em seu trabalho apresenta várias heurísticas para a resolução de problemas de roteamento com janelas de tempo. Foram realizados exaustivos testes

computacionais para o estudo da performance destas heurísticas. Kolen et al.[1986] utilizaram um método exato baseado em Branch-and-Bound para resolver o problema de roteamento com janelas de tempo. Desrosiers et al.[1988] abordaram o mesmo problema para uma frota homogênea localizada em um depósito central, que foi formulado como um problema de fluxo em redes com restrições adicionais de tempo. Foi utilizado o método da relaxação lagrangeana para sua resolução. Desrochers et al.[1991] propuseram um novo algoritmo para o problema de roteamento com janelas de tempo. Seu método era capaz de encontrar a solução ótima para problemas até seis vezes maiores que os resolvidos em outras pesquisas publicadas até então.

Uma questão muito estudada durante os últimos 30 anos é a do transporte viário urbano através de modelos de simulação para regulação e descrição do tráfego urbano. A simulação de uma rede de tráfego não procura por um ótimo, mas sim permite experimentar e avaliar, em termos de fluidez dos veículos e dos tempos de atraso nas vias, por exemplo, diferentes estratégias de regulação de tráfego. A simulação se aplica com êxito a este problema devido a sua capacidade de "reproduzir" o comportamento de sistemas complexos. Muitos simuladores de tráfego urbano vêm sendo desenvolvidos com finalidade de analisar diferentes aspectos deste problema como, por exemplo, os tempos semaforicos e a operação de ônibus de transporte coletivo na rede simulada. Maiores informações sobre simulação de tráfego urbano podem ser obtidas no trabalho de Nishi[1993].

Outro problema de transporte com características peculiares é o de usinas que processam determinado produto agrícola produzido em locais próximos da mesma. Estas 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. Pode existir vários pontos de colheita simultâneos em localizações distintas. Esta classe de problema não se enquadra perfeitamente em nenhum dos problemas de transporte, composição da frota e roteamento de veículos comentados anteriormente. As principais características que o diferem destes são que um caminhão, a cada viagem visita apenas um ponto de suprimento e retorna em seguida a 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.

Existem muitos problemas com estas características mencionadas no parágrafo anterior que os diferenciam dos problemas de transporte e distribuição normalmente encontrados em grandes indústrias. Um destes é o de usinas de industrialização de suco de laranja. Nestas usinas o suprimento da demanda de laranja deve ser garantida pela frota que

transporta a fruta de maneira cíclica e contínua. Em usinas de industrialização de suco de outras frutas o sistema de transporte é basicamente o mesmo. Em empresas de beneficiamento de madeira de produção própria, tal como pinus e eucaliptos, o sistema de transporte também é semelhante.

O problema de transporte da cana-de-açúcar possui as mesmas características básicas dos problemas acima, podendo ser enquadrados com eles em um classe a parte dos demais problemas de transporte. Este sistema será descrito detalhadamente no capítulo 4. Basicamente ele consiste em uma usina que processa cana-de-açúcar 24 horas por dia, produzindo álcool e açúcar. A usina possui uma frota de caminhões próprios e fretados que efetuam o transporte da cana colhida em diversas lavouras situadas a distâncias diversas da usina e que podem variar diariamente. Este problema pode ser abordado em vários níveis. Um deles é o planejamento a médio prazo, onde deve-se determinar a quantidade e o tipo de veículos próprios e fretados que são capazes de suprir a demanda da usina minimizando os custos de transporte. Este problema não será abordado neste trabalho. Já o planejamento operacional, que será o objeto desta tese, é responsável por determinar quais e quantos equipamentos (caminhões, carregadoras e tratores) deverão ser alocados a cada lavoura para a configuração específica de cada dia de operação.

Não foi encontrado na literatura de Pesquisa Operacional nenhum trabalho que aborde um problema de planejamento operacional similar a este. Os problemas estudados por Turnquist e por Koenigsberg são os únicos que tratam de uma frota operando de forma cíclica entre um número resumido de pontos. Entretanto os dois possuem inúmeras simplificações em relação ao da cana de açúcar e não tratam do planejamento operacional, mas sim do planejamento tático, não trazendo portanto nenhuma contribuição significativa para esta tese.

Os únicos trabalhos encontrados que tratam do problema específico do transporte de cana-de-açúcar foram na área agrícola. Estes trabalhos fazem análise de custos e de viabilidade de diversos sistemas de corte, carregamento e transporte de cana, não tratando entretanto do planejamento operacional da frota.

Em seu trabalho, Gago[1986] apresenta um estudo econômico comparativo entre quatro sistemas de corte, carregamento e transporte de cana com objetivo de determinar aquela que, para as condições particulares de uma usina, propicie o melhor desempenho econômico. Ele apresenta as diferenças verificadas entre os sistemas explicados em termos dos custos fixos e operacionais de cada operação básica que compõe o sistema, e dos custos indiretos devido às perdas de cana no campo, impurezas, processos de lavagem e perdas de açúcar na lavagem. Em seu trabalho são apresentados dados que, são particularmente

importantes para esta tese no que diz respeito a estimativa de tempos médios de operações dos caminhões e velocidades médias de viagem para cada tipo de caminhão em três tipos diferentes de estradas. Os resultados apresentados por Gago e que interessam para esta tese serão comentados no capítulo 10 e as tabelas de interesse no apêndice à parte III desta tese. Figueiredo[1986], em seu trabalho apresenta valores para orientação a respeito dos tempos associados à operações de transporte de cana e um equacionamento simplificado da Capacidade e eficiência no transporte de cana, em forma de tabelas. No cálculo destas tabelas o tempo perdido pelos caminhões, foram considerados constantes. Os tempos de operação e o equacionamento utilizado por Figueiredo[1986] foram baseados no trabalho de Gago[1986].

2.3 Porque Usar Simulação ?

Muitos textos sobre Pesquisa Operacional tratam a simulação como "último recurso", para ser utilizada apenas quando todos os métodos analíticos falharem, entretanto, recentes avanços na técnicas de simulação, disponibilidade de software e de computadores mais velozes tem feito da simulação uma das ferramentas mais amplamente utilizadas e aceitas na análise de sistemas e Pesquisa Operacional. Os mais recentes levantamentos sobre a utilização de metodologias em Pesquisa Operacional colocam a análise por simulação junto com a programação linear nos dois primeiros lugares entre os mais utilizados, Ravindran et al.[1987].

A seguir estão enumeradas algumas das principais vantagens que tornam a simulação uma ferramenta tão utilizada:

1. Modelos mais realistas - a simulação permite uma maior liberdade na construção do modelo, não obrigando-nos a enquadrar um problema a um determinado molde para que possamos obter uma solução, como ocorre, por exemplo no caso da programação linear. Assim, em lugar de soluções exatas para "problemas aproximados", a simulação fornece soluções aproximadas para "problemas mais realistas", Saliby[1988].
2. Processo e modelagem evolutivo - uma importante vantagem no processo de modelagem em simulação é o seu caráter evolutivo. Assim, começando com um modelo relativamente simples, podemos 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 do mesmo, Saliby[1988].

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, Saliby[1988].
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 destes, Ravindran[1987].
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, Neelamkavil[1988].
6. A análise por simulação pode ser utilizada para verificar soluções analíticas, Neelamkavil[1988].
7. Quando novos elementos são introduzidos no sistema, a simulação pode ser utilizada para antecipar os gargalos e outros problemas que podem surgir em seu comportamento, Neelamkavil[1988].

Não há dúvidas de que sempre que possível deve-se optar pela resolução de um problema utilizando métodos analíticos, pois eles normalmente fornecem soluções mais exatas e demandam menor esforço computacional. Entretanto, existem sistemas globais que são grandes e intrincados demais para serem lidados com modelos de programação linear, programação dinâmica ou com modelos probabilísticos padrões. O que caracterizam estes problemas difíceis de analisar é o efeito combinado da incerteza, das interações dinâmicas entre decisões e eventos subsequentes, das interdependências complexas entre as variáveis do sistema e, em alguns casos, da necessidade de usar intervalos de tempo finamente divididos Wagner[1985].

O problema de operação do transporte de cana em uma usina precisa fornecer uma análise da operação em um horizonte de tempo curto (24 horas) e, por isso, uma simplificação drástica no modelo para resolvê-lo através de um método analítico certamente comprometeria a validade prática dos resultados obtidos. Esta afirmação é justificada pelas seguintes características do sistema:

- A incerteza é intrínseca ao sistema pois os tempos de viagem, de ida para carregamento, volta para descarregamento, carregamento e descarregamento efetivo dos caminhões, podem ser representados através do conhecimento das distribuições de probabilidade destes tempos, mas não podem ser previstos deterministicamente.
- As interações dinâmicas entre decisões e eventos subsequentes estão presentes em todo o sistema. Por exemplo, o horário de chegada de um determinado caminhão para descarregar na usina depende :
 - dos tempos de viagem, de carga e descarga gastos por ele desde o início do turno
 - dos tempos de espera em filas para carregar e descarregar desde o início do turno. Estes tempos de fila por sua vez dependem dos tempos de viagem e de fila de todos os outros caminhões do sistema, bem como da decisão tomada, para cada caminhão, de qual entre as lavouras em transporte ele deveria se dirigir a cada viagem.
 - os itens anteriores podem ainda serem afetados pelo número e pelos momentos de quebra de caminhões e dos tempos respectivos de manutenção.

Nesta análise estamos omitindo muitas das complexidades do sistema real que serão detalhado no capítulo 4, entretanto ele é suficiente para que o leitor perceba as interdependências complexas existentes entre as variáveis do sistema.

- O número de pontos de onde a cana é transportada pode variar de um até mais de uma dezena, podem existir quatro ou mais tipos de caminhões e o carregamento pode ser efetuado em algumas lavouras por carregadoras e em outras por colhedoras. A abordagem por simulação permite flexibilidade na configuração destes e de muitos outros parâmetros que podem variar diariamente no sistema sem haver necessidade de ajustes no modelo.

É importante salientar ao leitor que não queremos, com esta justificativa, afirmar que o problema de transporte de cana-de-açúcar seja impróprio para abordagem analítica, pelo contrário, acreditamos que principalmente no planejamento a médio e longo prazo a resolução deste problema através de programação linear, ou qualquer outro método analítico, seja extremamente pertinente, e que a sua utilização em conjunto com a simulação se constitua na ferramenta ideal e completa para este problema. Como nossa proposta inicial

é o desenvolvimento de uma ferramenta prática para o planejamento de operação diária do transporte de cana-de-açúcar, a abordagem por simulação foi escolhida. Dentre as ferramentas disponíveis em Pesquisa Operacional, ela é aquela capaz de fornecer a solução mais prática e realista possível.

Na simulação é necessária a realização de testes computacionais exaustivos para que se obtenha políticas ou regras de operação de um sistema que minimizem os custos. Por outro lado, os métodos analíticos são capazes de determinar políticas ótimas de operação com um esforço computacional menor e sem despende muito tempo do analista. O ideal, portanto, para resolução de um problema qualquer, seria resolvê-lo inicialmente através de uma ferramenta analítica, determinando políticas ótimas de operação e testando, posteriormente, a viabilidade destas políticas através de uma ferramenta de simulação desenvolvida para o mesmo. Salientamos novamente que a forma ideal para a obtenção de políticas ótimas para o sistema de transporte de cana-de-açúcar seria trabalhar com uma ferramenta analítica utilizada em conjunto com o SISTEC.

Capítulo 3

O PROBLEMA DE TRANSPORTE DE CANA EM USINAS SUCRO-ALCOOLEIRAS

3.1 Introdução

Neste capítulo serão descritos detalhadamente os principais passos do processo de transporte de cana de açúcar em empresas do ramo sucro-alcooleiro, desde o seu corte na lavoura até sua colocação na esteira da usina.

3.2 Apresentação do Problema

O transporte de cana de açúcar é efetuado 24 horas por dia durante todos os dias da safra que dura seis meses por ano, de abril a outubro. A maior parte da cana transportada, se não toda, é plantada em lavouras próprias da usina ou em terras arrendadas pela mesma. No entanto uma porcentagem da cana processada pode ser comprada de terceiros. Neste caso, a cana pode ser transportada pelo próprio vendedor ou pela frota da usina.

A área de cana cultivada pela usina, que não é necessariamente conexa, é dividida em fazendas, que são divididas em seções, e estas por sua vez em talhões como mostra a figura 3.1. Geralmente, a maioria das seções ficam próximas da usina, com distâncias em torno de 15 Kilômetros, podendo no entanto existir seções com 70 Kilômetros ou mais da usina. O transporte a distâncias predominantemente curtas é uma das características específicas deste sistema. As estradas entre os talhões de uma seção são chamados carreadores.

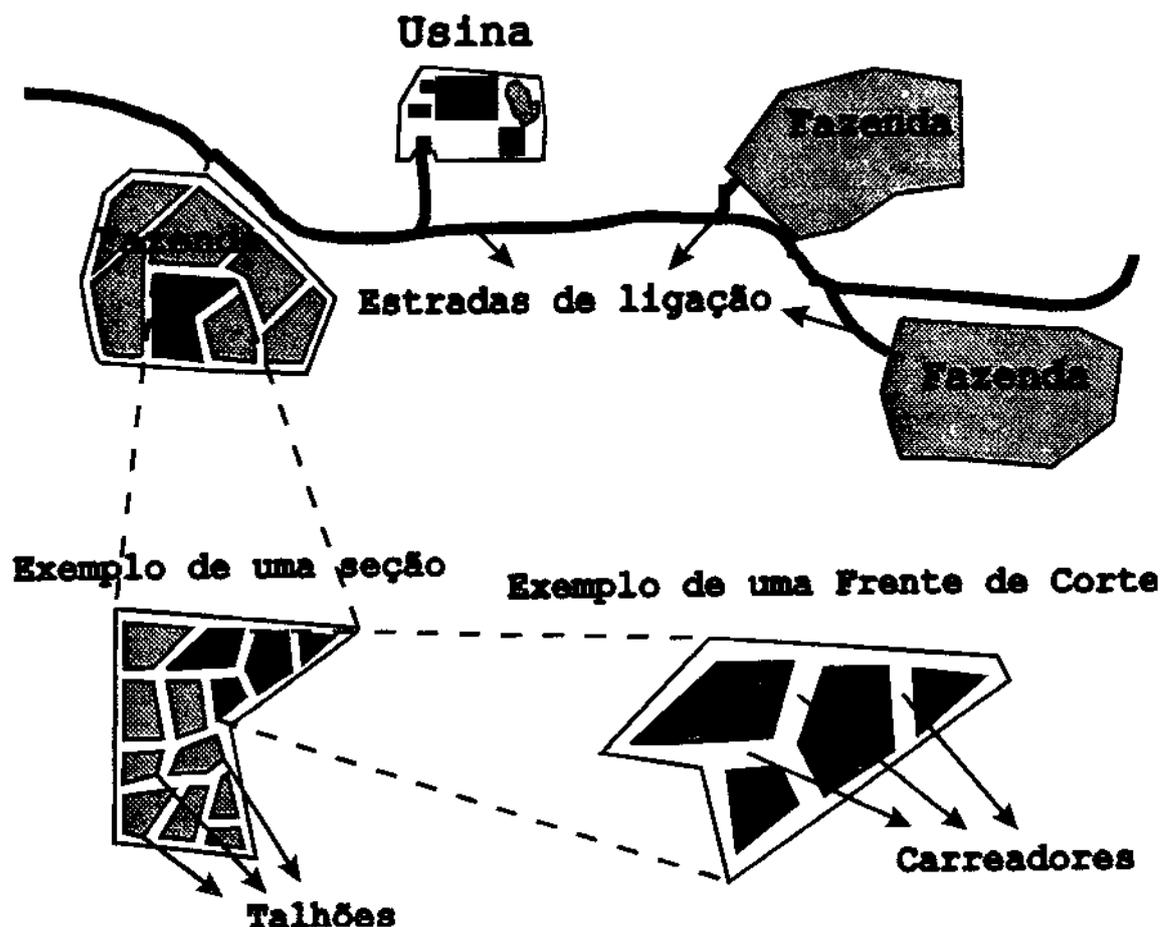


Figura 3.1 - Distribuição das áreas de cana cultivadas pela usina.

A frota de caminhões própria da usina, muitas vezes não é suficiente para o transporte de toda a cana plantada, sendo neste caso necessário a contratação de caminhões fretados. A aquisição de uma frota própria máxima, capaz de suprir sozinha o transporte de cana durante toda a safra, geralmente não é uma política interessante para a usina. A utilização de uma frota mista, com caminhões próprios e fretados, é normalmente mais vantajosa em virtude de permitir uma flexibilidade no número total de caminhões a cada mês. Desta maneira, a variação da demanda de caminhões, que pode acontecer ao longo da safra, em função das distâncias e períodos de colheita das diversas áreas de cana da usina, podem ser acomodadas. Não há, então, necessidade de ficar com parte da frota própria parada, o que significa ociosidade dos caminhões e conseqüente prejuízo para a usina.

A determinação da relação ótima entre o número de caminhões próprios e fretados é um problema complexo que influencia diretamente nos custos do sistema de transporte. Embora neste trabalho não abordemos este problema específico, é importante salientar que uma das aplicações do SISTEC pode ser a de ferramenta de apoio em análises de decisão sobre o dimensionamento da frota própria da empresa.

Toda a usina possui um setor responsável pelo exame e determinação dos talhões cuja maturação da cana se encontra em nível apropriado para colheita. Com base neste estudo, diariamente é decidido, dentre os talhões apropriados para colheita, quais serão cortados no dia seguinte (deve ser observado que um talhão cuja curva de maturação se encontra no ápice e não é colhido começa a perder o nível de açúcar). A cana normalmente é transportada de várias seções distintas simultaneamente. Dentro de cada seção são cortados vários talhões adjacentes de uma só vez, os quais passam a ser denominados uma frente de corte. O número de frentes de corte colhidas diariamente varia de acordo com a quantidade de cana que se estima cortar em cada frente, e a capacidade de moagem da usina expressa em toneladas de cana por dia.

A partir das características das frentes de corte selecionadas para serem colhidas em um dia, a equipe de transporte precisa planejar como serão distribuídos os equipamentos disponíveis (caminhões, carregadoras e tratores) de maneira a garantir o fornecimento de cana para a usina durante o decorrer do dia. Existem muitos fatores que influenciam neste planejamento, dentre eles podemos citar:

- distância de cada frente até a usina,
- quantidade de cana cortada,
- topografia do terreno,
- tipo e estado das estradas,
- quantidade total de caminhões, carregadoras e tratores disponíveis e suas características operacionais,
- tempo gasto para deslocamento de equipamentos de uma frente onde se encerrou o transporte para outra onde este deverá iniciar.

Embora não esteja dentro do escopo deste trabalho, a determinação otimizada de quais frentes de corte deverão ser colhidas em cada dia, no decorrer da safra, é um problema bastante complexo, que merece um comentário mais detalhado por estar intimamente relacionado com o problema de operação diária da frota. Na verdade este planejamento deve iniciar no ano anterior à safra, no momento de decidir quando e qual qualidade de cana plantar em cada talhão pertencente a usina. É preciso um planejamento para a safra toda, de

maneira que a distância média¹ das frentes transportadas em cada dia seja minimizada. O planejamento do plantio de diversas qualidades de cana é importante para que cada uma atinja maturação em épocas diferentes, de forma que haja cana apropriada para colher durante todo o período da safra. Um agravante neste problema é que como a cana cortada em um ano brota novamente durante vários anos sem haver necessidade de novo plantio, o planejamento geral do plantio tem que ser gradativo de modo a acomodar as restrições geradas pelas lavouras já plantadas.

Não aprofundaremos a discussão sobre este problema, pois a complexidade do mesmo é bastante grande e não é o objetivo desta tese, ficando a sua resolução como sugestão para pesquisa. Como o problema em estudo neste trabalho parte do ponto onde as frentes a serem transportadas em determinado dia já estão definidas, é irrelevante qual o tipo de análise levou a determinação destas frentes. Entretanto, o simulador desenvolvido pode ser utilizado como ferramenta de apoio para tal análise.

Quando as mudanças de frente ocorrem dentro de uma mesma seção, não existe grandes problemas devido ao tempo perdido com deslocamento das carregadoras e tratores, no entanto, quando a mudança é para outra seção distinta, a distância entre elas pode ser grande, e é preciso um estudo detalhado da mudança para que seja garantido o fornecimento de cana na usina. Esta tarefa de alocação diária de caminhões, carregadoras e tratores envolve muitas variáveis que, principalmente em usinas de porte médio e grande, acaba levando a um super dimensionamento da frota, pela dificuldade de prever com certa precisão como o sistema se comportará. O simulador proposto neste trabalho, tem a pretensão de ser uma ferramenta de apoio prática e efetiva no planejamento diário do transporte de cana em usinas. Ele deve obter a previsão do comportamento do sistema para diversas configurações; e conseqüentemente ser uma ferramenta de apoio no dimensionamento da frota fretada e na operação diária do sistema. Na operação diária procura-se minimizar o custo de transporte, garantindo o fornecimento necessário de cana à usina.

Existem vários sistemas de corte, carregamento e transporte da cana de açúcar em usinas, dentre os quais podemos citar o convencional manual, o convencional mecanizado, o manual com carregamento contínuo e o de transporte da cana em containers. No entanto, este trabalho apenas levará em consideração os sistemas convencionais manual e mecanizado, por eles serem os mais utilizados. Estes dois sistemas serão descritos em detalhes a seguir,

¹ A "distância média" em determinado dia é calculada dividindo-se a somatória das distâncias de cada frente até a usina pelo número total de frentes de corte.

com a descrição dos equipamentos utilizados e dos processos de corte, carregamento, transporte e descarregamento na usina.

3.3 Sistema Convencional Manual

O equipamento que representa a parcela mais significativa dos custos neste sistema são os caminhões de transporte, que serão divididos em classes², tais como no estudo de Gago[1986]:

- **Categoria I** - Veículos sem reboque (Mercedes-Benz 2213 (6x4) diesel ou equivalente), com capacidade média de 15 toneladas de cana.
- **Categoria II** - Veículos tipo "Romeu e Julieta" (Mercedes-Benz 2225 (6x4) diesel ou equivalente, rebocando uma carreta³) com capacidade média de 30 toneladas de cana.
- **Categoria III** - Veículos tipo "Treminhão" (Scania-Valis T 112-E (6x4) diesel ou equivalente, rebocando duas carretas) com capacidade média de 45 toneladas de cana.

Outros equipamentos que fazem parte do sistema de transporte são as carregadoras, normalmente tratores adaptados com garras hidráulicas responsáveis por pegar a cana já cortada, que se encontra amontoada em feixes no chão, e coloca-la nas carrocerias dos caminhões. Também fazem parte do sistema os tratores responsáveis pelo reboque das carretas no interior dos talhões, no caso de transporte tipo II e III.

O processo de colheita inicia com a queima da cana, geralmente na noite anterior ao dia do corte. Pela manhã se inicia o corte manual e a formação dos feixes de cana ao longo do talhão, já prontos para serem carregados e transportados. Após a etapa de corte, se inicia a etapa de carregamento, na qual a carregadora eleva a cana enfeixada e a coloca na carroceria do caminhão, que acompanha a carregadora ao longo do talhão de forma independente mas sincronizada (esta operação é chamada carregamento da cana). O processo

² Além das três classes usuais citadas aqui, existem outras menos utilizadas. No final deste capítulo descrevemos a "Categoria IV", utilizada em um sistema alternativo de transporte de cana.

³ As carretas possuem capacidade média de 15 toneladas e neste trabalho poderão ser chamadas simplesmente de "julietas" de acordo com o jargão das usinas,

de carregamento é análogo para as julietas, que são tracionadas por tratores 4x4 no interior dos talhões. Uma vez completada a carga, os caminhões e as carretas se dirigem para um carreador principal onde a carga é amarrada na carroceria para evitar perdas durante o trajeto de volta à usina. Logo após são acopladas as carretas (para categorias II e III) e efetuada a aparração da carga onde os pedaços de cana que se sobressaem da carroceria são cortados. A seqüência de operações de um caminhão em uma frente de corte é a seguinte:

- chegada trazendo carretas vazias (apenas para categorias II e III),
- desacoplamento das julietas vazias,
- espera em fila única pela liberação de carregadoras,
- carregamento efetivo,
- amarração da carga,
- acoplamento das julietas carregadas que devem estar a espera (categoria II e III),
- aparração da carga,
- início da viagem de volta a usina.

Quando chega na usina, após a pesagem e eventual coleta de amostra para medida do nível de sacarose, os caminhões são preparados para descarga (a carga é desamarrada) e então é efetuada a descarga efetiva, através de um guindaste específico, que possui vários ganchos os quais são acoplados a cabos de aço colocados previamente no chão da carroceria, abaixo da cana. Existem várias variações destes guindastes para descarga, no entanto, não entraremos em detalhes pois nos interessa apenas os tempos de operação de cada tipo. Os cabos são então suspensos de um lado, fazendo com que toda a carga seja levantada da carroceria⁴ de uma só vez e caia em uma esteira ao lado do caminhão, iniciando sua lavagem e moagem pela usina. Resumindo, a seqüência de operação dos caminhões na usina pode ser:

- chegada trazendo julietas carregadas (categoria II e III),
- pesagem (caminhão carregado),
- coleta de amostra,

⁴Os caminhões e julietas que transportam feixes de cana inteira, são abertos nas laterais, tendo nestas espaçadamente 4 ou 5 hastes verticais para evitar a queda dos feixes.

