

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO

SISTEMAS DE PROCESSOS QUÍMICOS E INFORMÁTICA

LINHA DE PESQUISA: PLANEJAMENTO DE PRODUÇÃO

**OTIMIZAÇÃO DA CAPACIDADE DE INSTALAÇÕES SUCRO-
ALCOOLEIRAS**

Autor: Ademar Nogueira do Nascimento

Orientador: Prof^a. Dra. Maria Teresa Moreira Rodrigues

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas – São Paulo

fevereiro – 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

N17o

Nascimento, Ademar Nogueira do
Otimização da capacidade de instalações sucro-alcooleiras /
Ademar Nogueira do Nascimento.--Campinas, SP: [s.n.], 2006.

Orientador: Maria Teresa Moreira Rodrigues
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Química.

1. Otimização matemática. 2. Engenharia química – Modelos matemáticos. 3. Engenharia produção – Modelos matemáticos. 4. Teoria das filas. 5. Açúcar – Usinas. 6. Alcool – Combustível - Indústria. I. Rodrigues, Maria Teresa Moreira. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Titulo em Inglês: Optimization of the capacity of sugar and alcohol plants

Palavras-chave em Inglês: Optmization, Modeling, Waiting-queue, Sugar and alcohol

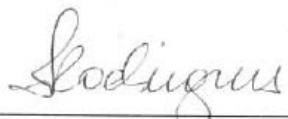
Área de concentração: Sistemas de Processos Químicos e Informática

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Roger Josef Zemp, Sergio Persio Ravagnani, Antonio José de
Almeida Meirelles, José Geraldo de Andrade Pacheco Filho

Data da defesa: 23/02/2006

O presente exemplar corresponde à redação final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por Ademar Nogueira do Nascimento e aprovada pela Comissão Julgadora em 23/02/2006.

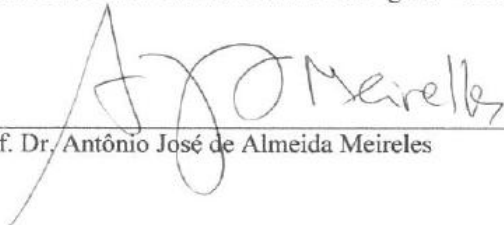


Profa. Dra. Maria Teresa Moreira Rodrigues

Tese de doutorado defendida por Ademar Nogueira do Nascimento e aprovada em 23 de fevereiro de dois mil e seis pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:



Prof. Dra. Maria Teresa Moreira Rodrigues - Orientadora



Prof. Dr. Antônio José de Almeida Meireles



Prof. Dr. José Geraldo de Andrade Pacheco Filho



Prof. Dr. Roger Josef Zemp



Prof. Dr. Sergio Persio Ravagnani

AGRADECIMENTOS

À minha Orientadora, Professora Doutora Maria Teresa Moreira Rodrigues, do Departamento de Engenharia Química da UNICAMP, por todo seu apoio, dedicação e disponibilidade para consultas técnicas ao longo de todo esse projeto, que ora se concretiza.

Ao Professor Doutor, Ricardo de Araújo Kalid, docente do Departamento de Engenharia Química da UFBA, por suas observações sobre o modelo matemático da Programação Linear.

Ao Professor Doutor Gilênio Borges Fernandes, docente do Departamento de Estatística do Instituto de Matemática da UFBA, por suas contribuições durante os testes estatísticos, muito demandados ao longo da modelagem da fila de espera.

Ao Professor Doutor, Darcy Prado, docente da Escola de Engenharia da UFMG, que muito contribuiu com suas leituras e sugestões a cerca da estruturação da modelagem da fila de espera.

Ao Engenheiro Carlos Calado, especialista dos recursos estatísticos informatizados, por suas contribuições quando da implementação dos modelos matemáticos em linguagem de computador.

À Direção da Usina Aliança, que franqueou o acesso do doutorando às suas instalações para que o trabalho fosse realizado, bem como a seus profissionais, sobretudo o Engenheiro e Gerente de Produção, João Santana, cujas consistentes e experientes opiniões, a cerca da validade dos modelos desenvolvidos com a realidade operacional sucro-alcooleira, permitiram que o trabalho tivesse êxito.

À Universidade Federal da Bahia, por ter me concedido licença funcional para que pudesse dedicar-me integralmente às atividades do Doutorado.

Por fim, um agradecimento especial à minha família, Maria das Graças, minha esposa, minhas filhas Lorena e Marina, as quais peço desculpas pelos inúmeros momentos de afastamento da convivência familiar diante do excesso de demandas, principalmente no final deste trabalho, bem como a todos os demais parentes e amigos que encontravam-se bastante apreensivos em função de minhas manifestas angústias e alegrias no decorrer de todo esse tempo.

RESUMO

O presente estudo trata da otimização da logística de transporte e recepção de cana-de-açúcar em indústria sucro-alcooleira, com base em modelos de *filas de espera*, seguido de modelo para otimização da produção, no âmbito da programação linear, cujo objetivo é a maximização do lucro total, advindo da comercialização de seus produtos (açúcar e álcool) e sub-produtos (bagaço de cana, torta de filtro, vinhaça e eletricidade).

Para o estudo das *filas de espera*, a metodologia adotada consistiu na análise do sistema de transporte de cana da Usina Aliança, indústria localizada no interior do Estado da Bahia, Brasil. Os dados coletados alimentaram o *software* de planilha eletrônica *excel*, da *Microsoft*, empregado para o teste de aderência das distribuições de probabilidade. Com base no *software Quntitative Systems for Business Plus – QSB⁺* foram feitas simulações de descarregamentos de cana.

Para a programação linear, por sua vez, tomou-se por base estudo detalhado das operações unitárias de 95 indústrias desse segmento, realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. O recurso informatizado neste caso, consistiu também, do *software excel*, através do *solver*, tendo sido usada para a simulação de cenários relativos à maximização do lucro.

Os resultados obtidos indicaram que um re-planejamento da frota de transporte de cana, com diferentes capacidades é, de fato, mais indicado para a otimização do descarregamento nas usinas. Quanto à otimização da produção, conclui-se que o modelo formulado responde satisfatoriamente a variações de preços de seus produtos, indicando cenários de produção mais adequados.

O presente estudo contribui para a melhoria da indústria de açúcar e álcool, fazendo ligação entre a função suprimentos e a função produção, de modo sistematizado, e apoiado em bases das Engenharias Química e de Produção.

Palavras-chave: Modelos matemáticos; Açúcar e Álcool; Otimização da Produção

ABSTRACT

This study is about optimizing sugar-cane transportation and delivery logistics in the sugar and alcohol industry, based on waiting-queue models following a model for optimizing production, using linear programming, with the objective of increasing the total profit resulting from the sale of the products and by-products: sugar-cane bagasse, filter cake, stillage, and electricity.

The methodology employed in the waiting-queues study consisted of analyzing the transportation system of the Aliança Mill, a facility located in rural Bahia, Brazil. Data collected were manipulated with statistics tools found in Microsoft Excel, in order to perform the probability distributions adherence test. *Quantitative Systems for Business Plus*, *QSB+* software was used to perform simulations of cargo unloading in which the number of cargo unloading facilities (dumpers) was varied.

The mathematical model was based on a detailed study of the operating units of 95 industries of this area, developed by *Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT*. The computer resources also included Microsoft Excel. Its “solver” function was used to simulate scenarios related to maximizing profit.

The results show that re-planning the transportation fleet to include a mix of vehicles with different load capacities is recommended to achieve optimal cargo unloading at the mills. Concerning production optimization, this study shows that the model satisfactorily responds to possible price variations of products and by-products, indicating suitable production composition scenarios.

This study thus contributes to processes improvement in the sugar and alcohol industry, linking the supply function to the production function in a systematized way, based on Chemical and Production Engineering.

Key-words: Mathematical modeling; sugar and alcohol; Production Engineering

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO À PROBLEMÁTICA SUCRO-ALCOOLEIRA E FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA DO MODELO EM ESTUDO.....	1
1. – As Peculiaridades da produção.....	1
1.1 – Fundamentação técnica do modelo selecionado para estudo.....	8
CAPÍTULO 2 – CONCEITOS E MODELOS MATEMÁTICOS EM TEORIA DE FILAS.....	14
2. - Conceito de teoria de filas.....	14
2.1 – Caracterização dos elementos das <i>filas de espera</i>	15
2.2 – Terminologia e notação.....	17
2.3 – O processo de vida e morte.....	18
2.4 – Modelos de filas baseado no processo de vida e morte.....	19
2.5 – Otimização de um modelo de filas.....	28
CAPÍTULO 3 – MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE TRANSPORTE E DESCARGA DE CANA NA USINA ALIANÇA.....	30
3. – Caracterização da infra-estrutura de transporte e descarga de cana na usina.....	30
3.1 – O fluxo dos caminhões para a usina.....	31
3.2 – Materiais e métodos.....	33
3.3 – Modelagem da fila dos caminhões na usina.....	34
3.4 – Caracterização do processo de fila da usina Aliança, de acordo com os modelos teóricos apresentados.....	43
3.5 – Apresentação e descrição do <i>software</i> empregado para a simulação do modelo de fila.....	45
3.6 – Otimização do sistema de descarga de cana.....	49
3. – Resultados obtidos e discussões.....	48
3.7 – Validação do modelo.....	60

CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS PARA A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR, ÁLCOOL E SUB-PRODUTOS.....	68
4. – Introdução.....	68
4.1 – Operações comuns à produção de açúcar e álcool.....	68
4.2 – Operações exclusivas da fabricação de açúcar.....	74
4.3 – Operações exclusivas da produção de álcool.....	80
4.4 – Processos de transformação do bagaço.....	84
 CAPÍTULO 5 – CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE PRODUTORA PARA FINS DE OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO.....	87
5. – Introdução.....	87
5.1 – Caracterização da unidade produtora.....	88
5.2 – Caracterização dos equipamentos por operação unitária.....	90
5.3 – Equipamentos exclusivos da produção de álcool.....	93
5.4 – Equipamentos exclusivos da produção de açúcar.....	93
5.5 – Rendimentos das operações unitárias.....	96
 CAPÍTULO 6 – MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO.....	97
6. – Introdução	97
6.1 – Base de cálculo e discussão das restrições.....	99
6.2 – Modelagem matemática.....	122
6.3 - Simulação.....	130
6.4 – Interpretação dos parâmetros relativos ao <i>solver</i>	130
6.5 – Resultados obtidos e discussões.....	133
 CAPÍTULO 7 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS...150	
7.1 – Conclusões referentes à modelagem da fila de espera.....	151
7.2 – Conclusões referentes à programação linear.....	153
7.3 – Sugestões para trabalhos futuros.....	154
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	158

APÊNDICES

Apêndice A – Aplicação do teste de aderência para a taxa de chegadas.....	162
Apêndice B – Aplicação do teste de aderência para a taxa de serviço.....	162
Apêndice C – Base de cálculo para o custo de espera e do serviço.....	163
Apêndice D – Cálculos das novas taxas de chegadas.....	166
Apêndice E – Memória de cálculo das taxas de chegadas para o cenário 2.....	167
Apêndice F – Legenda dos fluxos de materiais.....	168
Apêndice G – Fluxograma do processo de fabricação de açúcar e álcool.....	170
Apêndice H – Memória de cálculo para a secagem do açúcar.....	171
Apêndice I – Simulação da Programação Linear pelo <i>solver</i>	172
Apêndice J – Relatório de resposta da otimização.....	175
Apêndice K – Relatório de sensibilidade da otimização da produção.....	178

ANEXOS

Anexo A – Modelo de certificado de pesagem da safra 2003/2004.....	180
Anexo B – Modelo de certificado de pesagem da safra 1997/1998.....	185

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA DO MODELO SELECIONADO PARA ESTUDO E BREVE INTRODUÇÃO À PROBLEMÁTICA SUCRO-ALCOOLEIRA

1. 1. FUNDAMENTAÇÃO TÉCNICA DO MODELO EM ESTUDO

O segmento agro-industrial denominado *sucro-alcooleiro*, engloba as unidades que produzem açúcar e álcool simultaneamente (usinas com destilarias anexas) e as que produzem apenas álcool, as denominadas destilarias autônomas.

De um modo geral, as atividades sucro-alcooleiras podem ser desagregadas em três grandes áreas inter-relacionadas, muito embora, cada uma com suas funções específicas, quais sejam: agrícola, industrial e comercial. A área agrícola, é a fornecedora do recurso a ser transformado, a cana-de-açúcar, por sua vez, a área industrial consiste no processo de transformação da matéria-prima (insumos) em seus produtos e sub-produtos, envolvendo também as operações de estocagem; por fim, a área comercial refere-se ao segmento que irá ofertar os produtos ao mercado. A relação entre essas respectivas áreas, podem ser vistas na Figura 1.1.

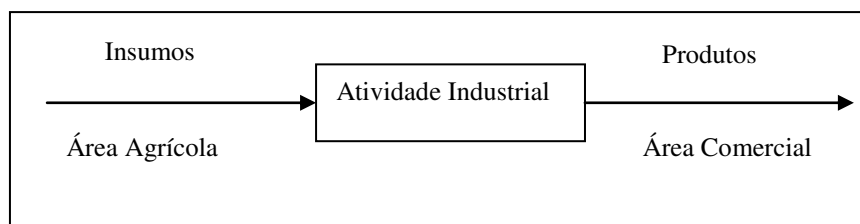


Figura 1.1. Inter-relação das áreas agrícola, industrial e comercial

Nesta representação, apesar das funções ocorrerem com uma hierarquia do sentido a montante para jusante, a relação inversa também existe, na medida em que a área comercial, retro-alimenta a industrial, demandando produtos para atendimento ao mercado. Por sua vez, a industrial, de modo análogo, demanda matéria-prima, cana-de-açúcar, para conversão em produtos finais.

A hipótese aqui formulada sugere, portanto, que apesar da função comercial posicionar-se no extremo da hierarquia da organização, a maximização do lucro da mesma, poderá ter origem no atendimento ao equilíbrio da capacidade de transporte e descarregamento de cana, com a capacidade de moagem da função industrial. Assim, com

base nas limitações do processamento de matéria-prima, faz-se necessário primeiro otimizar a infra-estrutura de transporte e descarga de cana, para que posteriormente possa-se obter o lucro máximo.

O detalhamento da relação de precedência entre as áreas agrícola, industrial e comercial, foi estabelecida de acordo com o princípio da decomposição hierárquica, com base no IDEF - *Integrated Computer Aided Manufacturing Definition* (08) onde o fluxo de informações existentes entre cada função é mapeado, possibilitando uma visão gradativa do processo. A Figura (1.3), apresenta essa relação.

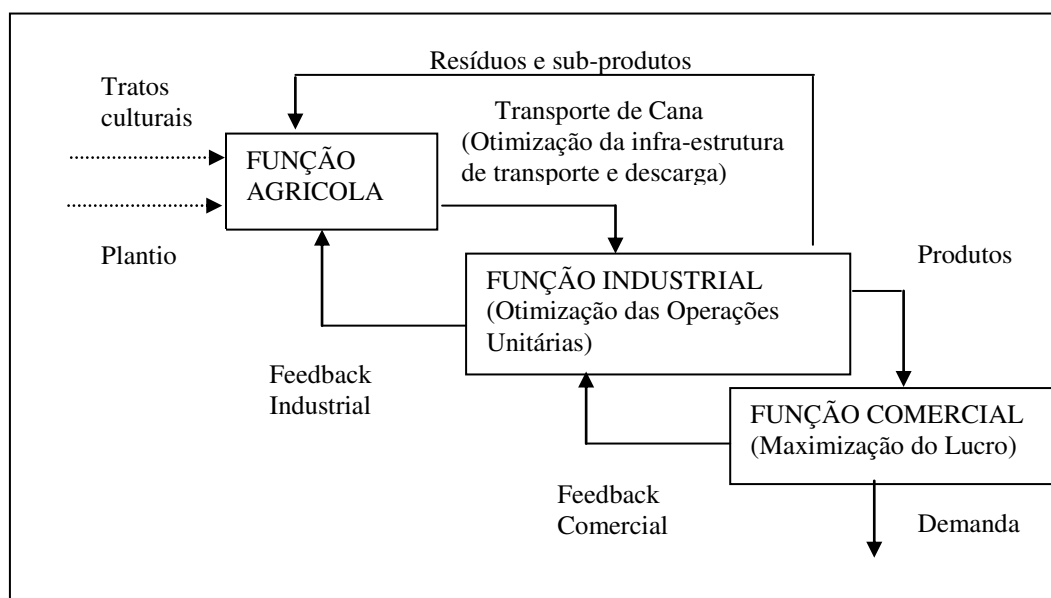


Figura 1.3. Decomposição hierárquica das funções sucro-alcooleiras

Fonte: Diagrama adaptado com base na referência (08)

Nesse sentido, conforme ilustrado na Figura 1.2, e em consonância com a hipótese formulada, o presente estudo tem por objetivo otimizar, de modo seqüenciado e interligado, as seguintes etapas do processo produtivo: 1) o transporte de cana da lavoura à Usina; 2) as operações industriais e, 3) a área comercial. Quanto ao transporte, o objetivo é estabelecer o número ótimo de veículos transportadores de cana e de instalações de descarga que possam oferecer uma vazão de matéria-prima em equilíbrio com a capacidade de moagem, empregando-se, para tanto, modelos matemáticos de *filas de espera*. Em relação aos dois últimos objetivos, operações industriais, cujo interesse é otimizar a vazão dos efluentes em cada operação unitária; e a área comercial, que direciona-se para a maximização do lucro, a ferramenta empregada será a programação linear.

A seqüência apresentada na Figura 1.2, indica que na medida da reação do mercado, a função comercial emite uma resposta à função industrial, que poderá ser positiva (para aumentar a produção) ou negativa (para diminuí-la). O que se deseja, na prática, é encontrar as quantidades ótimas das correntes geradas em cada operação unitária da função industrial, dentro do intervalo de variação de demanda estabelecido. A comercialização dessas quantidades ótimas é que resultará no lucro máximo. O modelo matemático usado na maximização, requer o estabelecimento de restrições sobre a função lucro (função objetivo). Neste caso, as restrições compreenderam três categorias: a) Capacidade produtiva; b) Mercado e, c) Capacidade de armazenagem. Evidentemente que a quantidade ótima pode mudar de valor a depender dos limites dessas restrições, e dos valores dos lucros unitários da função objetivo. Constatase, desse modo, que para cada resposta comercial, a reação industrial será de indicar a produção de um *mix* de quantidades ótimas de produtos e sub-produtos; ou seja, para cada estímulo comercial ocorrerá uma correspondente reação industrial. A maximização do lucro, portanto, estará vinculada à otimização da produção industrial. Nesse sentido, as operações unitárias foram rigorosamente estudadas, sendo estabelecidas as suas restrições com base nas limitações de capacidade e de seus balanços de massa.

De modo equivalente, a função industrial também faz retro-alimentação com a função agrícola, demandando maior ou menor quantidade de matéria-prima. Na verdade, isso ocorre devido ao estímulo comercial, que ao demandar produtos para a comercialização, exige, indiretamente, que uma certa quantidade de cana seja processada na usina. Por sua vez, a função agrícola ao buscar atender às necessidades da indústria, precisa ajustar a sua demanda por insumos, os quais, resumidamente, correspondem ao plantio e tratamentos culturais da lavoura. Desse modo, resíduos e/ou sub-produtos da produção industrial, são também devolvidos à área agrícola, que os usam como adubos e fertilizantes, sendo, portanto, considerados como insumos. Esses recursos também tomaram parte na estrutura do modelo de programação linear, representando outras restrições ao mesmo.

A resposta agrícola à demanda da usina se caracteriza pelo transporte de cana da lavoura à indústria. Essa transferência é realizada através de veículos transportadores, geralmente caminhões com diferentes capacidades, devendo fazê-la a uma taxa de entrega ajustada à capacidade de moagem da usina. O controle desta taxa, corresponde ao terceiro e

último objetivo. Esta fase trata do elo de ligação entre a área agrícola e a industrial e, conseqüentemente, à comercial, já que a maximização do lucro está vinculado à oferta de matéria-prima para a indústria.

Para atender às necessidades de descarga dos veículos, as usinas devem dispor de adequada infra-estrutura, as quais devem ser suficientes para equilibrarem-se às taxas de esmagamento de cana. Nesse ponto o estudo também oferece contribuições técnicas. Decorre que em função das características desses serviços (transporte e descarga), eventos não-planejados (aleatórios) contribuem para as suas incertezas, registrando falhas no planejamento da produção. Esta etapa, de caráter não-determinístico, configura-se como o gargalo do processo produtivo, demandando, um rigoroso controle, a fim de neutralizar os seus efeitos.

Grandes desequilíbrios entre as taxas de descarga e de moagem de cana proporcionam perdas que, conseqüentemente, implicam em custos, os quais estão relacionados tanto ao comprometimento da qualidade da matéria-prima, quanto ao uso otimizado dos recursos de transporte e descarga. Esses desequilíbrios, por sua vez, decorrem de variações que também podem ser observadas tanto na taxa de chegada, quanto na de descarga de matéria-prima, advindas, dentre outros eventos, do número de veículos disponíveis, do tempo necessário aos seus respectivos carregamentos nas áreas de colheita e descarregamentos na usina, das distâncias a serem percorridas, além de fenômenos aleatórios tais como, quebra de veículos e/ou dos equipamentos de descarga (tombadores), bem como da ocorrência de chuvas na área de influência da lavoura.

A modelagem matemática empregada para otimizar o fluxo de veículos e de descarga de cana, foi feita com base nos fundamentos de *teoria de filas*. Isto é aplicável, porque as diferenças entre as taxas de chegadas e de serviço de descarga prestadas pelos tombadores, podem formar de *filas de espera*. Evidentemente, que quanto maior o número de instalações de serviço, menor será o *custo pela espera* deste. Entretanto, oferecer maior capacidade de serviço, aumenta o *custo de sua oferta*. O que se objetiva, portanto, é encontrar a quantidade ótima do número de tombadores à disposição na usina, de modo a minimizar os custos totais (espera mais a oferta do serviço). Desse modo, com o número de tombadores otimizado, podem-se ajustar cenários de infra-estrutura de transporte que melhor atenda à capacidade instalada na usina. Esses cenários, dizem respeito a possíveis

variações no número e capacidade dos veículos que, de acordo com a taxa média de chegada na indústria e a correspondente taxa de serviço dos tombadores, descarregam certa quantidade de cana, a qual poderá ou não atender à demanda diária da fábrica.

Com esta etapa, otimização do transporte e descarga de cana, as três funções (agrícola, industrial e comercial) ficam interligadas, entretanto, conforme já evidenciado, com hierarquia do sentido da função agrícola para a função comercial.

Cabe ainda ressaltar, que o estudo da otimização do transporte e descarregamento, foi realizado tomando-se por base usina instalada no interior do Estado da Bahia, com capacidade de moagem de 170 toneladas de cana/hora. A usina foi escolhida por inserir-se numa escala que pode ser classificada como de média produção, portanto, representativa no contexto sucro-alcooleiro nacional, bem como pela disponibilidade de acesso a grande parte de seus dados operacionais, indispensáveis para a formulação do modelo aqui proposto.

De outro lado, como os dados das operações unitárias industriais desta usina mostraram-se insuficientes para a estruturação do modelo de programação linear, adotou-se para tanto, uma usina de referência, cujo processo industrial foi detalhadamente estudado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo –IPT (09), tendo sido realizados, inclusive, os balanços de massa de todas as operações, o que viabilizaria, como de fato viabilizou, a implementação das restrições, as quais são parte integrante do referido modelo matemático. Contudo, a capacidade de moagem dimensionada para esta usina é de 517 toneladas de cana/h, logo, três vezes maior do que a usina anterior.

Essa diferença, entretanto, não inviabiliza o modelo geral, pois, ainda que estivessem sincronizados, o gargalo continuaria na etapa de transporte e descarga de cana, por estarem submetidos a eventos aleatórios muito mais impactantes, a exemplo de chuvas, do que na área industrial. Além do mais, o transporte e descarga apresentam comportamento discreto, enquanto que o sistema de produção industrial, é contínuo.

Outra evidência da viabilidade da proposta, é que a mesma estabelece um modelo generalista, cuja metodologia, poderá ser replicada para quaisquer capacidades produtivas. A aplicabilidade da mesma, encontra-se fundamentada no Capítulo 3, item 3.7 (Validação do modelo matemático).

Por fim, pode-se afirmar que associado a todos os fundamentos aqui apresentados, deve-se ainda acrescentar como justificativa da escolha deste segmento para estudo, a sua indiscutível importância para o país, na medida em que destaca-se nos planos econômico, social, ambiental e tecnológico, dentre outros. Nesse contexto, ao movimentar em torno de R\$40 bilhões/ano, a indústria sucro-alcooleira gera, aproximadamente, 4,0 milhões de empregos, apesar de promover um expressivo impacto ambiental diante de seus 4,9 milhões de ha cultivados com cana, a industrialização desta, e seus efluentes gerados (04).

1.2. AS PECULIARIDADES DA PRODUÇÃO SUCRO-ALCOOLEIRA

A opção nacional pela implementação de projetos sucro-alcooleiros anexos ou autônomos é relativamente recente, e advém da criação do Pró-Álcool, em 1975. Antes desse período, era mais freqüente implementar unidades exclusivamente açucareiras e comercializar o mel final, sub-produto da fabricação do açúcar, para indústrias de aguardente. Entretanto, com a política energética instituída em função das crises internacionais do petróleo (1973 e 1979), associada às baixas nos preços do açúcar no mercado internacional, produzir o combustível exclusivamente ou em associação com o adoçante, tornou-se mais comum. Neste caso, o mel final passou a ser incorporado como matéria-prima complementar para a produção de álcool, ao invés de ser comercializado.

Com a consolidação dos produtos sucro-alcooleiros em seus respectivos mercados, durante as últimas décadas surgiram no país muitas unidades produtoras, tanto autônomas quanto anexas, totalizando, atualmente, em torno de 318 indústrias, conforme consta no plano de safra 2003/2004, elaborado pelo Ministério de Agricultura (01), apesar de muitas, pelo menos provisoriamente, terem interrompido o seu processo produtivo.

Por sua vez, a possibilidade de se obter em um mesmo empreendimento um *mix* de produtos demandados por mercados distintos, tais como o açúcar, os álcoois anidro e hidratado, além da energia elétrica gerada pela queima do bagaço, bem como de subprodutos, quais sejam o bagaço para outros fins, a torta de filtro e a vinhaça, torna a cadeia produtiva deste segmento, bastante peculiar quando comparada a outros. Entretanto, essa diversidade de opções muitas vezes é conflitante, sobretudo no contexto do livre mercado, no qual está inserido. É compreensível, por exemplo, que em ambientes de preços mais

favoráveis para álcool ou para açúcar, ocorra o deslocamento da moagem de cana em suas correspondentes direções.

Contudo, apesar dessa pretensa flexibilidade ter limitações, geralmente em função da capacidade instalada e dos contratos de médio prazo previamente assumidos, tais limites certamente podem ser explorados, já que a posição de Governo é, por princípio constitucional, não intervencionista. A Lei 9.498/97, por exemplo, que dispõe sobre a política energética nacional, consolida tais princípios, na medida em que liberou, a partir de então, o mercado de combustíveis. De outro lado, os desequilíbrios no *mix* de produção, não se dá apenas entre açúcar e álcool, mas também entre os próprios álcoois (anidro e hidratado) e, em casos mais atípicos com a geração de eletricidade. Em todos esses possíveis cenários, o parâmetro de decisão em relação ao o que e quanto produzir, corresponderia aos preços praticados nos mercados interno e externo e, conseqüentemente, ao lucro por unidade de produto comercializado.

Observa-se, entretanto, que fatos como a insuficiência de suprimento do álcool hidratado, em função do desabastecimento ocorrido no início dos anos 90, o qual implicou no descrédito do consumidor em relação a este produto, associado à citada liberação do mercado de combustíveis, a partir da qual várias destilarias não competitivas foram desativadas, conduziram ao acentuado declínio das vendas de veículos novos a movidos exclusivamente a álcool hidratado, com o conseqüente sucateamento da frota. Tais fatos promoveram ainda o deslocamento da produção na direção do álcool anidro, o qual, por compor a gasolina C, tem demanda e preços diretamente atrelados à mesma. Deste modo, a sua oferta foi superior à do hidratado até a safra 2000/2001, fato que já era previsível, diante do desinteresse por veículos a álcool até este período.

A partir de então, com a relativa estabilidade dos preços do álcool hidratado quando comparado à gasolina, combinado com a tecnologia *flexfuel*, particularmente a bi-combustível, desenvolvida por diferentes montadoras, a exemplo da General Motors, da Fiat e da Volkswagem, a qual já encontra-se disponível, sendo oferecidos modelos de automóveis que podem ser abastecidos tanto com álcool hidratado quanto com gasolina (veículos híbridos), vem mudando este cenário, resultando em aumentos na oferta do hidratado.

A produção e venda do hidratado e de veículos *flexfuel*, por exemplo, ajudam a confirmar essa hipótese, sugerindo haver uma estreita relação entre ambas. Segundo a ÚNICA (02), na safra 2001/2002, produziram-se 5,070 bilhões de litros de etanol hidratado, época em que ainda não se dispunha dos veículos híbridos. Entretanto, segundo a ANFAVEA (03), a partir de 2003, quando os mesmos foram colocados no mercado, as vendas atingiram a marca de 49.264 unidades, contra uma oferta de álcool de 5,607 bilhões de litros. Já em 2004, as vendas dos veículos *flex* aumentaram expressivamente saltando para 332.507 unidades, tendo a produção de álcool também aumentado, passando para 5,897 bilhões de litros. Ao final de 2005 foram vendidos 846.710 veículos e a produção de álcool saltado para 8,170 bilhões de litros. Considerando-se que as vendas de carros exclusivamente a álcool é inexpressiva (inferior a 3,0%) e que, ao contrário, a dos veículos *flex* já representa 16% das mesmas, pode-se inferir que a relação entre ambas é de fato positiva.