- preparação para descarregamento (desamarração da carga),
- descarregamento efetivo,
- limpeza da carroceria,
- pesagem do caminhão vazio (a carga descarregada é determinada com precisão através da diferença entre o peso do caminhão na entrada e o peso na saída da usina),
- início da viagem para carregamento em uma das frentes de corte.

A usina possui um pátio de depósito de cana, onde é depositada toda a cana que não consegue ser processada no momento da descarga, sendo utilizada posteriormente para suprir a usina em períodos que a taxa de chegada de caminhões é baixa e a cana descarregada não consegue suprir as necessidades da mesma. Desta maneira, o processamento da usina consegue se manter constante durante todo o tempo. O nível de cana no depósito da usina é uma variável importante para o problema. Notamos que a cana não pode ficar estocada por um período muito grande (aproximadamente 24 horas) devido a problemas de fermentação e perda de sacarose.

Normalmente a mudança de turno dos motoristas é escalonada em número de três e os turnos são de 12 horas. Por exemplo, de manhã um terço da frota troca de turno as 6:00 horas, um terço as 7:00 horas e o restante as 8:00 horas. Este sistema elimina o risco de uma interrupção muito grande no transporte, que poderia causar falta de cana para processamento, no pátio da usina. Ao final de cada turno tem-se um tempo perdido pelos caminhões que aguardam a troca de motorista na garagem da usina. Este tempo perdido depende da previsão do tempo que cada caminhão levaria para efetuar um ciclo completo (usina-frente de corte-usina) e conseqüente decisão de ir para garagem ou de efetuar um novo ciclo. O SISTEC pode ser utilizado na análise destes tempos para diversas configurações do sistema.

3.4 Sistema Convencional Mecanizado

Este sistema difere do manual principalmente na etapa de corte que é efetuado através de colhedoras. Estas cortam a cana e a carregam já picada diretamente nos caminhões que as acompanham. A carroceria dos caminhões e as julietas são fechadas lateralmente com telas⁵ para evitar a perda da cana picada durante o transporte. Neste sistema as operações de corte, empilhamento da cana, amarração e aparação da carga não existem, o que representa um ganho em tempo. Na usina, o descarregamento é efetuado através de um sistema de basculador hidráulico onde a carroceria, ou o caminhão inteiro, é inclinado lateralmente ou para trás, permitindo que a cana deslize para uma esteira, onde inicia o processo de moagem pela usina. Embora este sistema apresente um dos menores custos de operação, existem algumas desvantagens como perdas no campo (toletes deixados no campo e corte de base mais elevado do que o manual), quantidade de impurezas na matéria-prima transportada para a usina e compactação do solo.

Muitas usinas efetuam simultaneamente o transporte de cana inteira (corte convencional manual) e de cana picada (corte convencional mecanizado). Nestes casos normalmente a usina conta com dois tipos distintos de descarregadoras para cana picada e inteira, havendo conseqüentemente a formação de duas filas de caminhões a espera para descarregar. Nestes casos parte dos caminhões da usina são comuns e parte são telados para transporte de cana picada. Após a chegada na usina cada caminhão se dirige a uma descarregadora, ou à fila correspondente, compatível com o seu tipo de cana (picada ou inteira).

Nota : apesar da grande maioria das usinas no Brasil se restringirem ao uso dos três tipos básicos de transporte apresentados neste capítulo, podem existir muitas variações destes em sistemas alternativos de corte, carregamento e transporte de cana. Dentre estes sistemas alternativos citaremos apenas um, o qual chamaremos de categoria IV, em que a unidade de transporte a longa distância (usina-frente de corte) é composto por um cavalo mecânico e nove julietas. Neste sistema o cavalo mecânico acopla três julietas vazias na usina e transporta-as até a frente, onde estas são substituídas por outras três que já esperam previamente carregadas. Em seguida retorna a usina onde as três carretas carregadas são novamente substituídas por outras três vazias, reiniciando assim o ciclo. O transporte interno das julietas na usina e na lavoura é feito por tratores. A diferença desta

⁵ eventualmente os caminhões telados para transporte de cana picada podem ser utilizados para transportar cana inteira. Entretanto os caminhões para cana inteira não podem transportar cana picada.

classe de transporte em relação a categoria III é que esta não possui nenhuma carroceria fixa junto a gabine, possibilitando o transporte de julietas quase ininterruptamente, visto que não precisa entrar na usina para descarregar e nem na lavoura para carregar. A eficiência neste tipo de transporte é muito superior às demais categorias.

Capítulo 4

CONCEITOS DE SIMULAÇÃO

4.1 Introdução

Neste capítulo apresentaremos os fundamentos da simulação de sistemas a eventos discretos. Após uma breve apresentação dos conceitos básicos em simulação discutiremos a geração de variáveis aleatórias, as metodologias de modelamento e as principais estruturas em um modelo orientado a eventos.

4.2 Simulação de Sistemas

A simulação é uma abordagem de estudo que vem sendo utilizada, cada vez mais freqüentemente, por profissionais da área de Pesquisa Operacional devido a crescente complexidade dos sistemas existentes e a maior disponibilidade de recursos computacionais.

Simulação consiste basicamente em analisar um sistema real, através de experimentos realizados em um modelo construído especialmente para reproduzir o comportamento do sistema. Uma simulação pode ser realizada, em casos especiais, através de um protótipo físico do sistema a ser simulado. Exemplos deste tipo de simulação são o túnel de vento para testar a aerodinâmica de aviões ou de determinadas peças e pequenas usinas hidrelétricas para testar, o comportamento do fluxo das águas através do complexo de canais em uma barragem, por exemplo. Entretanto, 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.

Sistema é definido por Neelamkavil[1988] como uma "coleção de elementos interagindo ou agindo juntos para alcançar um objetivo comum". 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 o modelo de simulação deseja-se obter aspectos importantes do comportamento do sistema ao longo de um período de tempo. O modelo lógico-matemático adaptado para simulação em um computador é conhecido como modelo de simulação computacional ou simplesmente modelo de simulação.

Uma determinada simulação de acordo com o modelo desenvolvido pode ser classificada da seguinte maneira:

- *Simulação Determinística 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. Já a simulação *probabilística* aplica-se quando as incertezas nos valores das variáveis são determinantes no funcionamento do sistema. Neste caso o modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias com objetivo de reproduzir, da maneira mais apropriada possível, os valores reais representados por estas variáveis. A simulação desenvolvida neste trabalho é do tipo probabilística, pois estamos interessados em construir o modelo mais realista possível. O sistema de transporte de cana envolve variáveis aleatórias tais como tempo de viagem de um caminhão, tempo de carregamento e tempo de descarregamento entre outras.
- *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 referem-se ao estudo de um sistema ao longo do tempo, o que caracteriza uma simulação *dinâmica*. A simulação desenvolvida aqui é do tipo dinâmica, pois estamos interessados exatamente na evolução do estado do sistema de transporte de cana ao longo de um período de tempo (normalmente um dia) para uma determinada configuração dos equipamentos (tratores, carregadoras, caminhões) e das frentes de corte.
- *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 descritos 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. Existe pesquisas sendo feitas no sentido de uma maior integração destes dois tipos de simulação, combinando-se os elementos contínuos e discretos em um modelo de simulação mista. O simulador desenvolvido neste trabalho é do tipo discreto pois a simulação de operação do transporte de cana é bastante apropriado para utilização de incrementos variáveis, de acordo com a técnica do próximo evento que será discutida ainda neste capítulo.

4.3 Definição do Sistema

A definição de sistema já foi vista na seção 4.2 e nesse trabalho o sistema de interesse é o de transporte de cana-de-açúcar de várias lavouras para uma usina onde a mesma é processada. Este item é fortemente baseado em Perin[1990].

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 destas atividades é desenvolvido define uma variável do sistema e, em geral, está relacionada com as taxas de fluxo de entrada e saída das entidades nos respectivos componentes. Exemplo de componentes no sistema de transporte de cana são a usina, as frentes de corte e as estradas de ligação.

As **entidades** são os elementos do sistema que podem ser identificados e processados individualmente. Exemplos de entidades incluem os caminhões, as carregadoras, 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 que somente passam pelo sistema são denominadas *temporárias*, pois deixam de ser analisadas no instante que saem do sistema. Em nosso sistema todas as entidades são permanentes pois os caminhões operam de maneira cíclica viajando entre as lavouras e a usina, e assim como todas as demais entidades permanecem no sistema durante todo o período de simulação. Um exemplo de entidades temporárias são os

caminhões de fornecedores de cana (produtores que entregam a cana na usina), que são criados no momento em que chegam na usina, entram na fila de descarregamento, descarregam e depois desaparecem do sistema .

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, que denominamos **atributos**. 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*).

Durante a simulação as entidades mudam de estado. Entidades no mesmo estado podem ser representadas em conjuntos, em alguns casos estes podem ser imaginados como se fossem **filas** onde as entidades esperam algo acontecer (ex: fila de caminhões esperando a liberação de uma carregadora). Estas filas podem ter uma disciplina específica. Em nosso sistema todas as filas obedecem a disciplina FIFO (first in, first out - primeiro a entrar, primeiro a sair). Como exemplo, podemos citar um caminhão que chega na usina, se não houver pelo menos uma descarregadora disponível ele entra no final de uma fila de espera. Nesta, aguarda para iniciar o descarregamento quando todos os caminhões na sua frente tiverem saído da fila e houver pelo menos uma descarregadora vaga.

O **estado do sistema**, em cada instante de tempo, é formado pelos valores tomados pelas **variáveis de estado** do sistema. Uma **variável de estado** pode ser o nível de funcionamento da atividade de um componente ou o atributo de uma entidade (exemplos de variáveis de estado podem ser o número de caminhões que se encontram em uma fila aguardando para iniciar o carregamento ou a quantidade de cana no depósito da usina em determinado instante de tempo). As variáveis de estado devem ser criteriosamente escolhidas, pois é com base nos valores tomados por estas variáveis que se faz a observação do desempenho do modelo.

Mudanças no estado do sistema podem ser suaves (e contínuas) ou bruscas (e instantâneas). Uma alteração brusca no estado do sistema indica a ocorrência de um **evento**, como por exemplo, a chegada de um caminhão na usina. Mudanças suaves ocorrem devido ao desenvolvimento das atividades associadas aos componentes do sistema; por exemplo o carregamento de um caminhão. Neste sentido um evento é o instante de tempo no qual ocorre uma mudança significativa no estado do sistema, ou porque uma entidade entra e sai de um conjunto, ou porque alguma operação se inicia. Observamos que fica por conta do analista definir se um evento é ou não significativo no contexto dos objetivos da simulação.

As entidades se deslocam de um componente para outro por causa das operações em que estão envolvidas. Portanto, as operações e os procedimentos que são iniciados em cada evento são conhecidos como **atividades**. São as atividades que transformam o estado das entidades.

Relógio é uma variável responsável por marcar os instantes de tempo de simulação. Na simulação discreta o relógio é constantemente atualizado pelo controlador da simulação de acordo com o horário previsto para a ocorrência de cada evento.

4.4 Geração de Números Pseudoaleatórios

A utilização de modelos de simulação normalmente requer a obtenção de amostras aleatórias de uma ou mais distribuições.

O método mais prático para geração de amostras aleatórias, a partir de uma determinada distribuição, é primeiro gerar uma ou mais amostras uniformemente distribuídas, entre 0 e 1, e então transformar as amostras uniformes nas novas amostras desejadas. Amostras uniformemente distribuídas no intervalo 0 a 1, são chamadas **números aleatórios**.

O método normalmente utilizado em simulação computacional para gerar números aleatórios, consiste em empregar uma equação recursiva, que gera o *i*-ésimo número randômico a partir do $(i-1)$ -ésimo número. Uma vez que a seqüência de números é produzida deterministicamente por uma equação, os números não são verdadeiramente randômicos, e por isto são usualmente chamados de **números pseudoaleatórios**. Contudo, no decorrer deste trabalho, por simplicidade chamaremos estes números de aleatórios.

Segundo Soares[1990], um gerador de números pseudoaleatórios deve possuir as seguintes propriedades:

- Os números devem ser uniformemente distribuídos no intervalo $[0,1]$.
- Os números devem ser independentes e, portanto, nenhuma correlação deve existir na seqüência de números aleatórios.
- Muitos números devem ser gerados antes que um mesmo número seja novamente obtido. Isto é referido como ciclo ou período do gerador.
- A seqüência de números aleatórios deve ser reproduzível, e deve ser permitido diferentes valores de partida, chamados **sementes**, de forma a permitir que diferentes seqüências sejam geradas.
- O gerador deve ser rápido.

- O espaço de armazenamento requerido para geração deve ser o menor possível.

Existem vários métodos para geração de números pseudoaleatórios. O método congruente é um dos que melhor satisfaz estas propriedades segundo Soares[1990], e está implementado no pacote de simulação utilizado pelo SISTEC.

Este método emprega as seguintes equações recursivas:

$$x_{i+1} = (a x_i + b) \text{ mod } c \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

$$r_{i+1} = x_{i+1} / c$$

a = multiplicador

b = incremento

Onde x_0 é a semente e r_i é o i -ésimo número pseudoaleatório.

As amostras aleatórias em um programa de simulação são chamadas de **variáveis aleatórias**. Vamos ilustrar como pode ser gerada uma amostra de uma distribuição discreta com as seguintes probabilidades:

$$p(0) = 0,15 \quad p(1) = 0,50 \quad p(2) = 0,20 \quad p(3) = 0,15$$

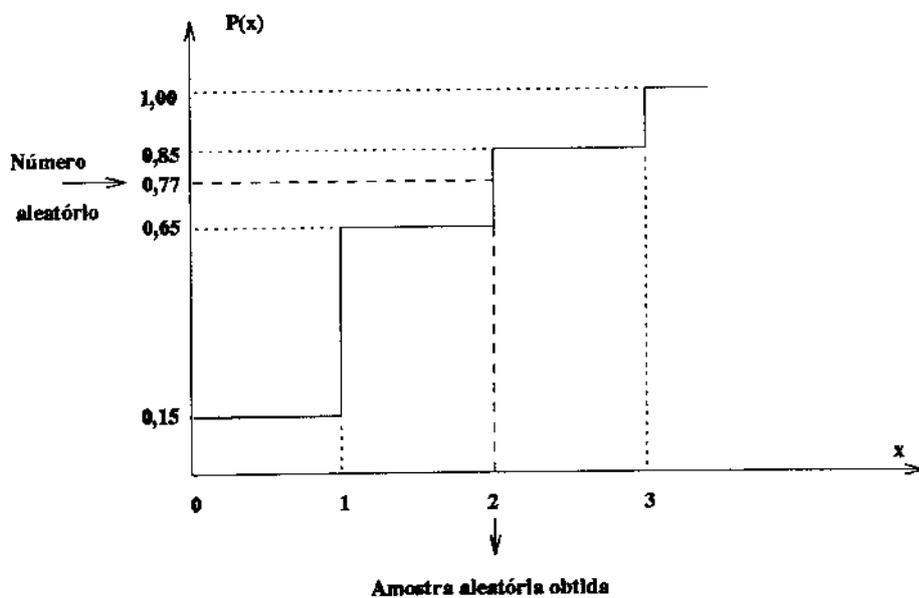


Figura 4.1 - Função distribuição de probabilidade $P(x)$.

A função de distribuição pode ser vista na figura 4.1. Para se obter uma amostra da distribuição, um número aleatório é gerado entre $[0,1]$. A partir do gráfico, é então traçada uma reta paralela ao eixo horizontal, a partir da coordenada vertical dada pelo número

aleatório. Onde esta reta cortar a função de distribuição, uma perpendicular ao eixo horizontal é tirada, interceptando o referido eixo exatamente na amostra aleatória desejada. Pela figura notamos que uma decisão arbitrária, mas consistente, deve ser tomada nos pontos de quebra. A figura ilustra a obtenção de uma amostra aleatória da distribuição apresentada, a partir de um número aleatório que pode ser gerado, por exemplo, através do método congruente. Este exemplo deve ilustrar, ao leitor que não esteja familiarizado com estes conceitos, como podem ser geradas variáveis aleatórias com determinadas distribuições, a partir de números pseudoaleatórios gerados previamente.

Existe quatro métodos fundamentais de geração de amostras aleatórias, tanto discretas como contínuas: Transformada Inversa; Composição; Aceitação/Rejeição; Propriedades Especiais. Todos os métodos geram suas amostras a partir de números aleatórios entre 0 e 1. Sugerimos as referências Fishman[1978] e Pidd[1998] para os leitores interessados em maiores informações a respeito de métodos de geração de variáveis aleatórias, pois não entraremos aqui em maiores detalhes.

Sempre que nos referirmos a uma variável aleatória precisamos ter em mente que associado a ela deve estar qual o tipo de distribuição ela obedece e quais os parâmetros desta distribuição. Por exemplo o tempo de viagem dos caminhões para uma determinada distância é considerada como uma distribuição normal cujos parâmetros são a média e desvio padrão. Conhecendo a semente inicial que foi utilizada para gerar uma seqüência de tempos, esta seqüência pode posteriormente ser reproduzida a partir desta semente.

4.5 Metodologias de Modelamento

O problema de transporte de cana-de-açúcar em estudo, como já foi dito anteriormente, é adequado para abordagem por simulação a eventos discretos. Isso acontece porque existe muitos períodos no sistema onde nenhum evento acontece, isto é, cada entidade se encontra efetuando um determinado processo e nenhuma mudança brusca acontece no sistema. Por isso é preferível utilizar um incremento de tempo variável, de maneira que o modelo seja examinado e atualizado somente nos instantes em que uma mudança no estado do sistema está para ocorrer. Estas mudanças no estado do sistema são conhecidas como eventos (ex.: início de carregamento, final de carregamento, início de viagem para a usina, chegada de um caminhão na usina, etc...). Neste enfoque o tempo é incrementado de evento para evento e por isso é conhecido como técnica do próximo evento.

Segundo Paul[1991] existem três metodologias principais para simulação de sistemas por eventos discretos :

- *Método orientado ao processo* - Esta metodologia utiliza uma estrutura básica com características que são similares à programação orientada por objetos e está encapsulada na linguagem chamada SIMULA que foi desenvolvida em ALGOL. A idéia básica deste método é que o programa simula o fluxo de um objeto através do sistema. Este fluxo ou processo deve descrever em seqüência todos os estados possíveis para este objeto no sistema.
- *Método das três fases ou método orientado ao exame da atividade* - Esta metodologia classifica os eventos em eventos não programáveis que ocorrem apenas quando determinadas condições são satisfeitas e cuja ocorrência não é programada, e eventos programáveis. Um exemplo de evento não programável, nesta abordagem, poderia ser a retirada de um caminhão da fila de espera, para iniciar o carregamento, pois a ocorrência deste evento depende da ocorrência de vários outros eventos, como o final de carregamento de outro caminhão. Um exemplo de evento programável seria o final de carregamento de um caminhão, pois ele pode ser programado no momento do início de seu carregamento, a partir do tempo estimado para o seu carregamento. O controlados da simulação, nesta abordagem, atua de maneira cíclica entre as três fases:
 1. Atualiza o relógio do simulador
 2. Executa os eventos programados (eventos programáveis) para aquele instante de simulação
 3. Testa a condição associada a cada evento não programável para executa-lo ou não.

Esta metodologia é amplamente utilizada em função de sua fácil implementação, porém possui uma desvantagem quanto a eficiência computacional, pois a cada avanço de tempo é realizada uma bateria de testes para verificar quais os eventos não programáveis que podem ser executados.

- *Método orientado a eventos* - Esta metodologia estabelece que eventos dependentes constituem na realidade um único evento composto. Sempre que ocorre um evento (normalmente final de uma atividade), é verificado se outros eventos não podem ser executados ou programados como consequência deste. Por exemplo, quando ocorre o evento final de carregamento de um caminhão, além das atividades ligadas diretamente a este caminhão tais como programação do início da viagem de volta, pode ser verificado se existe outro caminhão esperando para ser carregado, e caso exista, é iniciado imediatamente o seu

carregamento, caso contrário a carregadora que terminou o carregamento é colocada em disponibilidade. Nesta abordagem o controlador da simulação executa suas funções de maneira cíclica interagindo entre duas fases:

1. Atualiza o relógio do simulador
2. Executa os eventos programados para aquele instante de simulação.

Esta metodologia tende a ser mais difícil de implementar, porém é bastante eficiente computacionalmente.

A metodologia orientada a eventos foi a escolhida para desenvolvimento do modelo neste trabalho exatamente em função da sua eficiência computacional. Deste ponto em diante todas as explicações a respeito do modelamento e implementação do simulador estarão se referindo a esta estrutura de modelamento.

4.6 Modelo Orientado a Eventos

Na simulação orientada a eventos, um sistema é modelado pela descrição das mudanças que ocorrem no tempo de evento. A tarefa do modelador é determinar os eventos que podem causar mudança no estado do sistema e então desenvolver a lógica associada com cada tipo de evento. A simulação do sistema é produzida pela execução da lógica associada a cada evento, em uma seqüência ordenada no tempo, Soares[1990].

O estado de um sistema em um modelo orientado a evento é representado por variáveis, por entidades (e seus atributos) no modelo, e pela localização (em filas) destas entidades no modelo.

O conceito de que os eventos acontecem instantaneamente é crucial. Um evento pode iniciar ou terminar uma atividade, mas as mudanças no estado do modelo são instantâneas, pois o tempo não avança dentro de um evento, e mudanças no estado do sistema só podem ocorrer no tempo de evento.

Quando ocorre um evento, o estado do sistema pode mudar de quatro modos, ou por uma combinação destes quatro modos:

- pela alteração do valor de uma ou mais variáveis associadas com a simulação (por exemplo a atualização da quantidade de cana restante em uma frente de corte quando um caminhão termina de ser carregado);
- pela alteração do número de entidades presentes no sistema (este modo não ocorre no SISTEC porque não existe entidades temporárias, os caminhões,

carregadoras e demais entidades são permanentes no sistema, como mencionado anteriormente);

- pela alteração do valor designado a um ou mais atributos da entidade (por exemplo a designação do número de julietas acopladas a um trator em determinado instante);
- pela alteração da relação que existe entre entidades, através da manipulação de filas (por exemplo a colocação de um caminhão na fila de espera para carregamento ou a retirada do mesmo para iniciar o carregamento).

É importante notar que a ocorrência de um evento pode não alterar o estado do modelo, mas apenas causar uma tomada de decisão.

Para a simulação orientada a eventos, devemos manter um calendário de eventos (lista de eventos futuros), e causar a execução das rotinas adequadas em tempos apropriados do tempo simulado. Cada evento será executado em uma seqüência ordenada, com o tempo simulado sendo avançado de um evento para o próximo, dentro do calendário de eventos.

4.6.1 Estrutura de Filas

A simulação orientada a eventos normalmente exige a utilização de uma estrutura de dados e de rotinas especiais para trabalhar com filas de entidades; como por exemplo, fila de caminhões aguardando para descarregar, para carregar, etc.

Fila pode ser definida como uma linha de espera para utilização de um recurso. Neste trabalho as filas são utilizadas para "armazenar" entidades, normalmente em períodos ociosos em que elas precisam aguardar a ocorrência de determinado evento para iniciar uma atividade. Quando um caminhão (usuário) chega na usina ele entra em uma fila onde aguarda até que uma descarregadora (servidor) esteja disponível.

Existem várias disciplinas para operação de filas. A mais utilizada é a FIFO (first in first out) onde o primeiro usuário a entrar é sempre o primeiro a sair. Uma fila pode possuir apenas um servidor ou vários servidores operando em paralelo.

4.6.2 Lista de Eventos Futuros

Na simulação orientada a eventos é necessário a presença de uma estrutura chamada lista de eventos futuros. Esta estrutura é utilizada como um calendário de eventos onde todos os eventos que estão para acontecer ficam programados em ordem cronológica. O próximo evento para acontecer é sempre o primeiro da lista.

O controlador da simulação retira o primeiro evento da lista, atualiza o relógio para o instante de ocorrência do evento e executa a rotina correspondente ao evento. Caso novos eventos sejam gerados durante a execução desta rotina, estes eventos são incluídos na lista de eventos futuros de acordo com o instante programado de ocorrência. Uma vez que a rotina tenha sido executada, o controlador repete este procedimento com o próximo evento da lista.

Um simulador orientado a eventos precisa contar com um conjunto de rotinas para criar e manipular eficientemente a lista de eventos futuros. Existe uma maneira de estruturar dados de modo a permitir a inserção de um elemento em um conjunto e também encontrar e retirar o maior elemento eficientemente. A estrutura de dados que permite realizar estas duas operações é denominada fila de prioridade.

Normalmente uma lista de eventos futuros é composta das seguintes informações:

- tipo de evento
- instante de programação do evento na lista
- instante de execução do evento
- índices que identificam quais são as entidades envolvidas neste evento

A maioria das linguagens de simulação já trazem prontas rotinas eficientes para manipulação da lista de eventos futuros, de modo que o programador destas linguagens não precisa se preocupar com seu funcionamento interno. Entretanto, quando se utiliza uma linguagem geral de programação (linguagem C por exemplo) para implementar o simulador, a programação destas rotinas consiste em uma tarefa bastante árdua.

O estudo destas rotinas de manipulação da lista de eventos futuros não faz parte dos objetivos deste trabalho, porém maiores informações e referências podem ser obtidas na tese de Nishi[1993].

O pacote de simulação utilizado na implementação do SISTEC chama-se SIMÃO e conta com todas as rotinas necessárias para manutenção da lista de eventos futuros, manipulação das filas de entidades e geração de variáveis aleatórias. Referências sobre estas rotinas podem ser obtidas em Nishi[1990].