A regressão linear, Figura 1.3 abaixo, gerada a partir dos dados da UNICA (02) e ANFAVEA (03), revela um coeficiente de determinação linear (R^2) muito próximo de 1 (0,982), confirmando que as vendas dos veículos *flex*, explica, de fato, o aumento da demanda e, portanto, da produção do álcool.

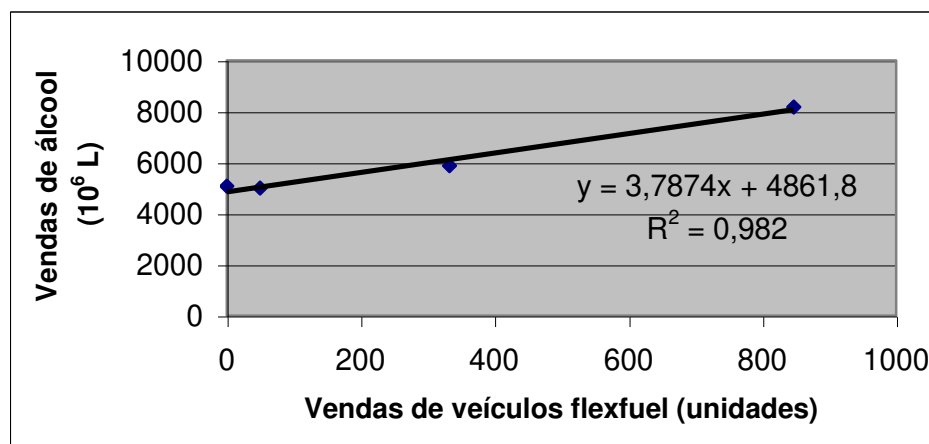


Figura 1.3. Relação entre vendas de veículos *flexfuel* e álcool (2002/2005)

Esta possível tendência, entretanto, poderá estar ameaçada, e até mesmo não se consolidar, visto que o uso automotivo do gás natural, concorrente tanto da gasolina quanto do álcool, tem sido crescente na matriz energética nacional. Contudo, apesar de sua relativa facilidade de obtenção quando comparado ao álcool, associado à sua oferta interna,

principalmente diante das importações da Bolívia em contratos de longo prazo, deve-se lembrar que o gás, assim como a gasolina, é de origem fóssil e, caso venha a prevalecer o apelo ambiental internacional pelo uso de fontes renováveis, conforme estabelece o Protocolo de Kyoto, o álcool teria maiores chances de permanecer no mercado, caso se adotasse uma estrutura tarifária que fosse mais penalizadora ao gás natural do que ao etanol.

Quanto ao açúcar, deve-se inicialmente destacar que o país é um dos principais produtores mundiais, tendo inclusive aumentado a sua participação nos últimos dez anos (1994-2004) saindo de 12,05 milhões de toneladas (11,10%) para 20,95 milhões de toneladas (15,36%), superando a produção Européia que, apesar ter sido o principal produtor até 1994, quando produziu 15,49 milhões de toneladas (14,20%), e ter aumentado a sua produção em 2004 para 19,43 milhões de toneladas (14,24%), situa-se atualmente em segundo lugar. A Tabela 1.1, mostra os dados de produção dos principais países produtores.

Tabela 1.1. Evolução da produção mundial de açúcar entre os anos de 1994 e 2004

1994			2004		
Produtores	Produção	Participação	Produtores	Produção	Participação
	(10 ⁻⁶ t)	(%)		(10 ⁻⁶ t)	(%)
Europa	15,49	14,20	Brasil	20,95	15,36
Brasil	12,05	11,10	Europa	19,43	14,24
Índia	11,04	10,20	Índia	17,41	12,76
EUA	7,06	6,50	China	9,27	6,80
China	5,96	5,40	EUA	8,24	6,04
Austrália	5,00	3,90	Austrália	5,52	4,05
Cuba	4,22	3,60	Tailândia	5,46	4,00
Tailândia	3,87	3,40	México	5,03	3,69
México	2,54	2,6	Cuba	3,88	2,84
Outros	34,51	31,73	Outros	41,20	30,22
Total	108,77	100,00		136,39	100,00

Fonte: Referência 04.

Ainda em relação à Tabela 1.1, pode-se observar que outras mudanças nas posições de produção também ocorreram durante este período. A produção chinesa, por exemplo, superou a norte-americana, enquanto que a tailandesa passou a ocupar a posição cubana. A produção atual de Cuba encontra-se atualmente em posição inferior à mexicana.

De um modo geral, a produção mundial saltou de 108,77 milhões de toneladas para a 136,39 milhões de toneladas, registrando um crescimento médio de 2,27% a. a. A expectativa (04) é a produção brasileira crescer 3,8% ao ano entre 2000 e 2010, enquanto que a projeção mundial é de aumentar 1,7% ao ano.

No que se refere à comercialização, o Brasil também mantém-se em destaque, sempre ocupando as primeiras posições entre as nações exportadoras. Entre os anos de 1996 e 2001, por exemplo, o país assegurou continuamente a primeira posição, seguido da União Européia e da Austrália. A Tabela 1.2, revela os dados de exportação para o período indicado.

Tabela 1.2. Principais exportadores de açúcar entre 1996 e 2001 (em 1.000 t)

Ano País	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Brasil	5800	5800	7200	8750	11300	7700
Europa	4629	5228	6361	5239	6138	6600
Austrália	4242	4564	4564	4076	4123	3118
Outros	19611	20333	17271	18131	17996	19107
Total	34282	35925	35386	36196	39557	36525

Fonte: Referência 04.

Nos dois últimos anos, a participação nacional no mercado internacional continuou sendo expressiva. Em 2003, alcançou o pico de 12,91 milhões de toneladas exportadas, apesar de que em 2004, a quantidade remetida ao exterior tenha diminuído para 7,83 milhões toneladas, mas ainda assim vem assumindo a liderança neste mercado. Esta destacada participação nacional é favorecida pelos baixos custos relativos do produto nacional, o qual situa-se em torno de US\$180/t (média paulista). O custo de produção na Argentina, por exemplo é de US\$300/t, nos Estados Unidos é de US\$580; na Europa chega a custar US\$600/tonelada (04). A Figura 1.4, apresenta os custos de produção de açúcar

cristal em diferentes países (Brasil, África do Sul, Austrália, Argentina, Estados Unidos e a União Européia).

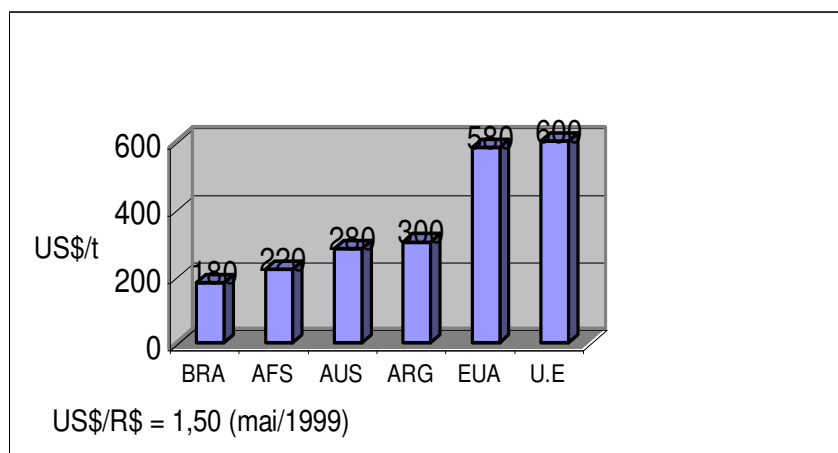


Figura 1.4. Custos da produção de açúcar

Fonte: Elaborado com base nas Referências (04) e (05)

Por sua vez, o mercado importador internacional, é bem menos concentrado que o exportador. Pelo menos 40% do total de açúcar importado, vem sendo mantido por oito nações, destacando-se a Rússia, que sozinha demandou 14,64% de todo o açúcar importado mundialmente. A Tabela 1.3, apresenta os dados de importação, por nação, ao longo dos anos compreendidos entre 1996 e 2001.

Tabela 1.3. Principais importadores de açúcar entre 1996 e 2001(em 1.000 t)

País \ Ano	1996	1997	1998	1999	2000	2001
Rússia	3.200	3.600	4.210	5.400	5.170	5.200
EUA	2.536	2.517	1.962	1.665	1.484	1.405
Europa	1.813	1.808	1.829	1.867	1.786	1.850
Japão	1.673	1.608	1.592	1.542	1.650	1.555
Coréia	1.411	1.497	1.424	1.403	1.514	1.520
Malásia	1.120	1.166	1.065	1.188	1.158	1.257
Canadá	1.174	1.057	1.061	1.141	1.142	1.170
Irã	940	1.200	1.110	1.075	1.315	1.200
Outros	18.590	18.350	18.241	19.426	19.891	20.371
Total	32.457	32.803	32.494	34.697	35.110	35.528

Fonte: Referência 04.

A maioria desses países entretanto, impõem regras disciplinadoras, e em muitos casos protecionistas, para a importação deste produto. Um dos exemplos de maior destaque,

refere-se aos EUA, que pratica basicamente dois mecanismos de controle: o primeiro de cunho mais protecionista do mercado interno, denominado *loan rate*, que funciona como um empréstimo financeiro a industriais locais de modo a viabilizar a formação de estoques estratégicos; e o segundo, com base em um sistema de cotas distribuídas entre os vários países exportadores, principalmente da América Latina e das Antilhas, cuja prática, de qualquer modo, tem contribuído para o controle da oferta mundial (06).

De um modo geral, há uma expectativa do panorama comercial melhorar ainda mais para o Brasil e outros países exportadores no curto e médio prazos, diante da decisão da Organização Mundial de Comércio (OMC), em última instância, de condenar os países europeus que, ao subsidiarem suas respectivas produções, mascaravam custos. Além do mais, muitos países união européia importavam o produto de suas ex-colônias na África, pagando preços em torno de US\$600/tonelada, e re-exportavam a preços de até três vezes maior. Com isto vinham obtendo, artificialmente, vantagem competitiva. Com esta decisão, que impede os países europeus penalizados de exportarem seus excedentes, estima-se que o Brasil poderá disputar parte de um mercado de aproximadamente 3,5 milhões de toneladas de açúcar anualmente (07).

Entretanto, apesar de ser o maior produtor e exportador mundial de açúcar, a situação nacional é peculiar e bastante delicada. O país tem neste produto um importante elemento em favor da balança comercial, portanto é de pleno interesse o equilíbrio do mercado internacional, fato que exige rigoroso controle da produção. Um dado particular, porém, é que o Brasil ainda é o único país em que a produção de açúcar está necessariamente relacionada à produção de álcool combustível em grande escala. Em caso de desestímulo do consumo do combustível, bastaria que apenas 70% da cana, hoje empregada na produção de álcool, fosse desviada para açúcar para causar uma oferta adicional de 18 milhões de toneladas, implicando em graves desequilíbrios na oferta mundial.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS E MODELOS MATEMÁTICOS EM TEORIA DE FILAS

2. CONCEITO DE “TEORIA DE FILAS”

Segundo PRADO (10) a teoria de filas envolve o conceito matemático das filas, ou filas de espera. A formação destas é um fenômeno comum que ocorre sempre que a demanda por determinado serviço excede à capacidade de fornecer aquele serviço.

Deve-se entretanto, entender, que a formação de filas poderá até mesmo ocorrer quando a demanda for inferior à capacidade do atendimento. Isto porque os clientes geralmente chegam em intervalos aleatórios, e não em intervalos espaçados igualmente, além do mais, alguns serviços podem demandar mais tempo de atendimento do que outros. Portanto, as chegadas e os serviços podem apresentar diferentes graus de variabilidades e, como resultado, o sistema às vezes fica temporariamente sobrecarregado, originando a formação de filas. A base para esta compreensão está no valor *médio*, ou seja como tanto a taxa de chegadas de clientes quanto a de atendimento desses variam, deve-se conhecer os seus respectivos valores *médios*, e analisar os seus comportamentos em torno desta.

Nesse contexto, segundo LARRY & KRAJEWSKI (11), tomar decisões em relação à capacidade a ser ofertada para o atendimento de determinado processo, tanto em instalações industriais quanto de serviços, constituem ações muito frequentes a serem adotadas pelos gerentes de produção. Assim, oferecer capacidade de atendimento acima da demanda, poderá implicar em custos de ociosidade. Por outro lado, não oferecer capacidade de serviço suficiente pode implicar na formação das referidas *filas de espera* que, às vezes, se tornam excessivamente longas, com um custo associado ao tempo de espera e, em alguns casos, de consequências inaceitáveis.

De modo geral uma espera excessiva implica em custos elevados, podendo envolver o custo social, o custo de perda de clientes, o custo de empregados desocupados ou de equipamentos ociosos, dentre outros. Deve-se portanto como meta buscar atingir um balanceamento econômico entre o custo do serviço e o custo associado à espera deste serviço.

O comportamento matemático de uma *fila de espera* modelado, deverá contribuir com informações essenciais necessárias a uma boa decisão, predizendo as várias características das fila, a exemplo do número de clientes no sistema e o tempo de espera necessário para o seu atendimento, dentre outros parâmetros.

De acordo com BRONSON (12), as origens sobre os fundamentos em teoria de filas baseiam-se em estudos do início do século XIX (1908) com equipamentos de discagem telefônica automática, feitos pelo Engenheiro de Telecomunicações dinamarquês Agner Karup Erlang (Copenhagen Telephone Company), a fim de solucionar o congestionamento das chamadas. Desde aquela época, estes princípios têm sido aplicados em uma ampla faixa de problemas.

2.1. CARACTERIZAÇÃO DOS ELEMENTOS DAS FILAS DE ESPERA

Segundo WAGNER (13), a análise dos problemas de filas tem início com uma descrição dos elementos básicos que estão presentes em todas as situações, sendo o seu comportamento afetado pelas variações destes elementos. As principais características a serem consideradas, e que, portanto, devem ser compreendidas e definidas quando do estabelecimento de um modelo de fila, serão discutidas a seguir.

2.1.2. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DE FILAS

As filas se formam a partir do instante em que os “clientes” em determinado sistema passam a requerer serviços de acordo com mecanismos definidos. O processo transcorre na medida em que um membro da fila é selecionado para ser servido segundo alguma regra conhecida como a disciplina da fila (ou do serviço). O serviço necessário é, então, realizado para o cliente pelo mecanismo de serviço, depois do que o cliente deixa o sistema de fila.

2.1.2.1. A disciplina da fila

Refere-se à ordem pela qual os membros da fila são selecionados para serem servidos. Esta poderá estar de acordo com a ordem da chegada, tais como *primeiro a chegar, primeiro a sair*, também conhecida como FIFO (do inglês, *frist in, first out*), *último a entrar primeiro a sair* denominada de LIFO (do inglês, *last in, frist out*), ou mesmo uma regra de prioridades que possa ser estabelecida, dentre outros procedimentos disciplinadores.

2.1.2.2. A Fonte de chegada (População Potencial)

A fonte de chegada corresponde ao número de clientes que possam requisitar serviços população. Este número pode ser finito ou infinito (de modo que a fonte de chegada é dita ser limitada ou ilimitada). Como os cálculos para os casos infinitos já estão consolidados, esta suposição é freqüentemente feita, mesmo que o tamanho real seja algum número finito relativamente grande. Na verdade o caso finito é mais difícil analiticamente, vez que o número de clientes no sistema de fila pode influenciar o número de clientes potenciais fora do sistema a qualquer tempo.

O padrão estatístico no qual os clientes são gerados no tempo também precisa ser especificado. A suposição comum é o número de clientes gerados até que qualquer tempo específico tenha uma distribuição de probabilidade de Poisson. Esta distribuição é caracterizada pela aleatoriedade dos eventos (chegadas), porém a uma certa taxa média. De maneira equivalente, supõe-se que a distribuição de probabilidade do tempo entre chegadas consecutivas seja uma distribuição exponencial. Entretanto, apesar destas serem as suposições mais freqüentes, é indispensável que testes estatísticos indiquem o tipo de distribuição de probabilidade associada àquele sistema de fila.

2.1.2.3. O mecanismo de serviço

O mecanismo de serviço consiste de uma ou mais instalações de serviços cada uma das quais contendo um número finito de canais de serviço em série ou paralelos, denominados de servidores.

O intervalo de tempo desde o começo do serviço até sua conclusão, para um cliente numa instalação de serviço é chamado de tempo de serviço. De modo equivalente ao processo de chegada, o mecanismo de serviço deve especificar a distribuição de probabilidade dos tempos envolvidos. A distribuição de tempo de serviço mais comum suposta na prática (facilmente tratável analiticamente do que qualquer outra) é a distribuição exponencial. Outras distribuições importantes são a distribuição degenerada (tempo de serviço constante) e a distribuição de Erlang (gama).

2.2. TERMINOLOGIA E NOTACÃO

De modo geral os conceitos e notações abaixo são freqüentemente empregados nos estudos de teoria das filas, quais sejam:

$N(t)$ = Número de clientes no sistema de fila no tempo $t(t > 0)$

$P_n(t)$ = probabilidade de que exatamente n clientes estejam no sistema de fila no tempo t , dado o número no tempo 0.

s = Número de servidores no sistema de fila (geralmente são atendentes ou equipamentos)

λ_n = Taxa média de chegada (número médio esperado de chegadas por tempo unitário) de novos clientes, quando n clientes estão no sistema.

μ_n = Taxa média de serviço para todo o sistema (número médio esperado de clientes concluindo o serviço por tempo unitário), quando n clientes estão no sistema.

$\rho = \lambda/\mu$, corresponde ao fator de utilização da instalação de serviço, ou seja a fração de tempo esperada em que os servidores estão ocupados.

Quando um sistema de fila tenha começado a operar recentemente, o estado do sistema (número de clientes no sistema) será grandemente afetado pelo estado inicial e pelo tempo decorrido desde então. O sistema é, então, dito estar em condição transiente. Entretanto, depois de já ter passado tempo suficiente, o estado do sistema se torna essencialmente independente do estado inicial e do tempo decorrido. Neste caso diz-se que o sistema alcançou a condição de estado de equilíbrio. A teoria das filas trabalha geralmente na condição de estado de equilíbrio, em parte porque o caso transiente é mais difícil analiticamente. Portanto, a notação seguinte diz respeito aos resultados do estado de equilíbrio:

N = número de clientes no sistema de fila

P_n = Probabilidade de que exatamente n clientes estejam no sistema de fila

L = Número de clientes esperado no sistema de fila (inclui atendimento)

L_q = Número de clientes esperando apenas na fila

W = Tempo de espera no sistema (inclui atendimento)

W_q = Tempo de espera apenas na fila para cada cliente

f = fator percentual de utilização da instalação de serviço

2.3. O PROCESSO DE VIDA E MORTE

A maioria dos modelos de filas elementares supõe que as chegadas (clientes chegando) e saídas (clientes saindo) do sistema de fila ocorrem de acordo com um processo de *vida e morte*. O termo *vida* se refere à chegada de um novo cliente ao sistema de fila, e morte se refere à partida de um cliente já servido. Este processo descreve probabilisticamente como $N(t)$ muda à medida que t aumenta. De maneira geral este processo estabelece que *vidas e mortes* individuais ocorrem aleatoriamente, onde suas taxas médias de ocorrência dependem somente do estado atual do sistema.

As suposições do processo de vida e morte são as seguintes:

1. Dado $N(t) = n$, a distribuição de probabilidade atual do tempo restante até à vida (chegada) seguinte é exponencial, com parâmetro λ_n ($n = 0, 1, 2, \dots$).
2. Dado $N(t) = n$, a distribuição de probabilidade atual do tempo restante até conclusão do serviço seguinte é exponencial, com parâmetro μ_n ($n = 1, 2, \dots$).
3. Somente uma vida ou morte pode ocorrer de cada vez.

2.4. MODELOS DE FILAS BASEADOS NO PROCESSO DE VIDA E MORTE

A maioria dos modelos teóricos de filas já desenvolvidos estão baseados neste processo. Por causa das suposições 1 e 2, estes modelos são ditos terem uma entrada de Poisson (já que, estatisticamente, se a distribuição dos tempos entre chegadas é exponencial, então a sua correspondente distribuição do número de chegadas obedeceria a uma distribuição de Poisson) e tempos de serviço exponenciais. Os modelos diferem apenas quanto às suposições de como os λ_n e os μ_n mudam com n .

Segundo HILLIER (14), modelar um sistema de fila consiste em se determinar a taxa média de chegadas (λ), a taxa média de serviço (μ) e o número de servidores necessários à operação, de modo que com essas variáveis de entrada, se possa prever o

número de clientes no sistema (L e L_q), os correspondentes tempos de espera (W e W_q) bem como a probabilidade de que exatamente n clientes estejam no sistema de fila (P_n), além da porcentagem de utilização da instalação de serviço (f).

A seguir serão discutidos os principais modelos, baseado no conceito de vida e morte. As deduções das equações que regem cada modelo, podem ser encontradas em WAGNER (13) e HILLIER (14).

2.4.1. O MODELO BÁSICO (TAXA DE CHEGADA E TAXA DE SERVIÇO CONSTANTES)

É bastante comum que taxa média de chegada (λ) e a taxa média de serviço (μ) por servidor ocupado de um sistema de fila sejam essencialmente constantes, independentemente do estado do sistema. Por isso o modelo básico faz essa suposição. Quando o sistema tem apenas um servidor único ($s=1$), isto implica que os parâmetros para o processo de vida e morte sejam λ_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) e μ_n ($n = 1, 2, \dots$).

Entretanto, quando o sistema tem servidores múltiplos ($s>1$), os μ_n não podem ser expressos tão simplesmente. Quando a taxa média de serviço por servidor ocupado for μ , a taxa média de serviço geral para n servidores ocupados terá que ser $n\mu$. Portanto, $\mu_n = n\mu$, quando $n \leq s$, enquanto que $\mu_n = s\mu$, quando $n \geq s$, de modo que todos os servidores estejam ocupados.

Quando a taxa média de serviço máxima ($s\mu$) exceder à taxa média de chegada (λ), ou seja, quando $\rho = \lambda/s\mu < 1$, diz-se que um sistema de fila que se ajuste a esse modelo alcançará, eventualmente, uma condição de estado de equilíbrio.

2.4.1.1. Resultados para o caso de servidor único ($s=1$)

$$P_o = 1 - \rho$$

$$P_n = (1 - \rho)\rho^n, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots$$

$$L = \lambda/(\mu - \lambda)$$

$$L_q = \lambda^2/(\mu(\mu - \lambda))$$

Quando $\lambda \geq s\mu$, de modo que a taxa de chegada excede a taxa média de serviço por servidor, a solução acima “explode” (uma vez que a soma para o cálculo de P_0 diverge). Para este caso a fila crescerá sem limite, podendo ser equilibrada aumentando-se o número de servidores.

2.4.1.2. Resultados para o caso de servidores múltiplos ($s > 1$)

Neste caso as equações de estado são:

$$P_0 = 1 / [\sum (\lambda/\mu)^n / n! + (\lambda/\mu)^s / s! \cdot (1 / (1 - \lambda/\mu s))]$$

$$P_n = [(\lambda/\mu)^n / n!] \cdot P_0, \text{ se } 0 \leq n \leq s; \text{ ou } P_n = [(\lambda/\mu)^n / s! s^{n-s}] \cdot P_0, \text{ se } n \geq s.$$

$$L_q = [P_0 (\lambda/\mu)^s \cdot \rho] / [s! (1 - \rho)]$$

$$W_q = L_q / \lambda$$

$$W = W_q + 1/\mu$$

$$L = (L_q + 1/\mu)$$

2.4.2. O MODELO BÁSICO COM UMA FILA FINITA

Como já foi mencionado anteriormente o número de clientes no sistema não pode exceder algum número específico (denotado por M). Qualquer cliente que chegue enquanto a fila estiver “lotada” é proibido de entrar no sistema e, portanto, sai para sempre. Do ponto de vista do processo de vida e morte, a taxa média de chegada no sistema nesses momentos se torna zero. Por isso, a única modificação necessária no modelo básico, para introduzir uma fila finita, é mudar os parâmetros λ_n para:

$$\lambda_n = \lambda, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, M-1; \text{ ou } \lambda_n = 0, \text{ para } n \geq M.$$

Como $\lambda_n = 0$ para alguns valores de n , um sistema de fila que se ajuste a esse modelo também alcançará eventualmente, uma condição de estado de equilíbrio.

2.4.2.1. Resultados para o caso único

$$P_n = (1 - \rho) \rho^n, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots, M.$$

$$L = (\rho / (1 - \rho)) - [(M + 1) \cdot \rho^{M+1}] / (1 - \rho^{M+1})$$

$$L_q = L - (1 - P_o)$$

$$W = L/\lambda$$

$$W_q = L_q/\lambda$$

2.4.2.2. Resultados para o caso de servidores múltiplos($s > 1$)

Como este modelo não permite mais de M clientes no sistema, este seria o número máximo de servidores que jamais poderia ser usado. Portanto deve-se estabelecer que $s \leq M$. Neste caso tem-se que:

P_n , é igual a:

$$(\lambda/\mu)^n/n!, \text{ para } n = 1, 2, \dots, s$$

$$(\lambda/\mu)^n/s!s^{n-s}P_o, \text{ para } n = s, s+1, \dots, M; \text{ e, } 0 \text{ para } n > M$$

$$P_o = 1/[1 + \sum_{n=1}^s (\lambda/\mu)^n/n! + (\lambda/\mu)^s/s! + \sum_{n=s+1}^M (\lambda/s\mu)^{n-s}]$$

$$L_q = [P_o(\lambda/\mu)^s \rho/s!(1-\rho)^2][1-\rho^{M-s} - (M-s)\rho^{M-s}(1-\rho)]$$

$$L = \sum_{n=0}^{s-1} nP_n + L_q + s(1 - \sum_{n=0}^{s-1} P_n)$$

$$W = L/\lambda^*, \text{ e}$$

$$W_q = L_q/\lambda^*, \text{ sendo } \lambda^* = \lambda(1-P_M)$$

2.4.3. O MODELO BÁSICO COM UMA FONTE DE CHEGADA LIMITADA

Neste caso o único desvio da versão original do modelo básico é que a fonte de chegada é limitada, isto é, o tamanho da população potencial seja finito, definido por M. Assim quando o número de clientes na fila for n ($n = 0, 1, 2, \dots$), haverá somente (M - n) clientes potenciais restando na fonte de chegada.

Note-se que cada membro da população potencial se altera entre estar dentro e fora do sistema de fila. Por isso, o análogo à versão original do modelo básico, o qual se ajusta a essa situação, supõe que o tempo fora de cada membro (intervalo de tempo entre sair do sistema até voltar outra vez) tem uma distribuição exponencial com parâmetro λ . Quando n

membros estão dentro e, portanto, (M-n) membros estão fora, a distribuição de probabilidade atual do tempo restante até à próxima chegada ao sistema de fila é a distribuição do mínimo dos tempos fora restantes para os últimos (M-n) membros. As propriedades 2 e 3 para a distribuição exponencial implica que esta distribuição tenha que ser exponencial com parâmetro mínimo de tempos $\lambda_n = (M-n)\lambda$

Como $\lambda_n = 0$ para $n = M$, um sistema de fila que se ajuste a este modelo irá, eventualmente, alcançar uma condição de estado de equilíbrio. Os resultados deste estado de equilíbrio disponíveis estão resumidos abaixo.

2.4.3.1. Para o caso de servidor único

$$P_o = \frac{1}{\sum_{n=0}^M [M!/(M-n)!] \cdot [(\lambda/\mu)]^n}$$

$$P_n = [M!/(M-n)!] \cdot [(\lambda/\mu)]^n \cdot P_o, \text{ para } n = 1, 2, \dots, M.$$

$$L_q = \sum_{n=1}^M (n-1) \cdot P_n$$

$$L = M - \mu/\lambda (1 - P_o)$$

$$W = L/\lambda^* \text{ e, } W_q = L_q/\lambda^*, \text{ sendo } \lambda^* = \lambda(M-L).$$

2.4.3.2. Para o caso de servidores múltiplos

Os valores de P_n podem ser admitidos como sendo iguais a:

$$[M!/(M-n)!n!] \cdot [(\lambda/\mu)]^n, \text{ para } n=1, 2, \dots, s$$

$$[M!/(M-n)!s!s^{n-s}] \cdot (\lambda/\mu)^n, \text{ para } n=s, s+1, \dots, M; \text{ e, } 0, \text{ para } n > M.$$

$$P_o = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} [M!/(M-n)!] (\lambda/\mu)^n + \sum_{n=s}^M [M!/(M-n)!s!s^{n-s}] (\lambda/\mu)^n}$$

$$L_q = \sum_{n=s}^M (n-s) P_n$$

$$L = \sum_{n=0}^{s-1} n P_n + L_q + s(1 - \sum_{n=0}^{s-1} P_n),$$

Por sua vez, W e W_q podem ser obtidos pelas mesmas equações do caso do servidor único.

Além do modelo básico acima discutido, que considera que a taxa média de serviço é sempre constante, independentemente de quantos clientes possa haver no sistema, dois outros modelos são de uso frequente no mecanismo de entendimento das filas de espera, quais sejam:

2.4.4. O MODELO DE TAXA DE SERVIÇO E/OU TAXA DE CHEGADA DEPENDENTE DO ESTADO

Quando existe uma longa fila é bastante provável que os servidores tendam a trabalhar mais depressa do que quando o acúmulo é pequeno ou inexistente. Esse aumento na taxa de serviço resulta do fato de que os servidores aumentam seus esforços quando estão sob pressão de uma longa fila (o modelo básico desconsiderava esse comportamento). Entretanto, pode também resultar, em parte, pelo fato de as metas estarem comprometidas, justificando a possibilidade de auxílio em certas fases do serviço.

Dado que observações práticas demonstram que a taxa média de serviço de fato aumenta à medida que o tamanho da fila é aumentado, faz-se necessário calcular as diferentes taxas de serviço quando existirem n clientes no sistema de fila (μ_n). Os fundamentos com as formulações destes cálculos, em função do número de servidores, são apresentados a seguir.

2.4.4.1. Formulação para o caso do servidor único

Neste caso $\mu_n = n^c \cdot \mu_1$, para $n=1,2,\dots$, onde:

n = número de clientes no sistema

μ_n = taxa média de serviço quando existem n clientes no sistema

$1/\mu_1$ = tempo de serviço *normal* esperado

c = “coeficiente de pressão”, constante positiva que indica o grau em que a taxa de serviço do sistema é afetada pelo estado do sistema.

Portanto, a seleção $c=1$, por exemplo levanta a hipótese de que a taxa média de serviço seja diretamente proporcional ao comprimento da fila n ; $c=1/2$, implica que a taxa média de serviço seja proporcional à raiz quadrada de n , e assim por diante. Os modelos de fila precedentes, supuseram, implicitamente, que $c = 0$.

Por outro lado, em lugar de se aumentar a taxa de serviço, um sistema de fila pode, alternativamente, reagir a uma longa fila, diminuindo a taxa de chegada. Isto pode ser feito, por exemplo, desviando alguns dos clientes que requerem serviços para outros servidores disponíveis na instalação de serviço. O modelo correspondente para descrever as taxas médias de chegada para este caso considera que:

$\lambda_n = (n + 1)^{-b} \lambda_0$, para $n=0,1,2,\dots$, onde b é uma constante cuja interpretação é análoga à de c .

Pode ainda ser usado um modelo que combina esses dois padrões, quando ambas as taxas (chegadas e serviço) são dependentes do estado. Neste caso, tem-se que:

$$\mu_n = n^a \mu_1$$

Sendo que para ambos os casos também são válidas as expressões abaixo:

$c = a+b$ e $\lambda/\mu_1 = \lambda_0/\mu$, para os quais existem resultados tabulados.

2.4.4.2. Formulação para o caso de servidores múltiplos

Neste caso, λ_n e μ_n , variam com o número de clientes por servidor, de modo equivalente como variam com n para o caso do servidor único. Assim, temos que:

$$\lambda_n = \lambda_0, \text{ se } n \leq s - 1, \text{ ou } (s/n+1)^b \lambda_0, \text{ se } n \geq s-1; \text{ e,}$$

$$\mu_n = n\mu_1, \text{ se } n \leq s, \text{ ou } (n/s)^a, \text{ se } n \geq s, \text{ sendo } c = a + b.$$

$$P_1 = \frac{(\lambda/\mu_1)}{n!} \cdot P_0 \quad L_q = L - (1 - P_0)$$

$$W_q = \frac{L_q}{\lambda}; \quad W = \frac{L}{\lambda};$$

Os resultados computacionais para P_0 , L_q e L , para diversos valores de c , λ_0/μ_1 , μ_n e s , estão disponíveis em forma de tabelas em algumas referências sobre o tema, a exemplo de CONWAY & MAXWELL (15). Uma vez determinado esses parâmetros, as demais variáveis de saída do modelo são obtidas pelas relações:

2.4.5. MODELOS DE FILAS COM DISTRIBUIÇÕES NÃO-EXPONENCIAIS

Todos os modelos precedentes se basearam no processo de vida e morte. Fez-se necessário, portanto, que ambos os tempos, entre chegadas e de serviço, tivessem distribuições exponenciais. Este tipo de distribuição tem muitas propriedades convenientes para a teoria das filas, porém oferece um ajuste razoável apenas para certos tipos de operações. Por isso é importante se dispor de outros modelos que usem distribuições alternativas. Na maioria das vezes, a análise matemática de tais modelos é extremamente complexa ou mesmo não obtiveram sucesso, entretanto o mais importante deles pode ser descrito abaixo.

2.4.5.1. Modelo de servidor único, com entrada de Poisson e qualquer distribuição de tempo de Serviço

A principal exigência para se compor este modelo é o conhecimento da média ($1/\mu$) e a variância (σ^2) da correspondente distribuição. Ressalte-se ainda, que os modelos desenvolvidos para este caso além de servirem apenas para os casos de servidor único, exigem que o processo de chegadas, seja de Poisson.

Assim sendo, qualquer um destes modelos de filas pode alcançar uma condição de estado de equilíbrio, se $\rho = \lambda/\mu < 1$. Os resultados do estado de equilíbrio para este modelo geral é o seguinte:

$$P_0 = 1 - \rho,$$

$$L_q = (\lambda^2 \sigma^2 - \rho^2)/2(1 - \rho)$$

$$L = \rho + L_q$$

$$W_q = L_q/\lambda; e,$$

$$W = W_q + 1/\mu$$

Note-se que para qualquer tempo de serviço fixo esperado $1/\mu$, os valores de L_q , L , W_q e W , aumentam à medida que a variância (σ^2) é aumentada. Este é um resultado importante porque indica que, além de sua velocidade média, a consistência do servidor também tem um peso importante no desempenho da instalação de serviço.

Este, na verdade, corresponde a um modelo genérico, do qual derivam dois outros: 1) quando os tempos de serviço são constantes (equiivale a impor a condição de $\sigma^2 = 0$) e, 2) quando o desvio-padrão (σ) situa-se entre uma variação nula ($\sigma = 0$) e um grau de elevada variabilidade ($\sigma = 1/\mu$), ou seja, $0 < \sigma < 1/\mu$. Esta última situação, coerente com a maioria das operações de serviço, é melhor representada pela distribuição de *Erlang*. Entretanto, também só estão disponíveis resultados para os casos de servidor único, logo de aplicabilidade restrita.

2.4.6. MODELOS SEM UMA CHEGADA DE POISSON

Todos os modelos de filas apresentados anteriormente trazem como premissa básica um processo de chegada de Poisson. Porém, esta suposição não pode ser aplicada quando as chegadas são programadas, de alguma maneira, de modo a não permitir que elas ocorram aleatoriamente. Neste caso, seria necessário um outro modelo.

Segundo GROSS (16) as análises matemáticas deste caso, além de serem bastante complexas, contemplam, na maioria das vezes, apenas os casos de servidor único. Entretanto, desde que os tempos de serviço tenham uma distribuição exponencial, estão disponíveis três modelos para estes casos, contudo apenas para servidor único, conforme apresentados a seguir:

- O primeiro caso, admite qualquer distribuição dos tempos entre chegadas.

- O segundo modelo supõe que os tempos entre chegadas sejam iguais a alguma constante fixa, a qual representaria um sistema de fila onde as chegadas fossem programadas para ocorrerem em intervalos regulares.
- O terceiro modelo supõe uma distribuição de tempo entre chegadas de Erlang, cujo comportamento é intermediário entre chegadas regularmente programadas (constante) e completamente aleatórias (exponenciais).

2.5. OTIMIZAÇÃO DE UM MODELO DE FILAS

Conforme já destacado nos fundamentos apresentados, bem como de acordo com ANDRADE (17), o objetivo em se modelar um sistema de fila e, portanto, se determinar a taxa média de chegadas (λ), a taxa média de serviço (μ) e o número de servidores, é fazer com que o seu funcionamento seja otimizado, em relação à adequação de custos e à capacidade das instalações.

A adequação dos custos diz respeito à minimização do tempo de espera no sistema de fila, o qual está diretamente associado ao número de instalações de serviço (que mede o nível do serviço prestado). Observa-se, que à medida em que se aumenta o número de servidores (s), reduz-se o custo da espera por este serviço (CW). Porém, ofertar mais instalações de serviço, implica no aumento do custo de sua oferta (CS). Deste modo, o valor do custo total (CT), corresponderá ao somatório dessas duas parcelas, ou seja, $CT = CW + CS$.

A análise do comportamento gráfico do $CT \times \text{Nível de Serviço}$, revela, conforme apresenta a Figura 2.1, uma situação relativamente conflitante, mas que poderá ser solucionada com a compensação entre os custos da espera média para ser atendido, e o de fornecer o correspondente serviço. Matematicamente, refere-se a encontrar a solução ótima, ou seja, o número de servidores, que implique na minimização do custo total.

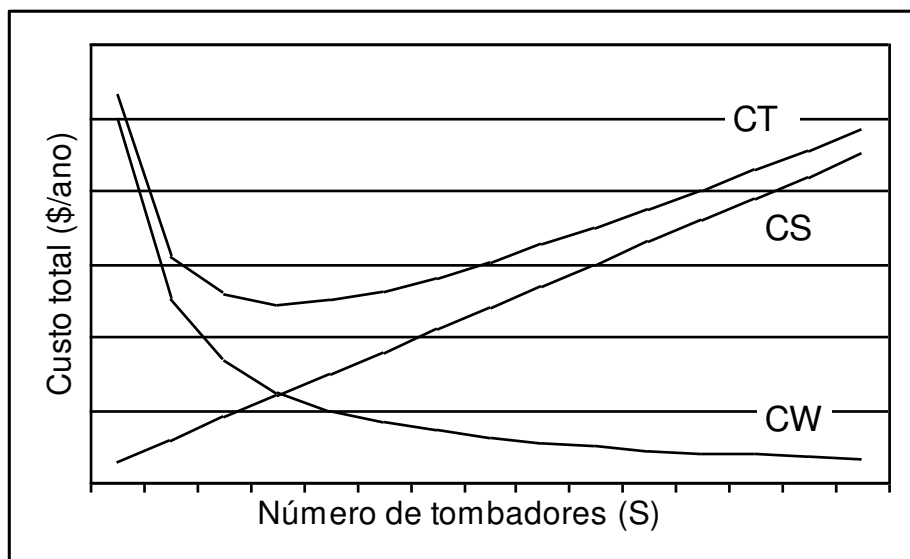


Figura 2.1. Custo total envolvido na oferta e espera pelo serviço

O custo pela espera do serviço (CW), é proporcional ao tempo pelo qual o cliente espera para ser servido (W) o qual depende do número de clientes no sistema de fila (L).

Uma vez modelado o sistema de fila, ou seja, determinadas as taxas ótimas de chegadas e de serviço, bem como o número de servidores, espera-se que o mesmo seja capaz de prever o número de clientes em espera, no sistema (L) e na fila (L_q), bem como os seus correspondentes tempos de espera, no sistema (W_q), e na fila (W), para que o custo total seja mínimo. Um sistema de fila modelado, deverá prever ainda, a sua taxa de ocupação ($\lambda/s\mu$), bem como a probabilidade de n clientes estarem presentes no mesmo (P_n).

De um modo geral, os fundamentos aqui apresentados, tem por objetivo servir de base às suas aplicações no contexto do segmento sucro-alcooleiro, no que se refere aos estudos para atendimento da necessidade ótima de matéria-prima a ser processada na indústria, conforme será discutido no capítulo seguinte (Capítulo 3), bem como para a modelagem matemática, com a finalidade de maximização do lucro total, que encontra-se fundamentada no Capítulo 6.

CAPÍTULO 3

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A OTIMIZAÇÃO DO FLUXO DE TRANSPORTE E DESCARGA DE CANA NA USINA

3. CARACTERIZAÇÃO DA INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTE.

Para a construção do modelo de filas aplicado à indústria sucro-alcooleira será tomado como referência a Usina Aliança, a qual localiza-se no interior baiano, mais precisamente no município de Amélia Rodrigues (aproximadamente a 100km da capital). Esta usina produz açúcar e álcool a partir de cana-de-açúcar, cuja capacidade de processamento de matéria-prima é de 170 t de cana/h (ou 4.080 t de cana/dia).

O atendimento à demanda das moendas (equipamento onde a cana é esmagada para a retirada do caldo para posterior processamento) é feito por um conjunto de veículos transportadores, composto por 50 caminhões, que realizam em média sete viagens diariamente, transportando cana da lavoura à indústria. A potência dos motores dos caminhões, os classificam como veículos do tipo *toco*. A Usina dispõe ainda de um reduzido número de veículos auxiliares, geralmente tratores, que transportam apenas um pequeno volume de matéria-prima cultivada nas vizinhanças da área industrial. O transporte por meio de tratores, entretanto, é irregular apenas se justificando em casos de dificuldades de acesso dos caminhões.

As operações de descarga, são realizadas por equipamentos mecânicos denominados de *guindastes* (ou *tombadores*), que levantam e transferem a carga de cana de cada caminhão para a seção de moagem da mesma. Os guindastes mais frequentemente usados pelas usinas correspondem aos do tipo *Hilo*, os quais caracterizam-se pela realização do tombamento apenas da carga (outros tipos de *guindastes* tombam a lateral do caminhão, deslocando a sua carga para o interior da “bandeja” que alimenta as moendas).

As instalações de descarga de cana da Usina, dispõem de três guindastes, equipados com cabos de aço. Uma vez envolvida a carga nos cabos, o movimento do guindaste faz a transferência desta para o interior do espaço de provisionamento de matéria-prima ou diretamente sobre a bandeja de *alimentação*, cuja inclinação facilita a imediata transferência para a esteira mecânica, a qual conduzirá continuamente o volume descarregado na direção do conjunto de moagem. A operação de descarga atende um veículo de cada vez por cada *guindaste* disponível.

3.1. O FLUXO DOS CAMINHÕES PARA A USINA

Em linhas gerais o transporte de cana da lavoura para a indústria ocorre de acordo com o fluxograma contido na Figura 3.1, a seguir:

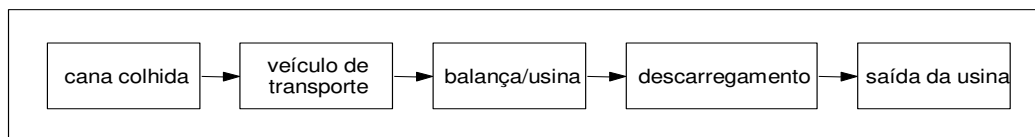


Figura 3.1. Fluxograma simplificado do transporte de cana para a indústria.

Destaca-se, entretanto, que esta é uma representação simplificada, já que etapas intermediárias poderiam também compor o sistema, a exemplo do estacionamento de parte dos caminhões junto ao laboratório para a retirada de amostras para análise.

Outra maneira de visualizar esta sequência é através da Figura 3.2, que apresenta a formação das filas propriamente ditas, durante o processo de descarga.



Figura 3.2. Fila para o descarregamento dos caminhões na Usina

Ao entrar na instalação industrial o motorista pára o veículo com a carga de cana sobre a balança onde é registrado o peso bruto, a data e o horário de entrada.

Em seguida o veículo é conduzido para um dos três *tombadores* de cana selecionado onde aguarda a sua vez de descarregar, caso o servidor esteja ocupado, ou o faz imediatamente em caso de disponibilidade deste. O processo de descarregamento é realizado por *guindastes* do tipo *Hilo*, A Figura 3.3, ilustra esta operação.



Figura 3.3. Guindaste *Hilo* em operação na Usina Aliança

É justamente nesta etapa do processo que podem ocorrer a formação das *filas de espera* dos caminhões que aguardam para o descarregamento.

Uma vez concluído o serviço o veículo deixa a área industrial passando novamente pela balança (lado oposto) a fim de registrar o horário de saída e o seu peso (tara). Assim, por diferença, é calculado o peso líquido da carga que foi entregue. A Usina não processa cana *picada* (colhida e pré-triturada pelas próprias colheitadeiras), mas sim cana do tipo *inteira*. Isto poderá fazer diferença para efeito da estruturação do modelo, já que nas unidades que processam este tipo de cana, os veículos transportadores podem ter prioridade no descarregamento, alterando a disciplina da fila.

As operações de descarregamento são realizadas diária e continuamente sendo registradas em relatórios denominados de *certificado de pesagem*. Cada tombador, evidentemente, atende um veículo por cada operação.

Antes de deixar a plataforma, entretanto, o operário faz a limpeza da carroceria do veículo, a qual consiste na retirada da cana residual que ficou retida na mesma, transferido-a à bandeja de recepção, que alimenta a moenda.

3.2. METODOLOGIA

A fim de se coletar dados para o desenvolvimento do modelo, foram realizadas visitas à usina em diversos dias das safras 2002/2003 e 2003/2004, oportunidade em que o processo agro-industrial foi visualizado e analisado em seu todo, tendo sido feito, inclusive, o acompanhamento de inúmeras operações de carga e descarga dos veículos.

Foram disponibilizados para o estudo deste processo, *certificados de pesagem* para diferentes dias da safra 2003/2004, totalizando aproximadamente, 1.349 descarregamentos, e uma carga total de 21.592,98 toneladas, o que resulta numa carga média de 12,03 toneladas/veículo de transporte. Os referidos *certificados* correspondem às seguintes datas: 21/10/2003; 13/11/2003; 12/12/2003; 21/01/2004; 21/02/2004 e 12/03/2004. Cópias de alguns destes *certificados*, encontram-se no Anexo A.

Essas datas foram escolhidas por representarem um período de relativa estabilidade do processo de carregamento, transporte e descarga de cana, provavelmente fora da fase *transiente*, situando-se na faixa mais regular do período de safra, que geralmente situa-se desde o final do mês de setembro, até o final do mês de março do ano posterior. Fora deste intervalo as ocorrências de chuvas tornam-se mais frequentes e intensas, fazendo com que as operações de colheita e transporte sejam interrompidas.

Deve-se ainda considerar que, no final da safra (a partir do final de março), a disponibilidade de matéria-prima torna-se mais reduzida, diminuindo bastante a taxa de colheita de cana e, conseqüentemente de carregamento e transporte para a usina.

Os dados de cada *certificado de pesagem* foram agrupados em intervalos horários, compreendendo 24 horas/dia, de acordo com as datas analisadas, tendo sido contemplados todos os turnos de trabalho da usina, em períodos assim distribuídos:

- Período madrugada (de 00:00 h às 06:00 h)
- Período matutino (de 06:00 h às 12:00 h)
- Período almoço (de 12:00 h às 14:00 h)
- Período vespertino (de 14:00 h às 19:00 h)
- Período noturno (de 19:00 h às 24:00 h)

Este procedimento foi adotado para favorecer o tratamento estatístico (distribuições de probabilidades) das taxas de chegada (λ) e de serviço (μ) dos veículos à usina. Na verdade, são parâmetros básicos de todos os modelos de filas.

3.2.1 TRATAMENTO COM A FILTRAÇÃO DOS DADOS

Cronometragens do processo de tombamento da carga, realizadas *in loco*, revelaram que caso não ocorram problemas nestas operações, que impliquem em elevados tempos de indisponibilidade dos tombadores (na maioria dos casos associados a questões de ordem mecânica, tais como ruptura dos cabos de aço dos guindastes que envolvem a carga no caminhão), o tempo de descarga situa-se desde em torno de 5 minutos a até em torno 15 minutos, estando aí incluídos o tempo de limpeza da carroceria na própria plataforma.

Quando esses problemas se manifestam, o tratamento dos dados contidos nos *certificados de pesagem*, revelaram tempos de permanência dos veículos no pátio da usina bastante discrepantes, algumas vezes superiores a horas. Tais constatações estão também associadas, em muitos casos, a problemas de quebra do veículo, interrupções da moagem ou por eventuais necessidades dos seus condutores.

Para a eliminação dos dados *discrepantes*, fez-se a *simetrização* de dados, conforme descreve PINHEIRO (18), tendo sido eliminados aproximadamente 9,0 % dos dados contidos nos *certificados*. O recurso informatizado para tanto consistiu no *software* “MINITAB STATISTIC PROFESSIONAL”, com base em seu assistente de operações denominado de “box-plot”.

3.3. MODELAGEM DA FILA DOS CAMINHÕES NA USINA ALIANÇA

Segundo HILLIER (14), a modelagem de um sistema de fila inicia-se com a determinação da taxa média de chegadas (λ), da taxa média de serviço (μ) e do número de servidores necessários à operação, de modo que o seu funcionamento seja otimizado, em relação à adequação de custos e à capacidade das instalações.

Conforme discutido no capítulo 2, a adequação de custos diz respeito à minimização do tempo de espera na fila, o qual está associado ao número de instalações de serviço (que mede o nível do serviço prestado). No presente estudo, o objetivo será determinar o número ótimo de guindastes *Hilo* em operação, de modo que o custo total (CT), correspondente ao somatório dos custos para a disponibilidade destes (CS) com os custos da espera dos caminhões *toco* (CW), ou seja, $CT = CS + CW$, seja minimizado.

Uma vez modelado sistema de fila, tendo sido inclusive calculadas as taxas ótimas de chegadas e de serviço, bem como o número de servidores necessários, o modelo deverá ser capaz de prever o número de clientes em espera, no sistema (L) e na fila (L_q), bem como os seus correspondentes tempos de espera, no sistema (W_q), e na fila (W). Uma fila devidamente modelada, deverá predizer ainda a taxa de ocupação do sistema ($\lambda/s\mu$), bem como a probabilidade de n clientes estarem presentes no sistema de fila (P_n).

3.3.1. IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PARA AS CHEGADAS E OS TEMPOS DE SERVIÇO.

Conforme já salientado, para a determinação do modelo de filas a ser empregado, faz-se necessário a identificação, com base em comprovações estatísticas, do comportamento tanto das distribuições de probabilidades das chegadas dos veículos, quanto das distribuições dos tempos de serviços correspondentes.

Conforme visto no Capítulo 2, os fundamentos teóricos dos modelos de filas, estão baseados no princípio de *vida e morte*, onde, no qual, as chegadas normalmente ocorrem segundo um processo de Poisson, enquanto que os serviços apresentam comportamento de uma exponencial negativa. Ocorre, entretanto, que os resultados obtidos por meio de amostras nem sempre concordam exatamente com os teóricos esperados, de acordo com as regras de probabilidade supostas convergentes.

Segundo SPIEGEL (19), pode-se, investigar, através de *testes de hipóteses*, se de fato existe convergência dos dados amostrais (distribuições empíricas) com as distribuições teóricas, aplicando-se o teste do *Qui-Quadrado* (χ^2), para efeito de investigação da aderência entre as frequências observadas e as esperadas.

3.3.1.1. Aplicação do teste *Qui-Quadrado* (χ^2) para a taxa de chegadas (λ)

O Número de chegadas na Usina foi contabilizado em intervalos horários durante os dias listados nos certificados de pesagem. As chegadas horárias para o dia 13/11/2003, encontram-se na Tabela 3.1. Entre 00:00 e 01:00h, chegaram 8 veículos, e entre 01:00h e 02:00h, chegaram 7 veículos, e assim sucessivamente até serem completadas as 24 horas (entre 23:00 e 24:00h, chegaram 3 veículos). A Tabela 3.1, conforme a seguir, apresenta o número de chegadas por cada intervalo horário.

Tabela 3.1. Número de chegadas à Usina em intervalos horários (00:00h a 24:00 h)

Intervalo	00/01h	01/02h	02/03h	03/04h	04/05h	05/06h
Chegadas	8	7	11	12	9	6
Intervalo	06/07h	07/08h	08/09h	09/10h	10/11h	11/12h
Chegadas	3	4	13	21	19	10
Intervalo	12/13h	13/14h	14/15h	15/16h	16/17h	17/18h
Chegadas	16	17	18	19	16	12
Intervalo	18/19h	19/20h	20/21h	21/22h	22/23h	23/24h

Chegadas	10	17	7	13	6	3
----------	----	----	---	----	---	---

Com base nos dados contidos na Tabela 3.1, conclui-se que chegam à Usina, em média 13,12 veículos por hora, já que são registrados 315 veículos no período de 24 horas.

Evidentemente que para este estudo estatístico não interessa apenas conhecer o valor médio, mas sim avaliar como estes valores se distribuem em torno da média. Isto deve ser feito calculando-se os respectivos valores de χ^2 (Qui-Quadrado). Para tanto, faz-se necessário conhecer as frequências dessas chegadas, tanto a observada quanto a esperada.

As frequências observadas foram extraídas da Tabela 3.1, simplesmente contando-se o número de ocorrências para cada ritmo (taxa) de chegadas dos veículos à Usina. A listagem dessas contagens em função das chegadas, estão apresentadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Frequências observadas em função do ritmo das chegadas

Chegadas/h	Freq. Observada (FO)	Chegadas/h	Freq. Observada (FO)
0	0	13	1
1	0	14	0
2	0	15	0
3	2	16	1
4	0	17	1
5	0	18	2
6	2	19	2
7	5	20	3
8	2	21	1
9	0	22	1
10	0	23	1
11	0	24	0
12	0	25	0

Por sua vez, as frequências esperadas devem ser calculadas para as mesmas hipóteses, ou seja estar de acordo com a regra de probabilidade pressuposta, no caso,

Poisson, a qual é dada por: $P(X) = \frac{\lambda^x \cdot e^{-\lambda}}{x!}$, onde o parâmetro λ corresponde à média (no

caso a taxa média de chegada, 13,12 chegadas/hora), e x, corresponde à expectativa de chegadas diferentes da média, de acordo com o número de chegadas. Frequências superiores a 25 chegadas/hora, são pouco prováveis, sendo o ponto de corte da Tabela 3.2.

As frequências esperadas (FE) poderão, então, ser calculadas multiplicando-se as probabilidades encontradas, $P(X)$, pela frequência acumulada (24 observações). Para um ritmo de 8 chegadas/hora, por exemplo, têm-se que, $P(X = 8) = 0,044$ e, portanto, a frequência esperada correspondente, será de 1,0 chegada/hora, contra 2,0 chegadas/hora observadas. As demais frequências esperadas, encontram-se na Tabela 3.2.

Tabela 3.3. Probabilidades e frequências esperadas das chegadas dos veículos.

X (Chegadas/h)	P(X)	FE	X (Chegadas/h)	P(X)	FE
0	1,99E-06	0,00005	13	1,10E-01	2,63698
1	2,62E-05	0,00063	14	1,03E-01	2,47217
2	1,72E-04	0,00412	15	9,01E-02	2,16315
3	7,52E-04	0,01804	16	7,39E-02	1,77446
4	2,47E-03	0,05919	17	5,70E-02	1,36999
5	6,47E-03	0,15539	18	4,16E-02	0,99895
6	1,42E-02	0,33991	19	2,87E-02	0,69006
7	2,65E-02	0,63732	20	1,88E-02	0,45285
8	4,35E-02	1,04561	21	1,17E-02	0,28303
9	6,35E-02	1,52485	22	7,03E-03	0,16886
10	8,34E-02	2,00136	23	4,01E-03	0,09636
11	9,95E-02	2,38799	24	2,19E-03	0,05270
12	1,09E-01	2,61187	25	1,1E-03	0,02767

Com esses dados, pode-se investigar a distribuição que mais se aproxima dos dados reais da Tabela 3.1. Assim, as frequências esperadas são calculadas em uma hipótese H_0 (aderir à distribuição em análise, no caso Poisson). Se para tanto o valor do χ^2 calculado for menor que o correspondente valor crítico (tabelado) para o nível de significância de 0,05 ($\chi^2_{0,95}$), conclui-se que as frequências observadas não diferem significativamente das esperadas e, portanto, deve-se aceitar H_0 . Caso contrário, a hipótese deve ser rejeitada.

A base informática empregada para o teste do *Qui-Quadrado* foi o aplicativo *excel da Microsoft*, a partir do seu *assistente de funções* estatísticas. Para a aplicação do teste faz-se necessário que sejam conhecidos os seguintes parâmetros: O valor do *Qui-Quadrado* (χ^2), que corresponde à medida da discrepância entre as frequências observadas (FO) e

esperadas (FE), e o número de graus de liberdade (v). Para este último, se os dados agrupados são distribuídos em k classes, então, $v = k - 1 - m$, já que as frequências esperadas somente podem ser calculadas mediante a estimativa de m parâmetros populacionais. No presente caso, $m = 1$, visto que apenas a média da distribuição de Poisson, neste caso a taxa de chegadas (λ), foi estimada com base em dados amostrais. Por sua vez, $k = 4$, ao invés das 25 classes estabelecidas, porque as frequências esperadas para chegadas horárias foram menores do que 5 e, nesses casos, de acordo com a metodologia, devem ser agrupadas até que superem 5, pois o teste não permite classes com valores menores que 5 (20). Assim, têm-se que $v = 4 - 1 - 1 = 2$.

Por sua vez, sendo o valor do *Qui-Quadrado* dado por

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(FO_J - FE_J)^2}{FE_J},$$

então, pelos dados amostrais das tabelas 3.2 e 3.3, conclui-se que $\chi^2 = 13,14$.

Comparando-se o valor de χ^2 calculado (13,14) com o tabelado (5,99), para um grau de significância de 0,05, e 2 graus de liberdade, conclui-se que a hipótese de aderência deve ser rejeitada, pois o valor calculado é superior ao tabelado. Este procedimento foi adotado para os demais dias listados, obtendo-se resultados equivalentes. O tratamento para o dia 13/11/2003, em planilha *excel*, com os seus resultados, encontram-se no Apêndice A.