Parte II

**UM MODELO DE SIMULAÇÃO
PARA O PROBLEMA DE TRANSPORTE
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Capítulo 5

UM MODELO GERAL PARA O PLANEJAMENTO DE TRANSPORTE

5.1 Introdução

Na fase inicial deste trabalho, a partir do problema objeto desta tese, apresentado no capítulo 4, foi feita uma análise para definir um sistema computacional capaz de solucionar o mesmo com eficiência. O sistema completo que surgiu desta análise é descrito resumidamente neste capítulo e é apresentado de forma esquemática na figura 5.1. O trabalho desta tese consiste em implementar e testar apenas uma parte deste sistema, como veremos a seguir.

Na seção 5.3 serão feitos comentários sobre o **equipamento** e a **linguagem computacional** utilizada para implementação do SISTEC bem como sobre a sua **interface com o usuário**.

5.2 Sistema Computacional Completo

A seguir estão descritos os módulos componentes do sistema proposto:

- **Simulador básico** - este módulo é o coração do sistema proposto na figura 5.1 e o objetivo primeiro deste trabalho. Ele contém as rotinas responsáveis pela "reprodução" da realidade do sistema físico. A estrutura deste módulo é projetada não só para permitir grande versatilidade na configuração dos diversos elementos do sistema, como também para garantir a sua fácil interação com os diversos módulos do sistema completo.

- **Interface amigável para o usuário** - este módulo é responsável pela interação entre o usuário e todos os outros módulos do sistema. Ele torna o simulador transparente para o usuário, permitindo que pessoas sem prática na utilização de computadores e sem conhecimentos na área de simulação possam operá-lo sem dificuldades.

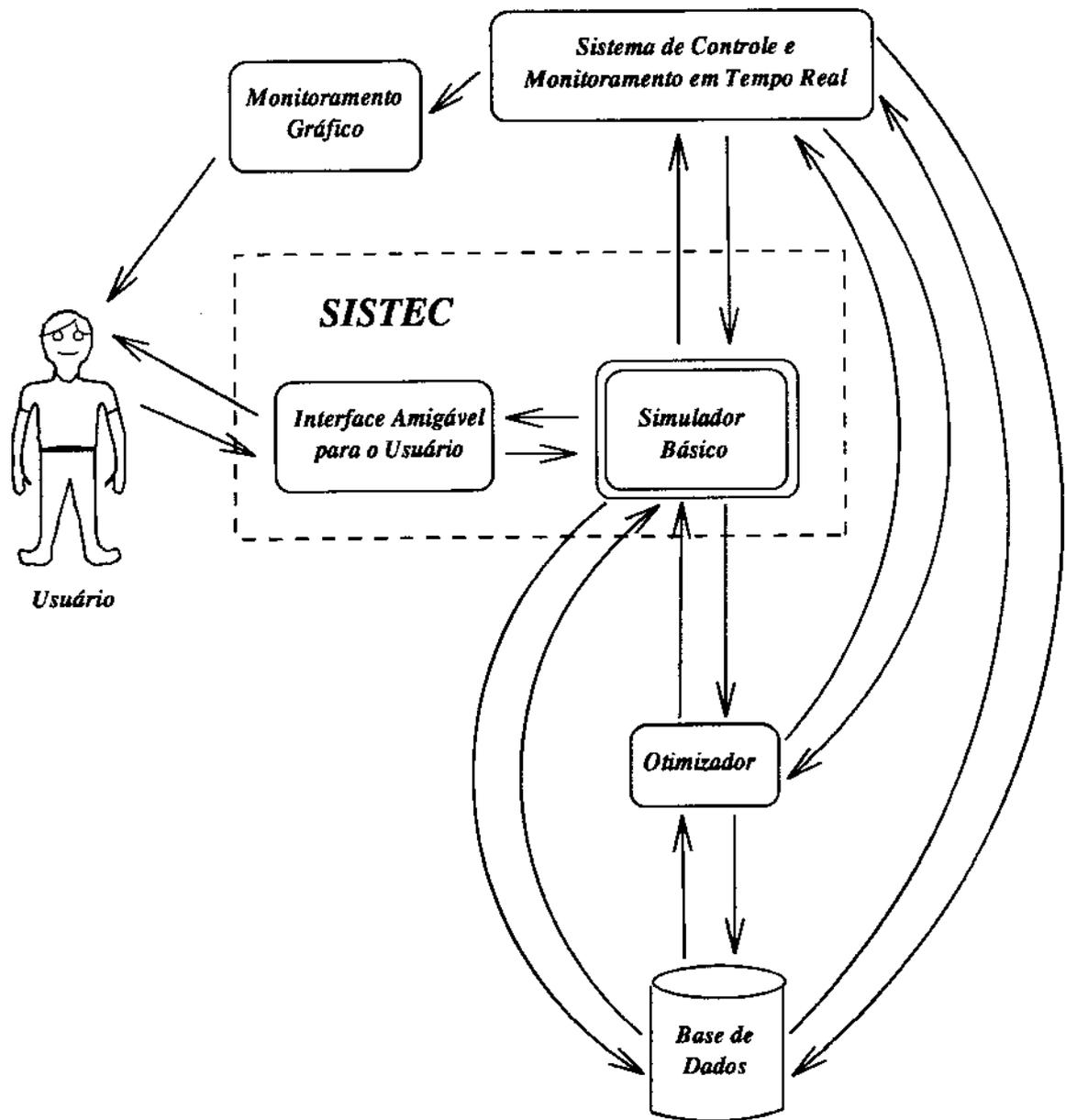


Figura 5.1 - Modelo geral para o planejamento de transporte de cana

- **Base de dados** - a base de dados pode ser dividida em dois sub-módulos.
 - O primeiro, responsável pelo armazenamento dos dados sobre as frentes de corte, usina e todo o sistema simulado bem como sobre as diversas simulações já realizadas. Uma vez implementado, ele traria grande conforto e rapidez para o usuário que ao invés de entrar com toda a configuração do sistema detalhadamente para determinado dia, apenas recuperaria esta configuração da base de dados, fornecendo quais as frentes de corte que serão colhidas no dia simulado.
 - O outro sub-módulo da base de dados é responsável pela realimentação e atualização das informações já existentes, a partir do sistema de controle e monitoramento em tempo real. Esta base de dados torna o sistema auto corrigido e com o passar do tempo, através da sua própria utilização, se tornaria cada vez mais preciso e confiável.

- **Otimizador** - É importante salientar que este módulo, não é a implementação de um modelo analítico (exato ou heurístico) capaz de encontrar uma solução ótima utilizando-se de um algoritmo de programação matemática. Sem dúvida um otimizador deste tipo, utilizado em conjunto com o simulador, seria de grande utilidade, principalmente no planejamento a médio e longo prazo. Entretanto o otimizador a que nos referimos aqui é um módulo que através de um conjunto de regras heurísticas, obtidas através de testes exaustivos, buscaria minimizar a frota utilizando o simulador. Este módulo deve atuar em duas fases distintas:
 - Na primeira, substituindo o usuário, no trabalho interativo de tentar chegar a configuração mínima de equipamentos (caminhões, tratores e carregadeiras) para um determinado dia de operação, através da realização de simulações com diferentes configurações, sendo apresentado ao usuário apenas um subconjunto de configurações mais interessantes sob determinado critério. Nesta fase, o otimizador, trabalha com despacho estático¹.

¹ 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 a qualquer frente. A decisão de qual frente o caminhão se dirigirá é tomada sempre no momento de sua saída da usina.

- Na segunda fase, este módulo tentaria minimizar ainda mais, se possível, o número de veículos mínimo encontrado na fase anterior. Nesta fase seriam usadas regras heurísticas para, no momento de partida de cada caminhão da usina, escolher qual dentre as frentes disponíveis é a mais vantajosa economicamente para este caminhão se dirigir. Nesta fase seria usado o despacho dinâmico dos caminhões.

As duas fases deste módulo são baseadas em "regras" que precisam ser formuladas e testadas antes de sua implementação.

- **Sistema de controle e monitoramento em tempo real** - é apoiado no simulador básico, e ao contrário dos módulos anteriores que visam configurar a frota para um dia de operação futuro (planejamento operacional), este módulo visa o controle e monitoramento do sistema em tempo real durante 24 horas por dia. O mesmo deve rodar em equipamento localizado em ponto estratégico, provavelmente a balança, por onde chegam e saem todos os caminhões da usina. Este módulo precisa dispor de mecanismos para atualizar constantemente a situação do simulador com os dados do sistema real tais como chegada de determinado caminhão, quebra de algum equipamentos, chuva em alguma frente e partida de caminhão da usina, neste último caso ele deve intervir em conjunto com o módulo otimizador para determinar a qual frente o caminhão deverá se dirigir. Este módulo se utilizado em conjunto com o monitoramento gráfico, proporcionará uma visão geral da situação na usina e em todas as frentes, bem como a previsão dos eventos que estão para acontecer no sistema como, por exemplo, a chegada de caminhões na usina. Também poderão ser acrescentadas a este módulo, regras para tomada de decisões em caso de quebra de equipamentos ou chuva em alguma frente.
- **Monitoramento gráfico da simulação** - Responsável por efetuar a monitorização gráfica de todas as entidades e componentes do sistema de transporte durante a execução do programa simulador, facilitando ao usuário entender o que ocorre para cada configuração testada.

Os passos para o desenvolvimento do sistema proposto são:

1. Levantamento de dados e análise do sistema real
2. Desenvolvimento do modelo para o sistema real

3. Implementação computacional do modelo de simulação (simulador básico) para caso de despacho estático
4. Projeto e implementação da interface para o usuário. Neste ponto a interface deve apenas conter módulos para entrada de dados , simulação do caso estático e saída de dados. Deve ser prevista estrutura para manipular futuramente todos os módulos do sistema.
5. Validação do modelo através de testes computacionais para comparação dos resultados do simulador com os dados reais do sistema.
6. Levantamento de regras para despacho econômico dos caminhões.
7. Interfaceamento com uma base de dados
8. Projeto e implementação do otimizador
9. Implementação do sistema de controle em tempo real
10. Projeto e implementação do animador gráfico

O objetivo desta tese é a realização das 5 primeiras etapas, ficando as demais como sugestão para pesquisas futuras. O sistema desenvolvido será capaz de simular apenas o caso de despacho estático dos caminhões, podendo ser utilizado para as seguintes funções:

- Encontrar para um determinado dia, o número de caminhões, carregadeiras e tratores necessários para manter o fornecimento de cana na usina com determinado nível de segurança
- Testar o comportamento do sistema para mudança de tecnologia. Especificamente para prever o número de unidades necessárias de um novo equipamento na qual a usina esteja investigando a possibilidade de compra.
- Analisar o impacto e a produtividade geral dos equipamentos, acarretados por mudanças operacionais tais como, mudança de horários e escalonamento das trocas de turno.

5.3 Considerações Gerais Sobre o Programa Implementado

5.3.1 Equipamento Utilizado

Para a implementação do programa computacional de simulação, optamos pela utilização de microcomputadores compatíveis com IBM-PC. A adoção deste equipamento ao invés de estações de trabalho disponíveis nos laboratórios da faculdade, é justificado pelo próprio objetivo deste trabalho, fundamentado na filosofia de não apenas contribuir com o desenvolvimento acadêmico, como também, trazer contribuição quase imediata ao setor que pode ser beneficiado diretamente pelo mesmo.

Embora a utilização do SISTEC seja sugerida em computadores PC 386 ou 486 com vídeo VGA ou SVGA colorido e pelo menos um Megabyte de disco disponível, a configuração mínima exigida é um PC-XT com um drive e vídeo CGA.

Nossa opção por implementar um software que rodasse em plataforma DOS é extremamente condizente com a realidade de qualquer usina, podendo assim serem utilizados os próprios computadores já existentes ou adquirindo equipamento específico para este fim a um baixo custo.

5.3.2 Linguagem Computacional

No início dos anos 60 começaram a ser desenvolvidas *linguagens de programação de simulação* gerais. Estas linguagens são especialmente projetadas para facilitar a tarefa de programação e construção de um modelo de simulação. Elas fornecem meios convenientes de descrever os elementos que comumente aparecem nos modelos de simulação. Também fornecem algum tipo de mecanismo interno de tempo e controle, geradores de variáveis aleatórias e estruturas para dar assistência ao tipo de armazenamento de informações que é necessário durante a execução de uma rodada de simulação. Elas também são projetadas para obter, convenientemente, dados e estatísticas sobre o comportamento do sistema que está sendo simulado. A seguir citaremos algumas das linguagens mais conhecidas de simulação.

Uma das mais poderosas linguagens de simulação é o SIMSCRIPT que requer um conhecimento de FORTRAN e é razoavelmente complexa devido a sua considerável flexibilidade e utiliza abordagem de programação a eventos. A linguagem GASP também é baseada no FORTRAN e usa programação por eventos. O GPSS é uma linguagem auto-suficiente, facilmente aprendida por principiantes, mas que, correspondentemente, é restrita em sua finalidade. Ela utiliza o mecanismo do próximo evento para avanço do tempo. Outra

linguagem poderosa é a SIMULA, que conta com o ALGOL como linguagem base e utiliza a abordagem da interação com o processo para modelar a simulação. O SLAM II é uma linguagem baseada em FORTRAN que permite técnicas alternativas de modelamento. Ela suporta três abordagens de modelamento integrados em uma única estrutura. O SLAM II permite o modelamento de redes, modelamento por eventos discretos, modelamento contínuo ou uma combinação destes três sendo usados em um único modelo de simulação.

O SISTEC foi implementado em TURBO PASCAL, utilizando-se do pacote de simulação SIMÃO, que foi desenvolvido originalmente na Inglaterra e aperfeiçoado no IMECC (Instituto de Matemática, Estatística e Ciências da Computação) da UNICAMP. Este pacote consiste em um conjunto de rotinas básicas para simulação desenvolvidas em PASCAL. A simulação é orientada por eventos e os principais conjuntos de rotinas utilizadas foram para manutenção da lista de eventos futuros, para manipulação de filas e para geração de variáveis aleatórias. A escolha por este pacote de simulação, além da disponibilidade, foi em função dele possuir extrema flexibilidade, permitindo que se intervenha em qualquer nível do programa simulador, o que é primordial para permitir a implementação do sistema completo apresentado neste capítulo. Outro ponto a favor do SIMÃO é a utilização da linguagem TURBO PASCAL que permite bastante flexibilidade para criação de gráficos e de interfaces amigáveis para o usuário.

5.3.3 Interface Para o Usuário

O SISTEC realiza simulações de forma interativa com o usuário. Todas as entradas, saídas e diálogos são efetuados através menus e janelas que podem ser manipulados através do "mouse". Após cada corrida de simulação é aberta uma nova janela na tela onde são apresentados os resultados. As janelas com os resultados de outras corridas permanecem na tela de forma inativa (subpostas às demais) podendo ser fechadas ou tornadas ativas e movimentadas para efetuar comparações entre diversos resultados. A visualização da janela contendo os parâmetros de entrada também pode ser feita simultaneamente com a janela dos resultados a fim de facilitar para o usuário a modificação dos parâmetros para uma nova corrida. No final de cada corrida de simulação é possível gerar também um arquivo texto contendo as informações completas a respeito da simulação realizada.

Existe também uma saída gráfica, onde podem ser analisadas simultaneamente as filas de caminhões na usina e em cada frente de corte ao longo do dia simulado. Nesta mesma tela gráfica é apresentado também o número de carregadoras ou colhedoras ociosas em cada frente e o nível de cana no depósito da usina ao longo do dia.

CAPÍTULO 6

COMPONENTES BÁSICOS DO SISTEC

6.1 Introdução

Neste capítulo serão especificados os diversos componentes que fazem parte do sistema descrito no capítulo 4, seus atributos e tempos de operações relevantes para o objetivo do presente estudo.

Os conceitos de entidades, eventos e outros inerentes à simulação que já foram apresentados ao leitor no capítulo 3, serão assumidos como conhecidos doravante.

Para o desenvolvimento do modelo foi realizado um estudo evolutivo, que sofreu diversas realimentações, até chegar ao modelo atual apresentado a seguir. Um modelo simplificado foi desenvolvido inicialmente, baseado em entrevistas com um profissional altamente qualificado da área de máquinas agrícolas, com conhecimento abrangente sobre todo o processo de transporte de cana em usinas. A implementação deste modelo foi de grande importância para adquirir sensibilidade sobre a complexidade do sistema. Uma segunda etapa, que resultou na versão atual do modelo, contou com a visita à duas usinas, onde todo o processo de carregamento e transporte pôde ser acompanhado de perto. Estas visitas em campo foram de fundamental importância para garantir que nenhuma característica operacional relevante deixasse de ser analisada e considerada no modelo.

O problema de sistema de transporte de cana apresentado no capítulo 4, consta de três componentes básicos: **usina, frentes de corte e estradas de ligação.**

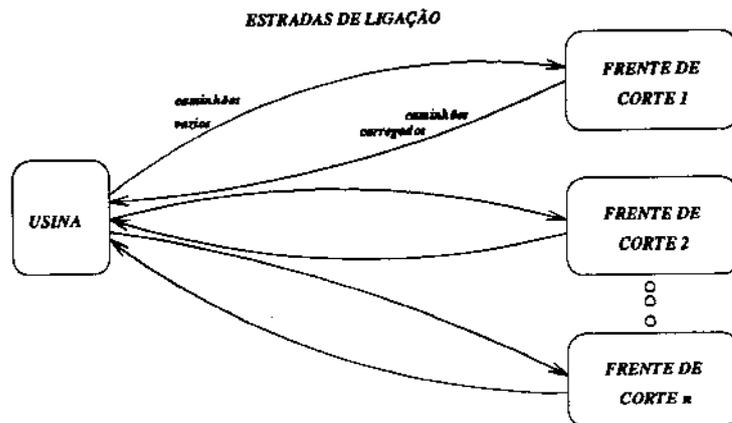


Figura 6.1- Componentes básicos do sistema de transporte de cana.

Na figura 6.2 é apresentado um esquema geral de todo o sistema, para uma única frente de corte. Normalmente o sistema opera com várias frentes de corte que variam diariamente, mas possuem funcionamento análogo. Esta figura mostra como se desenvolve o fluxo de caminhões, tratores e julietas através dos diferentes componentes do sistema. Nas próximas subseções serão vistas detalhadamente as diversas características do modelo de simulação desenvolvido para este sistema.

Neste ponto, se faz necessária a introdução de dois conceitos sobre variáveis de tempo e sobre tempos de utilização de diversos equipamentos. As variáveis que representam os tempos associados às diversas tarefas desempenhadas por cada entidade são divididas em dois tipos básicos:

- *Variável Independente (VI)* - Variável aleatória gerada pelo simulador com distribuição conhecida (ex.: Tempo de descarregamento de um caminhão na usina).
- *Variável Dependente (VD)* - Variável com valor aleatório determinado a partir de outras variáveis (ex.: Tempo de espera em uma fila). São estas variáveis que irão medir o desempenho do sistema.

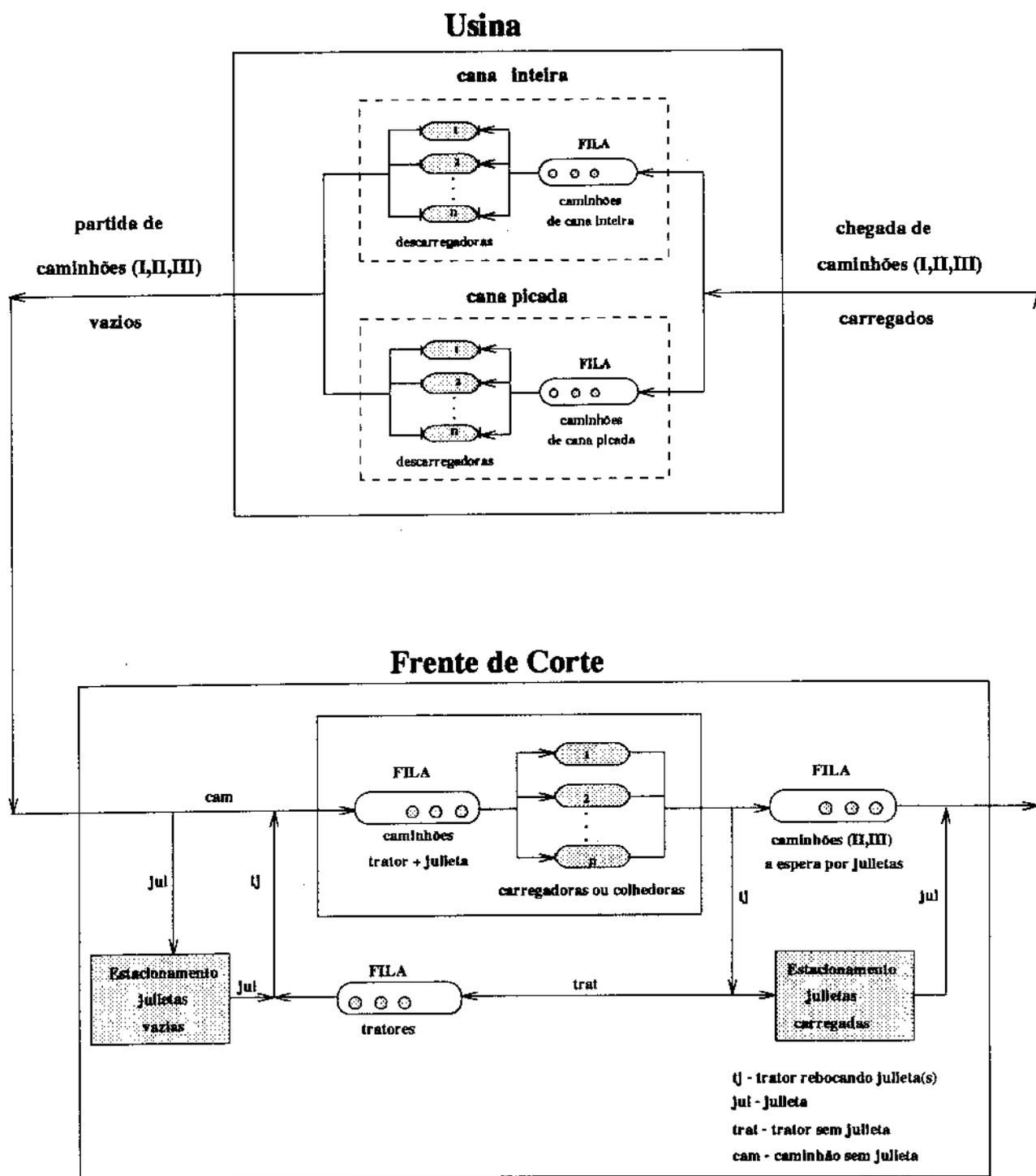


Figura 6.2 - Esquema geral do transporte de cana.

Os tempos de operação de cada entidade serão divididos em três categorias:

1. *Tempos Produtivos (TPR)*: São aqueles contabilizados quando um determinado equipamento está desempenhando efetivamente sua função produtiva.

2. *Tempos Auxiliares (TAX)*: Correspondem aos tempos dispendidos com funções auxiliares, que a operação do equipamento obrigatoriamente exige.
3. *Tempos Perdidos (TPE)*: Englobam os períodos em que o equipamento está disponível para operar, porém não é utilizado em virtude de situações gerenciais do sistema que independem da máquina (Por exemplo, os tempos perdidos nas filas).

Para um sistema produtivo ideal, os tempos auxiliares devem ser reduzidos ao máximo e os perdidos devem ser eliminados. O objetivo básico do simulador é atuar sobre os tempos perdidos nas filas de espera da usina e das frentes de corte, afim de que os mesmos possam ser reduzidos ao máximo.

Para cada atributo ou variável descrita neste capítulo, será apresentada sempre, entre parênteses, uma abreviação que será a mesma adotada no Apêndice à parte II desta tese para referencia-la.

6.2 Usina

Sempre que mencionarmos o sistema usina, estamos nos referindo apenas ao subsistema ligado ao transporte da cana, que vai desde a chegada do caminhão para pesagem na balança, passando pelo momento em que a cana cai na esteira rolante para início do processo de moagem, até a pesagem do caminhão vazio e subsequente retorno à frente de corte. Não nos interessam as operações de processamento da cana a partir do momento em que ela é descarregada na esteira da usina.

O diagrama das operações e a indicação dos tempos perdidos e auxiliares relativo aos caminhões na usina são apresentados na figura 6.3. Uma simplificação assumida pelo modelo é considerar os tempos de primeira pesagem, retirada de amostra, preparo para descarga, limpeza da carroceria e segunda pesagem como um único tempo auxiliar gasto depois do descarregamento e representado na figura 6.3 como TAX2. Esta simplificação apenas causa um pequeno deslocamento nos tempos de operação de cada caminhão dentro da usina, não afetando entretanto nos tempos de fila e de saída do caminhão, visto que o gargalo responsável pelas filas dentro da usina é a operação de descarregamento.