3.3.1.2. Teste para o tempo de serviço

Aplicou-se, neste caso, teste equivalente ao realizado para a distribuição das chegadas. Os mesmos *certificados de pesagem* foram as fontes de dados amostrais; entretanto, a suposição mais freqüente é verificar se a distribuição dos tempos entre serviços segue a distribuição da exponencial negativa, já que muitas operações de serviço apresentam comportamento similar. A função densidade da exponencial negativa, é dada por, $f(x) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot x}$, onde λ corresponde ao tempo médio entre serviços e x , qualquer valor diferente da média.

Para a avaliação da distribuição correspondente, faz-se necessário tabular os tempos entre serviços relativos aos mesmos veículos em que foram apuradas as taxas de

chegadas. Esses tempos podem ser calculados pela diferença entre os instantes de duas chegadas sucessivas na balança de saída, porém exige a realização de inúmeras operações matemáticas que, mesmo sendo operações simples, seriam mais trabalhosas e poderiam incorrer em erros. Entretanto, segundo HILLER (14), suposição equivalente e estatisticamente aceita, é que se a distribuição do tempo entre chegadas é exponencial, então a distribuição do número de chegadas (saídas horárias dos veículos) ocorre de acordo com um processo de Poisson. Tal contagem, diferentemente do cálculo dos tempos entre chegadas, é de maior praticidade, com menor chance de erros no levantamento dos dados, já que os *boletins de pesagens* permitem uma contagem direta (tal como foi feito para as chegadas), sendo desnecessário se calcular a diferença entre os referidos tempos. Portanto, mais uma vez, este foi o procedimento adotado no presente estudo, viabilizando-se, assim, a aplicação do teste de hipótese (*Qui-Quadrado*), o qual também foi empregado para avaliar a aderência da distribuição real do serviço com a distribuição teórica.

Com base na mesma metodologia das chegadas, as correspondentes saídas foram contabilizadas em intervalos horários para os dias listados nos *certificados de pesagens*, cujos resultados para o dia 13/11/2003, encontram-se na Tabela 3.4. Entre 00:00h e 01:00h, saíram da usina 8 veículos, e entre 01:00h e 02:00h, saíram 7 veículos, e assim sucessivamente, até serem completadas as 24 horas.

Tabela 3.4. Número de saídas da Usina em intervalos horários (00:00h a 24:00 h)

Intervalo	00/01h	01/02h	02/03h	03/04h	04/05h	05/06h
Saídas	8	7	11	12	9	6
Intervalo	06/07h	07/08h	08/09h	09/10h	10/11h	11/12h
Saídas	3	4	13	21	19	10
Intervalo	12/13h	13/14h	14/15h	15/16h	16/17h	17/18h
Saídas	16	17	18	19	16	12
Intervalo	18/19h	19/20h	20/21h	21/22h	22/23h	23/24h
Saídas	10	17	7	13	6	3

Com a Tabela 3.4, pode-se observar que, em média, deixam a usina 11,54 veículos por hora (são 277 veículos no período de 24 horas). Assim, com o objetivo de se avaliar as variações em torno desta média, esses valores foram agrupados dentro dos respectivos

número de saídas horárias (ou chegadas/hora na plataforma de saída), podendo-se, portanto, se identificar as frequências observadas. Os resultados estão inseridos na Tabela 3.5.

Tabela 3.5. Frequências observadas em função do ritmo das saídas

Saídas/h	Freq. Observada (FO)	Saídas/h	Freq. Observada (FO)
0	0	13	2
1	0	14	0
2	0	15	0
3	2	16	2
4	1	17	2
5	0	18	1
6	2	19	2
7	2	20	0
8	1	21	1
9	1	22	0
10	2	23	0
11	1	24	0
12	2	25	0

Calculando-se agora as frequências esperadas com base também em um processo de Poisson, obtêm-se os resultados conforme a Tabela 3.6.

Tabela 3.6. Probabilidades e frequências esperadas das saídas dos veículos .

X (Saídas/h)	P(X)	FE	X (Saídas/h)	P(X)	FE
0	9,73E-6	0,00023	13	1,0E-1	2,41510
1	1,12E-4	0,00269	14	8,29E-2	1,99100
2	6,48E-4	0,01553	15	6,38E-2	1,53199
3	2,49E-3	0,05975	16	4,60E-2	1,10510
4	7,19E-3	0,17242	17	3,12E-2	0,75020
5	1,664E-2	0,39800	18	2,00E-2	0,48108
6	3,19E-2	0,76561	19	1,21E-2	0,292238
7	5,26E-2	1,26234	20	7,00E-3	0,168646
8	7,59E-2	1,82119	21	3,06E-3	0,092688
9	9,73E-2	2,33551	22	2,02E-3	0,048626
10	1,12E-1	2,69557	23	1,00E-3	0,024401
11	1,17E-1	2,82831	24	4,88E-4	0,011735

12	1,13E-1	2,72028	25	2,25E-4	0,005417
----	---------	---------	----	---------	----------

Aplicando-se os mesmos procedimentos estatísticos anteriores, têm-se, neste caso, que o número de graus de liberdade(v), é igual a 2, vez que as frequências esperadas menores que 5, do mesmo modo que no teste das chegadas (item **3.3.1.1**) foram agrupadas até superarem este valor. Deste modo, o número de classes (k) passou a ser 4. O valor de m também continuou sendo igual a 1 (taxa média das saídas estimada). Com esses dados, obteve-se o valor de *Qui-Quadrado* (χ^2) é igual a 1,95.

De modo análogo ao teste para a taxa de chegadas, comparando-se também o valor de χ^2 calculado (1,95) com o correspondente valor tabelado (7,82), para o nível de significância de 0,05 com 2 graus de liberdade, conclui-se que a hipótese de aderência não deve ser rejeitada, já que o valor calculado é menor do que o tabelado. O tratamento estatístico desses dados, em planilha *excel*, com os correspondentes resultados, encontram-se no Apêndice B.

Ainda que a aderência a *Poisson* não tenha sido confirmada para as chegadas, foi dada continuidade à modelagem admitindo-se como sendo verdadeira esta hipótese, vez que o fato de a mesma não ter sido confirmada para as média amostral encontrada (a média representa o parâmetro para a distribuição de *Poisson*), isto não impede que para outros valores destas a convergência não possa ocorrer.

3.3.2 O TAMANHO DA FONTE DE CHEGADA

Apesar do número de caminhões que possam solicitar os serviços dos tombadores ser finito (50 veículos), cada um deles poderá retornar à fila várias vezes ao longo do dia, durante o período da safra, fato que justificaria a consideração de um número infinito de *clientes*.

3.3.3. A CAPACIDADE DO SISTEMA

O número máximo permitido de veículos na fila foi considerado como sendo ilimitado, já que a disponibilidade de área interna e externa à indústria é suficiente para acomodar um número bastante grande de caminhões.

3.3.4. O NÚMERO DE SERVIDORES

Conforme já informado Usina dispõe de 03 (três) tombadores que podem operar 24 horas por dia. Destes apenas um descarrega diretamente sobre a esteira de moagem, os demais o fazem para o interior do galpão de provisionamento.

Estes servidores podem ser usados simultaneamente ou não a depender da demanda. A disponibilidade para operação dos mesmos, consiste em importante variável de decisão, e será tratada no item 3.6.

3.4. CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FILA DA USINA ALIANÇA, DE ACORDO COM OS MODELOS TEÓRICOS APRESENTADOS.

Após a análise dos modelos teóricos discutidos no Capítulo 2, associado ao estudo do comportamento do processo de fila na Usina contidos no presente capítulo, inclusive tomando-se por base os dados amostrais levantados e tratados, não se pode afirmar que o sistema de fila em estudo atenda, específica e integralmente, a um desses modelos.

Na verdade os modelos matemáticos desenvolvidos e disponíveis na atualidade, supõem taxas de chegadas que geralmente se enquadram em dois extremos: variação nula ($\sigma = 0$), aplicáveis em situações em que as chegadas possam ser rigorosamente planejadas, ou então com elevada variabilidade ($\sigma^2 = \lambda$), como é o caso da distribuição de Poisson. A mesma observação é também válida para as operações de serviço, e sua correspondente distribuição exponencial ($\sigma = 1/\lambda$). Contudo, entre esses dois extremos ($0 < \sigma < 1/\lambda$) é que espera-se encontrar a maioria das distribuições reais.

De um modo geral, as chegadas dos caminhões nas Usinas, por exemplo, ainda que tenham sido relativamente planejadas podem não seguir à risca o que fora estabelecido. As naturais variabilidades dos processos de corte, carregamento e transporte, impõem regras (*aleatórias!*) provavelmente diferentes do desejado. A intensidade das chuvas, quebra de máquinas no campo, e variações da produtividade dos operários durante as suas tarefas, são exemplos que devem justificar tais argumentos.

Por outro lado, as operações de descarregamento também são passíveis de serem igualmente afetadas por fatores equivalentes, como são os casos de problemas mecânicos nos guindastes e as variações dos tempos de limpeza das carrocerias dos caminhões, realizadas ainda nas plataformas de descarga. Entretanto, há de se esperar que tais variações

não sejam tão expressivas como pressupõe as distribuições *Poisson* e exponencial, nem desprezíveis a ponto de observar-se desvios nulos, sugerindo chegadas e taxas de serviço rigorosamente constantes.

Ocorre, entretanto, que não existem modelos matemáticos disponíveis que atendam exatamente às especificidades do processo de transporte de cana nas indústrias sucro-alcooleiras. Os modelos existentes, cujas taxas de chegada e de serviço situam-se entre os dois extremos comentados, são bastante limitados, contemplando apenas os casos para servidor único e, conseqüentemente, inapropriados para o contexto de tais indústrias.

Observou-se, ainda assim, que para determinadas datas analisadas, em alguns períodos, sobretudo alguns horários noturnos e as madrugadas, o comportamento estatístico mais se aproximava da não rejeição da hipótese de aderência, sugerindo que os modelos *markovianos* (*cadeias de Markov*, onde a taxa de chegadas é de *Poisson* e serviço é exponencial) possam representar o comportamento das filas nesses casos.

Portanto, ainda que os modelos teóricos disponíveis não sejam rigorosamente adequados para representar o sistema de filas nas Usinas, em função de não poderem ser rejeitados em seu todo, e diante da indisponibilidade de modelos que se ajustem especificamente a essa realidade, optou-se por empregá-los para simular o comportamento das filas de espera dos veículos transportadores para o presente caso, conforme será visto a seguir no item 3.5, a seguir.

Dentre os modelos evidenciados nos fundamentos teóricos (Capítulo 2), o correspondente ao **modelo básico**, caracterizado por terem as **taxas de chegada e de serviço dependentes do estado da fila, com população potencial infinita e capacidade do sistema ilimitada, é o que mais se ajusta ao comportamento do sistema de fila da Usina, conforme indicam os dados levantados e tratados no item 3.3.**

A não-confirmação quanto à total aderência ao modelo teórico assumido, bem como as argumentações quanto aos desvios daí decorrentes, serão tratadas no item referente à Validação do Modelo (item 3.7). Desde já, entretanto, fica evidenciado que um modelo completamente correto, é impossível, o que leva a supor a existência de limitações em relação à sua validação. No presente estudo, por exemplo, os testes de aderência

implementados basearam-se em inferência estatística, que a depender da amostra disponível poderá, de fato, chegar a conclusões não esperadas.

3.5. APRESENTAÇÃO E DESCRIÇÃO DO *SOFTWARE* EMPREGADO PARA A SIMULAÇÃO DO MODELO DE FILA.

Conforme apresentado, o conjunto de formulação para o dimensionamento dos sistemas de filas são bastante trabalhosos, envolvendo funções do tipo somatório, fatorial e exponencial que, a partir do exercício exclusivo do analista, poderia implicar em possíveis erros de cálculos.

Desta forma optou-se por um sistema informatizado, o *software* denominado QSB+ (*Quantitative Systems for Business Plus*), conforme descrito em CHANG & SULLIVAN (21), para a realização dos cálculos que estabeleçam o modelo de fila de descarregamento de cana mais próximo da realidade operacional da usina. Este sistema consiste em um aplicativo que contém e resolve diversos problemas aplicados aos sistemas de planejamento da produção, dentre os quais se inclui a análise das filas de espera, designado por “QUEUE”.

Trata-se de um *software* flexível que realiza simulações ao variar dados de entrada, a exemplo do número de servidores (s), taxa de chegadas (λ) e de serviço (μ), com suas respectivas distribuições de probabilidades. Em relação às duas últimas, conforme anteriormente discutido, foram assumidos comportamentos de Poisson e exponencial, respectivamente. Nesses casos, para o *QSB*⁺ tais distribuições são codificadas com o número 1.

Além destas variáveis de entrada fazem-se necessárias também definir outras, muito embora já discutidas na apresentação dos modelos teóricos, porém não necessariamente de acordo o presente modelo, dentre as quais podem-se destacar:

- “*Pressure coefficient*”

Está associado ao modelo que avalia a taxa de serviço dependente do “estado da fila”, ou seja, quando a fila está grande é provável que os servidores tendam a aumentar a taxa de serviço.

- “*Discouraged coefficient*”

Geralmente associado ao “modelo básico com fila finita” onde o sistema não suporta mais do que determinado número de clientes. Seria o conceito de fila “lotada”, pouco provável de ser aplicado ao caso em estudo, já que a capacidade de retenção de veículos no sistema de fila foi considerada como ilimitada, sendo o descarregamento praticamente obrigatório.

- “*Bulk arrival size*”

Consiste no conceito de “chegadas em grupo”, aplicável, por exemplo em casos onde um conjunto de clientes possam chegar exatamente no mesmo instante, como seria o caso de várias pessoas que cheguem a um terminal de serviço em um ônibus. Esta variável foi considerada como improvável de ser aplicado no caso em apreço, já que os eventos são discretos (veículos chegam individualmente às instalações industriais). Além do mais, durante o tratamento de dados tais *chegadas em grupo* ocorreram com frequência desprezível, a ponto de serem realmente desconsideradas, para efeito da configuração do modelo em discussão.

- “*Maximum number of customers allowed in the system*”

Seria o número máximo de caminhões permitidos no interior da Usina que, conforme já mencionado, foi assumido, neste caso, como sendo ilimitado.

- “*Maximum number of customers in the population*”

Seria o número máximo de caminhões que poderia demandar o serviço de descarga. Conforme também já mencionado, foi assumido como sendo infinito.

A seguir é apresentada a seqüência de entrada de dados na ordem original contida no QSB⁺ em seu aplicativo *QUEQUE*.

() *Number of servers*

() *Service rate(μ) per server per hour(or minute)*

() *Distribution of service time*

() *Standard deviation of service time in hour(or minute)*

() *Pressure coefficient*

() *Arrival rate(λ) per hour*

() *Distribution of interarrival time*

() *Standard deviation of interarrival time in hour(or minute)*

() *Discouraged coefficient*

() *Bulk arrival size*

() *Standard deviation of arrival size*

() *Maximum number of customers allowed in the system*

() *Maximum number of customers in the population*

Foi suposto que os processos de entrada e de serviço são do tipo M/M, também conhecidos como modelos *markovianos*. Neste caso, pelo aplicativo, é suficiente apenas indicar o número de servidores, as taxas de chegada (ou o tempo entre chegadas) e de serviço, com os respectivos tipos de distribuição (codificadas como 1), já que sendo a chegada um processo de *Poisson*, a distribuição do tempo entre chegadas será exponencial, e, portanto, o desvio padrão é o inverso da média ($1/\mu$ ou $1/\lambda$), de modo que para ambos os casos os mesmos (desvios-padrão) seriam automaticamente calculados.

Os dois últimos dados (número de clientes no sistema e na população), se não informados serão assumidos como sendo ilimitado e infinito, respectivamente.

3.5.1. TAXAS MÉDIAS DE CHEGADA E DE SERVIÇO (DADOS DE ENTRADA NO APLICATIVO *QUEUE*)

De acordo com o informado no item 3.4, as chegadas dos veículos, registradas nos *certificados de pesagem*, foram contabilizadas em intervalos horários, em função de cada período analisado. Desse modo, a partir das Tabelas 3.1 e 3.2, pôde-se calcular os valores médios de λ e μ , para cada um dos citados intervalos, cujos resultados encontram-se na

Tabela 3.7. Informa-se, porém, que como os tempos de serviço foram anotados em *minutos*, converteram-se as chegadas para a mesma unidade.

Tabela 3.7 Taxas médias de chegadas e de serviço por período analisado

Horários	λ (chegadas/minuto)	μ (descarregamentos/minuto)
00:00h/06:00h	0,103	0,149
6:00h/12:00h	0,247	0,194
12:00h/14:00h	0,270	0,275
14:00h/19:00h	0,347	0,250
19:00h/24:00h	0,188	0,154

Pelo exposto, constata-se que em função do período, tanto λ quanto μ , variam. Como o intervalo considerado diurno, entre 06:00h e 19:00h, corresponde a um período relativamente regular, observam-se os maiores valores para estas variáveis. No caso específico das taxas de serviço (descarregamentos/minuto) valores menores fora deste período refletem o efeito do que se denominou de *coeficiente de pressão*, pelo qual maiores demandas pelo serviço farão com que os servidores (operários que manipulam os tombadores) trabalhem de modo mais *rápido*, e o contrário mais *lentamente*.

Com esses dados de entrada, calculam-se os valores das variáveis:

L = Número médio de veículos no sistema

L_q = Número médio de veículos na fila

W = Tempo médio de espera no sistema

W_q = Tempo médio de espera na fila

P_o = Probabilidade que o servidor esteja inativo

f = Fator de ocupação do sistema

3.6. OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE DESCARGA DE CANA

De um modo geral, o descarregamento de cana nas usinas está limitado à capacidade de tombamento da carga, bem como da capacidade de moagem.

Conforme já informado, a usina Aliança dispõe de três equipamentos de descarga, cuja taxa de tombamento pode sofrer variações, em função da taxa de chegadas dos caminhões de cana e, portanto, do tamanho da fila. Assim, a opção pelo uso sucessivo de um ou mais desses equipamentos, dependerá do equilíbrio entre essas taxas, bem como do custo envolvido na oferta dos mesmos. Deste modo, propõe-se a otimização do sistema de tombamento, com base na minimização destes custos.

Por sua vez, a capacidade de moagem, está dimensionada para processar 170 t/h, para canas com teor de fibra entre 12% e 14%, que é o que de fato ocorre com as variedades cultivadas pela usina e seus fornecedores. Esta capacidade é relativamente constante, e vem sendo observada ao longo de várias safras. Evidentemente, que a usina busca explorar ao máximo esta capacidade na tentativa de obter maiores produções. Entretanto, o desbalanceamento entre a taxa de chegadas e de tombamento com a taxa de moagem, poderá implicar na formação de estoques de matéria-prima ou ociosidades. Ambos os casos, são indesejáveis, já que refletem em aumento desnecessário de custos. O primeiro caso, excesso de cana, poderá comprometer a qualidade da matéria-prima, visto que sendo esta perecível, terá modificada a sua composição à medida em que o tempo de acondicionamento aumenta. No segundo caso, têm-se o custo pelo não uso da capacidade instalada. Deste modo, propõe-se avaliar cenários de equilíbrio entre as taxas de descarregamento com a taxa de moagem praticada pela usina, de modo a minimizar a quantidade de cana que fica em estoque.

Ambos os casos, otimização do número de tombadores em operação, de acordo com a taxa de chegadas dos caminhões, e o balanceamento entre as capacidades de descarregamento e de moagem, serão objeto de análise nos itens 3.6.1 e 3.6.2.

3.6.1. OTIMIZAÇÃO DO NÚMERO DE TOMBADORES

Conforme fundamentado no Capítulo 2, deixar à disposição um maior número de guindastes para atender às operações de descarga, evidentemente que minimiza o tempo de espera dos veículos transportadores e, conseqüentemente, os custos associados a esta espera, tais como: *custo correspondente à ociosidade dos motoristas, custo de combustível para os veículos e os custos relativos à perda de sacarose contida na cana*. Este último, por envolver matéria-prima perecível, cujo rendimento em açúcar decai com o tempo, exige que a cana seja processada o mais rapidamente possível. O somatório destes custos, aqui representado por CW (custo associado à espera pelo serviço), será tanto menor quanto maior for o número de equipamentos de descarga à disposição.

Por outro lado, dispor de um maior número de guindastes em operação, implica também em custos que crescem à medida em que se oferecem mais opções de serviço. Alguns desses custos, estão associados a: *recursos humanos para operação dos guindastes, energia elétrica para acionamento dos motores, e manutenção dos equipamentos*. Por sua vez, o somatório destes custos, representado por CS (ou custo associado à oferta do serviço), será tanto maior quanto maior for o número de guindastes em operação.

Como CW diminui à medida que o número de tombadores aumenta, e nessas mesmas circunstâncias CS aumenta, o objetivo será encontrar o número ótimo de equipamentos à disposição do transporte, que minimize o custo total, aqui representado por CT, o qual corresponderá à soma de CW mais CS, ou seja, $CT = CW + CS$. Para efeito de simplificação do modelo, foi considerado que possíveis restrições associadas aos respectivos custos parciais sejam desprezíveis.

O Apêndice C apresenta a memória de cálculo dos custos horários tanto para CW (em função do número de veículos em espera para o descarregamento, L) quanto para CS (em função do número de tombadores em operação, s). As expressões destas equações, são:

$$CW = R\$ 15,50.L/h$$

$CS = R\$(13,39 + 12,34.f).s/h$, sendo f , a fração do tempo (%) em que os guindastes estão operantes.

Deste modo, serão calculados diferentes valores para o Custo Total (CT) fazendo-se variar o número de tombadores (L também varia em função de s) que deverão encontrar-

se disponíveis, o que resultará no maior ou menor número de veículos em espera. Evidentemente que o menor resultado encontrado para o Custo Total, indicará o correspondente número ótimo de tombadores para atender aos veículos de carga.

O objetivo da modelagem do sistema de fila na usina, portanto, será de avaliar cenários de minimização da *quantidade de matéria-prima em espera durante o sistema de descarregamento*, e da *taxa de cana que vai para estoque*, a partir da otimização do número de tombadores. Isto é de fundamental importância, já que estas variáveis influenciam o rendimento do processo de obtenção de açúcar e álcool (22).

3.6.2. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

De acordo com a divisão do dia (24 h) em períodos horários previamente assumidos, os cálculos do custo total (CT), serão apresentados e discutidos em função desta divisão. Os valores correspondentes às taxas de chegadas (λ) e de serviço (μ), estão disponíveis na Tabela 3.7.

3.6.2.1. Análise do turno de 00:00h a 06:00h

Corresponde a um período que, apesar do horário, apresenta uma baixa variação, tanto da taxa de chegadas (0,103 chegadas/minuto com $\sigma = 1,72$) quanto da taxa de serviço (0,149 tombamentos/minuto com $\sigma = 2,31$). Isto ocorre provavelmente em razão de que muitos condutores dos veículos de fato trabalhem efetivamente durante este período, remanejados por turno, ou com descanso no período anterior. A correlação entre essas taxas, torna possível se trabalhar com servidor único, vez que $\lambda/\mu.s < 1$.

Os resultados obtidos, fazendo-se variar o número de tombadores em operação, encontram-se na Tabela 3.8.

Tabela 3.8. Resultados para o período de 00:00h às 06:00h (madrugada¹)

(S) (Servidores)	L (veículos)	W (min)	f (%)	CW (R\$/h)	CS (R\$/h)	CT (R\$/h)
S = 1	1,98	19,18	67,44	30,70	21,71	52,41
S = 2	0,80	7,57	34,46	15,40	35,28	50,68

S = 3	0,70	6,81	23,03	10,85	48,70	59,55
-------	------	------	-------	-------	-------	-------

1. Com $\lambda = 0,103$ chegadas/minuto e $\mu = 0,149$ descarregamentos/minuto

De acordo com a Tabela 3.8, constata-se que com o emprego de apenas um servidor, apesar de se obter uma taxa de ocupação dos mesmos próxima de 70%, o tempo médio de espera para descarregamento é relativamente elevado (19,18 minutos), formando uma fila de aproximadamente 2 veículos. Isto implica em um custo total de R\$52,41/h. O emprego do segundo tombador, apesar de aumentar a ociosidade dos equipamentos, já que a taxa de ocupação é reduzida para 34,46%, faz com que o tempo médio de espera diminua de 60,53%, passando para 7,57 minutos, o que resulta em um custo total menor, de R\$50,68/h. Quando se dispõe do terceiro guindaste, a ociosidade por equipamento aumenta, vez que a taxa de ocupação dos mesmos cai para 23,03%. Entretanto, reduz ainda mais o tempo de espera que passa a ser de 6,81 minutos. Essa conjugação de fatores, leva a um custo total de R\$59,55/h. Conclui-se assim, que com base na otimização dos custos horários, operar o sistema de descarga com apenas dois guindastes, constitui-se na melhor opção.

3.6.2.2. Análise do turno de 06:00h a 12:00h

Este é um período de relativo equilíbrio, onde o processo começa a se estabilizar, de modo que o tempo entre chegadas ($1/\lambda$) começa a diminuir. Entretanto, ao contrário do período anterior, neste período e nos seguintes, o emprego de apenas um tombador é absolutamente insuficiente, vez que $\lambda/\mu.s > 1$, para o caso de servidor único, exigindo-se que se opere com pelo menos dois tombadores. Com apenas um servidor, corresponderia à situação em que a fila crescería incontrolavelmente, ou seja: *explodiria* (!). Portanto, não será considerada esta possibilidade, mas apenas quando ocorrer que $\lambda/\mu.s < 1$, ou seja quando estão disponíveis dois ou três tombadores. Os resultados para esses casos, encontram-se na Tabela 3.9.

Tabela 3.9. Resultados para o período de 06:00h às 12:00h (matutino)¹

S (Servidores)	L (veículos)	W (min)	f (%)	CW (R\$/h)	CS (R\$/h)	CT (R\$/h)
S = 2	2,04	8,27	62,96	31,62	42,32	73,94

S = 3	1,39	5,61	42,35	21,54	55,84	77,38
-------	------	------	-------	-------	-------	-------

1. Com $\lambda = 0,247$ chegadas/minuto e $\mu = 0,194$ descarregamentos/minuto

Constata-se, através da Tabela 3.9, que quando disponibilizados dois tombadores, o número médio de veículos que aguardam para descarregar (2,04), durante um tempo médio de 8,27 minutos, resulta em um custo total de R\$73,94/h, enquanto que com a operação do terceiro equipamento, este custo sobe para R\$77,38/h, apesar da redução do número de veículos e do tempo em espera, que passariam a 1,39 caminhões e 5,61 minutos, muito embora com uma redução da taxa de ocupação que passaria de 62,96% para 42,35%. Esses resultados evidenciam a otimização do sistema de descarregamento, com apenas dois tombadores.

3.6.2.3. Análise do período de 12:00h às 14:00h

Apesar de ser um período relativamente atípico em relação aos anteriores, visto que o ritmo da atividade humana geralmente diminui nesses horários, isto não foi aqui observado, já que ocorreu um aumento tanto a taxa de chegadas(λ), que passou para 0,270 chegadas/minuto, quanto para a taxa de serviço(μ), que saltou para 0,275 tombamentos/minuto.

Também foi observado que a relação λ/μ é menor que 1, fato que remete à possibilidade de emprego de apenas um tombador. Entretanto, o número de veículos em espera (9,66), o tempo de permanência no sistema de fila (35,76 minutos), e o elevado custo da espera (R\$149,73/h), implicaria em um custo total de R\$174,54/h, o qual é bastante elevado em relação a todos demais casos ($S = 2$ e $S = 3$).

A Tabela 3.10, conforme consta a seguir, apresenta os resultados obtidos para este período.

Tabela 3.10. Resultados para o período de 12:00h às 14:00h (matutino¹)

S (Servidores)	L (veículos)	W (min)	f (%)	CW (R\$/h)	CS (R\$/h)	CT (R\$/h)
-------------------	-----------------	------------	----------	---------------	---------------	---------------

S = 1	9,66	35,76	92,53	149,73	24,81	174,54
S = 2	1,27	4,70	48,80	19,68	38,82	58,50
S = 3	1,02	3,78	32,69	15,81	52,27	68,08

1. Com $\lambda = 0,270$ chegadas/minuto e $\mu = 0,275$ descarregamentos/minuto

A disponibilidade de um guindaste a mais durante este período ($s = 2$), reduziria consideravelmente o custo total, que passaria para R\$58,70/h, o qual otimizaria o sistema de tombamento, já que com $s = 3$ o custo total voltaria a aumentar, passando agora para R\$68,08/h. As demais variáveis, L, W e f, para $s = 2$, apresentam valores intermediários quando comparados aos casos em que $s = 1$ e $s = 3$.

3.6.2.4. Análise do período de 14:00h às 19:00h

Caracteriza-se por um comportamento similar ao matutino, no que diz respeito à regularidade das chegadas, cuja taxa média, no conjunto da amostragem tratada, apresentou o maior valor (0,347 chegadas/minuto) quando comparada às registradas nos demais períodos. O valor do quociente $\lambda/\mu s$ neste intervalo, indica que só é possível operar com dois ou três servidores, já que, para servidor único, esta relação é maior que 1. Os resultados obtidos durante este período, estão na Tabela 3.11.

Tabela 3.11. Resultados para o período de 14:00h às 19:00h (vespertino¹)

S (Sevidores)	L (veículos)	W (min)	f (%)	CW (R\$/h)	CS (R\$/h)	CT (R\$/h)
S = 2	2,50	7,20	68,45	38,75	43,67	82,42
S = 3	1,55	4,46	46,14	24,02	57,25	81,27

1. Com $\lambda = 0,347$ chegadas/minuto e $\mu = 0,250$ descarregamentos/minuto

Ao contrário dos casos anteriores, a minimização do custo total só ocorre quando são disponibilizados três equipamentos ($s = 3$), cujo valor corresponde a R\$81,27/h.

Entretanto, o custo para $s=2$, é apenas um pouco superior (R\$1,15/h) em relação ao valor otimizado, mas apesar de apresentar uma taxa de ocupação mais favorável (68,45%), registra valores de L (2,5 veículos) e W (7,20 minutos) mais desfavoráveis do que os observados para $s=3$.

3.6.2.5. Análise do período de 19:00h às 24:00h

Corresponde a um período em que ocorre a diminuição tanto da taxa de chegadas (0,188 chegadas/minuto), quanto da taxa de serviço (0,154 tombamentos/min). Esta última, provavelmente, em função da diminuição do ritmo da primeira em relação ao período anterior, reforçando o modelo de fila proposto, o qual sugere uma redução na taxa de serviço diante do tamanho da fila, já que quanto maior o número de caminhões para descarregamento, maior seria a pressão sobre os operários para a conclusão dos serviços. Entretanto, ainda assim, o quociente entre ambas as taxas também revela a impossibilidade de se trabalhar com servidor único, já que este resultado seria inferior à unidade. Os resultados calculados para este período, encontram-se na Tabela 3.12.

Tabela 3.12. Resultados para o período de 19:00h às 24:00h (noturno¹)

Servidores	L(veículos)	W (min)	f (%)	CW (R\$/h)	CS (R\$/h)	CT (R\$/h)
$S = 2$	1,87	9,95	60,43	28,98	41,69	70,67
$S = 3$	1,32	7,00	40,62	20,46	55,21	75,67

1. Com $\lambda = 0,188$ chegadas/minuto e $\mu = 0,154$ descarregamentos/minuto

Mais uma vez, o emprego de apenas dois tombadores, minimizaria o custo total (R\$70,67/h) e, portanto, otimizaria o processo de descarga. A redução no tempo de espera pelo serviço (W), de 9,95 minutos para 7,00 minutos, quando são empregados os três servidores, e a redução do custo correspondente (CW), que diminuiria de R\$28,98/h para R\$20,46/h, não seria suficiente para compensar o aumento do custo pela oferta do serviço (CS), que saltaria de R\$41,69/h, para R\$55,21/h. Este caso ($s=3$), apesar de registrar um menor número de veículos na fila (1,32 veículos), apresenta uma maior ociosidade do sistema, pois a ocupação é reduzida de 60,43% para apenas 40,62%.

3.6.3. CENÁRIOS PARA O BALANCEAMENTO DA TAXA DE DESCARREGAMENTO DE CANA COM A TAXA DE MOAGEM APÓS O SISTEMA DE FILA MODELADO

Pelos resultados expostos, a estratégia de operação regular com apenas dois tombadores, otimiza o sistema de descarregamento, com base na minimização do custo total (custo da espera mais custo da oferta do serviço). Entretanto, para um mesmo número de tombadores em operação, a equivalência entre a quantidade de cana transportada e descarregada, com a capacidade de moagem da indústria, além de buscar atender a capacidade instalada deverá contribuir para a minimização da formação de estoques, tanto no que diz respeito à matéria-prima em espera para o descarregamento, quanto ao material já descarregado e acondicionado no galpão de provisionamento.

Em função da capacidade de moagem (170 t/h), deveriam ser descarregadas na usina 4.080 toneladas diariamente, entretanto, conforme consta nos *boletins de pesagens*, a média de descarregamentos diários é de 3.690 t, realizados por 50 veículos do tipo *toco*, com capacidade média de 12 toneladas de cana por viagem, registrando uma diferença de 390 t/dia.

O balanceamento entre a quantidade de cana descarregada por hora e a correspondente capacidade horária de moagem, será realizado com base em simulações de reconfigurações do sistema de transporte, no que diz respeito aos seus possíveis tipos e número de veículos (caminhões) disponíveis na usina e, conseqüentemente, às suas capacidades de carga.

Para tanto, serão analisados três cenários, o atual, com base na infra-estrutura existente na usina, e dois outros alternativos: o cenário 1, que sugere o aumento do número de veículos simples (tipo *toco*) atualmente disponíveis, e o cenário 2, que prevê a substituição de parte dos caminhões *toco* por veículos de maior capacidade.

Como o objetivo consiste em promover o balanceamento, minimizando as quantidades de cana em estoque (no caminhão e no galpão), estas variáveis foram quantificadas de acordo com os procedimentos a seguir.

- **Quantificação da quantidade de cana descarregada**

A vazão média horária de cana descarregada na usina durante o turno i (Q_i), medida em toneladas/hora, poderá ser calculada pelo produto entre a taxa de chegadas (chegadas/minuto) do turno i (λ_i), e o peso médio de cada carga, avaliado em 12 toneladas, conforme foi demonstrado no item 3.2, de modo que:

$$Q_i = \lambda_i \cdot 12 \cdot 60, \text{ ou seja: } Q_i = 720 \cdot \lambda_i.$$

Por sua vez, a diferença entre Q_i (t/h), e a capacidade de moagem (170 toneladas/hora), representada por θ_i , indicará a variação do estoque (t/h), ou seja:

$$\theta_i = Q_i - 170$$

- **Quantificação da quantidade de cana em espera**

De forma equivalente, a diferença entre a taxa média de chegadas durante o turno i (λ_i), e sua correspondente taxa de serviço (μ_i), impõe um certo tempo médio de espera no sistema de fila (W_i). Assim, pode-se calcular a quantidade média de cana em espera, em cada turno i , (q_{ei}), medida em toneladas, a qual poderá ser dada por:

$$q_{ei} = 12 \cdot W_i \cdot \lambda_i.$$

3.6.3.1. Cenário atual

Conforme anteriormente evidenciado, a infra-estrutura atualmente presente na Usina com o respectivo fluxo de veículos, tem assegurado um descarregamento médio de apenas 3.690 t de cana/dia, o qual é insuficiente para atender à demanda da mesma (4.080 t). Essa defasagem pode ser explicada por interrupções na colheita, geralmente por ocorrências de fortes chuvas, ou interrupções no processo industrial, muitas vezes por razões de quebra máquinas.

Nesse contexto, com o objetivo de aproximar a taxa de descarregamento com a de moagem, utilizando-se dos atuais valores de λ (chegadas) e μ (descarregamentos), cujas médias levam em conta os tempos de paralisação, já que foram extraídas dos boletins de pesagens, e operando-se o sistema de descarga com dois guindastes, pode-se calcular a quantidade de cana que a ser diariamente descarregada, bem como o tempo e as quantidades retidas nos veículos à espera do descarregamento e em estoque no galpão de

provisionamento. Este, portanto, seria o cenário atual possível. Os respectivos tempos de espera (W) foram gerados pelo aplicativo *QUEUE*, cujos resultados dos cálculos, para todos os períodos em análise, encontram-se na Tabela 3.13.

Tabela.3.13. Resultados para o Cenário Atual

Período	00/06h	06/12h	12/14h	14/19h	19/24h	
λ (veic/min)	0,103	0,247	0,270	0,347	0,188	
W (minutos)	7,27	8,27	4,70	4,46	9,95	6,93 ¹
Cana (t)	444,96	1.067,04	388,80	1.249,20	676,80	3.826,80 ²
Cana em espera (t)	8,98	24,51	15,23	18,57	22,44	17,95 ³
Cana p/ estoque (t/h)	-95,84	7,84	24,4	79,84	-34,64	-253,20 ⁴

1. Tempo médio de espera 2. Quantidade de cana descarregada diariamente (t/dia). 3. Valor médio em espera por período (t). 4. Valor em t/dia, ponderado pelo número de horas de cada período.

O tempo médio de espera de cada veículo neste caso, seria de 6,93 minutos por período. Durante este intervalo ficam em espera para o descarregamento, em média, 17,95 toneladas. Como a vazão de cana descarregada (3.826,80 t) é menor que a capacidade de moagem (4.080 t), há um déficit de 253,20 t/dia.

Este cenário, apesar de ser melhor em relação aos resultados observados, no que diz respeito ao equilíbrio dos descarregamentos com a capacidade de moagem, já que aproxima-se mais desta, ainda apresenta-se defasado com a referida capacidade instalada.

Este insuficiente volume de cana transportado deverá promover o prolongamento do tempo de colheita, comprometendo o rendimento industrial em função da redução do teor de sacarose da planta, que aguarda a operação de colheita. A capacidade de corte de cana não se constitui em gargalo, vez que o contingente para tanto, contratado durante as safras, em torno de 1.200 trabalhadores, é suficiente para suprir a necessidade da indústria, vez que o rendimento médio de corte praticado nas lavouras da usina é de 3,5 t por operário e por dia (23). Esta constatação evidencia que o fator limitante seria o transporte de cana para o processamento industrial, fato que justificaria a análise de cenários alternativos de

transporte conforme anteriormente proposto. Assim, com o objetivo de atender à capacidade instalada, foram analisados dois outros cenários, alternativos ao atual:

1. Ampliação do número de caminhões do tipo *toco*
2. Substituição de parte dos veículos, por outros de maior capacidade.

Evidentemente que para quaisquer dessas opções, a taxa de chegadas deverá ser modificada, já que o número de veículos será diferente do cenário original. Além do mais, no que se refere ao cenário 2, as substituições não guardam a mesma proporção entre as taxas, pois as capacidades de transporte, bem como o tempo de ciclo (ida e volta) são diferentes para esses tipos de veículos.

3.6.3.2. Cenário 1: Aumento do número de caminhões *toco*

O tratamento estatístico realizado com os *certificados de pesagem*, indicam que os caminhões *toco* fazem, em média, 7 viagens/dia. Como cada um transporta em média 12 t, para atender à demanda diária de 390 t adicionais, serão necessários, $\frac{390}{12 \times 7} = 4,64$, ou seja 5 veículos. Incorporando-os à frota já existente, totalizariam 55 veículos.

As frequências das chegadas desses novos veículos ao longo dos períodos em estudo, foi calculada considerando-se a mesma distribuição de probabilidade do cenário atual, conforme consta nos itens 3.3 e 3.4.

Os levantamentos de dados com a memória de cálculos das respectivas taxas de chegadas para este cenário (λ_{c1}), encontram-se no Apêndice D.

Por sua vez, na Tabela 3.14, são apresentados os resultados da simulação para o Cenário 1, com as novas taxas de chegadas.

Tabela 3.14. Resultados do aumento do número de caminhões *toco* (Cenário 1)

Período	00/06h	06/12h	12/14h	14/19h	19/24h
λ_{c1} (veic/min)	0,153	0,266	0,295	0,380	0,198

W (minutos)	8,92	5,55	7,56	3,08	6,77	6,38 ¹
Cana (t)	660,96	1.149,12	424,80	1.368,00	712,80	4.315,68 ²
Cana em espera (t)	16,38	17,84	26,40	14,04	16,27	22,42 ³
Cana p/ estoque (t/h)	-59,84	21,52	42,40	103,60	-27,44	235,68 ⁴

1. Tempo médio de espera; 2. Quantidade de cana descarregada diariamente (t/dia); 3. Valor médio em espera por período (t); 4. Valor em t/dia, ponderado pelo número de horas de cada período.

Pelo exposto na Tabela 3.14, constatam-se que caso fosse implementado este cenário, os descarregamentos diários (4.315,68 t) superariam a capacidade da indústria (4.080 t), em aproximadamente 6,0%. A quantidade excedente implicaria no aumento da taxa para estoque, que seria de 235,68 t/dia (13,38t/hora). Por sua vez, as filas formadas durante os descarregamentos, que apesar de impor um tempo de espera médio de 6,38 minutos/veículo em cada período, portanto, inferior ao cenário atual (6,93 minutos), implicaria em uma maior retenção de matéria-prima, já que em média 21,80 t ficariam aguardando o descarregamento, contra 22,42 t previstos para o cenário anterior (atual).

Deve-se ainda destacar que esta taxa de cana excedente também elevaria o tempo de moagem de cana, comprometendo, da mesma forma como foi evidenciado para o cenário atual, o rendimento do processo produtivo, pelo provável aumento do decaimento do teor de sacarose do material a ser processado.

3.6.3.3. Cenário 2: Substituição de parte dos caminhões *toco* por veículos de maior capacidade (Conjuntos *Romeu e Julieta*)

De um modo geral as Usinas empregam uma maior diversidade de tipos de veículos transportadores de cana, dentre os quais o denominado conjunto *Romeu e Julieta*. São veículos com motores de maior potência, suficientes para tracionarem uma carroceria adicional, com capacidade equivalente à original. Portanto, esse conjunto é capaz de transportar, o dobro da capacidade dos veículos *toco* (24 toneladas) em cada viagem.

Entretanto, em função de conduzirem uma carga de maior volume e mais pesada, esses veículos apresentam tempo de ciclo um pouco inferiores aos caminhões *toco*. Com

base em informações da gerência de transporte (24), a usina Aliança já empregou esses veículos no passado, tendo sido os poucos exemplares já sucateados. Tais veículos realizavam, em média, 5 viagens diárias entre a lavoura e a usina.

Utilizando-se essa mesma frequência de viagens, para transportar o déficit de cana registrado nos *boletins de pesagens* (390 t/dia) com o conjunto *Romeu e Julieta*, seriam necessários $\frac{390}{24 \times 5} = 3,25$, ou seja 4 destes veículos. Assim, cada um deles quando incorporados à frota, poderia dispensar 1,25 caminhões *toco*, o que resultaria na eliminação total de 6 caminhões caso fossem substituídos por 4 conjuntos *Romeu e Julieta*. A relação entre as receitas obtidas e os custos dessa permuta poderá ser equivalente, já que os veículos substituídos, poderiam gerar receitas em outras atividades da usina.

De maneira análoga à análise do *cenário 1*, reavaliou-se o impacto nas taxas de chegadas com a adoção do presente caso (*cenário 2*), proporcionalizando as frequências de chegadas também com base nas frequências observadas. As taxas de chegadas para os caminhões *toco* (chegadas/minuto), foram recalculadas subtraindo-se dos valores das taxas do *cenário atual* o valor correspondente às taxas dos veículos substituídos (seis caminhões *toco*). Em relação ao conjunto *Romeu e Julieta*, o procedimento consistiu em se calcular as taxas de chegadas com base nos *boletins de pesagens* da safra 96/97, cuja cópia encontra-se no Anexo B. Quanto às taxas de serviço, foram mantidos os valores médios do cenário atual, no que se refere ao atendimento dos veículos *toco*, vez que o impacto de sua redução seria desprezível sobre a taxa de descarregamento. Entretanto, para o conjunto *Romeu e Julieta*, estimou-se que o seu tempo de atendimento seria o dobro do tempo dos caminhões *toco*, visto que suas capacidades guardam esta mesma proporção. A memória de cálculo das novas taxas de chegadas, encontra-se no Apêndice E. Os resultados simulados com o emprego dos quatro conjuntos *Romeu e Julieta*, são apresentados na Tabela 3.15.

Tab.3.15. Resultados com o emprego de 4 conjuntos *Romeu e Julieta* (RJ).

Período	00/06h	06/12h	12/14h	14/19h	19/24h

$\lambda(\text{veic/min,C})$	0,045	0,225	0,237	0,300	0,168	
$\mu(\text{veic/min,C})$	0,149	0,194	0,275	0,250	0,154	
$\lambda(\text{veic/min,RJ})$	0,039	0,015	0,022	0,031	0,013	
$\mu(\text{veic/min, RJ})$	0,074	0,097	0,138	0,125	0,077	
W(min,C)	6,10	7,52	4,41	6,02	9,00	6,61 ¹
W(min, RJ)	14,47	10,37	7,29	8,12	13,08	10,67 ¹
Cana (t)	531,36	1.101,60	404,64	1.303,20	698,40	4.039,20 ²
Cana em espera (t)	16,83	24,04	16,39	27,71	22,22	21,40 ³
Cana para estoque (t/h)	-81,44	13,60	32,32	90,64	-30,32	-40,80 ⁴

1. Tempo médio em espera; 2. Quantidade de cana descarregada diariamente (t/dia); 3. Valor médio

em espera por período (t); 4. Valor em t/dia, ponderado pelo número de horas de cada período.

Os resultados contidos na Tabela 3.15, revelam um cenário mais ajustado às condições operacionais da Usina. A quantidade de cana que poderia ser diariamente transportada à indústria (4.039,20 t) estaria muito mais próxima à sua capacidade instalada (4.080 t/dia), sendo apenas um por cento inferior a esta (40,80 t/dia). Na verdade operar uma unidade produtiva exatamente nos limites da capacidade instalada nem sempre se traduz em maior eficiência, vez que, nessas situações, a taxa de falhas poderá aumentar, fato que comprometeria o rendimento do processo produtivo. Deste modo, operá-la com taxa um pouco abaixo de sua capacidade, poderá ser uma estratégia de produção mais prudente, favorecendo a obtenção de resultados mais previsíveis.

Nessas circunstâncias, a variação de estoques de cana no galpão de provisionamento, seria negativa, ou seja ocorreria uma diminuição ao longo do dia, à razão de 1,7 toneladas de cana por hora. Isto está de acordo com os propósitos do modelo de produção *just-in-time*, que recomenda, a minimização ou anulação de estoques, reforçado ainda mais neste caso, por tratar-se de uma matéria-prima perecível. Tal prática, aliás, é o que vem buscando muitas organizações deste segmento agro-industrial.

Deve-se ainda salientar, que os conjuntos *Romeu e Julieta*, apesar de apresentarem um tempo médio em espera um pouco superior, de 10,67 minutos contra 6,61 minutos dos veículos *toco*, as suas taxas de chegadas, associadas às capacidades por viagens, deslocam para menos o efeito dos descarregamentos mais frequentes dos caminhões *toco*, resultando, como consequência final, em uma quantidade de cana em espera (21,43 t) ainda menor quando comparado ao Cenário 1 (22,42 t).

Concluindo, o presente cenário, além de ser mais vantajoso, por apresentar uma taxa de descarregamento de cana para moagem próxima da capacidade instalada, praticamente não altera a quantidade média de cana em espera para o descarregamento em relação ao Cenário 1.

3.7. VALIDAÇÃO DO MODELO

Segundo PIDD (25), modelo é uma representação do mundo real, ou parte dele. Por isso, a validação tem que ser direta. Deve-se verificar se o comportamento do modelo e da realidade ocorrem sob as mesmas condições. Sugere ainda o autor, que a validação se ampara na visão construtivista dos modelos, na qual devem ser usados, não na tentativa de se descobrir a verdade, mas sim de descobrir as soluções úteis. Afirma o autor que a presunção em se ter um modelo completamente correto, é impossível de se concretizar.

Deve-se ainda destacar, que grande parte do modelo aqui estruturado baseia-se em inferências estatísticas, as quais são feitas de amostras e não da população de dados, de modo que estas (as amostras) podem levar a inferências erradas (ou inadequadas), já que elas não apresentam todas as informações da população. Nesse sentido, construindo-se o modelo com base em amostragens, pode-se tanto cometer o erro de rejeitar um modelo que é correto, e portanto válido, quanto de aceitar um modelo que é incorreto.

Pode-se então concluir, que os modelos, enquanto representações da realidade, são compreendidos como instrumentos dinâmicos, que serão refinados ao longo do tempo. A credibilidade de um modelo, está também vinculada ao seu grau de aceitabilidade por parte do usuário. Assim, enquanto este estiver satisfeito com os seus resultados aplicados, pode-se entendê-lo como adequado à representação real naquele momento.

Nesse sentido, excluindo-se o rigor das estatísticas, opiniões de experientes profissionais da Usina (26), atestam que os resultados são satisfatórios, não estando distantes da realidade operacional, admitindo, portanto, que o modelo formulado poderá representar o fluxo de transporte de cana nas condições atuais (e normais) de operação.

Para justificar ainda mais a representatividade do modelo proposto, pode-se, também, apresentar resultados comparativos dos modelos teóricos, com aquele que foi assumido como o mais razoável à realidade em estudo, qual seja o **modelo básico (chegada de Poisson e serviço Exponencial), com taxa de serviço dependente do estado do sistema**. Para tanto, serão comparados os resultados obtidos neste modelo com dois outros: 1) **Modelo com taxa de serviço e de chegada independente do estado do sistema**; e 2) **Modelo com taxa de chegada (λ) de Poisson e taxa de serviço (μ) de Erlang**. O primeiro foi escolhido para avaliar se de fato o tamanho da fila impacta o tempo de serviço; já o segundo, visa comparar valores de μ com elevadas variabilidades (exponencial) e com média variabilidade (*Erlang*), conforme já discutido (capítulo 2).

Entretanto, como os resultados da aplicação do modelo de *Erlang* para servidores múltiplos ainda não tem sido satisfatório (13), as comparações serão feitas apenas para o caso de servidor único ($s = 1$). Deste modo, apenas os períodos, *madrugada* (00:00/06:00 h) e *almoço* (12:00/14:00 h), conforme constam na Tabela 3.7, ajustam-se a esta premissa. A Tabela 3.16, mostra os resultados obtidos para estes modelos.

Tabela 3.16. Comparação de resultados para três modelos¹ com servidor único

Modelo Variáveis	Modelo Básico com λ e μ independentes do estado da fila		Modelo Básico com μ dependente do estado da fila		Modelo com λ de Poisson e μ de <i>Erlang</i> ($k=2$)	
	00/06 h	12/14 h	00/06 h	12/14 h	00/06 h	12/14 h
W (minutos)	21,73	180,98	19,19	35,76	17,98	150,90
W_q (minutos)	15,03	177,34	12,64	32,33	11,27	147,26
L (caminhões sistema)	2,24	48,84	1,98	9,65	1,85	40,74
L_q (caminhões na fila)	1,55	47,86	1,30	8,63	1,03	39,76

Utilização (%)	69,13	98,13	67,44	92,53	69,13	98,19
----------------	-------	-------	--------------	--------------	-------	-------

1. Para o período de 00:00/06:00 h, $\lambda = 0,103$ chegadas/minuto e $\mu = 0,149$ atendimentos/minuto. Para o período 12:00/14:00h, $\lambda = 0,270$ chegadas/minuto e $\mu = 0,275$ atendimentos/minuto. Essas taxas estão disponíveis na Tabela 3.7.

Pelo exposto na Tabela 3.16, pode-se constatar que os resultados obtidos para o período da madrugada (00:00 h às 00:06 h) não diferem de modo significativo para quaisquer dos modelos em análise. Além do mais, os resultados encontrados para o modelo proposto, situam-se em posição intermediária em relação aos outros, e mais próximos do modelo de Erlang, cujo desvio padrão revela sua baixa variabilidade, conforme discutido no Capítulo 2, sendo muito empregado em vários sistemas de filas.

Por outro lado, quando são comparados os resultados para o período de *almoço* (12:00/14:00 h), os valores obtidos com o modelo assumido, situam-se muito abaixo dos demais, diferindo estes últimos, porém, de modo bastante significativo em relação ao modelo proposto. Enquanto o tempo de espera (W) obtido para este, foi de 35,76 minutos, para o modelo com λ e μ independente do estado do sistema e o de *Erlang*, os valores desta variável foram de 180,98 minutos e 150,90 minutos, respectivamente. Por sua vez, enquanto que o número de caminhões no sistema de fila (L), para o modelo proposto seria de 9,65 veículos, para os demais seria de 48,84 veículos (modelo independente) e 40,74 veículos (modelo de *Erlang*), também muito acima dos valores tidos como mais representativos da realidade operacional. Os demais parâmetros (W_q , L_q e f), situam-se no mesmo contexto.

Todas essas constatações, evidenciam que o modelo assumido (*entrada de Poisson e serviço exponencial*), poderia melhor representar a operação do fluxo de transporte e descarga de cana na usina, do que os demais, os quais foram rejeitados pelos seus profissionais.

Os demais modelos teóricos discutidos no Capítulo 2, também não seriam adequados, visto que ou estão igualmente limitados a servidores únicos (modelos sem uma chegada de *Poisson*) ou não se aplicam às operações de transporte, como são os casos do *modelo básico com fonte finita* (mais indicado a operações de manutenção, cuja saída do

processo de fila, após reparo, não implica em seu retorno futuro) e do *modelo básico com fila limitada* (já que há espaço suficiente na usina para acomodar um número ilimitado de caminhões para descarga).

Destaca-se que os possíveis desvios do modelo proposto em relação ao comportamento real, podem ser explicados por causas aleatórias, tais como:

- Quebra de máquinas agrícolas;
- Chuvas, que podem interromper, as frentes de colheitas e o transporte;
- Acidentes, que podem dificultar o livre trânsito;
- Interrupções do processo nas operações unitárias;
- Quebra de guindaste;
- Variações na pressão de vapor;
- Problemas com o suprimento de eletricidade.

Estes e outros possíveis fatores não planejados, poderão interferir drasticamente nas taxas de chegada e de serviço dos veículos à usina. Problemas mecânicos, elétricos ou pressão de vapor insuficiente, conforme acima listados, a depender de sua gravidade e extensão, podem interromper, em alguns casos por horas, o descarregamento dos caminhões.

Simplificações em relação ao contexto real, que se fizeram necessárias para o estabelecimento do modelo matemático, como foi o caso da desconsideração dos tratores que conduzem cana de lavouras próximas à unidade industrial, interpretando-os como se fossem caminhões *toco*, também poderiam ser consideradas mais uma razão que justificassem possíveis desvios em relação ao comportamento operacional real, já que as taxas de chegadas desses veículos, são diferentes das observadas para os caminhões.

Ainda assim, mesmo com essas simplificações, os tempos de espera durante os descarregamentos que foram acompanhados e cronometrados, conforme discutido no item 3.2.1 (Tratamento com a filtração de dados), bem como as taxas de cana para estoque que

foram observadas, não são muito diferentes dos valores gerados pelo modelo, portanto, pode-se admitir que as simplificações são aceitáveis, fato que reforça a coerência do modelo com a realidade operacional da usina.

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DO PROCESSO PARA A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR, ÁLCOOL E SUB-PRODUTOS

4. INTRODUÇÃO

A descrição das operações neste capítulo está de acordo com literaturas especializadas (09) e (27), sendo feita de forma resumida, tendo como objetivo estabelecer uma visão geral do processo para ajudar e orientar a construção do modelo matemático de otimização da produção, que encontra-se no Capítulo 6.

As transformações ocorridas em cada uma dessas operações, devem apresentar seus respectivos rendimentos sobre as correntes de entrada, podendo ser maiores ou menores que a unidade, visto que em algumas etapas ocorre adição de insumos, podendo, assim, aumentar a vazão mássica das mesmas.

O fluxograma total do processo está de acordo com a descrição das operações, e indica a vazão das correntes na direção de suas operações unitárias de transformação. A legenda referente a cada uma das correntes, bem como o referido fluxograma, encontram-se nos Apêndices F e G, respectivamente.

4.1. OPERAÇÕES COMUNS À PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Os processos para a produção de açúcar e álcool apresentam algumas operações que podem estar vinculadas à obtenção de um destes produtos isoladamente, e outras, que são comuns a ambos. A extração do caldo de cana, incluindo alguns procedimentos preliminares do seu tratamento, refere-se ao presente contexto, conforme será discutido a seguir.

4.1.1. EXTRAÇÃO DO CALDO: LAVAGEM, PREPARO E MOAGEM

Após colhida na lavoura a cana (Xo) é transportada à fábrica, geralmente em caminhões, onde é pesada, e em seguida descarregada em *bandejas* inclinadas (45°), iniciando o processo de lavagem. É então conduzida, de forma contínua e automática, através de esteiras transportadoras, à seção de preparo e extração do caldo. O preparo

consiste em ação preliminar de desintegração das células do material, realizado por equipamentos denominados de picadores e desfibradores.

A extração é realizada em um conjunto de moendas (*tandem de moagem*) com adição de água sobre a cana desfibrada, em esmagamento. Esta operação é denominada de embebição, tendo o objetivo de aumentar a extração de sacarose. Existem diferentes processos de embebição, no presente estudo foi adotada a do tipo composta, que consiste na injeção de água apenas no último terno, sendo que o caldo diluído, em parte ou totalmente, retorna para embeber o bagaço da moenda anterior. O líquido resultante do esmagamento, denominado de caldo misto (X1), é retirado nos dois últimos ternos e coletado através de calha especial (*cush-cush*), sendo em seguida transferido às operações subsequentes.

Além do caldo extraído, a moagem da cana resulta no bagaço (X11), que é ser queimado nas caldeiras como combustível para a geração de vapor de processo ou para geração elétrica. A energia necessária para o acionamento dos picadores e moendas é retirada do vapor de alta pressão, o qual retorna como vapor de escape, para ser empregado em outras operações. A Figura 4.1, ilustra esse processo.