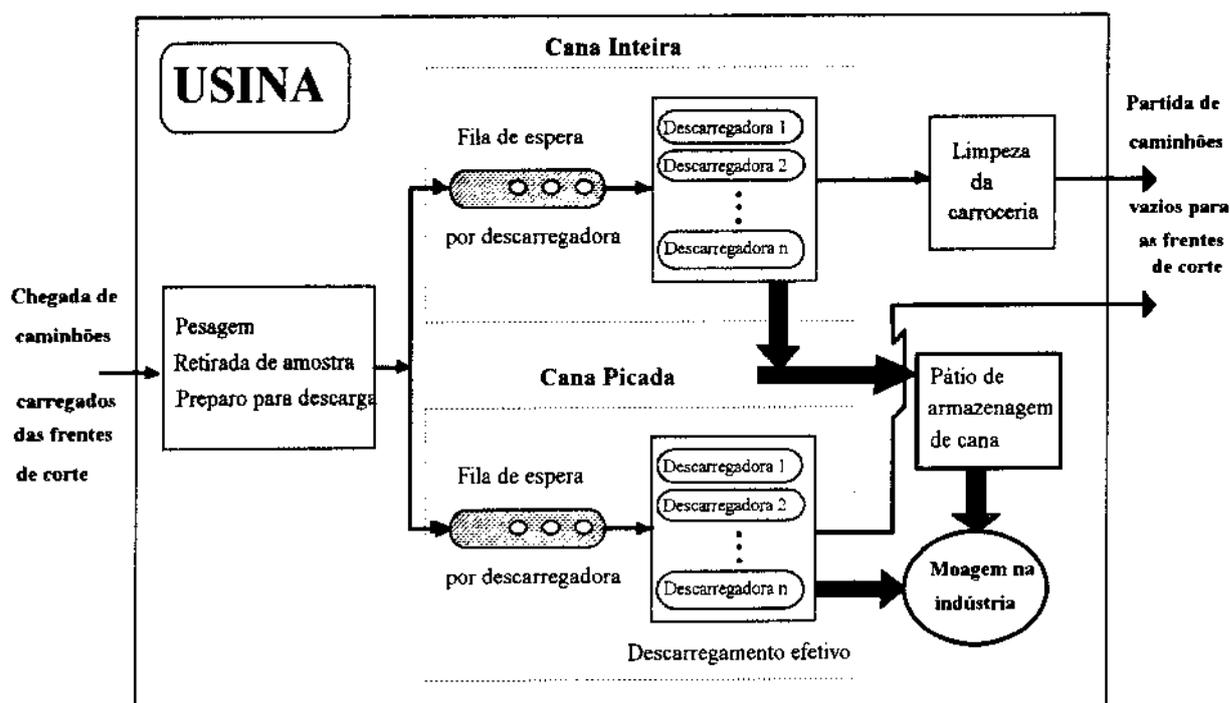


Figura 6.3 - Esquema dos tempos dispendidos pelos caminhões na usina.

Atributos da usina:

- Número de pontos de descarga de cana inteira ($usina_n_des_ci$)
- Número de pontos de descarga de cana picada ($usina_n_des_cp$)
- Moagem de cana em toneladas/dia ($usina_cons$)
- Capacidade máxima de armazenagem de cana no pátio e/ou barracão ($usina_lim_max$)
- Nível mínimo de cana no depósito da usina ($usina_lim_min$) - este nível pode ser violado durante uma simulação, chegando até a zero, quando é interrompido o fornecimento para usina. O tempo em que este nível permanece violado durante uma simulação, avalia o grau de segurança da configuração simulada¹.

¹ O esgotamento do estoque no sistema real só é permitido em situações extremas, tais como chuvas prolongadas e generalizadas na região, que inviabilizam o transporte assim como quebras e/ou manutenções prolongadas na indústria.

- Quantidade de cana no depósito no início da simulação (usina_can_ini)
- Quantidade de cana no depósito durante a corrida de simulação (usina_qua_can)

Variáveis independentes relacionadas à usina :

- Tempo de descarregamento ($t_{des}(cam)$) - função da classe do caminhão.
- Tempo auxiliar gasto pelo caminhão na usina ($t_{aux_usina}(cam)$) - função da classe do caminhão este tempo é gasto por todas ou por uma combinação das seguintes operações:
 - Pesagem (ocorre a chegada e na saída da usina). Teoricamente, não seria necessário pesar o caminhão na saída, dado que seu peso é conhecido, mas a cada viagem o caminhão pode carregar por exemplo uma carga diferente de barro, causando um pequeno erro na medida da cana descarregada.
 - Retirada de amostra da cana
 - Preparo para descarga - consiste na desamarração da carga
 - Limpeza da carroceria
 - Engate e desengate de julietas ou semi-reboques

Estas variáveis são geradas com base em distribuições normais cujos parâmetros, tempo médio e desvio padrão, são armazenados em uma tabela.

Filas na usina

- Fila de caminhões aguardando para descarregar (usina_fcd)
- Fila dos pontos de descarga de cana picada ociosas (usina_fdo_cp) - Fila utilizada pelo modelo para manter as entidades descarregadoras quando elas não estão efetuando nenhum descarregamento.
- Fila dos pontos de descarga de cana inteira ociosas (usina_fdo_ci)
- Garagem (f_gar)- local de manutenção dos equipamentos. Entretanto, deste ponto em diante utilizaremos a denominação garagem para referir-nos ao local de troca de motoristas, que normalmente ocorre na fila de descarga. Os caminhões aguardam neste local, quando o tempo que falta até a troca de turno não é suficiente para uma nova

viagem até uma frente de corte. O modelo proposto utiliza uma fila para armazenar as entidades (caminhões) que se encontram nesta situação.

Indicador importante

- usina _interditada - é um indicador que pode assumir os valores verdadeiro ou falso. Seu valor é tornado verdadeiro enquanto o depósito da usina está com sua capacidade máxima de cana. Durante este período nenhum caminhão pode ser descarregado na usina.

6.3 Frente de Corte

Na figura 6.4 é apresentado um diagrama das operações e a indicação dos tempos dispendidos pelos caminhões e tratores em uma frente de corte. Os modelos para cada frente são análogos e o simulador é flexível para suportar as especificações de várias frentes de corte em cada corrida de simulação.

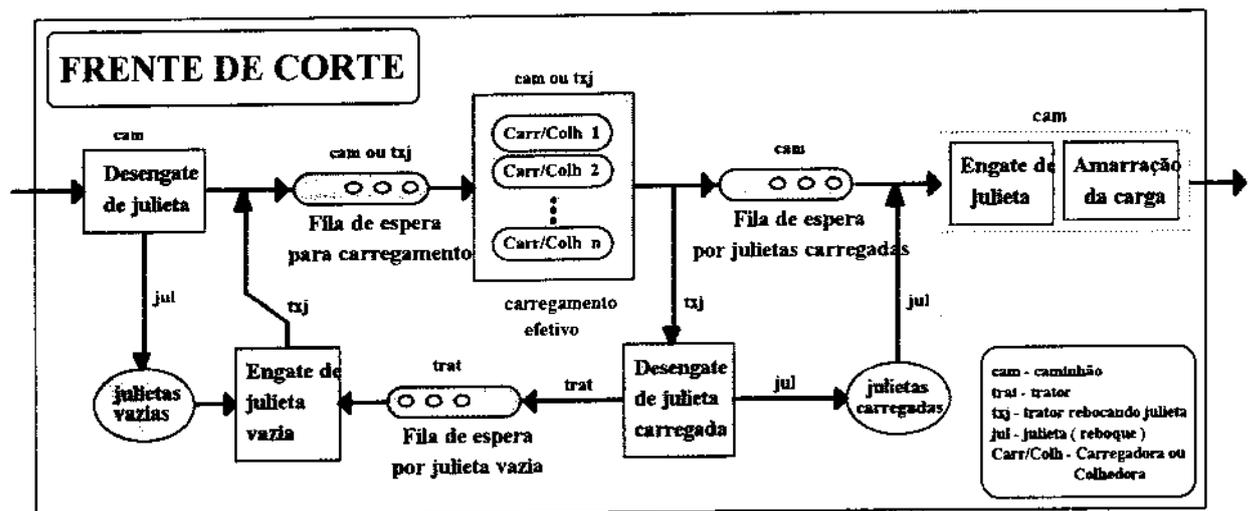


Figura 6.4 - Esquema dos tempos de operações nas frentes de corte

Atributos de uma frente de corte:

- Número da frente de corte(fc)- identifica cada frente individualmente
- Horário previsto para final do corte (fc_hfc)- horário previsto para final do corte da cana (no caso de corte manual) e a partir do qual a frente estará a disposição para início do

transporte. Caso já existam caminhões e carregadeiras na frente antes desta hora, eles deverão permanecer parados aguardando até este momento para iniciar o transporte.

- Quantidade de cana cortada na frente no instante inicial de simulação (fc_{qic})
- Quantidade corrente de cana na frente (fc_{qcc})
- Situação (fc_{sit}) - indica qual a situação atual da frente de corte de acordo com a seguinte convenção:
 1. *Aguardando* transporte - a condição para que esta frente comece a ser transportada é que a hora corrente seja maior ou igual a fc_{hfc} e os caminhões e carregadeiras tenham chegado de outra frente onde se encerrou o transporte.
 2. Transporte em *Andamento* - uma frente pode iniciar a simulação nesta situação, ou pode passar para esta a partir da situação *aguardando transporte* durante o decorrer da simulação.
 3. Transporte *Encerrado* - uma frente pode iniciar ou passar a esta situação a partir da situação em *andamento* quando toda cana disponível para transporte nesta frente já tiver sido transportada.
- Número da próxima frente que será transportada quando encerrar o transporte na frente fc (fc_{prox}) - Se não houver próxima ($fc_{prox} = 0$) os caminhões alocados à frente encerrada serão enviados para a garagem ou remanejados para as frentes restantes na situação 2.
- Tempo médio de deslocamento das carregadeiras e tratores da frente fc para frente fc_{prox} (fc_{tmprox})

Variáveis independentes relacionadas com a frente de corte:

- Tempo de viagem vazio da usina até a frente ($fc_{via_vaz}(cam)$) - gerado em função da frente e da classe do caminhão. Distribuição normal (ver próximo item, 6.4).
- Tempo de viagem carregado da frente até a usina ($fc_{via_carr}(cam)$) - gerado em função da frente e da classe do caminhão. Distribuição normal (ver próximo item, 6.4).

- Tempo auxiliar dos caminhões ($fc_aux_cam (cam)$) - função da frente de corte e da classe do caminhão. Este tempo é o somatório do tempo gasto por todas ou por uma combinação das seguintes operações:
 - Desacoplamento de julietas vazias
 - Acoplamento de julietas carregadas
 - Tempo de amarração da carga
 - Tempo de aparação da carga
 - Tempos de manobras no talhão e engate/desengate de julietas
- Tempo auxiliar dos tratores (fc_aux_trat) - função apenas da frente de corte. Este tempo representa o somatório das seguintes operações:
 - Acoplamento de julietas vazias
 - Amarração da carga das julietas
 - Desacoplamento de julietas carregadas
- Tempo de carregamento efetivo ($fc_t_carr(cam)$) função da frente de corte e da classe do caminhão.

Todas estas variáveis independentes são geradas aleatoriamente pelo modelo, obedecendo uma distribuição normal, cujos parâmetros média e desvio padrão são armazenados em uma tabela (frente de corte x classe de caminhão).

Filas em uma frente de corte

- Fila de caminhões esperando para carregar (fc_fcec)
- Fila de caminhões carregados aguardando por julietas carregadas para acoplar e iniciar viagem para usina (fc_fcej)
- Fila de tratores aguardando por julietas vazias para acoplar (fc_ftjv)
- Fila de tratores com julietas acopladas esperando para iniciar carregamento (fj_ftec)

- Fila de carregadoras ociosas (fc_fco)- Esta fila é utilizada para receber carregadeiras que não estejam em operação de carregamento.

Indicadores importantes

- n_jul_vaz (fc)- mantém atualizado o número de julietas vazias que se encontram na frente fc aguardando para serem carregadas.
- n_jul_carr (fc) - mantém atualizado o número de julietas carregadas que se encontram na frente fc aguardando para serem transportadas para usina.

6.4 Estradas de Ligação

As distâncias entre a usina e cada frente de corte podem ser divididas em três sub-distâncias como mostra a figura 6.6: trecho asfaltado, trecho de terra e trecho percorrido nos carreadores. Através do conhecimento destas distâncias, da velocidade média de cada tipo de caminhão em cada tipo de estrada (existem estatísticas conhecidas, ver apêndice III), e do estado do caminhão (carregado ou vazio), pode ser determinado uma aproximação dos tempos médios de viagem para cada frente de corte. Embora a estimação dos tempos de viagem para uma determinada estrada seja possível, ela pode ser afetada, muitas vezes drasticamente, pelos seguintes fatores:

- *Estado de conservação dos caminhões* - A diferença de idade entre caminhões de mesma categoria pode ser de até 10 anos, o que pode repercutir diretamente na sua velocidade.
- *Subidas íngremes ou longas*
- *Trechos esburacados*
- *Passagem por perímetro urbano*
- *Trechos embarrados em época de chuva*

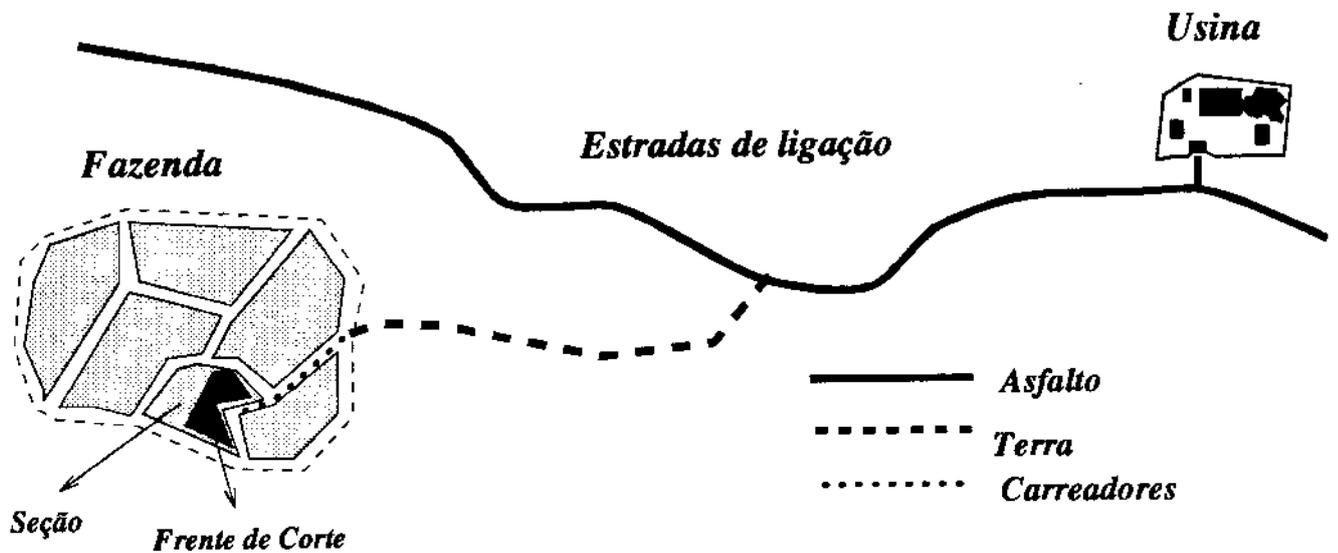


Figura 6.5 - Composição de uma estrada de ligação.

Em virtude disto sugerimos, sempre que possível, a utilização de estatísticas baseadas em medições ou dados históricos. Este modelo se abstrai da composição física das estradas de ligação e leva em consideração apenas os parâmetros da distribuição dos tempos de viagem entre a usina e cada frente, em função do tipo de caminhão e do destino do mesmo (frente de corte ou usina). O tempo de viagem dos caminhões são representados no sistema por uma variável independente gerada com base em uma distribuição normal $N(u,p)$. A utilização de distribuição normal para representar os tempos de operações dos caminhões foi baseada em um análise visual realizada sobre histogramas de tempos de viagens. Os dados utilizados para geração dos histogramas foram fornecidos pela mesma usina utilizada na validação do modelo (capítulo 10).

Capítulo 7

ENTIDADES DO SISTEC

7.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentadas as entidades, **caminhão**, **carregadora**, **descarregadeira**, **trator** e **turno**, presentes no modelo. Cada entidade será descrita por seus atributos. As abreviações utilizadas para nomear os atributos de cada entidade serão apresentados entre parênteses neste capítulo e são as mesmas adotadas no Apêndice à Parte II desta tese.

7.2 Caminhão

Os caminhões responsáveis pelo transporte da cana até a usina são classificados pelo modelo em diversas classes. O modelo é aberto para inclusão ou remoção de classes. Cada classe é definida por um conjunto de atributos que definem todas as características relevantes da mesma, que são as seguintes:

- *Número da classe* (classe)
- *Capacidade total média* de transporte em toneladas de cana, considerando a cana da carroceria do caminhão mais a cana das julietas acopladas. (clas_cam_cap_tot(classe))
- *Capacidade própria média* - Capacidade de cana transportada pelo caminhão em carroceria fixa do mesmo. Para efetuar o carregamento desta cana, é preciso que o próprio caminhão entre no talhão. (clas_cam_cap_pro (classe))

- *Número de juletas acopladas* - Número de juletas que o caminhão deve rebocar em condições normais de operação (*clas_cam_n_jul* (classe)).

Cada caminhão individualmente é caracterizado pelos seguintes atributos:

- Número de identificação (*cam*)
- Número da classe à qual pertence (*cam_classe*)
- Número do turno no qual é efetuado a sua troca de motorista (*cam_turno*)
- Frente de corte alocada (*cam_fc*)- frente para a qual o caminhão irá sempre se dirigir no caso de simulação com despacho estático.
- Frente de corte destino (*cam_dest*)- frente de corte na qual o caminhão se encontra, ou está se dirigindo ou voltando no momento. Este atributo pode diferir do *cam_fc* por intervenção do usuário durante a simulação.
- Situação inicial (*cam_sit_ini*), Frente inicial (*cam_fc_ini*), horário inicial (*cam_hor_ini*)- indica em uma tabela qual a operação que o caminhão está realizando no instante zero de simulação e o horário previsto para final desta operação. Este atributo é especialmente útil quando a usina simulada opera com mais de um horário de troca de turno por período, pois neste caso a simulação iniciará no horário da primeira troca, e os caminhões com mudança de motorista nas outras trocas estarão em operação. Estas informações são importantes, pois além de permitir maior realismo para o modelo, iniciando um dia de simulação com base na situação final do dia anterior simulado, pode permitir que o estado do sistema em determinado instante da simulação seja "guardado", e posteriormente seja iniciada outra corrida de simulação a partir do instante "guardado". Esta característica do modelo visa fornecer informações básicas capazes de suportar no futuro a interação com outros módulos de heurísticas ou inteligência artificial para otimização e ou controle do sistema. A convenção para o indicador de situação inicial é a seguinte:

1. Em carregamento na frente
2. Indo para carregamento na frente
3. Em descarregamento na usina
4. Indo para descarregamento na usina

5. Efetuando operações auxiliares na usina
6. Esperando na fila para carregar na frente
7. Esperando na fila por julietas carregadas na frente
8. Esperando troca de turno na fila da usina
9. Esperando na fila para descarregar na usina.

7.3 Carregadora

A entidade carregadora, na verdade pode representar tanto carregadoras convencionais com garra hidráulicas, como também colhedoras, no caso de corte mecanizado. Atributos:

- Tempo de carregamento e desvio padrão - estas informações são armazenadas pelo modelo em uma tabela onde existe uma coluna para cada frente de corte e uma linha para cada classe de caminhões. Desta maneira o modelo consegue ser bastante realista, permitindo com que equipamentos idênticos possam ter tempos de carregamento diferenciados em função da frente de corte em que está operando. Esta diferença de tempo pode ocorrer na realidade em função de fatores tais como:
 - Tamanho e formato dos talhões na frente de corte
 - Inclinação e condições de tráfego do solo

7.4 Pontos de Descarregamento

- Tipo de cana descarregada - o ponto de descarregamento pode ser para cana picada ou cana inteira.
- Tempo médio de descarregamento e desvio padrão - estes atributos são definidos em uma tabela para cada classe de transporte. Esta tabela já foi comentada no capítulo anterior, seção 6.2.

7.5 Trator

- Tempo de carregamento e desvio padrão no caso de estar rebocando uma julieta.
- Número de identificação individual do trator (trat)
- Frente de corte à qual está alocado (trat_fc)
- Número máximo de julieta (max_jul_trat) - Número máximo de julieta que um trator pode rebocar.
- Número de julieta acopladas ao trator no momento (trat_n_jul)

Uma simplificação assumida pelo modelo é considerar que o tempo de carregamento cresce linearmente com o número de julieta carregadas.

Tempo carregamento = tempo de carregamento de uma julieta \times trat_n_jul

7.6 Turno

Cada troca de turno ocorre em um horário fixo, e é tratada pelo modelo como uma entidade abstrata com os seguintes atributos:

- Número (turno) - identifica cada troca de turno individualmente
- Horário da primeira troca diária (turno_h_ini)
- Duração do turno (turno_dur)
- Horário previsto para próxima troca (turno_p_tro)

Capítulo 8

EVENTOS E OPERAÇÕES DO SISTEC

8.1 Introdução

Neste capítulo será apresentado o **corpo principal do modelo** e enumerado os eventos que podem ocorrer no sistema bem como uma descrição das atitudes tomadas para cada evento dentro do modelo que está sendo proposto. Os eventos do sistema são o **início de carregamento, final de carregamento, chegada de trator para carregar, trator pronto, chegada de caminhão em uma frente de corte, início de descarregamento, final de descarregamento, chegada de caminhão na usina, saída de um caminhão da usina e troca de turno**. Também será apresentado neste capítulo uma seção esclarecendo a maneira como os **tempos de manutenção** dos caminhões são considerados no SISTEC.

Para cada evento do sistema real existe no modelo computacional uma rotina correspondente. Os algoritmos para estas rotinas, apresentados de forma simplificada em português estruturado, se encontram no apêndice A3. O nome destas rotinas serão sempre destacados em letra maiúscula quando referenciados neste capítulo.

8.2 Corpo Principal do Modelo

Cada **rodada** de simulação inicia com o procedimento de inicialização do modelo a partir da configuração recebida (ver apêndice A2). Logo após inicia um ciclo onde o simulador retira o primeiro evento da lista de eventos futuros, atualiza o relógio para o instante programado e executa o procedimento responsável por tomar todas as atitudes relativas ao evento ocorrido. Este ciclo se repete até que o relógio seja atualizado para o

horário previsto para final da simulação, quando então são tomadas as providências para finalizar a rodada de simulação. A rotina computacional responsável por efetuar uma rodada de simulação é apresentada com mais detalhes no apêndice A1.

Uma rodada de simulação normalmente é repetida várias vezes para um mesmo conjunto de parâmetros iniciais dados. Este conjunto de várias rodadas com parâmetros idênticos é chamado de **corrida** de simulação. Com um número maior de rodadas, efetuadas em cada corrida de simulação, podemos obter estimativas mais precisas das variáveis de interesse. Um problema que se apresenta é o de determinar o número de rodadas mínimo suficiente para determinar, com uma certa precisão, os parâmetros destas variáveis. Testes computacionais mostraram que, na maioria dos casos, com um número da ordem de 10 rodadas já obtemos boas estimativas dos parâmetros desejados.

No SISTEC precisamos informar o número de rodadas desejadas no início de cada corrida de simulação. No final de cada rodada são anotados dados para análise das principais variáveis de desempenho do sistema, que são apresentados no final da corrida completa de simulação.

8.3 Início de Carregamento

O procedimento **INÍCIO_CARREGAMENTO** é responsável pela colocação de um veículo que pode ser caminhão ou trator com julietas, em processo de carregamento em uma determinada frente de corte.

Inicialmente atualizamos a quantidade de cana que restará na frente após o carregamento. No caso de caminhão é utilizada a sua capacidade própria média, no caso de trator é utilizado a capacidade média de uma julieta vezes o número de julietas rebocadas pelo mesmo. Geramos o tempo de carregamento e programamos na lista de eventos futuros o instante em que terminará o carregamento (**FINAL_CARREGAMENTO**).

Se não houver mais cana para ser transportada na frente, programamos o início de transporte na próxima frente, que substituirá a anterior, na lista de eventos futuros. O início será programado para o maior horário dentre os dois seguintes: horário corrente mais o tempo de deslocamento das carregadoras da frente encerrada até a frente iniciante; ou para o horário previsto para o final de corte na frente iniciante. A partir do momento em que a cana termina, a frente é colocada na situação de Transporte Encerrado e os tratores, caminhões e carregadoras alocados a esta frente são remanejados para a nova frente.

8.4 Final de Carregamento

O procedimento FINAL_CARREGAMENTO é responsável por enviar os caminhões carregados para a na usina, e no caso de trator, determinar o seu destino e o das julietas carregadas.

Se for final de carga de um caminhão e houver disponível nesta frente o número necessário de julietas rebocadas pelo mesmo, programamos na lista de eventos futuros a chegada deste caminhão na usina (CHEGADA_USINA). Para prever o tempo decorrido do instante presente até a chegada deste caminhão na usina , somamos o tempo de viagem e o tempo gasto pelo caminhão em operações auxiliares na frente.

Caso não haja julietas carregadas disponíveis na frente, colocamos o caminhão em uma fila de espera por julietas carregadas.

Caso o final de carregamento seja de um trator, as julietas carregadas pelo mesmo são colocadas à disposição e caso já haja caminhão à espera , elas são conectadas ao caminhão e programamos a chegada deste caminhão na usina (CHEGADA_CAMINHÃO) na lista de eventos futuros. Programamos então o evento trator pronto (TRATOR_PRONTO) na lista de eventos futuros, com horário previsto para instante atual mais tempo despendido pelo trator em operações auxiliares em cada ciclo de carregamento na frente de corte.

Finalmente é dado um destino para a carregadora liberada, que se encontra disponível. A prioridade é efetuar o carregamento de um caminhão. Se não houver caminhão à espera, é efetuado o carregamento de um trator rebocando julietas (INÍCIO_CARREGAMENTO). Caso também não haja tratores disponíveis para rebocar julietas, a carregadora fica disponível na frente em estado ocioso (fila de carregadoras ociosas). Sempre que houver fila de caminhões esperando por julietas carregadas, a prioridade passa a ser o carregamento de julietas.

8.5 Chegada de Trator para Carregar

O procedimento CHEGADA_TRATOR_CARREGAR verifica se existe condições para o início de carregamento de um trator rebocando julietas vazias.

Se não existir fila de tratores e existir pelo menos uma carregadora disponível, é realizado o início de carregamento (INÍCIO_CARREGAMENTO) do trator¹, caso contrário ele é colocado no final da fila de espera.

8.6 Trator Pronto

O procedimento TRATOR_PRONTO recebe um trator disponível sem nenhuma julieta acoplada e realiza, se possível, a conexão das julietas vazias, ficando pronto para iniciar o carregamento.

Se não houver nenhuma julieta vazia disponível na frente, o trator é colocado em uma frente de espera, caso contrário, é conectado ao trator o maior número, possível, de julietas que um trator pode rebocar durante o carregamento e o trator se torna apto para o início do carregamento (CHEGADA_TRATOR_CARREGAR).

8.7 Chegada de Caminhão em uma Frente de Corte

O procedimento CHEGADA_CAMINHÃO_FRENTE providencia o início de carregamento, ou a colocação do caminhão na fila de espera.

Primeiro são colocadas disponíveis as julietas vazias trazidas pelo caminhão. Se não houver fila de espera para carregar e houver carregadora disponível, é iniciado o carregamento do caminhão (INÍCIO_CARREGAMENTO), o caminhão é colocado no final da fila de espera.

Enquanto existir tratores na fila de espera por julietas e houver julietas vazias disponíveis, é acoplado o número máximo de julietas possíveis ao trator e iniciado o processo de carregamento do trator (INÍCIO_CARREGAMENTO).

¹ Sempre que nos referirmos a carregamento ou descarregamento de um "trator" estaremos nos referindo a um trator rebocando uma ou mais julietas. O número de julietas rebocadas depende do número máximo tracionado por um trator e do número de julietas disponíveis no momento do acoplamento.

8.8 Início de Descarregamento

O procedimento INÍCIO_DESCARREGAMENTO inicia o descarregamento e atualiza a quantidade de cana no depósito do pátio da usina, caso este não esteja lotado.

Primeiro é calculada a quantidade atual de cana no depósito da usina através da função CONSUMO, que retorna a quantidade de cana moída pela usina desde o último cálculo até o momento atual. Se existir espaço suficiente no pátio e descarregadeiras disponíveis, é programado o final do descarregamento (FINAL_DESCARREGAMENTO) na lista de eventos futuros e a carga do caminhão é acrescida a quantidade de cana no depósito. Caso contrário o caminhão é colocado na fila de espera para descarregamento.

No caso do depósito estar lotado, a usina é interditada para descarga e é calculado o tempo necessário para a usina consumir a quantidade de cana que será descarregada pelo caminhão, sendo programado na lista de eventos futuros o instante de liberação da descarga na usina (LIBERA_DESCARGA).

8.9 Final de Descarregamento

Após o evento FINAL_DESCARREGAMENTO, o caminhão inicia o processo de operações auxiliares, no qual é descontado o tempo total despendido pelo caminhão em tais operações na usina.

É programada a SAÍDA_CAMINHÃO_USINA na lista de eventos futuros para horário atual acrescido do tempo total das operações auxiliares.

Se houver caminhão aguardando na fila para descarregar e a usina não estiver interditada, para descarregamento é realizado o início do descarregamento do primeiro caminhão da fila (INÍCIO_DESCARREGAMENTO). Caso contrário a descarregadeira liberada fica a disposição na usina no estado ocioso.

8.10 Chegada de Caminhão na Usina

O procedimento para o evento CHEGADA_USINA dá início, se possível, ao descarregamento do caminhão.

Se não existir fila de caminhões, a usina não estiver interditada e houver carregadora disponível, é providenciado o INÍCIO_DESCARREGAMENTO do caminhão que está chegando na usina (INÍCIO_DESCARREGAMENTO), caso contrário o caminhão é colocado na fila de espera para descarregamento.

No sistema real, existem algumas operações auxiliares, como pesagem do caminhão e tirada de amostra da carga, que são realizadas cronologicamente antes do descarregamento efetivo. Entretanto foi verificado que em situação normal o gargalo que dá origem as filas está localizado nas descarregadeiras, ou seja, a fila de espera que se forma na chegada dos caminhões não é causada pelas operações auxiliares, mas sim pelo descarregamento efetivo. Baseados nestas afirmações podemos afirmar que a simplificação assumida pelo modelo proposto, somar todos os tempos auxiliares e considerar este tempo auxiliar total após o descarregamento, não afeta a formação das filas e nem o tempo total despendido por cada caminhão desde a sua chegada na usina até o momento da sua partida.

8.11 Saída de um caminhão da usina

O processo SAÍDA_CAMINHÃO_USINA é responsável por verificar se existe tempo suficiente, antes da troca de turno do caminhão, para uma viagem de ida e volta até uma frente e também definir para qual frente o caminhão irá se dirigir.

Neste ponto é importante introduzir o conceito de **Fator Garagem**. Este fator é utilizado no modelo para que seja possível intervir no critério de decisão usado para determinar quando um caminhão deve ou não se dirigir para a garagem e aguardar a troca de turno. No sistema real não existe um critério formal, mas esta decisão é tomada com base em uma estimativa bastante imprecisa, que geralmente ocasiona um período desnecessário de ociosidade dos caminhões antes da troca de motorista. O modelo proposto inicialmente estima o tempo de um ciclo completo do caminhão que está saindo da usina para alguma frente, somando os tempos médios de viagem, ida e volta, tempos médios auxiliares e de carregamento na frente bem como o tempo médio de espera, por caminhão, na fila da frente desde o início da simulação. Em seguida este tempo de ciclo é multiplicado pelo fator garagem definido previamente no início da simulação. Se o tempo de ciclo vezes o fator garagem for maior que o tempo que resta até a troca de turno, então o caminhão é enviado para a garagem onde permanece parado aguardando a troca de turno. Caso contrário ele é enviado para o carregamento na frente de corte.

Quanto maior o fator garagem maior a segurança de que não ocorra atraso de nenhum caminhão para a troca de turno, mas por outro lado, maior será o tempo ocioso dos caminhões na garagem.

Sempre que o tempo previsto para um ciclo completo (ciclo completo - ida até a frente, carregamento, retorno para usina e descarregamento) for maior que o tempo restante até a próxima troca de turno do caminhão, ele é enviado para a garagem da usina onde permanecerá aguardando até o momento da troca de turno. Caso haja tempo para um ciclo completo, o modelo enviará o caminhão para carregamento em uma das frentes de corte que se encontram na situação em andamento. No modelo básico proposto, utilizamos o despacho estático, ou seja, cada caminhão é alocado a uma frente de corte e permanece transportando cana desta frente durante todo o período simulado. O modelo permite três variações referentes ao tipo de simulação desejado pelo usuário:

- *Simulação Numérica* - Nesta opção, não é apresentada nenhuma informação ao usuário sobre a evolução do sistema durante o período simulado. O usuário entra com os dados iniciais e recebe no final da simulação um relatório dos resultados obtidos. Nesta opção o despacho dos caminhões é estático e não pode ser mudado.
- *Simulação Passo a Passo* - Nesta opção o despacho dos caminhões é idêntico ao da Simulação Numérica, entretanto o usuário pode acompanhar a evolução do sistema durante todo o período simulado. Para isso é apresentada uma tela contendo todas informações importantes sobre a situação corrente do sistema na usina e em cada frente de corte. A velocidade de evolução da simulação é controlada pelo usuário através da digitação de uma tecla.
- *Simulação Interativa* - Nesta opção, tal como na anterior, é apresentada uma tela onde toda a evolução do sistema pode ser acompanhada durante a simulação. Entre tanto cada vez que um caminhão for partir da usina, o usuário pode intervir e determinar para qual frente o caminhão deverá se dirigir para carregamento. Se o usuário não intervir o caminhão será enviado para a frente à qual está alocado.

A expansão futura do módulo básico do simulador para efetuar despacho dinâmico dos caminhões e otimizar automaticamente a frota, está prevista através da conexão destes módulos futuros com o procedimento SAIDA_CAMINHÃO_USINA do simulador básico.

8.12 A Troca de Turno

O procedimento TROCA_TURNO verifica todos os caminhões que se encontram na garagem e realizam troca no turno em questão. Estes caminhões são enviados cada um para sua frente de corte determinada através da programação da CHEGADA_CAMINHÃO_FRENTE, na lista de eventos futuros. Após todos os caminhões pertencentes a esta troca de turno serem despachados para o carregamento, é programado na lista de eventos futuros a próxima troca de turno deste grupo de caminhões para o instante presente mais a duração do turno.

8.13 Tempo de Manutenção dos Caminhões

O SISTEC permite que seja considerado, durante uma simulação, os tempos perdidos pelos caminhões em manutenção. Tanto na literatura, como em estatísticas levantadas pelas usinas visitadas, o único dado relativo aos tempos de manutenção dos caminhões, refere-se a porcentagem de tempo que cada caminhão gasta, em média, por dia em atividades de manutenção (tanto preventivas como corretivas). Em todos os dados obtidos esta **taxa de manutenção** girou em torno de 8%, o que significa que, em média, cada caminhão perde entre tempo de lavagem, abastecimento, reparo mecânico, reparo elétrico, serviço de borracharia e outros, em torno de 2 horas por dia.

O SISTEC permite que, para cada corrida de simulação seja definido a taxa de manutenção que será utilizada para os caminhões. No início da simulação uma rotina programa, ao longo do dia para cada caminhão, uma parada cujo tempo de duração é definido pela taxa de manutenção. Os horários iniciais das paradas dos caminhões ao longo do dia são distribuídos de maneira uniforme.

A maneira determinística como os tempos de manutenção são considerados no SISTEC representam uma simplificação assumida pelo modelo e justificada por dois fatores:

- A não existência de levantamentos por parte das usinas que determinem o tipos e os parâmetros das distribuições de probabilidade que poderiam ser utilizados para gerar os números e horários de paradas de cada caminhão para manutenção ao longo do dia, bem como gerar o tempo de duração de cada parada.
- Os testes computacionais demonstraram que, mesmo com consideração determinística dos tempos de manutenção, o SISTEC apresentou bons resultados em simulações realizadas com dados de sistemas reais.

Capítulo 9

VARIÁVEIS DE DESEMPENHO DO SISTEC

9.1 Introdução

A determinação destas variáveis é de fundamental importância para o simulador, pois é através delas que é medido o desempenho do sistema no final de cada rodada de simulação. A inicialização destas variáveis se faz necessária a cada início de simulação e as atualizações são realizadas sempre logo após a mudança de estado das entidades as quais elas se referem.

Neste capítulo serão apresentadas todas as informações relevantes sobre as variáveis de desempenho do modelo de simulação. Neste ponto se faz importante esclarecer que para não aumentar a complexidade, para o leitor, no entendimento dos eventos e do pseudocódigo do simulador, não foi explicitado nos mesmos o momento em que são feitas as atualizações das variáveis de desempenho.

O procedimento normalmente utilizado para levantar estatísticas a respeito de uma fila é calcular o tempo médio de espera de cada usuário e a variância destas medidas. No caso de tráfego urbano, por exemplo, este tipo de cálculo é importante por ser uma maneira de se avaliar o grau de satisfação dos motoristas. O sistema de transporte de cana apresenta características peculiares, pois quando avaliamos uma determinada característica do sistema, estamos interessados não simplesmente na satisfação dos motoristas, mas sim na eficiência da frota como um todo.

Sempre que for possível fazer uma previsão futura e intervir no sentido de diminuir o número de caminhões responsável pelo transporte de cana em determinado dia de operação, sem comprometer o fornecimento de cana, estaremos atuando diretamente na diminuição das filas de espera, que representam tempo perdido para os caminhões, e conseqüentemente

estaremos aumentando o tempo produtivo total da frota. O mesmo procedimento pode ser realizado em relação aos tempos ociosos das carregadoras e tratores. Desta forma, através da minimização das filas e do conseqüente aumento da produtividade total dos equipamentos relacionados ao transporte, podemos atuar na diminuição do custo total da tonelada de cana colocada na esteira da usina.

No modelo proposto não calculamos o tempo de espera de cada veículo, mas apenas o tempo total perdido em cada fila de espera do sistema.

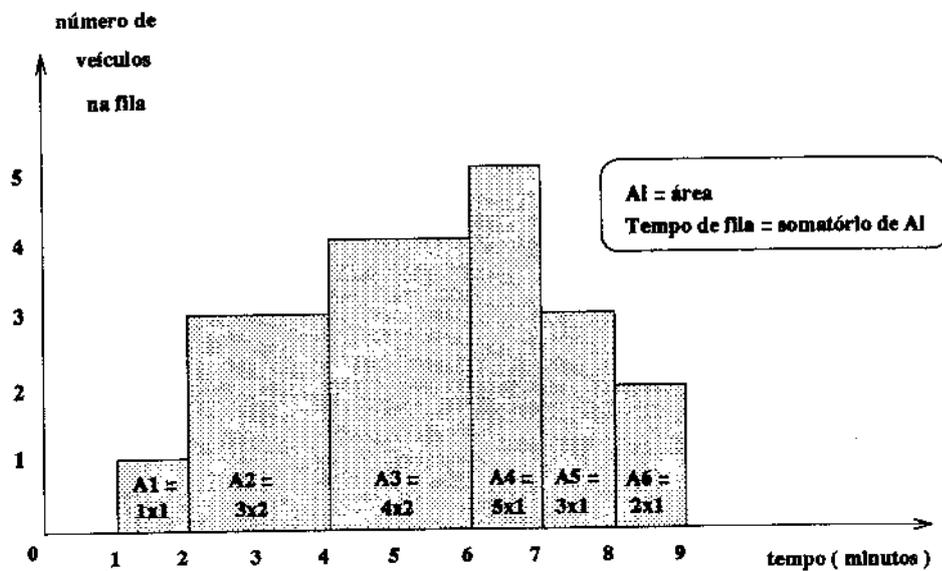


Figura 9.1- Tempo gasto em uma fila.

Sempre que ocorre uma mudança no número de veículos em uma fila é atualizado o tempo de espera para esta fila de acordo com o procedimento descrito a seguir a partir da figura 9.1. Nesta podemos observar que no minuto 1 chegou 1 veículo à fila que até então estava vazia. No minuto 2 chegou mais dois veículos e neste momento calculamos o tempo de fila que foi 1 minuto (1 veículo \times 1 minuto). A próxima alteração na fila ocorreu com a chegada de mais um veículo no minuto 4. Neste momento calculamos o novo tempo total perdido na fila somando 1 minuto da última atualização com 6 minutos (3 veículos \times 2 minutos). Assim por diante o tempo total de fila é sempre calculado através do somatório do produto do número de veículos pelo tempo em que permaneceram na fila. O procedimento ATUALIZA_TEMPO_DE_ESPERA utilizado no simulador está descrito no apêndice A4.

9.2 Variáveis de Desempenho

As variáveis de desempenho utilizadas pelo sistema para cada rodada de simulação estão relacionadas abaixo e agrupadas de acordo com a entidade à qual estão relacionadas:

Caminhões

- VD1. Tempo total perdido na usina aguardando descarregamento
- VD2. Tempo total perdido em cada frente aguardando carregamento
- VD3. Tempo total perdido em cada frente aguardando julietas carregadas
- VD4. Somatório do tempo total perdido em cada frente
- VD5. Tempo total perdido na garagem da usina aguardando troca de turno

Carregadoras

- VD6. Tempo total de ociosidade em cada frente
- VD7. Somatório tempo total de ociosidade em cada frente

Descarregadeiras

- VD8. Tempo total de ociosidade a espera de caminhão para descarregar

Tratores

- VD9. Tempo total perdido em cada frente aguardando por julietas vazias mais o tempo de espera antes de iniciar o carregamento.
- VD10. Somatório do tempo total perdido em cada frente

Outras variáveis que não estão relacionados diretamente a nenhuma entidade

- VD11. Nível médio de cana no depósito da usina durante o período simulado
- VD12. Tempo total durante o qual o depósito da usina permaneceu lotado impossibilitando o descarregamento de cana
- VD13. Tempo total em que o nível de cana no depósito da usina permaneceu inferior ao limite mínimo definido

VD14. Tempo total em que a usina permaneceu com o depósito vazio e o fornecimento de cana na esteira da usina foi portanto interrompido. Esta variável é de extrema importância, pois ela representa o grau de violação de uma restrição, que deve ser evitado a qualquer custo, pois fere o objetivo principal de todo o sistema de transporte.

VD15. Número de caminhões que chegaram atrasados na usina para a troca de turno durante o decorrer da simulação.

VD16. Quantidade de cana transportada de cada frente de corte

VD17. Quantidade total de cana transportada para a usina durante o dia simulado

VD18. Função Satisfação - esta variável visa prover uma medida para ser usada na comparação do grau de satisfação de diversas simulações com configurações de entrada distintas. Ela é calculada ao final de cada rodada de simulação com base no tempo ocioso dos equipamentos e em fatores definidos pelo usuário. Estes fatores (F_i , $i = 1,2,\dots,10$) tem a finalidade de ponderar o peso de cada variável de desempenho na função objetivo de acordo com sua importância. A fórmula da função objetivo está descrita abaixo:

$$VD18 = (VD1 * F1 + VD2 * F2 + VD3 * F3 + VD4 * F4 + VD5 * F5 + \\ VD6 * F6 + VD7 * F7 + VD8 * F8 + VD9 * F9 + VD10 * F10)$$

Os valores dos fatores $F1$ até $F10$ devem ser determinados através de testes computacionais de acordo com a finalidade específica da simulação que se está realizando.

Estas variáveis de desempenho constituem a saída do SISTEC para cada caso simulado. Quando uma corrida de simulação é composta de várias rodadas, ao final da corrida são apresentadas estas 17 variáveis anotadas na última rodada. Neste caso também é apresentado a média e variância das variáveis $VD1$, $VD4$, $VD7$, $VD10$ e $VD17$ bem como o valor do pior caso anotado para as variáveis $VD12$, $VD13$, $VD14$, $VD15$ e $VD18$ durante a corrida.

Parte III

TESTES COMPUTACIONAIS

Capítulo 10

VALIDAÇÃO DO MODELO

10.1 Introdução

As soluções obtidas em um estudo de simulação, assim como através de qualquer outra técnica de pesquisa operacional, referem-se na verdade ao modelo utilizado. Sua relação com o problema real é indireta, sendo o modelo o seu elo de ligação. Assim, para que tais soluções sejam de fato úteis, elas devem ser também válidas para o mundo real; no caso da simulação, isto será feito em dois níveis: na verificação do modelo computadorizado e na validação do modelo conceitual. Este capítulo tratará destas duas fases de nosso trabalho.

10.2 Verificação do Modelo Computacional

Na fase de Verificação do modelo computadorizado o programa deve ser testado a fim de garantir que esteja livre de erros, ou seja, faça o que dele se espera.

Nesta fase de nosso trabalho, utilizamos o simulador no modo passo a passo. Neste modo a situação geral do sistema é apresentada na tela durante a execução da simulação, que é avançada de evento para evento a comando do usuário. Para verificação do modelo realizamos inicialmente uma bateria de testes, acompanhando passo a passo a evolução das simulações com apenas um caminhão e uma frente de corte. Gradativamente fomos aumentando a complexidade dos parâmetros de entrada, respectivamente para vários caminhões, várias frentes de corte, vários tipos de caminhões e finalmente para vários horários de troca de turno. Em uma segunda etapa foi realizada nova bateria de testes, porém desta vez utilizando uma configuração de uma usina hipotética, onde a cada simulação

variava-se um dos parâmetros de entrada verificando se a variação nas saídas do simulador eram coerentes com as esperadas através da lógica do modelo. Através destes passos foram detectados e eliminados todos os erros lógicos do programa.

10.3 Validação do Modelo: Simulação do Sistema de Transporte da Usina Santa Helena de Goiás

A validação do modelo foi realizada através da comparação de valores fornecidos pelo simulador com valores reais de duas usinas para alguns dias de operação no passado. Nesta etapa, procuramos determinar através de relatórios e arquivos de dados fornecidos por uma usina, a configuração da usina, os tempos de operação e de viagens e o número de caminhões, carregadeiras e tratores que operaram em cada frente, durante cada dia a ser simulado. A idéia da validação é que se alimentarmos o simulador com dados de entrada reais de dias de operação passados, a saída do mesmo deverá fornecer valores (por exemplo a quantidade de cana transportada) próximos dos valores reais que ocorreram naqueles dias. Se isto acontecer, significa que o modelo do simulador é capaz de reproduzir com determinada precisão o sistema real.

Utilizamos para testar o modelo uma usina de pequeno porte chamada Santa Helena, situada em Goiás, que visitamos pessoalmente. A usina Santa Helena possui um sistema de controle de tempos de operação bastante completo, que é realizado através de fichas ("informes") que são preenchidos pelos próprios motoristas ou operadores. Estas fichas anotam basicamente o local onde o equipamento está operando ou se dirigindo no caso dos caminhões, o horário em que iniciou cada operação e o código correspondente a operação iniciada (ex.: frente 2034, 10:16 horas, início de carregamento). Todas as informações são armazenadas em computador através da digitação diária das fichas preenchidas no dia anterior. Durante a visita realizada, a usina nos forneceu um arquivo de dados padrão dbase (DBF) contendo os dados destas fichas relativo aos caminhões para vários dias de operação. Foi necessária a construção de um programa específico em dbase capaz de separar, a partir do arquivo obtido, os tempos de viagem, carregamento e descarregamento relativos a cada frente de corte para cada dia de operação a ser simulado. Este programa, gera quatro arquivos textos contendo os tempos de operação de transporte, em um determinado dia. Estes arquivos são lidos posteriormente por outro programa desenvolvido em Pascal, que é responsável por calcular os tempos médias e desvios padrões de cada operação em cada dia. Este programa apresenta ainda um histograma dos tempos para cada operação, para que seja possível a detecção visual e exclusão eventual de algum tempo incoerente encontrado no arquivo de dados.

A necessidade de descartar certos tempos acontece em função da aparição eventual de tempos errados, possivelmente gerados na digitação das fichas de controle, na anotação do horário errado ou esquecimento da anotação do início de determinada operação por parte de algum motorista. Estes dois últimos motivos são os mais prováveis, já que o sistema de informes foi implantado apenas a 2 anos e durante a visita verificamos que alguns motoristas ainda não estão completamente habituados com o mesmo. Estes valores absurdos, como por exemplo tempo de viagem de 4 horas para uma distância de 5 Kilômetros foram desconsiderados através da análise caso a caso utilizando-se de bom senso, pois caso contrário as suas ocorrências causariam uma distorção nos tempos médios e desvios padrões obtidos.

Também foram desenvolvidos programas para gerar listagens, para cada dia de operação, de quais frentes de corte foram visitadas por cada caminhão. Outros dados como quantidade total de cana transportado de cada frente e número de carregadeiras ou colheitadeiras alocadas a cada frente, foram obtidos em relatórios fornecidos pela própria usina.

No caso da usina Santa Helena foi necessário se fazer algumas ponderações adicionais sobre os dados de entrada, já que a usina não possui, aparentemente, regras fixas para a operação de transporte, o que permite, por exemplo, que a dispensa de caminhões ou alocação de um caminhão a várias frentes distintas durante o dia ocorra de maneira aleatória, do ponto de vista da nossa análise (já que não temos informações mais detalhadas do que aconteceu em determinado dia). Este é um dos fatores que influenciou no Erro cometido pelo SISTEC, visto que ele considera que todos os caminhões em operação permanecem alocados a uma única frente e que os caminhões operam o dia todo salvo por motivos de manutenção.

Na Tabela 1 são apresentados os tipos de caminhões existentes na usina e os dados relativos a cada um, que foram utilizados para a simulação.

Tipo	Descrição	TC	CTM	CPM	NJ	TDU	
						Me	DP
C1	Cana Picada (Classe I)	P	15	15	0	10.3	4.8
C2	Cana Inteira (Classe I)	I	15	15	0	09.5	4.5
C3	Treminhão (Classe IV)	I-P	45	0	3	25.0	10.0
<p>TC - Tipo de cana transportada (P - picada, I - inteira, I-P - ambos os tipos)</p> <p>CTM - Capacidade total média do caminhão em toneladas</p> <p>CPM - Capacidade própria do veículo (sem julietas acopladas) em toneladas</p> <p>NJ - Número de julietas normalmente acopladas ao caminhão</p> <p>TDU - Tempo de descarregamento na usina (minutos)</p> <p>Me - Tempo Médio</p> <p>DP - Desvio padrão</p>							

Tabela 1 - Tipos de Caminhões e tempos na usina Santa Helena

Foram simulados 4 dias consecutivos de operação da usina em questão, que correspondem ao período de 2 a 5 de setembro de 1993. Os tempos de viagem dos caminhões, vazios e carregados e os tempos de carregamento, para cada frente, utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 1. Nesta seção serão apresentadas as configurações relativas ao sistema real, que foram utilizadas como dados de entrada para o SISTEC, bem como os resultados gerados por ele para cada dia simulado.

A Tabela 2 apresenta o tempo de carregamento efetivo e os tempos de viagens dos caminhões, carregados e vazios, para cada frente de corte que operou em cada um dos 4 dias simulados. A tabela não contém o tempo de carregamento para caminhão do tipo 3, porque este não possui carroceria própria e apenas troca as julietas vazias por julietas carregadas quando chega na frente de corte. As julietas são rebocadas por tratores durante o carregamento e os seus tempos de carregamento se encontram na Tabela 3. Diversos dados relativos a configuração da usina são apresentados também na Tabela 3.