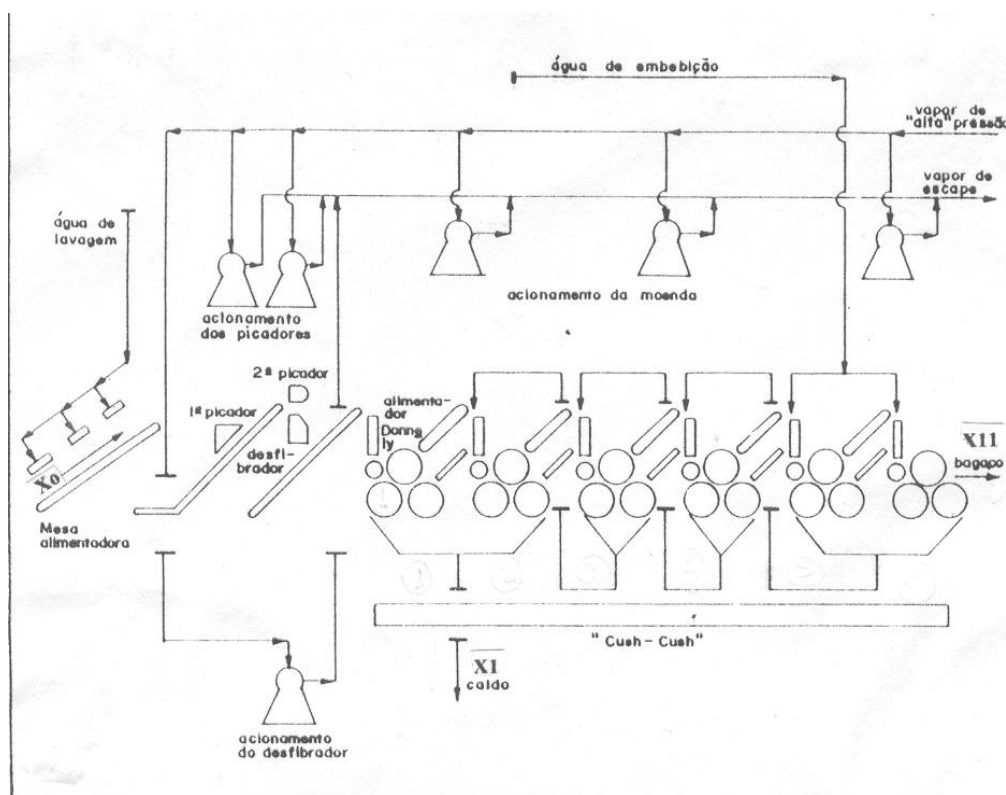


Figura 4.1. Fluxograma do módulo de lavagem, preparo e moagem de cana

4.1.2 TRATAMENTO DO CALDO

De um modo geral, as usinas realizam o tratamento do caldo com vistas à produção de açúcar, e não necessariamente de álcool, já que as consequências do tratamento sobre as especificações deste último, é de pouca relevância; o mesmo, entretanto, não ocorre com o açúcar, pois a cor para este, é especificada, sendo um dos parâmetros de decisão no momento da comercialização.

Deve-se, contudo, salientar, que a depender da conveniência operacional, o caldo submetido às operações de tratamento para açúcar poderá, também, ser destinado à produção de álcool, principalmente quando existe destilaria anexa à usina de açúcar, sendo, de fato, o que ocorre em maior frequência. Por esta razão, serão apresentadas neste item as operações de tratamento (sulfitação, calagem, aquecimento, decantação e filtração) como se fossem comuns a ambos os produtos. O fluxograma contendo todas as operações de tratamento do caldo, encontra-se ilustrado na Figura 4.2.

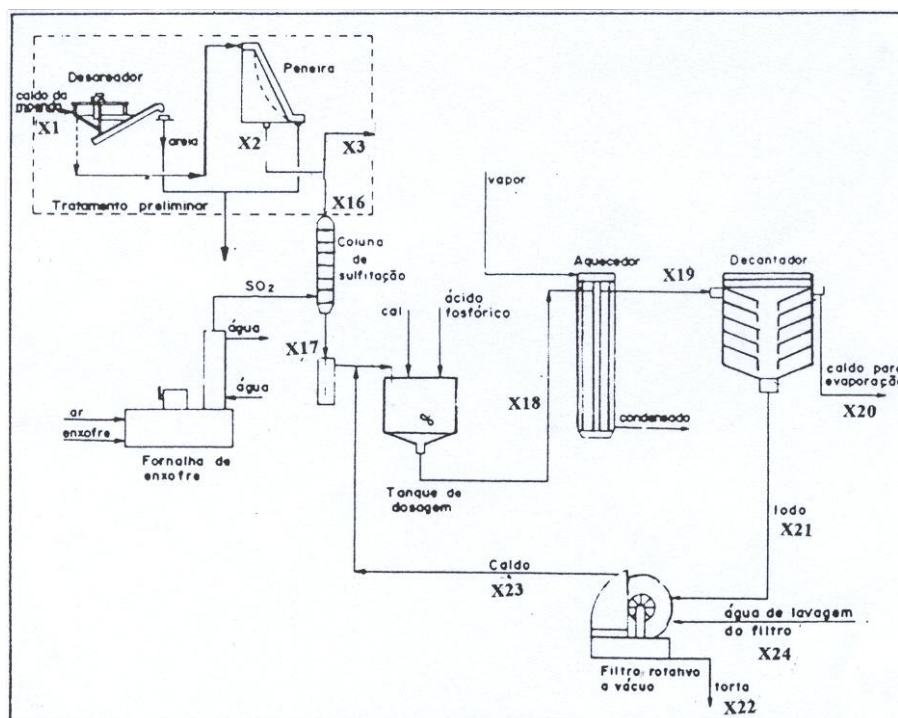


Figura 4.2. Fluxograma do módulo de tratamento do caldo

O caldo misto (X1), obtido na seção anterior, é submetido ao tratamento preliminar o qual consiste basicamente no peneiramento deste com o objetivo de eliminar partículas suspensas no meio, tais como resíduos de cana e areia.

Em seguida, o caldo preliminarmente tratado (X2), poderá ser destinado à produção de álcool (X3), ou açúcar (X16), constituindo-se para este último, nas operações de efetivo tratamento. As vazões de caldo para cada uma dessas opções, irão depender das conveniências operacionais e, principalmente comerciais que, conforme já evidenciado, serão calculadas no Capítulo 6. A seguir serão descritas as operações que constituem o tratamento do caldo para a fabricação de açúcar.

Conforme já evidenciado, a tecnologia para o tratamento do caldo para álcool não está consolidada no parque industrial brasileiro. Algumas unidades eliminaram-no, sendo o caldo apenas peneirado e enviado à seção de fermentação. Quando ocorre, o principal objetivo do tratamento é tornar o caldo livre de microorganismos nocivos à fermentação, durante a etapa posterior. Neste sentido, três processos, são os mais empregados: 1) Pasteurização (aquecimento a 105°C, seguido de resfriamento a 32°C; 2) Aquecimento a 105°C seguido de decantação; e 3) Adição de ácido sulfúrico baixando o pH do meio para 4,5. No presente estudo adota-se esta última operação.

A seguir serão descritas as operações que constituem o tratamento do caldo para a fabricação de açúcar.

4.1.2.1. Sulfitação

A indústria do açúcar se utiliza da combustão do enxofre para a obtenção do anidrido sulfuroso. Esta operação é realizada em fornalhas sendo a combustão realizada a 250°C, e posteriormente resfriado, produzindo o dióxido de enxofre. Os principais objetivos da sulfitação, são:

- Purificar o caldo sedimentando os colóides que serão formados.
- Descolorir o caldo, devido à propriedade redutora do gás
- Redução da viscosidade como consequência da sedimentação do aglomerado de moléculas orgânicas dispersas.

- Ação anti-séptica, evitando o desenvolvimento de microorganismos

Para tanto, o fluxo de caldo pré-tratado destinado à obtenção de açúcar (X16) flui através da coluna de sulfitação, em contra-corrente com a vazão de dióxido de enxofre (SO_2). O material indesejado será retirado na etapa de decantação, após a calagem.

4.1.2.2 Calagem

O processo de calagem, consiste em adicionar leite de cal (hidróxido de cálcio), em forma contínua até que o pH do caldo (que após a sulfitação situa-se entre 3,8 e 4,3), atinja valores entre de 6,8 e 7,2.

A finalidade do leite de cal é precipitar mais impurezas, complementando os objetivos da sulfitação, permitindo, portanto, a melhoria do aspecto turvo do caldo e, conseqüentemente, a cor do açúcar.

O caldo misto para ser clarificado na operação posterior (decantação) necessita ainda da adição de produtos fosfatados, sendo o ácido fosfórico a fonte mais usual. O seu principal objetivo é permitir uma clarificação eficiente, sobretudo quando se utilizam canas pobres em fósforo, resultando em um açúcar de maior valor comercial.

Nesse sentido, o caldo sulfitado (X17), é contido em tanques, onde são adicionados a cal e os auxiliares da clarificação, constituindo-se no que se denomina de operação de calagem, tendo o pH como variável de controle. O caldo filtrado, resultante da operação de filtração do lodo do decantador, etapa posterior à presente fase, também retorna ao tanque de calagem. Desse modo, com a adição do leite de cal e de ácido fosfórico ao caldo sulfitado, e com o retorno do caldo filtrado, o caldo que flui para a seção de aquecimento (X18), corresponderá à soma dessas parcelas.

4.1.2.3. Aquecimento

A operação de aquecimento consiste na elevação da temperatura do caldo até valores entre 100°C e 105°C , visando facilitar a remoção de albuminas e impurezas coloidais, por floculação, nos decantadores, melhorando a viscosidade do meio. O fluido de aquecimento empregado, o vapor, é geralmente proveniente do escape das turbinas ou o vegetal, originário do sistema de evaporação.

Esta etapa do processo consiste, portanto, apenas em procedimentos de troca térmica, não ocorrendo perdas de massa. Deste modo, considera-se que o fluxo que entra no sistema de aquecimento (X18), é o mesmo que sai deste (X19).

4.1.2.4. Decantação

O caldo aquecido (X19) é deixado em repouso para que haja remoção das impurezas tanto por floculação quanto por sedimentação. O principal objetivo dessa operação é permitir uma precipitação e coagulação dos colóides tão completa quanto possível, promovendo a produção de caldo mais clarificado.

Fluem dessa operação, duas correntes: O caldo clarificado (X20), produto de topo, e o lodo (X21), que é o produto de fundo. A vazão de caldo clarificado é continuamente transferida à etapa posterior, evaporação, marcando o início, propriamente dito, do processo de fabricação do açúcar. O lodo, por sua vez, é transferido à seção de filtração dando continuidade às operações de tratamento do caldo. Logo, o fluxo de entrada de caldo a ser decantado deve ser igual ao somatório dessas duas parcelas, ou seja X20 mais X21

4.1.2.5. Filtração

O lodo proveniente da seção de decantação (X21), passa pelo processo de filtragem com o objetivo de separar o caldo remanescente do precipitado contido nessa corrente. O equipamento comumente mais empregado nas indústrias de açúcar, corresponde ao denominado filtro rotativo a vácuo. Desse processo resultam duas outras correntes: o caldo filtrado (X23), que retorna à fase de calagem, e a torta (X22), geralmente empregada como adubo, destinado à lavoura da usina, ou então é comercializado, para o mesmo fim.

A operação de filtração é realizada com adição de bagacilho (obtido na etapa de moagem), que servirá como elemento filtrante, aumentando a porosidade do bolo durante o processo de filtração. Também é adicionada água, à razão de 80% do fluxo de lodo, facilitando a dissolução de açúcares dissolvidos no meio.

Esta, portanto, corresponde à última operação relativa ao tratamento do caldo. A partir de então, este poderá ser dividido em duas partes: Uma que se destina à fabricação de açúcar e outra para álcool (caso se utilize caldo tratado).

4.2. OPERAÇÕES EXCLUSIVAS DA FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR

O caldo tratado deverá ser submetido a uma seqüência de operações de transformação, geralmente físicas (térmicas) ou físico-químicas, com objetivo inicial apenas de concentrá-lo para que possa, em etapa posterior, cristalizar a sacarose do meio.

4.2.1. EVAPORAÇÃO

Constitui na primeira etapa de concentração do caldo clarificado (X20) proveniente da seção de tratamento. Em função da taxa de embebição, durante o processo de moagem da cana-de-açúcar, o caldo chega à seção de evaporação com uma concentração de açúcares variando entre 14% e 17%. Desse modo, a retirada de grande parte da água passa a ser o principal objetivo da presente operação. Esta é realizada continuamente até que se tenha uma solução, denominada de xarope, de concentração total entre 60% e 70%, desde que não apresente qualquer indício de presença de sacarose cristalizada, já que o processo de cristalização deverá apenas ocorrer na operação posterior (cozimento).

O sistema de evaporação mais empregado refere-se ao de múltiplo efeito em fluxos de correntes paralelas, onde tanto o caldo clarificado quanto o vapor são alimentados conjuntamente no pré-evaporador, seguindo o mesmo sentido do primeiro até o último efeito (quarto). A Figura 4.3, a seguir ilustra o fluxograma deste processo de evaporação.

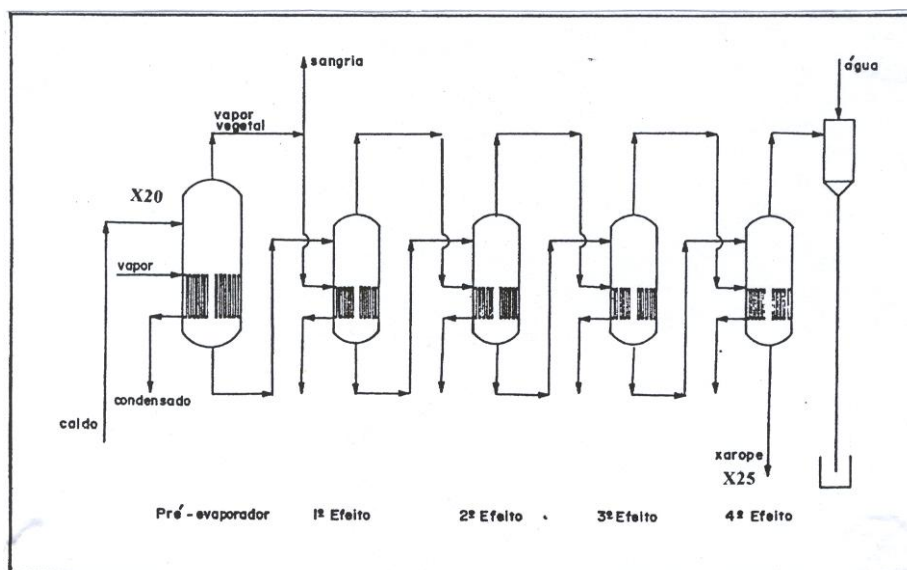


Figura 4.3. Fluxograma do processo de evaporação do caldo

Parte dos efeitos trabalha com pressão abaixo da atmosférica, mantida por condensadores barométricos, sendo que o pré-evaporador, apresenta área geralmente igual ao dobro dos demais efeitos. O objetivo é proporcionar uma maior vazão de água evaporada, que fica acima do que seria necessário ao primeiro efeito. Por isso, o excedente de vapor vegetal produzido, é ‘sangrado’, e destinado à alimentação dos cozedores e/ou dos aquecedores. No último efeito, portanto, é retirado o caldo já concentrado, agora denominado de xarope (X25).

O vapor que alimenta o pré-evaporador é o de escape das turbinas. Por sua vez o condensado da unidade de evaporação, bem como o do primeiro efeito, geralmente retornam às caldeiras.

Com o objetivo portanto, de aumentar a concentração do caldo clarificado (X20), este atravessa o conjunto de evaporação resultando no xarope (X25). Da vazão de caldo misto que alimenta o pré-evaporador no início do processo, têm-se ao final entre 20% e 35% do seu total.

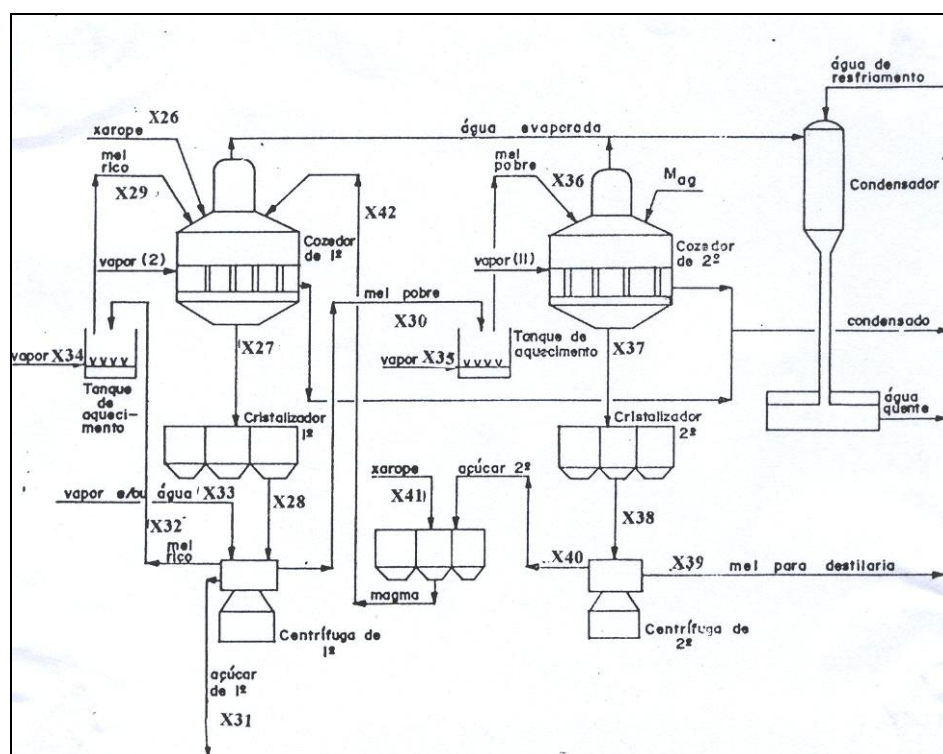
4.2.2. COZIMENTO, CRISTALIZAÇÃO E CENTRIFUGAÇÃO

O xarope (X25) proveniente da seção de evaporação, possui viscosidade tão elevada que não pode mais ser concentrado em evaporadores comuns. A solução, para tanto, é o emprego de equipamentos a vácuo, denominados de cozedores. Os tipos mais usuais destes equipamentos, geralmente operam em regime de batelada e permitem alcançar maiores concentrações do xarope, o qual juntamente com os cristais formados, passa a se denominar de massa cozida.

Visando maximizar a cristalização da sacarose, a maioria das indústrias açucareiras realizam o esgotamento do xarope em duas etapas de cozimento, sendo por isso denominado de sistema de duas massas (de primeira e de segunda).

Do cozimento, seguido de centrifugação e secagem da massa de primeira, obtém-se o açúcar de primeira, o qual constitui-se no produto final. Durante a operação de centrifugação, são obtidos dois sub-produtos: o mel rico e o mel pobre, que são assim rotulados em função da concentração remanescente em sacarose. O mel rico retorna ao cozimento de primeira a fim de fazer um novo esgotamento. Por sua vez, o mel pobre irá

Após ter sido transferido à seção de cozimento, o fluxo do xarope (X25) oriundo da seção de evaporação do caldo, divide-se em duas partes: A primeira, consistindo na corrente de maior vazão (X26), alimenta diretamente os chamados cozedores de primeira, enquanto que a corrente de menor vazão (X41), em conjunto com o açúcar de segunda (X40), destina-se à composição do magma (X42). Esta última corrente, o magma, juntamente com parte do xarope (X26), bem como com o mel rico (X29) oriundo da seção de centrifugação, deverá ser submetida ao processo do cozimento de primeira. A massa obtida nesta operação de cozimento é denominada de massa de primeira (X27), sendo descarregada nos cristalizadores e, posteriormente, transferida à seção de secagem. A Figura 4.4 , ilustra o processo de cozimento e centrifugação da massa cozida.



74

Por sua vez, a centrifugação da massa de primeira resulta em uma corrente sólida, denominada de açúcar de primeira (X31), a qual é enviada à seção de secagem, e no licor-mãe. Este último compreende duas correntes: o mel rico (X29), que contém elevados índices de sacarose, e por isto retorna ao cozimento de primeira, e o mel pobre (X30), que ainda contém, apesar de em menor concentração, sacarose possível de ser cristalizada, e por essa razão é utilizado no cozimento de uma segunda massa, denominada de massa de segunda (X37). A centrifugação desta, por sua vez, também resulta em duas correntes: o mel de segunda (X39), e outra fase mais densa, o açúcar de segunda (X40). O mel é enviado à destilaria para a produção de álcool, enquanto que o açúcar de segunda deverá ser misturado a parte do xarope compondo uma mistura denominada de magma (X42), que constitui-se na base inicial do cozimento da massa de primeira.

Tanto a massa de primeira quanto a massa de segunda, antes de serem centrifugadas, repousam em equipamentos denominados de cristalizadores, cujo objetivo é a complementação da cristalização ocorrida durante o cozimento.

Os méis, por sua vez, antes da transferência às etapas subsequentes, são aquecidos para diminuir as suas elevadas viscosidades. A fonte térmica para tanto é, geralmente, o vapor vegetal oriundo do processo de evaporação.

Cada batelada da massa de primeira descarregada (X27), alimenta os cristalizadores, que após o tempo de permanência é transferida à etapa de centrifugação. A vazão mássica transferida à centrifugação (X28) é considerada igual à de entrada nos cristalizadores (X27), pois não há perdas na cristalização.

A centrifugação da massa cristalizada (X28) ocorre com adição de vapor de escape (X33), visando diminuir a viscosidade desta o que permite uma melhor eficiência no processo. Resultam dessa operação três correntes: o mel pobre (X30), destinado ao cozimento da massa de segunda, o mel rico (X32), que após processo de aquecimento com vapor de escape (X34), é enviado ao cozimento de primeira (X29) e, o açúcar de primeira (X31), que é enviado à operação de secagem.

O processo de cozimento da massa de segunda começa com a transferência do mel pobre (X30) para esta seção, sendo aquecido com vapor de escape (X35), na proporção de 2,5% da vazão de mel. Durante este processo ocorre evaporação da água presente na massa,

de tal modo que a vazão da massa de segunda (X37), situa-se em torno de 77,0% da vazão mássica que foi enviada ao cozimento. Em seguida a massa cozida de segunda também passa a repousar nos cristalizadores, sendo posteriormente transferida à seção de centrifugação. Também não há perdas no processo de cristalização da massa de segunda, de modo que a vazão que flui do cristalizador (X38), é a mesma que foi submetida a esta operação (X37).

A centrifugação da massa cristalizada (X38), gera duas correntes: o açúcar de segunda (X40), em torno de 50,0% da vazão de alimentação, destinado à composição do magma, e o mel de segunda (X39), que entra na composição da matéria-prima para álcool. A vazão desta (X39) é calculada pela diferença entre a vazão de alimentação (X38) e a vazão do açúcar de segunda (X40).

4.2.3. SECAGEM

O açúcar que deixa a centrífuga apresenta um teor de umidade que varia entre 0,5% e 2,0% e está a uma temperatura relativamente elevada, entre 55°C e 60°C, o qual não se apresenta em boas condições para ser armazenado, fazendo-se necessário, deste modo, submetê-lo às operações de secagem, seguida de resfriamento.

Vários são os tipos de secadores disponíveis, entretanto, no Brasil, o modelo com tambor rotativo de disposição horizontal inclinada, é o de uso mais freqüente e, portanto, está sendo considerado no presente estudo.

O açúcar centrifugado (X31) alimenta o cone do secador que, em contra-corrente, atravessa o fluxo de ar quente insuflado para o interior do tambor rotativo. O ar é aquecido por trocadores de calor cujo fluido de aquecimento é o vapor de escape. O açúcar branco obtido (X43), deve apresentar umidade situando-se entre 0,04% e 0,07%. O rendimento desse processo (em torno de 3,0%) é calculado com base na vazão de açúcar arrastado pelo ar que sai através do ciclone do secador. Entretanto muitas usinas o recuperam, refundem para em seguida fazer retornar ao processo de secagem. A Figura 4.5, ilustra o processo de secagem do açúcar.

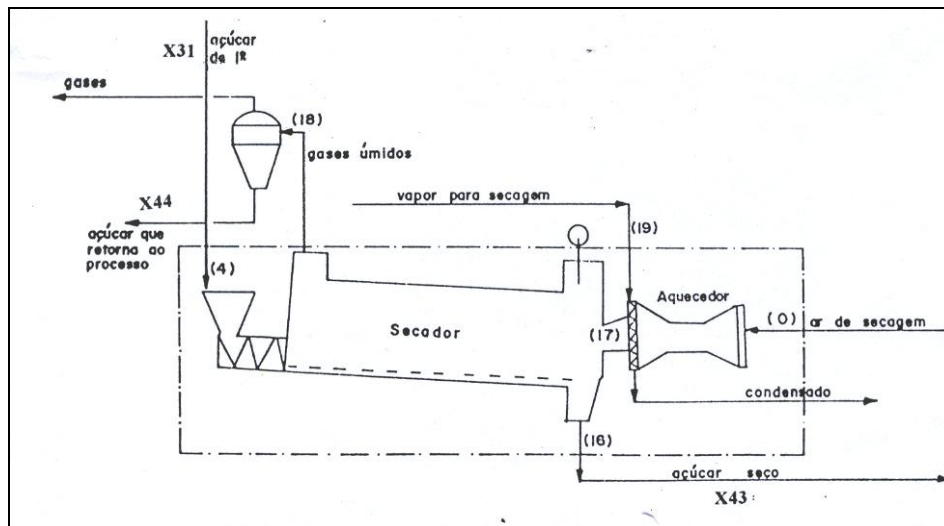


Figura 4.5. Fluxograma do processo de secagem do açúcar

4.3. OPERAÇÕES EXCLUSIVAS DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL

O processo de obtenção de álcool é bastante diferente das operações relativas ao açúcar. Enquanto este consiste basicamente em procedimentos físico-químicos, os processos para álcool dividem-se em duas etapas: operações biotecnológicas vinculadas à fermentação dos açúcares do caldo e/ou mel, seguidas de operações termo-físicas, no que diz respeito à separação do álcool contido no meio fermentado (vinho).

O processo para álcool, inicia-se, na verdade, com as operações para adequação das condições do meio a ser fermentado (geralmente caldo com o mel de segunda), também denominada de preparo do mosto. As etapas posteriores, correspondem à fermentação, de onde se obtém o vinho, e a destilação deste, processo que origina os álcoois (hidratado e anidro).

A vazão de caldo destinada ao processamento para álcool (X3), constitui-se em variável de decisão que dependerá, dentre outros fatores, das restrições de mercado e de capacidade dos equipamentos da destilaria.

4.3 1. PREPARO DO MOSTO

O caldo de cana apesar de se constituir em um bom meio de cultura, necessita, para a sua conversão em álcool de forma mais eficiente, ter sua concentração ajustada para valores adequados, o que pode ser feito adicionando-se mel ou xarope, resultante do processo de fabricação do açúcar, ou simplesmente diluindo-o com água; procedimento muito usual, sobretudo no início da safra, onde a concentração do caldo deve ser menor, por razões da incipiência do trabalho microbiológico na fase preliminar da fermentação. A adição de nutrientes fosforados e nitrogenados é também realizada. Todos estes insumos foram considerados no presente estudo. O caldo misto, que após esses procedimentos passa a ser denominado de mosto (X4) é, em seguida, enviado à seção de fermentação.

4.3.2 FERMENTAÇÃO

Para efeito do presente estudo, foi considerado que o meio em fermentação além dos nutrientes e do caldo misto (X4) será composto também do mel de segunda (X39), subproduto do processo de fabricação do açúcar. A fermentação do mosto, processo de conversão dos açúcares em álcool, é conduzido, na grande maioria das vezes, de forma descontínua, em reatores geralmente denominados de dornas.

Do ponto de vista microbiológico, as leveduras (*sacharomyces cerevisiae*) são os microrganismos que irão converter o açúcar da cana (sacarose) presente no mosto em álcool (etanol). Uma vez concluída esta operação, o mosto fermentado passa agora a ser denominado de vinho bruto (X5), sendo transferido para as centrífugas. O referido processo é chamado de *Melle-Boinot* e promove a reutilização da cultura de leveduras a ser usada em uma nova batelada. A Figura 4.6, apresenta o fluxograma da operação de fermentação do mosto e centrifugação do vinho bruto.

4.3.3 CENTRIFUGAÇÃO

A corrente líquida emergente após a fermentação, o vinho bruto (X5), constitui-se em uma mistura de onde se pode extrair duas frações: leite de leveduras e vinho

delevedurado. O leite de leveduras, é a fase rica em células de leveduras ativas, enquanto o vinho delevedurado, constitui-se em uma corrente rica em etanol.

A separação destas duas fases é feita nas centrífugas, sendo que o *leite* de leveduras é tratado, e posteriormente retorna às dornas na seção de fermentação, em um processo cíclico, dando-se início a uma nova batelada. Por sua vez, o vinho delevedurado (X6), passa a ser bombeado para um tanque de contenção denominado de dorna-volante, para em seguida ser continuamente transferido à seção de destilação. As operações sucessivas de fermentação e centrifugação, promovendo a reutilização da cultura de leveduras para uma nova batelada, é denominado de processo *Melle-Boinot*. A Figura 4.6, apresenta o fluxograma deste processo.