Dia de Operação	FC	TC	TVC		TVV		TCE	
			Me	DP	Me	DP	Me	DP
1	2701-P	C1	46.3	11.8	34.7	12.3	25.8	9.3
1	2701-I	C3	64.3	16.4	38.1	13.5		
1	1601	C2	26.9	8.4	16.9	7.7	16.8	5.1
2	1601-P	C1	25.9	5.5	17.2	4.6	21.8	5.6
2	1601-I	C2	25.9	5.5	17.2	4.6	21.8	5.6
2	2701	C1	47.0	12.3	33.4	9.0	24.9	6.5
2	3501	C2	24.2	5.9	15.3	4.8	16.9	6.1
3	2701	C2	48.4	14.9	36.2	10.5	24.4	8.0
3	2701	C3	67.2	20.7	39.8	11.5		
3	1601	C1	26.8	7.7	16.8	5.9	20.6	6.1
3	3501	C2	25.5	6.5	15.2	3.2	19.8	5.8
3	2501	C1	14.5	3.7	10.2	4.0	15.9	5.8
4	1601	C2	29.4	6.3	15.2	3.4	15.8	4.8
4	2501	C1	13.7	5.8	7.7	3.7	17.6	5.5
4	2701	C1	47.6	6.2	33.7	8.7	26.9	7.6
4	2701	C3	66.1	8.6	37.0	9.5		

FC - Identificação da Frente de Corte
TC - Tipo de Caminhão (segundo a tabela 1)
TVV - Tempo de viagem vazio em minutos (usina - frente)
TVC - Tempo de viagem carregado em minutos (frente - usina)
TCE - Tempo de carregamento efetivo em minutos

Tabela 2 - Tempos de Viagem e Carregamento

Os tempos auxiliares dos caminhões e tratores (amarração da carga, pesagem, desamarração da carga, etc...), tanto na usina como nas frentes não serão considerados, porque eles já estão incluídos nos tempos de viagem dos caminhões dos dados obtidos. As fichas de controle da usina, se preenchidas correta e rigidamente, permitem que se tenha os tempos auxiliares discriminados dos demais tempos de operações. Entretanto verificamos,

durante a visita realizada que os motoristas dos caminhões não costumavam anotar nas fichas o código e o horário inicial das operações auxiliares por estas demandarem pouco tempo (muitas vezes menos do que 5 minutos). Este procedimento incorreto faz com que estes tempos apareçam nos arquivos embutidos nos tempos de viagem.

Item	Valor	Unidade
Capacidade de moagem diária de cana	5000	Toneladas
Capacidade máxima de armazenagem de cana no pátio	1500	Toneladas
Limite mínimo de cana no pátio	300	Toneladas
Número de descarregadeiras para cana picada	1	Unidade
Número de descarregadeiras para cana inteira	2	Unidades
Quantidade de cana no pátio no início do primeiro turno	500	Toneladas
O tempo de carregamento de uma julieta	Me=19.5 DP= 5.9	Minutos

Tabela 3 - Configuração da Usina Santa Helena

10.3.1 Primeiro Dia de Simulação

Para este dia, que corresponde ao dia 2 de setembro de 1993, apresentaremos três tabelas e alguns comentários sobre os resultados obtidos. A **Tabela 4** contém informações sobre a configuração das frentes de corte em operação naquele dia, representando portanto os dados de entrada do SISTEC. As frentes 2701-P e 2701-I representam uma mesma frente de corte que colheu cana picada e inteira simultaneamente neste dia. Por esse motivo, na **Tabela 4** é apresentada apenas a quantidade total de cana transportada correspondente à frente 2701. A **Tabela 5** contém resultados do simulador em função da quantidade total de cana transportada para três valores de Fator Garagem (FG) e três valores de Taxa de Manutenção. A **Tabela 6** apresenta resultados do simulador em função da quantidade de cana transportada de cada frente de corte ao longo do dia.

CF	QCTF	DFU	TC	NCO	NCA	CT1	CT2	CT3
2701-P	1641,4	29	P	5	0	7	0	0
2701-I		29	I	0	4	0	0	1
1601	3230,4	11	I	0	4	0	12	0
Total	4871,8							

CF - Código da frente de corte
QCTF - quantidade total de cana transportada de cada frente durante o dia
DFU - distância entre a frente de corte e a usina em Kilômetros
TC - tipo de cana transportado da frente¹ (P - picada, I - inteira)
NCO - número de colheitadeiras alocadas a frente de corte
NCA - número de carregadeiras alocadas a frente de corte
CT_n - número de caminhões do tipo C_n.

Tabela 4 - Configuração das frentes para o primeiro dia de simulação.

A taxa de manutenção no sistema real para os caminhões que operaram neste dia foi de 7,8%. Esta porcentagem foi calculada desconsiderando os caminhões que não operaram durante o dia. A porcentagem de manutenção calculada pela usina oscila em torno de 10% a 12%, mas o cálculo leva em consideração todos os caminhões disponíveis, inclusive os que permaneceram em manutenção o dia todo.

Os resultados do simulador serão apresentados em forma de tabela variando o tempo de manutenção e o Fator Garagem para que o leitor possa ter maior sensibilidade a respeito dos mesmos. Na Tabela 5, para o primeiro dia de simulação, podemos verificar que para tempos de manutenção menor que 7,8%, o Erro cometido pelo simulador em relação à cana transportada é positivo. Isto significa que o simulador "transportou" mais cana que o sistema real, o que era esperado pois ele considerou um tempo perdido em manutenção menor que o ocorrido no sistema real. Já para tempos de manutenção crescentes acima do real (7,8%), o Erro cometido é também negativo e decrescente (crescente em módulo), significando que o simulador "transportou" menos cana que no sistema real, o que também é esperado, uma vez que ele fará com que os caminhões percam mais tempo em manutenção do que realmente foi perdido no sistema real. Para cada tempo de manutenção realizamos sempre 3 simulações

¹ Quando uma mesma frente de corte possui tanto carregadeiras como colheitadeiras ela deve ser subdividida em duas frentes. Uma que fornece apenas cana inteira e outra que fornece apenas cana picada.

com o Fator Garagem assumindo os valores: 1,2 , 1,4 e 1,6. O objetivo disto é evitar distorções que poderiam ocorrer nos resultados se simulássemos para apenas um valor do FG, pois é impossível prever antes de simular, qual o FG que melhor descreve a operação de determinado dia, a menos que a usina utilizasse uma regra rígida e bem definida para decidir o momento em que cada caminhão deve se dirigir para a garagem. Na usina Santa Helena esta regra não existia.

Observação: Se considerarmos que o fator garagem não é um número fixo, mas algo que pode variar entre 1.2 e 1.6 na tabela 5, então a quantidade média de cana transportada é a média para cada taxa de manutenção dos valores QCTS obtidos na tabela. Para o caso da T.Manutenção = 7,8% o valor médio da QCTS é de 4857,3 Toneladas, o que significa um Erro Percentual Médio (EPM) igual a -0,30%.

FG	QCTR	T.Manutenção= 4,8%			T.Manutenção = 7,8%			T.Manutenção=10,8%		
		NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)
1.2	4871,8	5	5141,9	5,54	5	4993,0	2,48	5	4852,5	-0,39
1.4	4871,8	3	5016,2	2,96	3	4855,4	-0,33	4	4716,6	-3,18
1.6	4871,8	1	4853,8	0,37	3	4723,6	-3,04	3	4599,5	-5,58

FG - Fator Garagem - este fator é utilizado para variar o grau de segurança quanto ao atraso dos caminhões na troca de turno. Quanto maior o FG, menor o risco de um caminhão ainda não ter chegado na garagem no horário da troca de turno (troca de motorista), porém maior será o tempo total perdido pelos caminhões a espera de troca. No momento da saída de cada caminhão da usina, é estimado o tempo que o mesmo levará para completar um ciclo completo, e então este é multiplicado pelo FG e baseado neste tempo é decidido se há tempo para um novo ciclo ou não antes da troca de turno. O Fator Garagem foi comentado na seção 8.11

QCTR - Quantidade de Cana Transportada para a usina durante o dia no sistema Real

T.Manutenção - (Taxa de Manutenção) - Percentagem diária do tempo perdido em manutenção em relação ao tempo total de operação dos caminhões

NA - Número de caminhões que se atrasaram para troca de turno durante a simulação

QCTS - Quantidade de cana transportada para a usina de acordo com a simulação

EP (%) - Erro percentual na estimativa da cana transportada feita pelo simulador em relação a quantidade real de cana transportada: $EP(\%) = ((QCTS - QTCT) * 100) / QTCT$

Tabela 5 - Resultados para o dia 1

Na Tabela 5 podemos observar também que para a taxa de manutenção de 4,80% (3% a menos do que o real de 7,8%) o EPM foi de +2,95%. Para as simulações com taxa de manutenção de 10,8% o EPM foi de -3,05%. Estes resultados demonstram que o SISTEC reproduziu de maneira satisfatória o sistema real neste dia simulado, uma vez que o menor erro percentual médio (EPM) de 0,3% ocorreu exatamente quando utilizamos a taxa de manutenção real do sistema. O fator garagem que melhor representou as condições de operação deste dia foi 1,4, para o qual o simulador apresentou um Erro de -0,33%. A Tabela 6 apresenta o erro percentual cometido pelo simulador em relação a quantidade de cana transportada de cada frente de corte durante o dia, para o tempo de manutenção de 7,8% e Fator Garagem de 1,4.

Frente de Corte	QCTF (Ton)	QCSF (Ton)	EPF (%)
1601	3230,4	3252,1	0,67
2701	1641,3	1603,3	-2,32
<p>QCTF - quantidade de cana transportada no sistema real durante um dia de operação para cada frente</p> <p>QCSF - quantidade de cana transportada de cada frente de corte de acordo com o simulador</p> <p>EPF - Erro Percentual cometido pelo simulador para cada frente:</p> $EPF = ((QCSF - QCTF) / QCTF) * 100$			

Tabela 6 - Comparação da quantidade de cana transportada por frente no sistema real e no simulado para o dia 1. FG = 1.4 e Manutenção = 7,8%.

10.3.2 Segundo Dia de Simulação

Este dia corresponde ao dia 3 de setembro de 1993. Serão apresentadas as mesmas tabelas do dia anterior, além dos comentários.

FC	QCTF	DFU	TC	NCO	NCA	CT1	CT2	CT3
1601-P	1467,5	11	P	5	0	8	0	0
1601-I		11	I	0	4	0	11	0
2701-I	1189,2	29	I	0	4	0	0	1
2701-P		29	P	5	0	8	0	0
3501	2118,4	11	I	0	4	0	11	0
Total	4775,1							

Tabela 7 - Configuração das frentes para o segundo dia de simulação.

Obs.: Houve duas mudanças de frente da 1601P para 2701P e da frente 1601I para 3501.

FG	QCTR	T.Manutenção= 6,2%			T.Manutenção = 9,2%			T.Manutenção=12,2%		
		NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)
1.2	4775,1	3	4874,5	2,08	4	5007,6	4,87	6	4670,6	-2,18
1.4	4775,1	2	4791,7	0,34	3	4898,4	2,58	5	4522,2	-5,29
1.6	4775,1	2	4705,2	-1,46	3	4758,9	-0,34	3	4402,2	-7,80

Tabela 8 - Resultados para o dia 2

No relatório gerado com o número e destino das viagens realizadas por cada caminhão para o dia 2, constam 22 caminhões operando. Enquanto a maioria dos caminhões alocados a uma das frentes realizaram em torno de 13 viagens neste dia, houve 4 caminhões que realizaram apenas 5, 7, 9 e 6 viagens respectivamente, embora outro relatório aponte que os mesmos não perderam mais tempo em manutenção do que o normal. Como o objetivo desta seção é fornecer os dados de entrada para o simulador, o mais próximo possível da realidade, consideramos para a simulação apenas 2 caminhões no lugar dos 4 que,

provavelmente, foram dispensados durante alguma parte do dia devido ao excesso de caminhões operando.

Comparando a dificuldade de transporte em total de Toneladas Kilômetros² transportadas no dia 1 e no dia 2, 83135 TonKm e 73931 TonKm respectivamente, verificamos que no dia 2 seria suficiente um número menor de caminhões do que no dia 1 para suprir a demanda da usina. Entretanto havia 22 caminhões operando no dia 2 e apenas 21 no dia 1. Como os 21 caminhões foram suficientes no dia 1 podemos afirmar que no dia 2 estavam sobrando caminhões que permaneceram "matando tempo" durante o dia. Isto pode ser comprovado pelos baixos números de viagens de alguns caminhões. Em dias onde sobraram caminhões, é de se esperar que o SISTEC forneça valor de quantidade de cana transportada superior ao real, já que no simulador não temos como considerar a "perda de tempo" dos caminhões.

A taxa de manutenção no dia 2 foi de 9,2% e na Tabela 8 podemos observar que para este tempo EPM (Erro Percentual Médio - vide observação na subseção 10.3.1) foi de 2,60%. Também observamos que para este dia o Fator Garagem que melhor descreveu a realidade foi 1,6 para o qual o Erro foi de apenas 0,34%. O fato da utilização de um FG maior ter gerado um solução mais próxima da realidade neste dia já era esperado, pois o Fator Garagem mais alto aumenta o tempo ocioso dos caminhões na garagem para troca de turno, exatamente como ocorre no sistema real em dias que a frota está com folga para realizar o transporte.

Frente de Corte	QCTF (Ton)	QCSF (Ton)	EPF (%)
1601	1467,5	1424,6	-2,92
2701	1189,2	1103,6	-7,20
3501	2118,4	2174,3	2,64

Tabela 9 - Comparação da quantidade de cana transportada por frente no sistema real e no simulado para o dia 2. FG = 1.6 e Manutenção = 9,2%.

² É calculado através do somatório das distâncias de cada uma das frentes pela respectiva quantidade de cana transportada de cada uma. A dificuldade de transporte em determinado dia pode ser medido através deste valor em Toneladas Kilômetro.

10.3.3 Terceiro Dia de Simulação

Corresponde ao dia 4 de setembro de 1993. Este foi um dia anormal de transporte pois as frentes em operação se encontravam a uma pequena distância média da usina. Entretanto, havia quase o mesmo número de caminhões operando que nos dias anteriores e a usina moeu uma quantidade de cana inferior à normal, provavelmente devido a problemas industriais. Além da apresentação de três tabelas (tal como nos dias anteriores) serão feitos comentários sobre as anormalidades nos parâmetros de entrada e sobre os resultados obtidos.

FC	QCTF	DFU	TC	NCO	NCA	CT1	CT2	CT3
2701	1022,7	29	I	0	3	0	6	1
1601-P	1236,3	11	P	5	0	7	0	0
3501	1273,6	11	I	0	4	0	6	0
2501	831,5	3	P	5	0	7	0	0
Total	4364,2							

Tabela 10 - Configuração das frentes para o terceiro dia de simulação.

Obs.: Houve mudança de frente da 1601-P para 2501.

FG	QCTR	T.Manutenção=14,3%			T.Manutenção=17,3%			T.Manutenção=20,3%		
		NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)
1.2	4364,2	7	4634,8	6,20	8	4456,9	2,10	9	4301,7	-1,43
1.4	4364,2	5	4512,4	3,39	7	4319,3	-1,02	8	4229,2	-3,09
1.6	4364,2	4	4390,1	0,59	7	4234,9	-2,96	7	4101,2	-6,02

Tabela 11 - Resultados para o dia 3.

Frente de Corte	QCTF (Ton)	QCSF (Ton)	EPF (%)
2701	1022,7	1170,9	-14,49
1601	1236,3	1241,0	-0,38
3501	1273,6	1501,1	-17,86
2501	831,59	406,3	50,06

Tabela 12 - Comparação da quantidade de cana transportada por frente no sistema real e no simulado para o dia 3. FG = 1.4 e Manutenção = 17,3%.

Neste dia a porcentagem de manutenção calculada foi de 17,3%. Na verdade esta taxa anormal é reflexo do número exagerado de caminhões operando e da distância média pequena entre as frentes e a usina. Estes fatores foram agravados pela quantidade de cana moída pela usina neste dia que foi abaixo do normal, provavelmente por problemas industriais (foram moídas 4300 toneladas de cana enquanto o normal gira em torno de 4800 toneladas). Também observamos que o despacho dos caminhões foi bastante confuso neste dia. Muitos caminhões realizaram viagens para várias frentes distintas durante o dia, o que causa um Erro por parte do simulador em relação a quantidade de cana transportada de cada frente.

Na Tabela 11 podemos observar que para a taxa de manutenção de 17,3% o EPM foi de -0,62%. E para o melhor caso, com FG 1,4, o Erro foi de -1,02%. Na Tabela 12 podemos observar que o Erro em relação a cana transportada de cada frente foi bastante grande para algumas delas, o que já era esperado como comentamos no parágrafo anterior. Na frente 2501 ocorreu um erro de 50,06% porque como esta frente se encontra a apenas 3 Kilômetros da usina, demandando pouco tempo para realização de um ciclo completo (usina-frente-usina), muitos caminhões alocados a outras frentes realizaram viagens eventuais para esta durante o dia. Estes resultados mostram a não existência de uma política definida de operação para o transporte, além de uma provável descoordenação entre a área industrial e a área de transportes.

A simulação deste dia traz contribuição especialmente no sentido de comprovar a nossa hipótese inicial de que a "matação de tempo" ou ociosidade dos caminhões, independente de suas causas, poderiam ser reproduzidos no SISTEC através da taxa de manutenção.

10.3.4 Quarto Dia de Simulação

Equivalente ao dia 5 de setembro de 1993. Neste dia a distância média das frentes de corte foi pequena, entretanto, ao contrario do dia anterior, a usina operou com um número menor de caminhões, o que acarretou uma diminuição no tempo ocioso dos mesmos.

FC	QCTF	DFU	TC	NCO	NCA	CT1	CT2	CT3
1601	1712,7	11	I	0	4	0	8	0
2501	2330,9	3	P	5	0	6	0	0
2701	804,8	29	I	0	3	0	5	1
Total	4848,5							

Tabela 13 - Configuração das frentes para o dia 4 simulado

FG	QCTR	T.Manutenção= 1,3%			T.Manutenção = 4,3%			T.Manutenção= 7,3%		
		NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)
1.2	4848,5	5	5151,4	6,24	5	5029,0	3,72	5	4878,0	0,60
1.4	4848,5	2	5017,1	3,47	3	4918,6	1,44	4	4781,7	-1,13
1.6	4848,5	1	4934,5	1,77	2	4794,2	-1,11	2	4692,8	-3,21

Tabela 14 - Resultados para o dia 4.

Neste dia, a usina operou com 18 caminhões, entretanto na simulação utilizamos um total de 17, pois foi observado que dois caminhões realizaram 4 e 5 viagens para determinada frente, enquanto a média dos outros foi de 9 viagens. A taxa de manutenção neste dia foi de 4,3%, bastante abaixo do normal. Este valor, além do fator aleatoriedade nas quebras dos caminhões no sistema real, deve ter sido causado porque como apenas 18 caminhões operaram, de uma frota de 24 caminhões, os caminhões com maiores problemas de manutenção devem ter sido os escolhidos para ficarem na oficina ou na garagem. O fato das frentes estarem a menor distância e eventualmente os caminhões trafegarem por vias mais

conservadas por um lado e por outro permitir uma operação de manutenção mais rápida podem ter contribuído também para uma taxa menor de manutenção.

Na Tabela 14 observamos que o EPM do SISTEC para taxa de manutenção de 1,3% (3% abaixo do observado no sistema real) foi de +3,82%. Para a taxa de manutenção de 7,3% (3% acima do observado no sistema real), o EPM foi de -1,24. Para taxa de manutenção real de 4,3 obtemos um EPM de 1,35. O fato de termos um Erro menor para simulações com taxas de manutenção superiores a taxa obtida como real, pode ter sido causado por dois motivos :

- o arquivo de onde retiramos os dados para calcular o tempo de manutenção por algum motivo estava incompleto para este dia, e a taxa de manutenção dos caminhões foi na verdade superior a que tomamos como real,
- mesmo com apenas 18 caminhões operando ainda estavam sobrando caminhões e naturalmente os caminhões tiveram maior tempo ocioso em que, por exemplo, permaneceram dispensados, e por isso o simulador teria obtido dados mais próximos da realidade para tempos de manutenção maiores, que tendem a reproduzir a ociosidade dos caminhões.

Também observamos que para este dia o Fator Garagem que melhor descreveu a realidade foi 1,6 para o qual o Erro percentual do SISTEC em relação a quantidade de cana transportado foi de 1,11%.

Frente de Corte	QCTF (Ton)	QCSF (Ton)	EPF (%)
1601	1712,8	1720,4	0,44
2501	2330,9	2252,5	-3,36
2701	804,8	821,3	2,05

Tabela 15 - Comparação da quantidade de cana transportada por frente no sistema real e no simulado para o dia 4. FG = 1.6 e Manutenção = 4,3%.

10.4 Minimização dos Equipamentos na Usina Santa Helena

Nesta seção, na tabela 16 serão apresentados os resultados de alguns testes realizados com o objetivo de minimizar o número de caminhões, carregadoras/colhedoras para os 4 dias de operação simulados na seção anterior. Para isso fixamos os seguintes critérios, que foram utilizados durante as simulações:

1. a taxa de manutenção dos caminhões foi fixada em 7,2%. Nos testes realizados na seção anterior verificamos que em dias normais de operação a taxa de manutenção gira em torno deste valor, que foi o valor fornecido pela usina 2.
2. o Fator Garagem utilizado será 1,4. Verificamos que o FG que represente a operação normal em uma usina pode variar entre 1,2 e 1,4,
3. A única restrição observada durante as simulações é que a cana no pátio da usina não pode ser inferior a 100 toneladas em nenhum momento do dia.

A seguir descreveremos o procedimento utilizado para minimizar o número de equipamentos nos dias simulados. Primeiro carregamos o SISTEC com a configuração do dia a ser simulado. Iniciamos com o mesmo número de caminhões carregadoras e tratores que operaram no dia. Realizamos então uma simulação, no modo gráfico, onde é apresentado graficamente as filas de caminhões nas frentes e na usina, o número de carregadoras ou colhedoras ociosas e o nível de cana no pátio da usina no decorrer do dia. Através da análise dos gráficos das frentes decidimos quais e quantos equipamentos serão tirados de cada frente. Realizamos então nova simulação gráfica e se o estoque de cana na usina não ficar abaixo de das 100 toneladas estipuladas no item 3 acima, diminuimos novamente pelo menos um equipamento em cada frente, e realizamos nova simulação. Este processo continua até que chegamos ao ponto em que a retirada de qualquer equipamento em qualquer uma das frentes cause a violação da restrição de estoque mínimo de 100 toneladas durante o dia. Neste ponto realizamos uma corrida de simulação no modo não gráfico com 10 rodadas, para verificar se as estimativas são coerentes com a última simulação gráfica que consiste em apenas uma rodada, podendo ocorrer portanto distorções devido a valores aleatórios particulares gerados naquela rodada.

Dia de Operação	Cana Transp	Sistema Real		SISTEC		PEE
		Caminhões	Carr/Colh	Caminhões	Carr/Colh	
DIA 1	4871,4	20	13	19	6	-24,24
DIA 2	4775,1	22	13	19	6	-28,57
DIA 3	4364,2	20	12	17	6	-28,12
DIA 4	4848,5	18	12	14	7	-30,00

Carr/Colh - Número de carregadoras e colhedoras que operaram em cada dia.

PEE - (Porcentagem de Equipamentos Exedentes) - representa a diferença percentual entre o número total de equipamentos (caminhões, colhedoras e carregadoras) utilizados no sistema real em cada dia simulado e a quantidade total de equipamentos que seriam suficientes para suprir a usina de acordo com as simulações realizadas visando minimizar este número de equipamentos. Em outras palavras o PEE representa uma medida do número de equipamentos que poderiam não ter operado sem causar interrupções no fornecimento de cana da usina durante cada dia.

Tabela 16 - Minimização do número de caminhões, colhedoras e carregadoras.

Para os 4 dias simulados da usina Santa Helena, concluímos que através do SISTEC seria possível, sem mudanças drásticas na operação do sistema de transporte, diminuir de 24 a 30% do número total de equipamentos em operação em cada dia, como pode-se observar na tabela 16, acima. Somando-se o número de caminhões, carregadoras e colhedoras exedentes em cada dia, chegamos ao número de 36 equipamentos durante os 4 dias simulados. Lembrando que a frota opera 24 horas e cada equipamento necessita dois motoristas por dia, só em pessoal seriam necessários 72 motoristas a menos. Este pequeno cálculo visa dar uma idéia quantitativa ao leitor dos custos envolvidos e que poderiam ser minimizados não apenas em 4 dias mas nos 6 meses de safra.

Os testes apresentados nesta seção tem objetivos acadêmicos, e no caso de utilização do SISTEC para planejamento em um sistema real algumas observações se fazem necessárias:

- Os dados de entrada precisam ser levantados com a maior precisão possível para que se possa ter confiança nas previsões do SISTEC.
- Provavelmente seria necessário prever o número mínimo de equipamentos suficientes para manter o fornecimento de cana com uma margem de segurança maior do que a utilizada aqui.