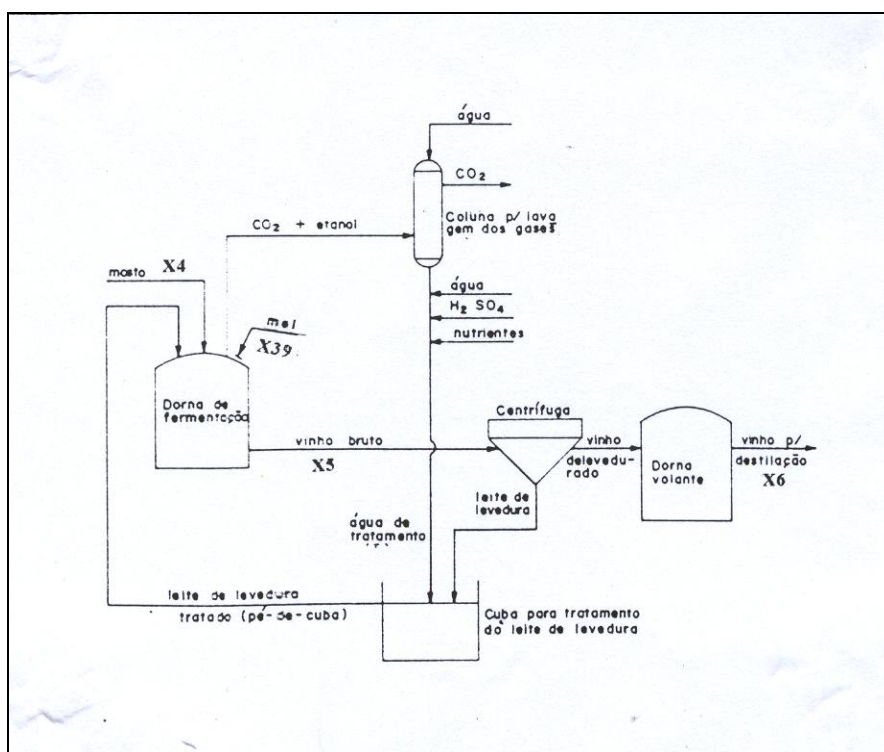


Figura 4.6. Fluxograma do processo de fermentação e centrifugação

4.3.4. DESTILAÇÃO

A destilação é uma operação unitária que se baseia nas diferenças de volatilidade dos componentes de uma mistura líquida a serem separados. No caso em questão, a mistura refere-se ao vinho delevedurado (mistura hidro-alcoólica).

O processo inicia-se com o vinho (X6) sendo transferido da dorna volante para o tanque de contenção de vinho, geralmente situado na parte mais elevada da destilaria já que este é que deverá alimentar as colunas de destilação por gravidade. A Figura 4.7, apresenta o fluxograma do processo de destilação.

O vinho, ao alimentar a seção A1 da primeira coluna (coluna de esgotamento), vai sendo purificado à medida que desce, produzindo vinhaça (X10), a qual é extraída na base desta coluna (seção A). Os vapores alcoólicos produzidos gera uma corrente denominada de flegma, cuja graduação alcoólica varia em torno de 50% (em volume). Por sua vez, a corrente resultante no topo (seção D), circula nos condensadores R, trocando calor com o vinho, sendo que parte do condensado aí gerado retorna como refluxo, recuperando a fração do etanol ainda contida nesta corrente. A outra parte constitui o álcool de segunda, que geralmente é misturado ao vinho e, portanto, retorna à destilação. O flegma, por outro lado, é enviado para uma segunda coluna (B), de destilação propriamente dita. Nesta, retira-se álcool hidratado no topo (seção B) e, no fundo (seção B1), uma composição predominantemente aquosa, denominada de flegmaça, que também irá misturar-se à vinhaça. Em sua seção intermediária retira-se outra composição, menos densa que a flegmaça, denominada de óleo fúsel (rica em álcoois amílico e iso-amílico).

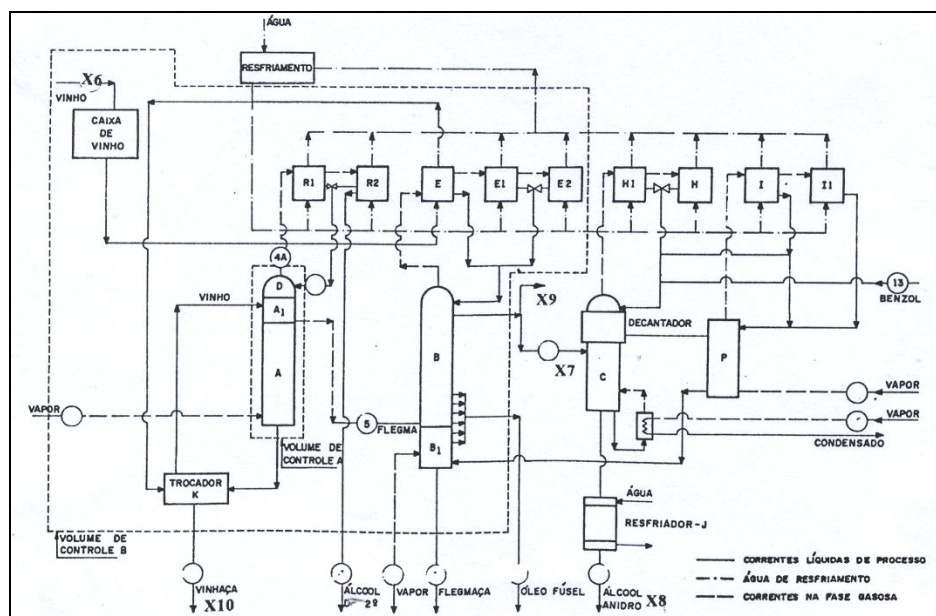


Figura 4.7. Fluxograma do processo de destilação

Parte do álcool hidratado (X7), é enviado para uma terceira coluna (C) também conhecida como retificadora, onde ocorre a desidratação. A outra parte (X9), é transferida para os tanques de estocagem destinada ao mercado. A corrente enviada à retificação é convertida em álcool anidro (X8), sendo empregado o ciclo-hexano ou o glicerol como agentes desidratantes. Da mesma forma que o álcool hidratado, o anidro é transferido para os tanques de estocagem para posterior comercialização. A finalidade da destilação é, portanto, purificar e concentrar o álcool contido na mistura. O calor usado nesse processo (com o objetivo de separar o álcool contido no vinho) é fornecido pelo vapor que pode ser injetado nas colunas de forma direta ou indireta, com o uso de refeedor.

Os condensadores, E (coluna B), H (coluna C) e I (recuperação do desidratante, P), juntamente com o trocador de calor K, situado na base da primeira coluna, apresentam função análoga aos condensadores R, trocando calor com o vinho que alimenta esta coluna.

4.4. PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DO BAGAÇO

A quantidade total de bagaço (X11), é proporcional à vazão de cana (Xo), e varia entre 25% e 30%, a depender do teor de fibra na mesma. Por sua vez, entre 70% e 80%

dessa quantidade é destinada ao consumo nas caldeiras para geração de vapor de processo (X12). Considerou-se o bagaço com umidade de 50%.

Ao processo simultâneo de obtenção de energia mecânica e térmica, a partir de uma fonte de calor primária, denomina-se de co-geração. O que se deseja com esta é aproveitar o vapor produzido pela queima do bagaço, movimentar os equipamentos da própria indústria, a exemplo de desfibradores, picadores, moendas e bombas, bem como acionar, simultaneamente, conjuntos geradores de energia elétrica, que promovem a geração de excedentes de eletricidade.

Desta forma, o bagaço não utilizado na geração de vapor de processo (X13), portanto no máximo 30% (já que 70% corresponde ao mínimo necessário ao processo e demanda interna de eletricidade), poderá ser destinada à geração de vapor para trabalho mecânico, e posteriormente convertido em eletricidade (excedente) nos turbo-geradores, caso a usina esteja dimensionada para tanto. Esta energia elétrica excedente (X14), poderá ser comercializada com as concessionárias, se a tarifa for compensadora.

Esta possibilidade de geração elétrica extra depende do perfil térmico da unidade produtora, bem como de suas intenções comerciais. Desse modo, pode-se ter pelo menos três tipos de usinas: aquelas que visam a maximização do excedente de bagaço, mantendo uma dependência de fornecimento de energia elétrica por parte das concessionárias, em torno de 31% do total consumido; as que também visam o mesmo, mas que são auto-suficientes em energia elétrica e, por fim, aquelas objetivam a geração de excedente de energia elétrica. Neste último caso, pode-se fazer duas opções: a primeira com geração de excedente de energia elétrica via co-geração, podendo existir excedente de bagaço (X15), e a segunda apenas com geração de excedente de energia elétrica, sem excedente de bagaço.

A primeira opção desse último caso, motivado por cenário em que tanto a venda de energia quanto a de bagaço sejam rentáveis (conforme otimização no Capítulo 6), vem sendo perseguida pelas indústrias. Neste caso, a energia elétrica adicional é gerada em turbina de extração e condensação, já que a energia da auto-suficiência continuaria sendo obtida na turbina antiga (extração). Um ciclo vapor com este fim, é mostrado na Figura 4.8.

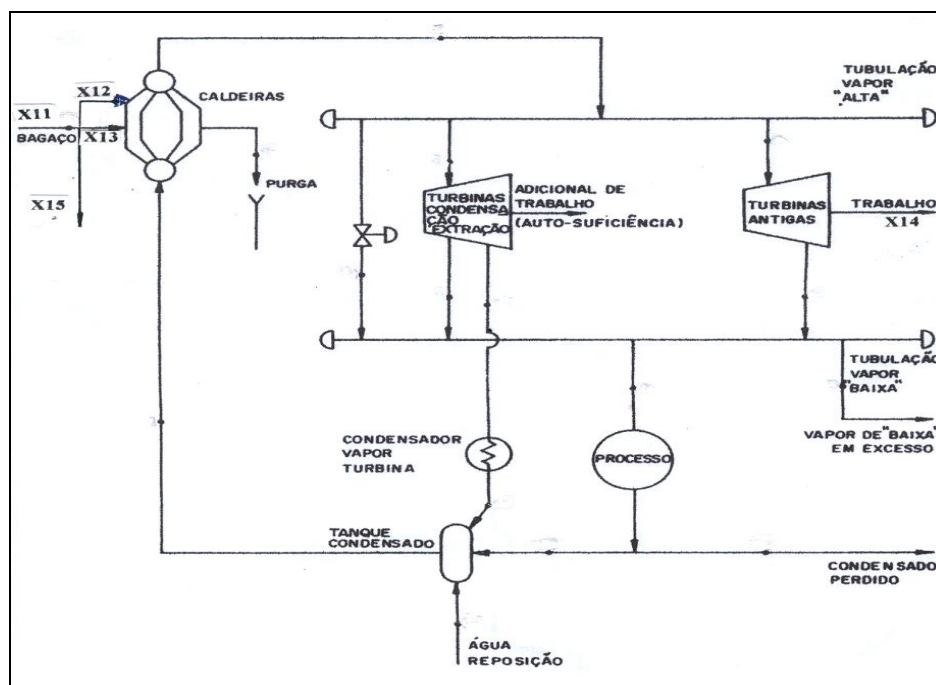


Figura. 4.8. Fluxograma de geração de vapor para o processo e trabalho

Entretanto, a despeito do evidente potencial para a comercialização de energia elétrica pelas usinas, isto apenas só seria realizável, caso de fato a infra-estrutura de geração de vapor fosse mais do que suficiente para o abastecimento interno, tanto no que se refere à demanda do próprio calor de processo quanto a de eletricidade. Ocorre entretanto, que a disponibilidade para a geração de excedentes depende não apenas de investimentos em co-geração, mas também da atratividade da tarifa de energia elétrica, em caso de comercialização, bem como dos preços praticados no mercado para o bagaço, já que este também tem sido bastante valorizado para diferentes fins.

Após o bagaço ser destinado à geração de vapor de processo e para eletricidade, caso ainda ocorra sobra, esta parcela poderá ser destinada a outros fins (X15). Os empregos alternativos mais frequentes referem-se à alimentação bovina e geração de calor em fábricas porventura existentes nas vizinhanças das usinas. Contudo, da mesma forma que o destino para a eletricidade, o fluxo de bagaço para outros fins dependerá do seu custo de oportunidade. O máximo que se poderá dispor para tais fins, deverá ser menor que a parcela potencialmente disponível para a geração elétrica.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE PRODUTORA PARA FINS DE OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO

5. INTRODUÇÃO

Apesar do dimensionamento do fluxo de chegada dos veículos com matéria-prima ter sido desenvolvido com base na Usina Aliança (Bahia), cuja capacidade de moagem é de 170 t/h, conforme consta no Capítulo 2, o modelo de programação linear que está estabelecido no Capítulo 6, poderá ser adequado a qualquer capacidade instalada, já que suas características, e portanto seus processos, são típicos de qualquer unidade industrial sucro-alcooleira. Nesse sentido, em função da disponibilidade de dados médios do processo de produção de açúcar e álcool no contexto nacional, inclusive com os rendimentos e produções específicas das operações unitárias, contidos no *Manual de Recomendações da Indústria do Açúcar e do Álcool*, elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo –IPT (09), optou-se pelo desenvolvimento de modelagem matemática, para fins de otimização da produção, ajustada à capacidade de moagem de 517 t/h, com as correspondentes capacidades das operações unitárias a jusante.

Esses parâmetros serão também de fundamental importância para a etapa de validação do correspondente modelo matemático, já que os resultados aqui obtidos poderão ser comparados com os resultados contidos no referido *Manual de Recomendações* do IPT.

Outro aspecto a considerar, diz respeito à representatividade da capacidade ora proposta, a qual encontra-se no contexto do atual cenário de produção nacional, tendo em vista que o segmento sucro-alcooleiro vem passando por um processo de modernização tanto no plano administrativo, quanto no que diz respeito à base tecnológica. Fatos como as ações de produção, geradas em resposta à crise promovida pelo desabastecimento do mercado interno de álcool entre 1989 e 1991, associada à razoável regularidade dos preços do petróleo nos anos de 1990, bem como à estabilização dos preços do açúcar no mercado internacional, decorrente da consolidação de outros países produtores e pela política de subsídios da produção europeia, impulsionaram mudanças e re-arranjos com alterações da

personalidade jurídica de muitas dessas empresas, tendo como consequências o fechamento e/ou aquisições de unidades produtoras por grupos mais capitalizados.

Esse efeito tem levado à concentração da produção em torno dos grupos compradores bem como o aumento da capacidade instalada das unidades remanescentes. Tal constatação, converge com o perfil industrial de referência, escolhido para a realização do presente estudo.

Assim, os itens a seguir descrevem as características da infra-estrutura material da capacidade de produção referenciada no estudo do IPT, as quais serão indispensáveis para o estabelecimento das limitações tecnológicas requeridas para a construção do modelo matemático proposto. Trata-se, na verdade, de uma usina hipotética, entretanto dentro das especificações médias das grandes indústrias brasileiras deste segmento.

5.1. CARACTERIZAÇÃO DA UNIDADE PRODUTORA

A caracterização dos equipamentos necessários com os seus limites de capacidade e respectivos rendimentos das diferentes operações unitárias, bem como a área total disponível para o empreendimento e o tempo de safra, estão também de acordo com o levantamento do IPT. Os dados gerais, sobre as capacidades que caracterizam a unidade de referência, estão listados na Tabela 5.1, conforme a seguir.

Tabela 5.1. Capacidades da unidade de referência

Moagem de cana	Álcool hidratado	Álcool anidro	Açúcar Cristal	Estoque de álcool	Estoque de açúcar	Área Total	Dias Safra
517 t/h	15 t/h	10 t/h	30 t/h	30 t/h	40t/h	12.000ha	210

Fonte: Referência (09)

5.1.1. CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS E SUB-PRODUTOS

Na rota de produção do álcool, os produtos são: álcool etílico hidratado carburante (AEHC) e álcool etílico anidro carburante (AEAC). O álcool anidro (de concentração 99,30 °INPM) e o hidratado (93,80° INPM) são empregados para fins combustíveis em veículos automotivos do ciclo Otto. O anidro é empregado na mistura com a gasolina C, para veículos movidos a gasolina, enquanto o hidratado é usado em veículos movidos exclusivamente a álcool.

Quanto ao açúcar o produto obtido corresponde ao de cor branca, do tipo cristal. É uma substância tradicionalmente empregada na alimentação humana na função de adoçante, com plena aceitação nos mercados nacional e internacional.

São ainda obtidos paralelamente aos produtos principais os seguintes sub-produtos: vinhaça, bagaço de cana, eletricidade e torta. Obviamente que a obtenção desses sub-produtos está diretamente condicionada às vazões dos produtos principais (açúcar e álcool).

A vinhaça, sub-produto vinculado à produção alcooleira, mesmo não sendo comercializada diretamente, substitui a aquisição de parte dos fertilizantes, principalmente aqueles relativos à adubação mineral potássica, ao ser usada para aplicação na lavoura, contribui com a diminuição dos custos referentes a estes insumos e, portanto, impacta positivamente o lucro total da fábrica, cuja função será o objetivo de maximização do modelo matemático.

A torta, por sua vez, corresponde ao material obtido com a filtração a vácuo da fase que foi sedimentada no decantador (lodo). Como é rica em minerais, matéria orgânica e umidade, é destinada à lavoura da própria indústria, ou comercializada para propriedades agrícolas em suas proximidades, para aplicação como fertilizante do solo.

O bagaço de cana consiste em um dos sub-produtos atualmente mais valorizados, visto que as opções para seu emprego é bastante ampla. As aplicações mais frequentes nas usinas dizem respeito ao uso como fonte térmica das caldeiras, gerando de vapor para o processo, e para a co-geração de eletricidade.

Por fim, a eletricidade, corrente obtida pela expansão do vapor de alta pressão nos turbo-geradores, é o único dos sub-produtos que, de fato, registra operações comerciais regulares, sendo a sua geração e consumo, regulamentado por normas específicas do Ministério de Minas e Energia e da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Deste modo, o seu excedente, quando ocorre, será considerado para fins de comercialização.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS POR OPERAÇÃO UNITÁRIA

Os dados das capacidades totais da instalação industrial de referência, conforme anteriormente apresentado, bem como de cada operação, com as informações das características materiais da sua infra-estrutura industrial, fazem-se necessários em função do estabelecimento das restrições quanto aos limites das capacidades dos equipamentos, os quais serão empregados na construção do modelo matemático da programação linear.

Como essas unidades podem produzir tanto açúcar quanto álcool, existem operações que são exclusivas a um ou outro produto, bem como outras que são comuns a ambos. Neste sentido, o item a seguir caracteriza a infra-estrutura para o processamento da matéria-prima de acordo com o produto a ser obtido.

5.2.1 EQUIPAMENTOS COMUNS ÀS OPERAÇÕES DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

5.2.1.1. Preparo da cana e extração do caldo

As operações de lavagem da cana e seu posterior desfibramento, realizado pelos martelos desfibradores e as facas rotativas, compreendem a etapa do que se denomina de preparo da cana, enquanto que a operação subsequente, a moagem, consiste no esmagamento da cana desfibrada para obtenção do seu caldo.

De um modo geral nesta fase do processo fazem parte os seguintes equipamentos: lavador de cana, facas rotativas, desfibradores e o tandem de moagem.

O *tandem* necessário deverá conter 6 ternos (42" x 84"), acionados com três turbinas, dotado de sistema de embebição composto, sendo feita adição de água nos dois últimos ternos com recirculação aos anteriores. O produto resultante, o caldo misto, é retirado no primeiro e no segundo terno. Este conjunto é suficiente para esmagar até 550 t de cana por hora (a capacidade referência foi 517 t/h). A embebição máxima considerada é de 2,5% de cana, que deve gerar uma vazão máxima de caldo misto em torno de 613 t/h.

5.2.1.2 Tratamento do caldo

O tratamento é basicamente uma operação físico-química, e tem por objetivos minimizar as perdas de sacarose do caldo, removendo material insolúvel e substâncias indesejáveis, para que, ao resultar em um caldo límpido, possibilite a obtenção de um

açúcar mais branco. A tecnologia empregada é relativamente padronizada sendo seguida por praticamente todas as usinas, no que diz respeito à produção de açúcar.

Por outro lado, conforme já evidenciado no Capítulo 4, o tratamento do caldo para álcool não está consolidado, sendo que algumas usinas utilizam parte do caldo tratado para açúcar, na fabricação de álcool. Desta forma, este processo será considerado como sendo comum à rota de ambos os produtos. Os equipamentos para as operações de tratamento, com suas respectivas capacidades, encontram-se listados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2. Capacidades dos equipamentos empregados no tratamento do caldo

EQUIPAMENTO	CAPACIDADE (t/h)
Peneira	650
Sulfitação	270
Tanque de dosagem (calagem)	300
Aquecedores	300
Decantador	300
Filtro	20

Fonte: Referência 09

5.2.1.3. Geração de vapor e turbogeradores de eletricidade

O acionamento de equipamentos nas usinas é feito basicamente através de vapor e energia elétrica, sendo o bagaço de cana o combustível predominantemente empregado, vez que na partida das unidades muitas vezes pode-se empregar a lenha como complemento do mesmo. Em geral as caldeiras mais utilizadas são do tipo grelha basculante, grelha inclinada e aquelas que empregam queima em suspensão.

O vapor gerado, cuja pressão situa-se em torno de 20 Kgf/cm^2 , é geralmente empregado para dois fins: acionamento de equipamentos e geração de energia elétrica. O primeiro é feito por turbinas a vapor, quase sempre de simples estágio e de contrapressão, que também são empregados nos turbogeradores. A energia elétrica consumida é, na sua maior parte, autogerada e a restante adquirida da rede concessionária, sendo a relação entre essas parcelas dependente do balanço energético de cada unidade

Os equipamentos turboacionados são, em geral, os picadores, desfibradores, ternos de moenda e bomba de alimentação de água de caldeira. A energia elétrica consumida é

geralmente autogerada, podendo ser adquirida se a geração for insuficiente, ou comercializada em parte, se ocorrer excedente, a depender do balanço térmico da usina.

O vapor de contra-pressão das turbinas, à pressão de 1,5 Kgf/cm², é utilizado no processo produtivo. O condensado retorna às caldeiras, ou é empregado para fins de aquecimento, como por exemplo, água de lavagem de filtros e outros equipamentos.

De acordo com a capacidade de moagem e de produção de açúcar e álcool, foi dimensionada, resumidamente, a seguinte infra-estrutura associada à geração de vapor:

- a) 4 Geradores multi-estágio (13 Kg de vapor/Kwh) com capacidade de geração de energia elétrica de 1.200Kwh/h (por gerador, sendo um de reserva).
- b) 6 Geradores de vapor com capacidade produção de 40 t de vapor/h (por equipamento)
- c) Turbo-bomba para água de alimentação de caldeira
- d) Tanque de recuperação de condensado, com retorno de 60%

5.3. EQUIPAMENTOS EXCLUSIVOS DA PRODUÇÃO DE ÁLCOOL

A produção de álcool compreende as operações de preparo do mosto, fermentação, centrifugação e destilação do vinho. As capacidades dos equipamentos que realizam estas operações, encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Capacidades dos equipamentos empregados na produção de álcool

Operação	Equipamento	Capacidade unitária	Quantidade	Capacidade total
Preparo Mosto	Pré-Fermentador	250 m ³	2	500 m ³
Fermentação	Dorna	500 m ³	18	9.000 m ³
Centrifugação	Centrífuga	400 m ³ /h	02	800 m ³
Contenção vinho	Dorna volante	500 m ³	01	500 m ³
Destilação	Colunas	120 m ³ /dia	05	600 m ³ /dia
Armazenamento	Tanque de álcool	96 m ³ /dia	05	480 m ³ /dia

Fonte: Referência 09.

O módulo de destilação engloba as colunas de destilação, que são responsáveis pela separação e concentração do álcool obtido no vinho. Dos cinco conjuntos de destilação

listados na Tabela 5.3, três referem-se à obtenção de álcool hidratado e dois, para a desidratação com obtenção do álcool anidro.

5.4. EQUIPAMENTOS EXCLUSIVOS DA PRODUÇÃO DE AÇÚCAR

As operações de fabricação do açúcar propriamente ditas, compreendem as etapas de evaporação, cozimento, cristalização, centrifugação e secagem.

Para fins do balanço de massa, a infra-estrutura de evaporação do caldo foi dimensionada para dois conjuntos de evaporadores de múltiplo efeito (4 efeitos cada), idênticos, com um pré-evaporador, e operando paralelamente. Esta operação poderá ser realizada continuamente a depender da disponibilidade do caldo a ser processado.

O cozimento do xarope é feito de modo intermitente, em vasos a vácuo denominados de cozedores. Geralmente emprega-se o sistema de duas massas, cuja operação inicia-se no cozedor de segunda. Ainda que a maioria das usinas operem com processos intermitentes, processos contínuos já são realidade em muitas unidades. Neste estudo, converteu-se a produção intermitente (t/batelada) do cozimento de primeira para contínua (t/h), dividindo-se o número de bateladas diárias (16 bateladas) por 24 horas/dia. Do mesmo modo foi feita a conversão da produção da massa de segunda, considerando-se, contudo, que são necessárias 3 bateladas de segunda em cada rodada de primeira.

Os cristalizadores, cuja função é completar a recuperação do açúcar através de contínua movimentação da massa descarregada, constituem-se em estruturas semi-tubulares, dotados de serpentinas rotativas através das quais circulam o fluído de refrigeração, que pode ser ar ou água.

O processamento do açúcar de segunda, que após misturado ao xarope constitui a base para o cozimento e formação dos cristais de primeira, é feito em tanques denominados de misturadores de magma, dotados de trocadores de calor tubular e homogeneizadores.

A operação de separação dos méis do açúcar ocorrem nas centrífugas, e como são classificados dois tipos de açúcares (de primeira e de segunda), tem-se igualmente as centrífugas de primeira e de segunda. As primeiras foram dimensionadas para operarem de modo descontínuo, sendo necessárias quatro unidades, suficientes para realizarem 16

bateladas diariamente. Para o açúcar de segunda foi dimensionada uma centrífuga contínua suficiente para processar aproximadamente 12 t/h, já que são realizadas 3 bateladas de açúcar de primeira para cada batelada de açúcar de segunda.

Por fim, a secagem do açúcar tem por objetivo baixar o seu teor de umidade, em um nível tal que não permita o desenvolvimento de microorganismos os quais podem promover a deterioração da sacarose. O equipamento dimensionado é constituído de cilindro metálico rotativo, com inclinação entre 1:15 e 1:20, sendo dividido em duas partes: a de secagem, onde é insuflado ar quente, e a de resfriamento, por onde circula ar em temperatura ambiente. Compõe ainda a estrutura do secador o ciclone no qual deposita-se pequena percentagem de açúcar que é arrastado do secador pelo ar de secagem. Este, entretanto, não representa perdas, pois é refundido com vapor e retorna ao processo.

Fazem parte ainda a base material complementar constituída de tanques de contenção de mel e xarope, bem como de preparação do magma, geralmente dotados de homogeneizadores, a fim de evitar o endurecimento do meio. A tabela 5.4, apresenta as capacidades desses equipamentos para a unidade industrial de referência.

Tabela 5.4. Dimensionamento dos equipamentos para a fabricação de açúcar

Operação	Equipamento	Capacidade unitária (t/h)	Quantidade	Capacidade total (t/h)
Evaporação	Evaporador	20	4	80
Cozimento de 1 ^a	Cozedor	12	6	72
Cristalização de 1 ^a	Cristalizador	40	20	80
Cristalização de 2 ^a	Cristalizador	15	5	75
Centrífuga de 1 ^a	Centrífuga	35	4	140
Cozimento de 2 ^a	Cozedor	12	1	12
Centrifugação de 2 ^a	Centrífuga	35	2	70
Mistura de magma	Tanque	15	1	15
Tanque de mel rico ^a	Tanque	10	1	10
Tanque mel pobre	Tanque	25	1	25
Tanque de mel 2 ^a	Tanque	20	1	20
Tanque de xarope	Tanque	60	1	60
Secagem do açúcar	Secador	30	3	90

Fonte: Referência 09

Conforme apresentado no Capítulo 4, a operação de cozimento provavelmente é a mais importante de todo o processo, visto que, de fato, é onde ocorre a cristalização da

sacarose. Constitui-se, portanto, no gargalo do processo de fabricação do açúcar, pois, sendo este um processo por batelada, limita as operações relativamente contínuas a montante. Isto também pode ser assumido no que diz respeito à etapa de fermentação para a produção de álcool, já que esta é igualmente uma operação intermitente. Tais considerações, serão de fundamentais importâncias quando do estabelecimento das restrições à maximização do lucro, de acordo com o que será tratado no Capítulo 6.

5.5. RENDIMENTOS DAS OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Os fluxos de matéria-prima e das vazões submetidas a cada etapa do processo, apresentam rendimentos que variam em função da operação unitária correspondente. Algumas operações aumentam a vazão mássica devido a injeção de determinados volumes de material, dada as características do processo, resultando no incremento do rendimento.

Estes coeficientes, serão usados nos balanços de massa que estão implementados no Capítulo 6, visando atender à modelagem matemática da programação linear. A Tabela 5.5, apresenta os valores dos rendimentos relativos aos balanços das operações unitárias.