- Também sabemos que no sistema real não é possível contratar ou não um número diferente de motoristas a cada dia de acordo com uma previsão a curto prazo. A contratação tanto de motoristas como de caminhões fretados é uma decisão a médio prazo.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 16, desta seção, acreditamos que mesmo observando todas as restrições reais do sistema seria possível diminuição de 10 a 20% no número de equipamentos operando para os dias simulados. Levando em conta o custo total do transporte durante todo o período da safra, é fácil concluir que a economia possível através do planejamento do transporte de cana utilizando o SISTEC pode ser significativa na economia de usinas. Observamos durante os testes que a usina Santa Helena não possui uma política bem definida para a operação do transporte de cana. Um exemplo que comprova esta afirmação é que no dia 2 e 3 foram colocados em operação um número maior e igual, respectivamente, de equipamentos do que no dia 1, embora a distância média das frentes e a dificuldade de transporte neste dia fosse inferior aos dias 2 e 3. Esta forma de conduta colocando quase toda a frota a operar diariamente, sem um planejamento prévio do número de equipamentos realmente necessários causa uma desorganização do sistema devido a folga com que os caminhões operam, e gastos desnecessários com combustível e outros inerentes a operação dos equipamentos, bem como gastos com pessoal.

Através do SISTEC, seria possível uma previsão, com boa precisão, do número de caminhões, carregadoras, colhedoras e tratores suficientes para suprir a usina em cada dia. Neste caso ao invés de colocarmos todos os equipamentos em operação todos os dias, a política de operação seria colocar apenas os equipamentos necessários, minimizando os custos e aumentando a produtividade dos mesmos. Neste caso os equipamentos dispensados seriam aqueles, por exemplo, que precisam de algum tipo de reparo ou de manutenção preventiva. A política que propomos é que seja criada uma lista de equipamentos que necessitam de manutenção preventiva, que seriam atendidos de acordo com o excedente de cada dia. Com esta política certamente a taxa de manutenção diária dos equipamentos em operação diminuiria, aumentando ainda mais a produtividade e conseqüentemente permitindo, após algum tempo, uma redução ainda maior no número de equipamentos.

Nos dias em que haja um excedente muito grande de equipamentos é preferível dispensar os motoristas dos equipamentos não necessários (pode-se utilizar, por exemplo um sistema de folgas prêmios para incentivar a boa conduta dos motoristas) ou em alguns casos deixar o motorista e o equipamento parados de prontidão, pois um equipamento desnecessário operando representa também um custo desnecessário.

Seria importante que o sistema industrial da usina comunicasse, sempre que possível, a previsão de moagem de cana para o setor de transporte. Pois sabendo-se que em determinado dia por algum motivo a usina irá moer uma quantidade de cana inferior à normal, é possível levar este dado em consideração durante o planejamento e colocar menos caminhões em operação.

10.5 Curva de Cana no Pátio da Usina

No modo de simulação gráfico do SISTEC, um dos gráficos apresentados é o do nível da cana no pátio da Usina ao longo do dia simulado. Este gráfico é uma importante ferramenta de análise, como veremos no decorrer desta seção.

O consumo de cana (moagem da usina) é considerado constante ao longo do dia, e toda a cana que é descarregada pelos caminhões e não consegue ser moída imediatamente pela usina fica armazenada no pátio da mesma. Nos momentos em que a chegada de cana é inferior à demanda da usina, a cana armazenada no pátio é consumida para que o nível de operação da usina seja mantida. Os momentos do dia em que o transporte não consegue manter sozinho a moagem da usina coincidem, normalmente, com os horários de troca de turno dos caminhões, podendo ser observados no gráfico como uma curva decrescente. Estes períodos ocorrem, como já foi discutido anteriormente, devido ao tempo que cada caminhão permanece parado na garagem aguardando a troca de turno. Os períodos em que o gráfico se apresenta como uma curva crescente, significa que a quantidade de cana transportada esta sendo superior à demanda da usina.

A figura 10.1 apresenta um gráfico da curva de cana com as principais características observadas nas simulações realizadas neste capítulo. Na figura podemos observar que a curva é bastante desuniforme, mostrando que nos períodos normais o nível de cana no pátio tende a ser crescente, para compensar a brusca queda na quantidade de cana, que ocorre nos períodos de troca de turno, que aparecem no gráfico como picos de mínima. Esta é uma curva típica de uma usina onde não há um controle rígido na decisão de quando um caminhão deve ou não parar e aguardar a troca de turno. O parâmetro que representa, no SISTEC, o grau de rigidez na decisão de ir ou não para garagem é o Fator Garagem, que oscilou em torno de 1.4 nos dias simulados. A través da redução deste fator, verificamos que o pico decrescente de cana no pátio nos períodos de troca tende a ser amenizado, chegando a um ponto que quase desaparece, mas acarretando como consequência que haja atraso da maioria dos caminhões para troca de turno.

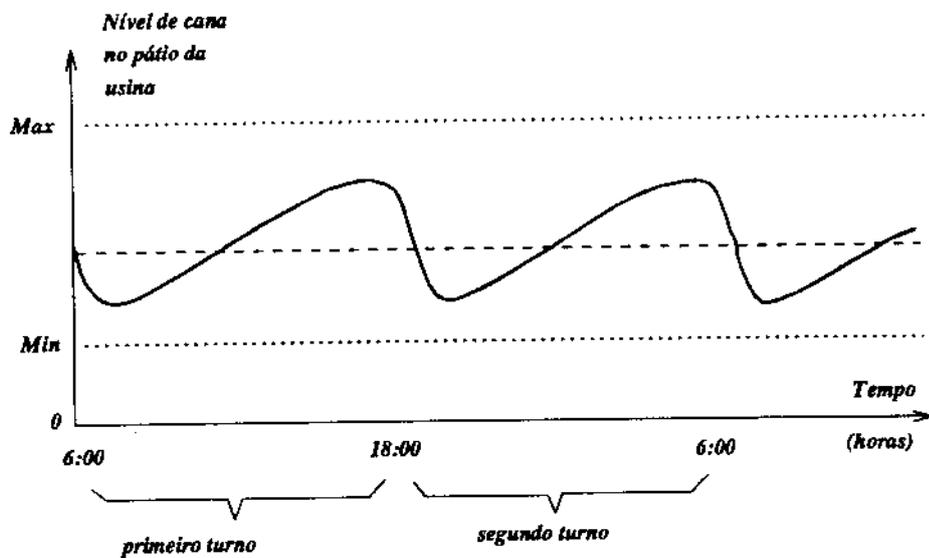


Figura 10.1 - Curva de Cana-de-Açúcar no Pátio da Usina.

Esta curva é de grande interesse, podendo ser utilizado como parâmetro de avaliação na análise de novas políticas de despacho dos caminhões, que devem ter como objetivo uniformizar esta curva, aproximando-a ao máximo da curva ideal, que é representada na figura 10.1 pela linha tracejada. Se obtivermos uma política de operação que gere uma curva de cana na usina, próximo de uma reta horizontal, poderíamos minimizar ao máximo o número de equipamentos operando.

A curva de cana no pátio da usina, possibilita que com uma rápida análise visual sejam detectados várias características ou falhas na configuração da frota utilizada.

Mesmo nas simulações com despacho estático, como as realizadas neste capítulo, sempre que o nível da cana no pátio ficar inferior ao limite mínimo ou chegar a zero, interrompendo a moagem na usina, é possível verificar se realmente a frota configurada é insuficiente para este dia ou se a interrupção foi apenas momentânea. Nestes casos, frequentemente a frota é suficiente durante os períodos normais de transporte, mas devido a características específicas das frentes em operação e do número de equipamentos alocados a cada uma ocorre uma interrupção no fornecimento de cana apenas nos horários de troca de turno. Através da realocação dos equipamentos (alteração do número de caminhões de cada tipo, carregadoras e colhedoras alocados a cada frente de corte) e de uma nova análise da curva de cana, pode ser possível conseguir uma maior uniformidade da curva e conseqüentemente obter um dia de transporte satisfatório para a usina, sem aumentar o número de equipamentos em operação.

Simulações onde o nível de cana atinge o limite máximo do pátio, são também rapidamente detectadas através desta curva. Neste caso novas configurações, com número menor de equipamentos podem ser testadas, já que esta situação indica uma frota

superdimensionada, onde vários equipamentos poderiam ser dispensados sem prejuízo para o transporte da usina.

Neste trabalho não foram desenvolvidas heurísticas para testar o despacho dinâmico dos caminhões, através das quais poderia ser determinada a frota mínima necessária a uma usina em determinado dia. Entretanto o SISTEC possui toda a estrutura necessária para, com pequenas alterações, testar tais heurísticas, ficando este trabalho como sugestão para pesquisas futuras.

Capítulo 11

TESTES COMPUTACIONAIS COMPLEMENTARES

11.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada uma etapa importante para a validação do SISTEC, que consistiu na realização de testes computacionais com dados de uma usina de grande porte para garantir que ele é suficientemente versátil para simular o transporte em usinas de qualquer porte. Para esta etapa utilizamos dados de uma das maiores usinas do país localizada no estado de São Paulo. Esta usina não foi visitada pessoalmente. Os dados foram obtidos extra oficialmente e por este motivo omitiremos o nome da usina referindo-nos a ela apenas por Usina 2.

Salientamos que este capítulo, como seu nome já anuncia, trata-se de testes complementares, uma vez que já consideramos o modelo do SISTEC validado no capítulo anterior. Os dados obtidos na Usina 2 são imprecisos e alguns deles incompletos causando-nos dúvidas, as vezes, no momento de estimar os parâmetros de entrada do SISTEC. Apesar disto, acreditamos que os dados são suficientes para avaliar a potencialidade do SISTEC na simulação de usinas de grande porte.

11.2 Simulação do Sistema de Transporte em uma Usina de Grande Porte

Os dados obtidos são de um dia completo de operação no mês de setembro de 1993. Estes dados, muito pobres, não incluem os tempos de viagem de cada caminhão nem os tempos auxiliares e são basicamente os apresentados abaixo:

- quantidade de cana transportada de cada uma das 8 frentes de corte em operação,
- número de caminhões, juletas, tratores, carregadoras ou colhedoras operando em cada frente de corte,
- distância de cada frente de corte até a usina e porcentagem média da composição de asfalto e terra das estradas que é de 60% asfalto e 40% de terra (se estes dados fossem para cada estrada, os cálculos dos tempos de viagens seriam mais precisos).

A partir destes dados e baseado nos trabalhos de Gago[1986], cujos dados de interesse são apresentados no Apêndice B1 e B2, foram feitas inúmeras estimativas para determinar todos os dados de entrada necessários ao simulador. Alguns tempos necessários ao simulador, e que não são citados no trabalho de Gago, foram determinados a partir de estimativas feitas em campo, durante as visitas realizadas a outras usinas.

A Tabela 17 apresenta especificações dos tipos de caminhões existentes na Usina 2 bem como os tempos de descarregamento efetivo e tempos auxiliares na usina para cada tipo de caminhão. A Tabela 18 apresenta os dados de configuração da Usina 2. Esta usina opera com dois horários para troca de turno : o primeiro as 6:00 horas e o segundo as 7:00, sendo que metade dos caminhões de cada frente trocam de motoristas no primeiro horário e o restante no segundo. Na Tabela 19 é apresentada a configuração de cada frente de corte no dia simulado.

Os tempos de viagem de cada tipo de caminhão para cada frente são apresentados na Tabela 20. Os tempos de viagens foram calculados a partir do apêndice B2, que apresenta as velocidades médias de viagem para cada tipo de caminhão na terra e no asfalto. Os tempos auxiliares foram tirados do apêndice B1.

Como todos os tempos de operações estimados são tempos médios, utilizamos o coeficiente de variação verificado em média nos tempos da usina Santa Helena, que é de 25%, para estimar os desvios padrões dos tempos na Usina 2.

Tipo	Descrição	TC	CTM	CPM	NJ	TDU		TAU	
						Me	DP	Me	DP
C1	Cana Picada (Classe II)	P	30	15	2	7,5	1,8	12,0	3,0
C2	Treminhão (Classe III)	P	45	15	3	11,0	2,7	17,5	4,3
C3	Cana Inteira (Classe II)	I	30	15	2	7,5	1,8	19,5	4,8

TC - Tipo de cana transportada (P - picada, I - inteira)
 CTM - Capacidade total média do caminhão em toneladas
 CPM - Capacidade própria do veículo (sem juletas acopladas) em toneladas
 NJ - Número de Julietas normalmente acopladas ao caminhão
 TDU - Tempo de Descarregamento na Usina (minutos), obtidos de Gago[1986] - Apêndice B1
 TAU - Tempo Auxiliar na Usina (minutos) - Gago[1986] - B1
 Me - Tempo Médio
 DP - Desvio padrão ($DP = 0,25 * Me$)

Tabela 17 - Tipos de Caminhões e tempos na Usina 2.

Item	Valor	Unidade
Capacidade de moagem diária de cana	38000	Toneladas
Capacidade máxima de armazenagem de cana no pátio	5000	Toneladas
Limite mínimo de cana no pátio	500	Toneladas
Número de descarregadeiras para cana picada	6	Unidade
Número de descarregadeiras para cana inteira	4	Unidades
Quantidade de cana no pátio no início do primeiro turno	2500	Toneladas

Tabela 18 - Configuração da Usina 2.

FC	DFU	TC	NCO	NCA	CT1	CT2	CT3
01	29	P	8	0	18	0	0
02	32	P	8	0	20	0	0
03	20	P	7	0	17	0	0
04	22	P	8	0	0	14	0
05	46	P	7	0	0	12	0
06	20	I	0	8	0	0	20
07	12	I	0	7	0	0	20
08	22	I	0	8	0	0	20
09	24	I	0	2	0	4	0

CF - código da frente de corte
QTC - quantidade total de cana transporta das frentes durante o dia
DFU - distância entra a frente de corte e a usina em Kilômetros
TC - tipo de cana transportada (I - inteira, P - picada)
NCO - número de colheitadeiras alocadas a frente de corte
NCA - Número de carregadeiras alocadas a frente de corte
CT_i - Número de caminhões do tipo *i*

Tabela 19 - Configuração das frentes de corte no dia simulado.

		TCJ (min)		TAT (min)		TVV (min)		TVC (min)		TCE (min)		TAC (min)	
FC	TCA	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP	M	DP
F1	C1	20,0	5,0	5,0	0,0	42,7	10,7	65,2	16,3	20,0	5,0	5,0	1,2
F2	C1	20,0	5,0	5,0	0,0	47,2	11,8	71,4	17,8	20,0	5,0	5,0	1,2
F3	C1	20,0	5,0	5,0	0,0	29,5	7,3	44,6	11,1	20,0	5,0	5,0	1,2
F4	C2	20,0	5,0	5,0	0,0	34,8	8,7	46,3	11,5	20,0	5,0	5,0	1,2
F5	C2	20,0	5,0	5,0	0,0	72,3	18,2	96,8	24,2	24,0	6,0	21,0	5,2
F6	C3	24,0	6,0	5,0	0,0	29,5	7,3	44,6	11,1	24,0	6,0	21,0	5,2
F7	C3	24,0	6,0	5,0	0,0	32,5	8,1	49,5	12,4	24,0	6,0	21,0	5,2
F8	C3	24,0	6,0	5,0	0,0	35,4	8,8	54,0	13,5	24,0	6,0	21,0	5,2
F9	C2	20,0	5,0	5,0	0,0	17,7	4,4	26,7	6,7	24,0	6,0	21,0	5,2

TCJ - tempo médio de carregamento de uma julieta rebocada por trator
TAT - tempo auxiliar médio de um trator (manobras no talhão, engate e desengate de julietas)
TVV - tempo médio de viagem de um caminhão vazio da usina até a frente de corte
TVC - tempo médio de viagem de um caminhão carregado da frente de corte até a usina
TCC - tempo de carregamento efetivo do caminhão na frente de corte
TAC - tempo auxiliar dispendido pelo caminhão na frente (engate e desengate de julietas, manobras no talhão e amarração da carga no caso de cana inteira)
TCA - Tipo de caminhão (C1, C2 ou C3)

Tabela 20 - Tempos de operações dos caminhões e tratores.

A taxa de manutenção diária dos caminhões fornecida pela própria Usina 2 é de 7,2%. Na Tabela 21, para a coluna correspondente a esta taxa de manutenção, para Fatores Garagens de 1,2, 1,4 e 1,6, o EPM¹ (Erro Percentual Médio) do SISTEC em relação a quantidade de cana transportada no dia foi de 1,91%. Podemos observar ainda que para uma taxa de manutenção de 4,2% (menor que a taxa real do sistema) , o EPM foi de 4,43%, e para uma taxa de 10,2% (maior que a taxa real) o EPM foi de -3,6%. Estes resultados demonstram que o SISTEC se comportou de maneira coerente na simulação do sistema de transporte da Usina 2, uma das maiores do país, em uma situação de grande imprecisão dos dados.

FG	QTCT	T.Manutenção= 4,2%			T.Manutenção = 7,2%			T.Manutenção=10,2%		
		NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)	NA	QCTS	EP(%)
1.2	35404,0	9	39099,0	10,44	16	37899,0	7,04	18	36813,0	3,97
1.4	35404,0	2	36831,0	4,03	8	35941,5	1,51	5	32773,5	-7,43
1.6	35404,0	1	34993,5	-1,16	5	34279,5	-3,17	8	32821,5	-7,30

Tabela 21 - Resultados da simulação na Usina 2

¹ Vide observação no capítulo 10 - Item 10.3.1.

Capítulo 12

CONCLUSÕES

O objetivo central que norteou esta tese foi o desenvolvimento de uma ferramenta essencialmente prática, para auxiliar na tarefa de planejamento operacional a curto prazo do transporte de cana-de-açúcar em usinas de açúcar e álcool.

O problema foi resolvido através de simulação e o modelo desenvolvido reproduz a operação de caminhões, tratores, carregadoras e colhedoras na usina e nas frentes de corte para um período de um dia, apresentando como resultados algumas medidas da eficiência operacional do sistema para a configuração simulada.

O modelo proposto foi testado em três etapas que estão descritas a seguir:

1. Teste de validade do modelo proposto através da simulação da operação de transporte de quatro dias da safra de 1993 na usina Santa Helena, da qual obtivemos dados bastante completos. Os dados reais foram comparados com as estimativas do SISTEC para verificar a que nível ele era capaz de reproduzir o sistema real simulado.
2. Embora o modelo de simulação proposto não constitua uma técnica de otimização, tentamos minimizar o número de caminhões, carregadoras e colhedoras operando nos dias simulados na etapa 1, através da realização de diversas simulações variando os parâmetros de entrada do SISTEC.
3. Simulação com dados obtidos de uma usina de grande porte para verificar se o modelo se adapta a usinas deste tipo.

A partir dos resultados obtidos nestas três etapas chegamos às seguintes conclusões gerais:

- O SISTEC é uma ferramenta confiável e efetiva na previsão de operação do transporte de cana. Nos testes da etapa 1, onde os dados de entrada do SISTEC foram suficientemente precisos, o erro cometido pelo simulador em relação a quantidade de cana transportada durante o dia não foi em nenhum caso superior a 4%, tendo sido na maioria dos dias bem inferior a isso. Chegamos a esta conclusão, considerando que o parâmetro estimado de maior responsabilidade é exatamente a cana transportada, pois é ela que determina se a moagem na usina será ou não mantida.
- A maioria dos esforços no sentido de melhorar a eficiência do sistema de transporte devem ser concentrados nos períodos de troca de turno para tentar uniformizar o máximo possível a curva de cana no estoque da usina. Através das análises realizadas com o gráfico do nível de cana no pátio da usina ao longo do dia, verificamos que os períodos críticos para o transporte de cana são exatamente durante as trocas de turno. Embora este fato já fosse esperado, não imaginávamos que a desuniformidade da curva de cana fosse tão grande quanto se apresentou. Principalmente em usinas que já trabalham com uma frota que não venha a formar filas na usina e nas frentes de corte, o trabalho no sentido de uniformizar a curva do estoque de cana é o ponto onde pode-se conseguir melhores resultados na minimização dos equipamentos. Muitas medidas podem ser tomadas neste sentido, tais como:
 - adotar um controle mais rígido dos tempos de viagens dos caminhões para cada frente, visando evitar os tempos ociosos desnecessários dos caminhões à espera da troca de motorista,
 - escolher de maneira mais eficiente o número e o horário de trocas de turno em cada período,
 - utilização de políticas eficientes de despacho dinâmico dos caminhões durante todo o dia ou apenas nos períodos finais de cada turno. O despacho dinâmico no final de cada turno deveria ter como objetivo fazer com que cada caminhão chegue no fim de uma viagem perto do fim do turno, para não motivar o motorista a "inventar" motivos de perda de tempo visando evitar a última viagem, que ultrapassaria o horário normal de fim de turno. Exemplos de motivos inventados pelos motoristas para matar tempo: manutenção desnecessárias, verificações (ruídos), bater pneus, abastecimento, aguardar queda de temperatura do motor, velocidade muito baixa.

Embora não tenhamos feito testes específicos com objetivo de melhorar a curva do estoque de cana, e conseqüentemente minimizar a frota da usina, o SISTEC pode ser usado para testar a eficiência de mudanças no sistema de transporte relativas aos itens citados acima. No caso do terceiro item, que trata da aplicação de uma heurística para despacho dinâmico dos caminhões, seria necessário executar alterações no simulador. Por esse motivo procuramos desenvolver o SISTEC de maneira a permitir a inclusão de posteriores rotinas para despacho dinâmico dos caminhões com facilidade.

- Permite testes computacionais que substituem a implantação de sistemas experimentais, evitando os riscos quanto ao fornecimento de cana na usina e os altos custos da realização de testes no sistema real. Acreditamos que o SISTEC pode ser de grande utilidade na realização de experimentos computacionais para testar o impacto da introdução de novos equipamentos, horários de troca de turno e novas políticas de operação em usinas que já estejam operando ou testar as diversas configurações possíveis para usinas que estejam em fase de planejamento ou de implantação.
- Embora o SISTEC tenha sido concebido basicamente para o planejamento operacional diário, ele pode ser utilizado eficientemente para planejamento a médio prazo. Para isso é necessário um cronograma das frentes que devem ser colhidas no período, bem como a estimativa de colheita prevista para cada uma. Para obter uma estimativa precisa do comportamento do sistema no período em questão, basta utilizar o SISTEC para simular, um a um, cada dia deste período. Desta maneira pode-se determinar para o período quais os dias críticos para o transporte, determinando políticas para ameniza-los, tais como remanejamento do cronograma das frentes a serem colhidas em cada dia. O processo pode ser repetido então para verificar se a política proposta irá causar o resultado esperado. Através da minimização dos equipamentos que deverão operar em cada dia pode também ter-se uma estimativa mais precisa do número de equipamentos que serão necessários para o período, evitando-se por exemplo o frete de caminhões desnecessários.
- Na última etapa de testes do SISTEC, através da simulação de uma usina de grande porte, mesmo com dados imprecisos de entrada, os resultados indicaram que o simulador é capaz de reproduzir o sistema de transporte de uma usina de grande porte com a mesma precisão obtida na fase de validação onde utilizamos uma usina de pequeno porte. Com estes testes asseguramos uma importante

qualidade do SISTEC que é a versatilidade para simular o transporte em usinas de qualquer porte.

Uma vez que não encontramos na bibliografia nenhum modelo específico para este problema real de transporte que afeta não só o ramo sucro-alcooleiro, mas também as indústrias de suco de laranja e outras empresas agro-industriais similares, acreditamos que o modelo apresentado nesta tese possa ser uma base de apoio para pesquisas futuras que venham a abordar um destes problemas, independente do método de resolução que venha a ser empregado.

No que diz respeito a facilidade de utilização do SISTEC por leigos na área de simulação e pessoas pouco familiarizadas com o computador, acreditamos que os objetivos foram alcançados. Embora possa ser aperfeiçoado ainda mais, o SISTEC possui um ambiente de trabalho bastante amigável para o usuário, através de janelas, menus e de saída gráfica, permitindo que qualquer pessoa com conhecimento do sistema de transporte da cana-de-açúcar possa, com algum treino, operá-lo e realizar um planejamento mais preciso para a operação do transporte de cana, minimizando assim, o número de equipamentos em operação e os custos envolvidos no transporte da cana.

Apêndice
à
Parte II

Apêndice A1

CORPO PRINCIPAL DO PROGRAMA

Na simulação orientada por eventos o programa gira sempre em torno da retirada de eventos da lista de eventos futuros e da execução dos procedimentos relativos a cada evento. A seguir está descrita a rotina responsável por esta tarefa no simulador desenvolvido.

Procedimento RODADA_DE_SIMULAÇÃO (*parâmetros, num_corridas*)

Recebe

parâmetros- estrutura de dados contendo configuração da usina, das frentes de corte e das entidades para esta corrida de simulação

num_corridas- número de corridas que serão realizadas com estes parâmetros

Início

Inicializar contador do número de corridas

$i = 0$

Repetir até que $i = num_corridas$

$i = i + 1$

Executar INICIALIZA_SISTEMA (*parâmetros*)

Repetir até que o relógio do simulador seja atualizado para o horário previsto para final de simulação

Repetir até hora = horário_final

Retirar o primeiro evento da lista de eventos futuros e incrementar relógio para horário deste evento

evento = PRÓXIMO_EVENTO

Caso *evento* seja FINAL_CARGA

Executar procedimento FINAL_CARGA

Caso *evento* seja CHEGADA_CAMINHÃO_FRENTE

Executar procedimento CHEGADA_CAMINHÃO_FRENTE

Caso *evento* seja TRATOR_PRONTO

Executar procedimento TRATOR_PRONTO

Caso *evento* seja FINAL_DESCARREGAMENTO

Executar procedimento FINAL_DESCARREGAMENTO

Caso evento seja CHEGADA_USINA

Executar procedimento CHEGADA_USINA

Caso evento seja TROCA_TURNO

Executar procedimento TROCA_TURNO

Caso evento seja SAÍDA_CAMINHÃO_USINA

Executar procedimento SAÍDA_CAMINHÃO_USINA

Caso evento seja LIBERA_DESCARGA

Executar procedimento LIBERA_DESCARGA

FimRepetir

Anotar resultados para estatística

FimRepetir

Apresentar resultados finais da corrida de simulação

FimProcedimento

Apêndice A2

INICIALIZAÇÃO DA SIMULAÇÃO

O procedimento de inicialização de cada rodada da simulação pode ser descrito através das seguintes etapas:

1. *Inicialização do relógio* (do simulador) com o horário inicial da primeira troca de turno do dia. Programação do horário final de simulação para horário inicial do último turno a trocar mais duas vezes o período de duração dos turnos.
2. *Programação na lista de eventos futuros das trocas de turno* (TROCA_TURN0) do primeiro período.
3. *Inicialização das variáveis de controle do programa e das variáveis de desempenho do simulador.*
4. *Inicialização das descarregadeiras* - são criadas as entidades descarregadeiras e colocadas na fila de descarregadeiras ociosas da usina.
5. *Inicialização dos tratores*- Para cada frente, são criadas o Número necessário de entidades tratores e colocados na fila de tratores esperando julietas vazias da frente.
6. *Inicialização das carregadeiras*- Para cada frente, são criadas o Número necessário de entidades carregadeiras e colocados na fila de carregadeiras ociosas da frente.
7. *Inicialização dos caminhões*- A lista de caminhões recebida para a rodada de simulação é varrida e de acordo com o indicador de situação inicial e da frente inicial (cam_sit_ini , cam_fc_ini) cada caminhão é colocado em determinada fila ou em determinado processo (neste caso o final do processo será programado para o horário previsto na variável cam_hor_ini do caminhão).

Após estas etapas, a rotina de inicialização verifica na usina e em todas as frentes, quais os processos que podem ser iniciados com as carregadeiras, tratores, caminhões e descarregadeiras que foram colocados em filas na etapas 4, 5, 6 e 7.

Apêndice A3

ROTINAS DO MODELO IMPLEMENTADO

Procedimento INÍCIO_CARREGAMENTO (*entidade, carr, fc*)

Recebe

entidade- identificação da entidade que irá carregar (trator ou caminhão)

carr- carregadeira que fará o carregamento

fc- frente de corte que o trator se encontra

Início

Se *entidade* for um trator

Então

Verificar o número de julietas acopladas ao trator

trat = *entidade*

njul = *trat_n_jul* (*trator*)

Atualiza a quantidade de cana restante na frente

$fc_qcc(fc) = fc_qcc(fc) - (qcjul * njul)$

Programa FINA_CARREGAMENTO(*trat, carr*) na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora + (t_carr_trat(fc) * njul)$

Senão

Atualiza a quantidade de cana restante na frente

cam = *entidade*

classe = *cam_classe* (*cam*)

$fc_qcc(fc) = fc_qcc(fc) - classe_cam_cap_pro(classe)$

Programa FINAL_CARREGAMENTO(*cam, carr*) na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora + fc_t_carr (classe , fc)$

FimSe

FimProcedimento

Procedimento FINAL_CARREGAMENTO (*entidade, carr*)

Recebe

entidade - identificação da entidade caminhão ou trator que terminou carregamento
carr - identificação da carregadeira que estava efetuando o carregamento

Início

Verificar qual a classe da entidade recebida

class_ent = classe da *entidade*

Se a *entidade* que encerrou o carregamento for da classe caminhão

Se *class_ent* = caminhão

Então

Verificar qual a frente de corte em que o caminhão se encontra

caminhão = *entidade*

fc = *cam_classe* (*caminhão*)

Verificar a qual classe o caminhão pertence

classe = *cam_classe* (*caminhão*)

Verificar o número de juletas transportadas por caminhões da sua classe

njul = *classe_cam_n_jul* (*classe*)

Se caminhões de sua classe não transportam nenhuma juleta

Se *njul* = 0

Então

Gerar o tempo de viagem de volta para usina

tviagem = *fc_via_carr* (*fc*)

Programar CHEGADA_USINA (*caminhão*) na lista de eventos futuros

Instante dado por: $\text{hora} = \text{hora} + tviagem$

Senão

Verificar se existe na frente o número de juletas carregadas que o caminhão deve transportar

Se $njul \leq n_jul_vaz$ (*fc*)

Então

Atualiza o número de juletas carregadas existentes na frente de corte

n_jul_vaz (*fc*) = n_jul_vaz (*fc*) - *njul*

Gerar o tempo de viagem de volta para usina

tviagem = *fc_via_carr* (*fc*)

Programar CHEGADA_USINA (caminhão) na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora + tviagem$

Senão

Coloca caminhão na fila de espera por julietas carregadas

Insere *caminhão* na fila $fc_fcej(fc)$

FimSe

FimSe

Senão (*class_ent* = trator)

Verifica o número de julietas rebocadas pelo trator

trator = entidade

$njul = trat_n_jul(trator)$

Calcula o novo número de julietas carregadas na frente de corte

$n_jul_car(fc) = n_jul_car(fc) + njul$

Gera o tempo dispendido pelo trator em operações auxiliares

$taux = fc_aux_trat(fc)$

Programar TRATOR_PRONTO(*trator*) na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora + taux$

Verificar se existe condições de acoplar julietas carregadas e transportá-las para a usina

Repetir enquanto existir caminhões na fila de espera por julietas e o número de julietas carregadas for igual ou maior que o número de julietas transportada pelo primeiro caminhão da fila

$cam = primeiro(fc_fcej(fc))$

$class = cam_classe(cam)$

$njul = classe_cam_n_jul(class)$

Repetir enquanto tamanho ($fc_fcej(fc)$) > 0 e $njul \leq n_jul_carr(fc)$

Gera o tempo de viagem do caminhão até a usina

$tviagem = t_via_carr(cam, fc)$

Programa CHEGADA_USINA (caminhão) na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora + tviagem$

Verificar o número de julietas rebocadas pelo próximo caminhão da fila, se este existir

Se ($fc_fcej(fc)$) > 0

Então

```

        cam = primeiro (fc_fcej(fc))
        class = cam_classe (cam)
        njul = classe_cam_n_jul (class)
    FimSe
FimRepetir
FimSe
Verificar se existe possibilidade de iniciar carregamento com a carregadeira vaga (carr)
Se existir pelo menos um caminhão na fila de espera por juletas carregadas e pelo menos um trator com juletas acopladas pronto para carregar
Se tamanho (fc_cejf(fc)) > 0 e tamanho ( fc_ftec(fc ) > 0
Então
    Retira primeiro trator da fila de tratores ( com juletas acopladas ) esperando para carregar
    trat = primeiro (fc_ftec(fc))
    Realizar INÍCIO_CARREGAMENTO (trator, carr)
SeNão
    Se a condição anterior não foi atendida então a prioridade é para carregar os caminhões, se existir algum esperando para carregar
    Se tamanho (fc_fcec(fc)) > 0
Então
    caminhão = primeiro (fc_fcec(fc))
    Realizar INÍCIO_CARREGAMENTO (caminhão, carr)
SeNão
    Se tamanho (fc_ftec(fc)) > 0
Então
    trat = primeiro (fc_ftec(fc))
    Realizar INÍCIO_CARREGAMENTO (trator, carr)
SeNão
    Se não houver caminhão nem trator para ser carregado, a carregadeira disponível é colocada na fila de carregadeiras ociosas
    Inserir carr na fila fc_fco(fc)
FimSe
FimSe
FimSe

```

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_TRATOR_CARREGAR (*trator, fc*)

Recebe

trator- identificação do trator rebocando julietas, candidato a carregamento

fc- frente de corte na qual o trator se encontra

Início

Se já existir trator esperando para carregar ou não existir carregadeira desocupada

Se ($\text{tamanho}(fc_ftc(fc)) > 0$) ou ($\text{tamanho}(fc_fco(fc)) = 0$)

Então

Colocar trator na fila de tratores esperando para carregar

Inserir *trat* na fila *fc_ftc(fc)*

Senão

Pegar a primeira carregadeira da fila de carregadeiras ociosas

carr = primeira(*fc_fco(fc)*)

Realizar INÍCIO_CARREGAMENTO (*trator, carr*)

FimSe

FimProcedimento

Procedimento TRATOR_PRONTO (*trat*)

Início

Verificar a qual frente de corte o trator está alocado

fc = *trat_fc(trat)*

Se já existir trator esperando por julietas vazias ou não houver nenhuma julieta vazia ($\text{tamanho}(fc_ftjv(fc)) > 0$ ou $\text{dep_jul_vaz}(fc) = 0$)

Então

Colocar trator no final da fila de espera por julietas *fc_ftjv(fc)*

Senão

Calcular quantas julietas serão acopladas ao trator

njul = menor número entre *nax_jul_trat* e *dep_jul_vaz(fc)*

Anotar quantas julietas o trator está rebocando

trat_n_jul(trat) = *n_jul*

Realizar CHEGADA_TRATOR_CARREGAR(*trat, fc*)

FimSe

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_CAMINHÃO_FRENTE(*caminhão*)

Início

Verifica em qual frente o caminhão está chegando

$fc = \text{cam_dest}(\text{caminhão})$

Verifica a qual classe o caminhão pertence

$\text{classe} = \text{cam_classe}(\text{caminhão})$

Verifica o número de juletas acopladas a caminhões da sua classe

$n_jul = \text{classe_cam_njul}(\text{classe})$

Atualizar número de juletas vazias na frente

$n_jul_vaz(fc) = n_jul_vaz(fc) + n_jul$

Se não existir fila de caminhões para carregar e houver pelo menos uma carregadeira desocupada

Se ($\text{tamanho } fc_fcec(fc) = 0$ e $\text{tamanho } fc_fco(fc) > 0$)

Então

Colocar caminhão no final da fila $fc_fcec(fc)$

Senão

Retirar uma carregadeira da fila de descarregadeiras ociosas

$carr = \text{primeira}(fc_fco(fc))$

Realizar INÍCIO_CARREGAMENTO (*caminhão, carr, fc*)

Fimse

Repetir enquanto existir tratores esperando para acoplar juletas vazias e houver juletas vazias na frente

Repetir enquanto ($\text{tamanho}(fc_ftjv(fc)) > 0$ e $n_jul_vaz(fc) > 0$)

Retirar primeiro trator da fila de espera por juletas

$trat = \text{primeiro}(fc_ftjv(fc))$

Calcula o número de juletas que serão acopladas ao trator

$n_jul = \text{menor número entre } \text{max_jul_trat} \text{ e } n_jul_vaz(fc)$

$\text{trat_n_jul}(trat) = n_jul$

Realizar CHEGADA_TRATOR_CARREGAMENTO(*trat, fc*)

FimRepetir

FimProcedimento

Procedimento INÍCIO_DESCARREGAMENTO (*caminhão, trator*);

Recebe

caminhão : identificação do caminhão que está iniciando descarga

desc : identificação da descarregadeira

Início

Calcula a quantidade de cana no depósito da usina no momento atual, antes do descarregamento do caminhão

$usina_quan_cana = usina_quant_cana - CONSUMO$

Verifica qual a capacidade média de cana transportado pelo caminhão

$classe = cam_classe(caminhão)$

$capacidade = classe_cam_cap_tot(classe)$

Se não houver espaço suficiente no depósito para descarregamento

Se $(usina_qua_cana + capacidade) > usina_limi_max$

Então

Colocar caminhão na fila de espera para descarregar

inserir *caminhão* na fila *usina_fcd*

Colocar a descarregadeira na fila de descarregadeiras ociosas

inserir *desc* na fila *usina_fdo*

Colocar usina no estado interditado para descarregamento

$usina_interditada = verdadeiro$

Calcular o tempo que os caminhões deverão esperar para descarregar até que haja espaço no depósito para efetuar um descarregamento

$falta = usi_lim_max - (usi_qua_cana + capacidade)$

$espera = falta / usi_cons$

Programa LIBERA_DESCARREGAMENTO_USINA na lista de eventos futuros

Instante dado por: $hora = hora + espera$

Senão

Caso tenha sido desrespeitado o limite mínimo de cana no depósito ou tenha faltado cana na usina, fazer as anotações necessárias

Calcular a quantidade de cana no depósito após o descarregamento

$usina_qua_cana = usi_qua_cana + capacidade$

Programa FINAL_DESCARREGAMENTO na lista de eventos futuros

Instante dado por : $hora = hora + t_des(caminhão)$

FimSe

FimProcedimento

Procedimento LIBERA_DESCARGA

Início

Tirar usina do estado interditado para descarregamento

usina_interditada = falso

Verificar se existe condições para efetuar descarregamento no momento

Repetir enquanto (*tamanho(usina_fdo)* > 0) e (*tamanho(usina_fcd)* > 0) e

(*usina_interditada* = falso)

Retirar primeiro caminhão da fila de espera para descarregar

caminhão = primeiro (*usina_fcd*)

Retirar uma carregadeira da fila de descarregadeiras ociosas

desc = primeira (*usina_fdo*)

Realizar INÍCIO_DESCARREGAMENTO (*caminhão*, *desc*)

FimRepetir

FimProcedimento

Procedimento FINAL_DESCARREGAMENTO (*caminhão*, *desc*)

Recebe

Caminhão- identificação do caminhão que está encerrando descarga

desc - descarregadeira que estava efetuando a descarga

Início

Gerar o tempo gasto pelo caminhão em operações auxiliares na usina

taux = *t_aux_usina* (*caminhão*)

Programa SAÍDA_CAMINHÃO_USINA (*caminhão*) na lista de eventos futuros

Instante dado por: *hora* = *hora* + *taux*

Verificar se existe condições da descarregadeira liberada iniciar descarga de outro caminhão imediatamente. Para isso é necessário que exista caminhão aguardando para descarregar e que a usina não esteja interditada para descarga.

Se *tamanho* (*usina_fcd*) > 0 e *usina_interditada* = falso

Então

Retirar primeiro caminhão da fila de espera

caminhão = primeiro (*usina_fcd*)

Realizar INÍCIO_DESCARREGAMENTO (*caminhão*, *desc*)

Senão

Colocar descarregadeira na fila de descarregadeiras ociosas

Inserir *desc* na fila usina_fdo

FimSe

FimProcedimento

Procedimento SAÍDA_CAMINHÃO_USINA (*caminhão*)

Recebe

caminhão - identificação do caminhão que está pronto para iniciar viagem para uma das frentes de corte.

Início

Calcula

Tempo de Ciclo (caminhão) =

**tempo de viagem vazio até a frente destino (*cam_dest(caminhão)*) +
tempo médio de espera na fila para carregamento até este momento +
tempo de carregamento efetivo na frente destino +
tempo auxiliar para classe(*caminhão*) na frente destino +
tempo de viagem carregado, de volta para a usina +
tempo de descarregamento efetivo +
tempo auxiliar na usina**

Se (*Tempo de Ciclo * Fator Garagem*) for menor que o tempo restante até a troca de turno do *caminhão*

Então

tviagem = t_via_vazio (cam , fc)

Programa CHEGADA_CAMINHÃO_FRENTE (*caminhão*) na lista de eventos futuros

Instante dado por: hora = hora + *tviagem*

Senão

Envia o *caminhão* para a garagem a esperar a troca de turno

Fimse

FimProcedimento

Procedimento CHEGADA_USINA (*caminhão*)

Recebe

caminhão - identificação do caminhão que está chegando na usina

Início

Se não houver fila de caminhões esperando para descarregar, se houver pelo menos uma descarregadeira ociosa e a usina não estiver interdita para descarregamento

Se $(\text{tamanho}(\text{usina_fcd}) = 0)$ e $(\text{tamanho}(\text{usina_fdo}) > 0)$ e
 $(\text{usina_interditada} = \text{falso})$

Então

Retira uma descarregadeira do estado ocioso

$\text{desc} = \text{primeira}(\text{usina_fdo})$

Realizar INÍCIO_DESCARREGAMENTO(*caminhão*, *desc*)

Senão

Colocar descarregadeira no estado ocioso

Inserir *desc* na *usina_fdo*

FimSe

FimProcedimento

Procedimento Atualiza_Estatística_Fila (fila , num_entidades)

Recebe

fila- identificação da fila a ser atualizada

num_entidade - novo número de entidades na fila

Início

$\text{período} = \text{hora_atual} - \text{hora_antiga}(\text{fila})$

$\text{temp_total}(\text{fila}) = \text{temp_total}(\text{fila}) + \text{ne_antigo} * \text{período}$

$\text{período_total}(\text{fila}) = \text{período_total}(\text{fila}) + \text{período}$

$\text{hora_antiga}(\text{fila}) = \text{hora_atual}$

$\text{ne_antigo}(\text{fila}) = \text{num_entidade}$

FimProcedimento

Onde são armazenados para cada fila:

- $\text{t_total}(\text{fila})$ - Tempo total perdido pelos equipamentos na fila
- $\text{Período_total}(\text{fila})$ - Período total no qual foi armazenado dados
- $\text{hora_antiga}(\text{fila})$ - Horário da última atualização na estatística da fila
- $\text{ne_antigo}(\text{fila})$ - Número de entidades existentes na fila no momento da última atualização

Apêndice A4

ROTINA PARA ANOTAR TEMPO DE ESPERA EM UMA FILA

Procedimento *Atualiza_Tempo_Espera_Fila* (*fila* , *num_entidades*)

Recebe

fila- identificação da fila a ser atualizada

num_entidade - novo número de entidades na fila

Início

$\text{período} = \text{hora_atual} - \text{hora_antiga}(\text{fila})$

$\text{temp_total}(\text{fila}) = \text{temp_total}(\text{fila}) + \text{ne_antigo} * \text{período}$

$\text{período_total}(\text{fila}) = \text{período_total}(\text{fila}) + \text{período}$

$\text{hora_antiga}(\text{fila}) = \text{hora_atual}$

$\text{ne_antigo}(\text{fila}) = \text{num_entidade}$

FimProcedimento

Onde são armazenados para cada fila:

- $t_total(\text{fila})$ - Tempo total perdido pelos equipamentos na fila
- $\text{Período_total}(\text{fila})$ - Período total no qual foi armazenado dados
- $\text{hora_antiga}(\text{fila})$ - Horário da última atualização na estatística da fila
- $\text{ne_antigo}(\text{fila})$ - Número de entidades existentes na fila no momento da última atualização

Apêndice

à

Parte III

Apêndice B1

TEMPOS MÉDIOS DE OPERAÇÕES DOS CAMINHÕES

Os tempos apresentados na tabela B1 foram tirados do trabalho de Gago[1986]. A coluna "Cana Inteira" corresponde aos tempos de operações no sistema de corte Manual Convencional e a coluna "Cana Picada" corresponde ao sistema Mecanizado Convencional. Os tempos de manobra nos talhões e engate/desengate de Julietas não aparecem no trabalho de Gago e serão considerados como 5 minutos nas simulações do capítulo 11.

OPERAÇÃO	CAMINHÕES CATEGORIA I		CAMINHÕES CATEGORIA II		CAMINHÕES CATEGORIA III	
	Cana Inteira	Cana Picada	Cana Inteira	Cana Picada	Cana Inteira	Cana Picada
Carregamento efetivo	24,0	20,0	24,0	20,0	24,0	20,0
Preparo da carga	10,0	---	16,0	---	23,0	---
Retirada de amostra	2,5	2,5	5,0	5,0	7,5	7,5
Soltar a carga	4,0	---	7,5	---	11,0	---
Descarregamento efetivo	4,0	4,0	7,5	7,5	11,0	11,0
Limpeza da carroceria	4,0	4,0	7,0	7,0	10,0	10,0

Tabela B1 - Tempos médios de operações para cada categoria de caminhão (minutos).

Apêndice B2

VELOCIDADE MÉDIA DOS CAMINHÕES

As velocidades médias apresentadas na Tabela B2 foram tiradas do trabalho de Gago[1986].

CAMINHÕES	ASFALTO		TERRA	
	Carregado	Vazio	Carregado	Vazio
Categoria I	33,1	55,4	25,0	36,0
Categoria II	35,7	56,1	19,6	28,8
Categoria III	33,9	54,4	23,0	26,1

Tabela B2 - Velocidade média

de cada categoria de caminhões na terra e no asfalto (Km/h).

Referências Bibliográficas

- [01] ACKOFF, R.L.; *Redesigning the Future; a Systems Approach to Societal Problems*; New York; John Wiley & Sons in Oliveira[1986].
- [02] BEAUJON, G.J.; TURNQUIST, M.A.; *A Model for Fleet Sizing and Vehicle Allocation*; Transportation Science; vol.25, no.1; February; 1991.
- [03] BODIN, L; GOLDEN, B.; ASSAD, A; BALL, M.; *Routing and Scheduling of Vehicles and Crews: The State of the Art*; Pergamon Press Ltd.; 1983.
- [04] BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A.; *Métodos Quantitativos, Estatística Básica*; Atual Editora Ltda; 1985.
- [05] DESROCHERS, M.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M.; *A New Optimization Algorithm for the Vehicle Routing Problem With Time Windows*; Operations Research; vol.40; no.2; March-April ; 1992.
- [06] DESROSIERS, J.; SAUVÉ, M.; SOUMIS, F.; *Lagrangian Relaxation Methods for Solving the Minimum Fleet Size Multiple Traveling Salesman Problem With Time Windows*; Management Science; vol.34,no.8; August; 1988.
- [07] ETEZADI, T.; BEASLEY, J.E.; *Vehicle Fleet Composition*; Journal of the Operational Research Society; vol.34; no.1;pp 87-91;1983.
- [08] FIGUEIREDO FILHO, O.; *Transporte de Cana-de-açúcar - Incidência dos Principais Parâmetros na Capacidade de Transporte da Frota*; In: III Seminário de Tecnologia Agronômica; Piracicaba; 1986; Anais São Paulo; Copersucar; 1986.
- [09] FISHMAN, G.S. ; *Principles of Discrete Event Simulation*; John Wiley & Sons; 1978.
- [10] GAGO, J.S.N.; *Corte, Carregamento e Transporte de Cana-de-açúcar*; In: III Seminário de Tecnologia Agronômica; Piracicaba; 1986; Anais São Paulo; Copersucar; 1986.
- [11] GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.A.; *Perspectives on Vehicle Routing: Exciting New Developments*; Operations Research; vol.34, no.5; September-October; 1986.

- [12] GORDON, G.; *Sistem Simulation*; Prentice-Hall; Second Edition; 1978.
- [13] KOENIGSBerG, E.; LAM,R.C.; *Cyclic Queue Models of Fleet Operations*; Operations Research; vol.24, no.3; May-June;1976.
- [14] KOLEN, A.W.J.; KAN, A.H.G.R.; TRIENEKENS,H.W.J.M.; *Vehicle Routing With Time Windows*; Operations Research; vol.35; no.2, March-April; 1987
- [15] KOO, W.W.; LARSON, D.W.; *Transportation Models for Agricultural Products*; Westview Press; 1985.
- [16] NEELAMKAVIL,F.; *Computer Simulation and Modelling*, John Wilay & Songs; 1988.
- [17] NISHI,M.; *SIMTRAF-OPERBUS: Um Simulador de Tráfego Urbano com Operação de Ônibus de Transporte Coletivo*; Tese de Mestrado; FEE/UNICAMP; Campinas; 1993.
- [18] NISHI,M.; *SIMÃO: Um Pacote de Simulação de Sistemas, Manual e Guia de Referência*; IMECC/UNICAMP; Campinas; 1990.
- [19] OLIVEIRA,D.P.R.; *Planejamento Estratégico - Conceitos, Metodologias e Práticas*; São Paulo, Atlas;1986.
- [20] PAUL,R.J.; *Recent Developments in Simulation Modelling*; Journal of the Operational Research Society; vol.42; no.3; pp.217-226; 1991.
- [21] PERIN FILHO,C.; *Introdução à Simulação de Sistemas*; Notas de Aulas; IMECC/UNICAMP; Campinas; 1990.
- [22] PRATT,O.E.; NOVAKOVIC,A.M.; ELTerICH,G.J.; HAHN,D.E.; SMITH, B.J.; CRINER, G.K.; *An Analysis of the Spatial Organization of the Northeast Dairy Industry*; Search: Agriculture;
- [23] RAVINDRAN,A.; PHILLIPS,D.T.; SOLBERG,J.J.; *Operations Research Principles and Practice*; John Wiley & Sons; Second Edition; 1987.
- [24] ROY,T.J.V.; *Multi-Level Production and Distribution Planning With Transportation Fleet Optimization*; Management Science; vol.35,no.12; December; 1989

- [25] SALIBY,E.; *Repensando a Simulação: A Amostragem Descritiva*; Editora Atlas S.A.; 1988.
- [26] SOARES,L.F.G.; *Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas*; VII Escola de Computação; IME-USP; São Paulo; 1990.
- [27] SOLOMON,M.M.; *Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems With Time Window Constraints*; Operations Research; vol.35; no.2, March-April; 1987.
- [28] TURNQUIST,M.A.; JORDAN,W.C.; *Fleet Sizing under Production Cycles and Uncertain Travel Times*; Transportation Science; vol.20, no.4; November; 1986
- [29] WAGNER,H.M.; *Pesquisa Operacional*; Rio de Janeiro; Prentice-Hall do Brasil Ltda.; Segunda Edição, 1985.
- [30] WRIGHT,C.L.; *Análise Econômica de Transporte e Armazenagem de Grãos, Estudo do Corredor de Exportação de Paranaguá*; Empresa Brasileira de Planejamento de Transporte - GEIPOT; 1980.