Tabela 5.5. Rendimentos das operações unitárias

OPERAÇÃO	RENDIMENTO
Extração (para caldo)	1,025 m ³ de caldo misto/t cana
Extração (para bagaço)	300kg de bagaço/t de cana
Tratamento preliminar (peneira)	0,9920 m ³ caldo tratado/m ³ caldo misto
Preparo do mosto	1,08 m ³ de mosto/m ³ caldo tratado
Fermentação	0,864 m ³ de vinho bruto/m ³ de mosto
Centrifugação	0,774 m ³ de vinho delevedurado/m ³ de vinho
Destilação	0,8916 m ³ de flegma/m ³ de vinho delevedurado
Desidratação	0,9244 m ³ de álcool anidro/m ³ álcool hidratado
Umidade do bagaço	50,0%
Rendimento dos turbo-geradores	38,2%
Produção específica de vapor	2,15 t de vapor/t de bagaço
Geração de energia elétrica	0,086MWh/t de bagaço
Calagem	1,0417 t de caldo caleado/t de caldo
Decantação	0,9600 t de caldo clarificado/ t de caldo
Filtração	0,7997 t de torta/t de lodo
Evaporação	0,1757 t de xarope/t de caldo decantado
Cozimento de primeira	1,1087 t de massa cozida/t de xarope
Cozimento de segunda	0,7700 t de massa cozida/t de mel pobre
Centrifugação de primeira	0,5028 t de massa centrifugada/ t de massa
Centrifugação de segunda	0,5503 t de massa centrifugada/t de massa

Secagem do açúcar	0,9702 t de açúcar seco/t de açúcar úmido
-------------------	---

Fonte: Referência 09.

CAPÍTULO 6

MODELAGEM MATEMÁTICA PARA A OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO

6. INTRODUÇÃO

Tomando-se por base o modelo de otimização do fluxo de matéria-prima à usina, de acordo com os conceitos de teoria de filas, conforme aplicado nos Capítulos 2 e 3, pode-se completar o processo otimizador, a partir de outro modelo, agora estruturado de forma a assegurar a maximização do lucro total gerado pela comercialização da produção sucro-alcooleira, utilizando-se dos fundamentos da programação linear.

Os modelos de programação linear constituem representações matemáticas de problemas de otimização com restrições. Segundo GOLDBARG & LUNA (28), estes modelos apresentam características comuns, as quais são importantes para a identificação de problemas que podem ser resolvidos com esta técnica de programação. As características comuns, são: objetivos; variáveis de decisão, restrições, e, parâmetros.

Os *objetivos* gerais da otimização de uma programação linear são maximizar ou minimizar. A maximização quase sempre envolve lucros enquanto a minimização geralmente está associada a custos. A *função-objetivo* é uma expressão matemática que é utilizada para se otimizar o lucro total ou o custo total (ou outros objetivos tais como: receita, tempo, distância percorrida e desperdícios).

Para uma determinada operação, as *variáveis de decisão* representam as escolhas possíveis ao alcance do tomador de decisão em relação às quantidades de entradas, a exemplo de combinação de *inputs* para se minimizar custos, ou em relação às saídas, a exemplo da combinação de *mix* de produção para se maximizar lucros (ou receitas).

As *restrições* são limitações que restringem as opções disponíveis para os tomadores de decisão, e definem o conjunto de todas as combinações viáveis para as variáveis de decisão. Matematicamente estão associadas a limites máximos ($\leq$), limites mínimos ($\geq$) ou valores exatos ($=$), os quais podem estar escritos, por meio de inequações ($\geq$ ou $\leq$) e equações ($=$). Um mesmo modelo de programação linear, poderá conter uma ou mais dessas limitações. De um modo geral, as restrições de determinado problema definem o conjunto de todas as combinações viáveis para as variáveis de decisão.

O modelo de programação linear consiste em uma declaração matemática para cada restrição. Essas declarações consistem em símbolos (por exemplo x_n , $n = 1, 2, 3, \dots$) que representam as variáveis de decisão (por exemplo quantidades a serem produzidas), e em valores numéricos denominados *parâmetros* (por exemplo, c_n , $n = 1, 2, 3, \dots$, que representariam os lucros unitários para cada variável e b_n , $n = 1, 2, 3, \dots$, representando os limites das restrições). Os valores das variáveis de decisão devem ser considerados como sendo não-negativos (sempre maiores ou iguais a zero).

Uma declaração matemática relativamente padrão, seria a busca de uma solução ótima (por exemplo maximização do lucro total) para uma dada função-objetivo Z (expressa em função das quantidades produzidas), que represente um processo produtivo qualquer, sujeito a um conjunto de restrições pré-estabelecidas. A convenção matemática para uma representação genérica dessa declaração, de acordo com a simbologia proposta, seria:

$$\text{Maximizar } Z = c_1.x_1 + c_2.x_2 + \dots + c_n.x_n,$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$a_{11}.x_1 + a_{12}.x_2 + \dots + a_{1n}.x_n \leq b_1$$

$$a_{21}.x_1 + a_{22}.x_2 + \dots + a_{2n}.x_n \leq b_2$$

$$a_{m1}.x_1 + a_{m2}.x_2 + \dots + a_{mn}.x_n \leq b_n$$

$$x_1 \geq 0; \quad x_2 \geq 0, \dots, x_n \geq 0$$

Nesse sentido, tomando-se por base a estruturação do modelo de otimização do fluxo de matéria-prima à usina, de acordo com os conceitos de teoria de filas, conforme aplicado nos Capítulos 2 e 3, pode-se completar o processo otimizador, a partir de modelo de programação linear, agora estruturado de forma a assegurar a maximização do lucro total gerado pela comercialização da produção sucro-alcooleira.

Para tanto, faz-se necessário considerar as limitações do processo produtivo e de mercado, de acordo com:

- 1) Restrições, determinadas por:
 - a) Capacidade produtiva
 - b) Mercado para os produtos e sub-produtos
 - c) Capacidade de armazenagem
- 2) Custos históricos observados nas safras
- 3) Preços de venda praticados no mercado
- 4) Lucro com a comercialização de produtos e sub-produtos

6.1 BASE DE CÁLCULO E DISCUSSÃO DAS RESTRIÇÕES

As discussões das restrições apresentadas no presente capítulo tem por objetivo esclarecer detalhes sobre as limitações técnicas e comerciais consideradas na modelagem matemática. Tais limitações foram agrupadas em três categorias: de mercado (comercialização de produtos), de Capacidade (produção e armazenagem) e de Balanço de Massa. Entretanto, as duas últimas, por serem complementares, serão avaliadas em conjunto.

Essas restrições, tais como limites de comercialização dos álcoois, açúcar e sub-produtos, máxima capacidade dos equipamentos de processo e de estocagem, bem como a equivalência entre as correntes de entrada e de saída em cada operação unitária, serão discutidas e fundamentadas a seguir, sendo posteriormente convertidas em linguagem matemática para serem empregadas na construção do modelo.

6.1.1. RESTRIÇÕES DE MERCADO

As oscilações no consumo dos principais produtos sucro-alcooleiros dependem, significativamente, de apuradas análises das taxas de crescimento da economia nacional, e de sua aceitação no mercado internacional, parâmetros estes que não são objeto de discussão no presente item, onde serão analisados apenas fatores atuais e suas oscilações sazonais, projetados para um curto espaço de tempo, e que possam ser quantificados, já que o objetivo é a estruturação do modelo matemático em proposição.

6.1.1.1. Restrições relativas à comercialização de álcool e seus sub-produtos

Para o álcool anidro e hidratado, os limites de comercialização foram fixados com base em seus respectivos consumos médios, ao longo dos últimos cinco anos. Para tanto dividiu-se o consumo total registrado no Balanço Energético Nacional 2003 (29) durante o período mais recente disponível (entre 1998 e 2002) pelo número de unidades industriais em atividade.

Durante este período observou-se que os consumos médios para ambos os tipos de álcoois foram equivalentes, situando-se em torno de 6,0 bilhões de litros, o que corresponde a uma taxa horária de 684.931 litros. Como no mesmo período encontravam-se em atividade, em média, 180 unidades industriais, tem-se que a demanda média por indústria é de aproximadamente 4.000 litros/hora, ou 3,2 t/h, considerando-se a densidade média de 800 kg/m^3 .

Deve-se, entretanto, considerar que ao longo do período em questão a demanda pelo álcool hidratado decresceu à taxa de 9,79% aa, enquanto o anidro, pelo contrário, cresceu à taxa de 3,75% aa. Este comportamento indica uma possível tendência do emprego do álcool enquanto um aditivo (caso do anidro) do que como um combustível integral (hidratado). Assim, ainda que a média das demandas tenham sido muito próximas, devem ser dados tratamentos diferenciados em relação aos prováveis limites de comercialização desses produtos.

Com base em dados do Ministério da Agricultura (30), e de organismo do segmento sucro-alcooleiro (31), foram estimados incrementos e decrementos diferenciados em torno da média calculada.

Para o hidratado, ainda que sua demanda seja decrescente, dificilmente chegaria a ser nula a médio prazo, já que permanecem em circulação no mercado uma considerável frota de veículos movidos exclusivamente a álcool. Desta forma, estima-se uma demanda mínima de 1,0 t/h, em torno de 31,0% da demanda média levantada (3,2 t/h). Por outro lado, de acordo com as taxas atuais de crescimento das vendas de veículos novos a álcool, em torno de 74% a.a (03), associado aos menores preços deste produto em relação à gasolina, pode-se estimar uma demanda máxima aproximadamente de 6,0 t/h de álcool hidratado, no curto ou médio prazo. Em resumo, os limites de comercialização do álcool hidratado devem situar-se entre 1,0 t/h e 6,0 t/h.

O comportamento da demanda do anidro, é mais favorável. O menor consumo provável seria de 3,0 t/h, aproximadamente 94,0% da média. Isto porque mantidas as condições atuais, o seu percentual de adição à gasolina tem sido no mínimo de 22,0%. Desse modo, caso a demanda pelo derivado de petróleo se estabilize, esta adição mínima poderá ser mantida. Por sua vez, as vendas de veículos novos exclusivamente a gasolina, apesar de apresentar uma taxa de crescimento (8,04% a.a) muito inferior que a do hidratado (74%), representa 96% dos veículos comercializados. Este fator, associado ao fato da tradição, bem como de oferta assegurada de gasolina em praticamente todo o país, além do percentual de adição que pode chegar a até 25,0%, proporciona uma maior confiança ao consumidor em relação ao produto (gasolina) e, conseqüentemente, ao etanol anidro. Pode-se assim, caso o cenário sugerido se confirme, estimar uma elevação de sua demanda a uma taxa de até 8,0 t/h.

Constata-se, assim, que de acordo com a conjuntura evidenciada, os limites de mercado para o anidro devem situar-se entre 3,0 t/h e 8,0 t/h.

Para a vinhaça, por sua vez, foi tomado como referência os valores máximos e mínimos permitidos para a sua disposição na lavoura, em função da concentração de nutrientes (NPK) presentes no solo. Segundo a COPERSUCAR (32), esses valores situam-se entre 80m³/ha. ano e 120m³/ha.ano (para vinhaças com concentrações entre 4kg de K₂O/m³ e 2 kg de K₂O/m³). Tomando-se por base estas relações pode-se chegar às taxas de aplicação entre 244 m³/h e 367 m³/h (considerando um área total em torno 25.000 hectares, incluindo cana para açúcar).

Entretanto, segundo o IPT (09), em 70% das unidades nacionais a produção da vinhaça situa-se entre 12 e 16 vezes do volume de álcool hidratado obtido na destilação. Como a capacidade de produção do hidratado informada no Capítulo 5 (item 5.1), é de 15 t/h (18,75 m³/h), têm-se que os limites de “comercialização” da vinhaça, seriam de 225 m³/h e de 300 m³/h. Constata-se, assim, que a restrição de ordem tecnológica, relativa à produção específica (m³ de álcool/m³ de vinhaça) é mais restritiva que a anterior, diante das limitações de mercado e de estocagem dos produtos e, portanto, é a que deverá prevalecer.

6.1.1.2. Relativas ao mercado de açúcar e seus sub-produtos

O mercado para o açúcar está diretamente relacionado ao crescimento da população e, evidentemente, com o seu poder de compra, bem como da demanda das indústrias de transformação. Depende ainda da participação do mercado de produtos dietéticos, substitutos da sacarose, e da evolução das taxas de exportação, sobretudo para a Europa e Estados Unidos, apesar de ser uma *comoditie* presente em todos os mercados do mundo. Como o Brasil é um dos principais produtores mundiais, variações climáticas muito desfavoráveis, tanto no contexto nacional, quanto em outros países de produção expressiva, também influenciam a oferta e, portanto, a comercialização do produto.

Conforme já informado no Capítulo 1, o Brasil produziu 20,65 milhões de toneladas de açúcar ao longo do ano de 2004 . No mesmo período, encontravam-se em operação 292 unidades produtoras (33), gerando uma média de produção de 78.512,3 toneladas por indústria (aproximadamente 9,0 t/h). Evidentemente que este é um valor médio, e engloba unidades produtoras com expressivas diferenças em escala de produção. A unidade de referência para o presente estudo de caso, pode ser considerada como uma destacada indústria com capacidade de moagem de 517 t/h, portanto muito acima da média. Nesse sentido, considerou-se que a demanda média para o açúcar produzido pela mesma, deverá ser em torno de 70,0% maior, o que implica em 15,3 t/h.

Avaliações da Cooperativa dos Produtores de Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo – COPER SUCAR, divulgadas na imprensa (34), indicam perspectivas de crescimento tanto do mercado nacional quanto do internacional, no que se refere à demanda por açúcar, principalmente o do tipo cristal, objeto do presente estudo. Historicamente, diante da plena aceitação deste produto, tanto no mercado interno, quanto no externo, pode-

se estimar que para a capacidade produtiva da usina em análise, é muito provável a comercialização de todo o açúcar obtido. Apenas como reforço da evidência, destaca-se que não existe atualmente disponibilidade de oferta de açúcar, além do que já foi contratado, para a próxima safra (2004/2005). A produção das usinas brasileiras já está comprometida com os agentes comerciais, nacionais e internacionais. Pressupõe-se, portanto, que o mercado para açúcar não apresenta grandes dificuldades comerciais.

Assim, em função de todas essas considerações, pode-se estimar que os limites de comercialização do açúcar possa situar-se entre 10,0 t/h (aproximadamente 35% inferior à média) e 25,0 t/h (em torno de 63,0% superior à média).

Quanto a torta, obtida durante a filtração do lodo decantado, não se pode afirmar que seja um efluente de aceitação comercial generalizada. Entretanto, é bastante comum o seu emprego como substituto de parte dos fertilizantes orgânicos aplicados em várias lavouras. Estabelecimentos agrícolas nas proximidades das usinas têm demandado com certa frequência este material. Porém, além de sua comercialização ser limitada, em razão do seu emprego direto nas áreas de canaviais das próprias usinas, a sua disponibilidade para tanto, depende da capacidade de produção, situando-se em torno de 440 Kg de torta/t de açúcar obtido.

De acordo com a COPERSUCAR (32), a torta com umidade de 75%, exige uma área de aplicação de 0,0014 ha/tonelada de cana. Para a usina em análise seria de aproximadamente 3.700 ha, a qual encontra-se disponível diante das dimensões do empreendimento em estudo (Capítulo 5). Com base nesses dados, pode-se estimar uma aplicação entre 5 t/h a 15 t/h de torta (limites em função do teor de cálcio e fósforo).

6.1.1.3. Mercado para bagaço e energia elétrica co-gerada

A portaria 227, do Ministério de Minas e Energia, de 02 de julho de 1999, estabelece a *garantia* da compra de toda energia excedente, co-gerada pelas usinas. Desse modo, a comercialização de eletricidade dependerá apenas da atratividade da tarifa. O presente estudo considerou esta restrição de mercado como sendo ilimitada, ou seja toda energia obtida deverá ser comercializada com as concessionárias. Por sua vez, os usos prioritários do bagaço são para a geração de vapor de processo e eletricidade. Caso ocorra

sobra poderá ser destinado à comercialização para outros fins. Deste modo, os seus limites para tanto dependem destes usos, e serão tratados a seguir.

6.1.2. RESTRIÇÕES RELATIVAS À CAPACIDADE DE PRODUÇÃO

6.1.2.1. Referentes à produção de álcool

De acordo com as capacidades dos equipamentos e os correspondentes rendimentos obtidos em cada processo, conforme estabelecido no Capítulo 5, pode-se calcular a vazão horária nominal e efetiva das correntes que fluem de cada operação unitária conforme a seguir:

6.1.2.1.1. Extração

Corresponde ao caldo misto (X1) e o bagaço de cana total (X11), obtidos durante o processo de moagem. Admite-se o processamento de cana padrão, com teor de fibra de 12,5%, e fator de preparo de 1,25. A umidade de referência do bagaço é de 50%. Assim, dadas as limitações técnicas e operacionais com base na infra-estrutura dimensionada (Capítulo 5), a capacidade máxima de moagem (X_o) foi estabelecida em 517 t de cana/hora.

Por sua vez, em função das taxas de embebição adotadas, a vazão do caldo extraído (X1), conforme indicam os estudos do IPT (09), situam-se em um valor em torno de 2,3% superior à taxa de cana que foi processada, portanto, têm-se que: $X1 = 1,023.X_o$.

Em relação ao bagaço, pode-se afirmar que no estado da arte atual, a depender da composição da matéria-prima e do controle das operações de preparo e moagem, a sua produção (X11), situa-se entre 25% e 30% da vazão de cana processada (X_o). Por sua vez, por razões tecnológicas e de demanda do processo, entre 70% e 80% deste bagaço, deve-se encontrar a parcela destinada à geração do vapor de processo (X12).

O bagaço excedente é geralmente destinado à geração extra de eletricidade, que é obtida para fins de comercialização. A disponibilidade máxima de bagaço para tal fim é equivalente a 30% da vazão total ($0,3.X11$) e ocorrerá quando a demanda de vapor de processo estiver vinculada ao seu limite mínimo (70%). Por sua vez, o seu emprego para outros fins, só ocorrerá se não se justificar a geração excedente de eletricidade. Logo o limite máximo para tanto (outros fins) corresponderá à vazão total que seria destinada para

eletricidade, portanto o limite de X15 (outros fins) deverá ser igual ao valor a ser assumido por X13 (bagaço para eletricidade).

6.1.2.1.2 Tratamento preliminar do caldo

Esta etapa do processo, juntamente com a anterior (extração) são, na verdade, comuns a ambos os produtos, apesar de ser aqui apresentada. O caldo obtido na extração (X1), atravessa uma peneira cujo objetivo é a retenção das partículas em suspensão, consistindo em um tratamento preliminar, resultando no caldo filtrado (X2). A capacidade desta operação é geralmente projetada para ser superior a 20% da capacidade de moagem (620 t/h), retraindo em torno de apenas 0,8% das partículas dispersas no meio. Portanto, pode-se escrever que $X2 = 0,9920.X1$, limitado a 620 t/h.

Uma parte deste fluxo deverá ser destinado para álcool (X3) e a outra para açúcar (X16). A escolha entre tais opções consiste em uma das mais importantes decisões, vez que deverá definir as proporções de produção de açúcar e álcool. Estas relações serão indicadas durante a simulação do Modelo Matemático (item 6.2).

6.1.2.1.3. Tratamento do caldo para álcool

Conforme já discutido anteriormente, considerou-se como tratamento para álcool, apenas as operações de adequação de temperatura do caldo. Admitiu-se que tais procedimentos não interferem na vazão de alimentação das dornas e, portanto, não foram consideradas possíveis perdas nesta etapa, caso ocorram. O fluxo que emerge desta operação (X3), corresponde à diferença entre a vazão de caldo misto pré-tratado (X2) e o fluxo destinado à produção de açúcar (X16), ou seja: $(X3) = X2 - X16$. Entretanto esse valor está limitado à capacidade máxima do sistema de aquecimento, dimensionado para processar 700 t de caldo/h.

6.1.2.1.4. Preparo do mosto

Diz respeito à vazão de caldo tratado com adição de nutrientes, mel diluído e/ou xarope, tendo o seu pH ajustado às exigências do processo microbiológico, com adição de ácido sulfúrico. Os materiais adicionados aumentam o volume do meio em torno de 8,0%.

A operação de preparo consiste, então, na vazão de mosto (X4) que será transferida à seção de fermentação.

Capacidade máxima = 700 t/h

Vazão efetiva de mosto enviada para a fermentação (X4) = $1,08.X3$

6.1.2.1.5 Fermentação

Refere-se à vazão efetiva de vinho bruto enviado às centrífugas (X5). Aproximadamente 20% desse fluxo fica retido nas dornas na qualidade de *leite* de leveduras que, após tratamento, é novamente empregado como meio de cultura para a próxima batelada. Portanto, a vazão de vinho que emerge da fermentação corresponde a 80% da vazão de entrada neste processo (X4).

Capacidade = 700 t/h

Vazão efetiva de vinho bruto para centrifugação (X5) = $0,8.X4$ (ou $0,8640.X3$)

6.1.2.1.6. Centrifugação

Corresponde ao fluxo de vinho delevedurado (X6), que flui para a seção de destilação. A operação é realizada em três conjuntos de centrífugas que operam em paralelo. Em torno de 10% do fermento (*creme de leveduras*) retorna à seção de fermentação. A capacidade individual de cada conjunto é de 400 t/h.

Em função do retorno do creme de leveduras o fluxo que sai das centrífugas deverá ser dado pelo produto $0,90 \times X5$ o que resulta em $0,7776.X3$. Cabe aqui, entretanto, outra consideração, além de vinho, também entra nas colunas de destilação (A e B) vapor direto na proporção de 15% da vazão de vinho centrifugado, portanto a corrente total que entra na destilação (X6), será: $1,15 \times 0,7776.X3 = 0,8942.X3$

Capacidade máxima = 1.200 t/h

Vazão efetiva de vinho delevedurado para a destilação (X6) = $0,8942.X3$

6.1.2.1.7. Destilação

Conforme o fluxograma do processo, as correntes que fluem desta seção podem ser divididas em:

a) Corrente total que deixa a destilação (colunas A e B). Corresponde ao somatório das parcelas das vazões máximas (horárias) que fluem da seção de destilação, quais sejam:

a1) Álcool hidratado (5 x 120 m³/h. Inclui a parcela que será desidratada para anidro)

a2) Vinhaça (16 vezes a vazão de álcool hidratado = 16 x 3 x 120 m³/h)

a3) Vapor injetado diretamente nas colunas de esgotamento e destilação (4,80 kg vapor/kg de AEHC). Considerou-se a densidade de 1,0kg/litro.

$$Capacidade\ Máxima = \frac{5 \times 120 \text{ m}^3/\text{h}(\text{álcool}) + 16 \times (3 \times 120 \text{ m}^3/\text{h}) + 4,8 \times 3 \times 120 \text{ m}^3/\text{h}}{24}$$

$$Capacidade\ máxima = 337 \text{ m}^3/\text{h}$$

Vazão efetiva total da composição que flui da destilação = 0,8916 X3

A vazão efetiva foi calculada com base na vazão de vinho delevedurado (já incorporada a parcela do vapor) enviado à destilação (X6). Como o rendimento desse processo é 99,7% (foi abatida a parcela de óleo fúsel) a vazão dessa corrente é dada pelo produto: 0,997 x 0,8942 .X3, o que resulta em 0,8916.X3.

b) Corrente exclusivamente hidroalcoólica. Vazão máxima que correspondente à parcela de AEHC para estocagem e para a conversão em AEAC, após desidratação.

$$Capacidade\ Máxima = \frac{3 \times 120 \text{ m}^3/\text{h}}{24} = 15 \text{ m}^3/\text{h}$$

Vazão efetiva. Refere-se à vazão exclusivamente de álcool hidratado (inclui a parcela que será destinada ao anidro) contida na vazão emergente da destilação, abatendo-se as perdas arrastadas pela vinhaça (3,0%). Calculada por:

$$Vazão\ efetiva = \left[\left(\frac{5\ part es\ de\ álcool\ hidratado}{67,4\ part es\ (álcool + vinhaça + vapor)} \right) \times 0,8916 \times 0,97 \right] = 0,0642.X3$$

c) Corrente exclusivamente alcoólica. Corresponde apenas à vazão do álcool desidratado (anidro, AEAC) obtido na coluna retificadora (coluna C). A parcela desidratada equivale à vazão de parte de álcool hidratado (X7), destinado à obtenção do álcool anidro carburante..

$$Capacidade\ Máxima = \frac{2 \times 120 m^3/h}{24} = 10\ m^3/h.$$

Vazão efetiva. Corresponde ao produto da vazão efetiva de álcool hidratado enviado para a desidratação (X7) pelo respectivo rendimento do processo, que é de 92,44%.

$$Vazão\ efetiva\ de\ álcool\ anidro\ para\ estocagem\ e\ comercialiação\ (X8) = 0,9244.X7$$

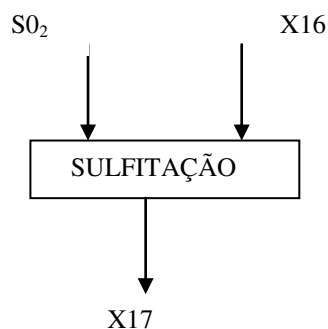
6.1.2.2. Referentes à produção de açúcar

Do mesmo modo como referido para a produção de álcool, o presente item também toma por base as capacidades dos equipamentos e os correspondentes rendimentos obtidos em cada processo, conforme estabelecido no capítulo 5.

6.1.2.2.1 Sulfitação

Corresponde à vazão máxima de caldo pré-tratado (X16) que flui através da coluna correspondente a esta operação, resultando em caldo sulfitado (X17).

Durante a sulfitação, o enxofre é queimado convertendo-se em SO₂, o qual percola o caldo em contra-corrente.



A taxa de caldo que deixa a coluna (X17) é dada pela expressão:

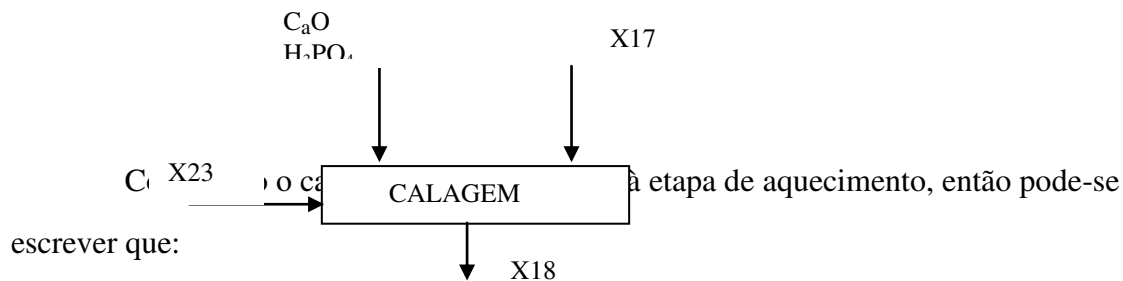
$$X17 = 2 \times \text{Consumo Específico de Enxofre} \times X16$$

O número 2, que multiplica a expressão, resulta da consideração de que 1 mol de enxofre combina-se com 1 mol de O₂ para formar 1 mol de SO₂. Portanto a vazão de SO₂, equivale ao dobro da vazão de enxofre que entra na coluna. Entretanto, como o consumo específico de enxofre tabelado corresponde a 0,413 kg de enxofre / t de caldo misto (ou 0,000413 t de enxofre/t de caldo misto), e como a capacidade máxima desta operação corresponde a 300 t de caldo misto/h, de acordo com os equipamentos comercializados atualmente, tem-se que:

$$X17 = 1,00083 \times X16 \leq 300$$

6.1.2.2.2. Calagem

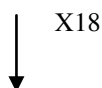
Refere-se à vazão de caldo submetido à adição de cal virgem e ácido fosfórico, que deixa o tanque de calagem (X18). Fica também submetido a esse processo o caldo que retorna da seção de filtração (X23).

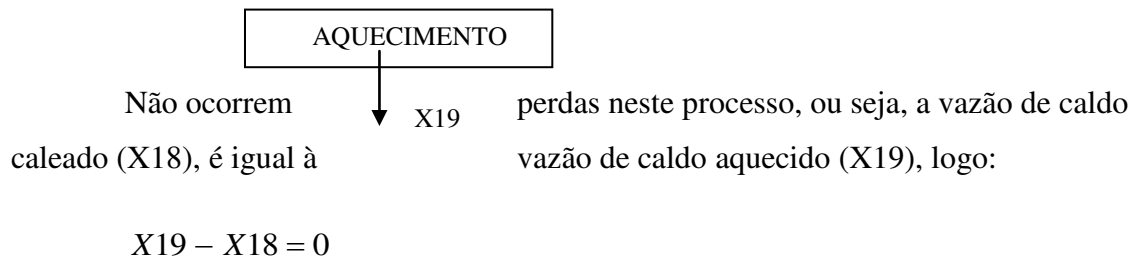


$$-X18 + X23 + 1,0016 \cdot X17 = 0$$

6.1.2.2.3. Aquecimento

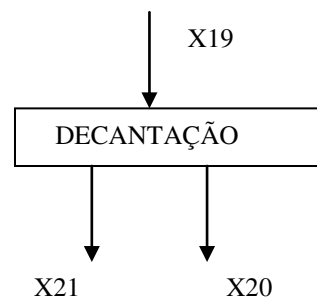
Corresponde à vazão de caldo aquecido (X19), à temperaturas entre 100°C e 105°C.





6.1.2.2.4. Decantação

Refere-se à vazão de caldo clarificado (X20) e lodo (X21), resultantes do processo de sedimentação e floculação dos sólidos contidos no caldo aquecido (X19).



O balanço global nesta operação, será:

$$-X19 + X20 + X21 = 0 ,$$

Entretanto, como: $X21 = X23 + X22 - X24$, então pode-se escrever:

$$-X20 + X19 - X22 - X23 + X24 = 0$$

As correntes X22, X23 e X24, correspondem aos fluxos de torta, caldo filtrado e água de filtragem do lodo, respectivamente.

As perdas neste processo situam-se entre 3,0% e 7,0%. Assim, os limites da corrente de caldo clarificado em relação ao caldo aquecido, será:

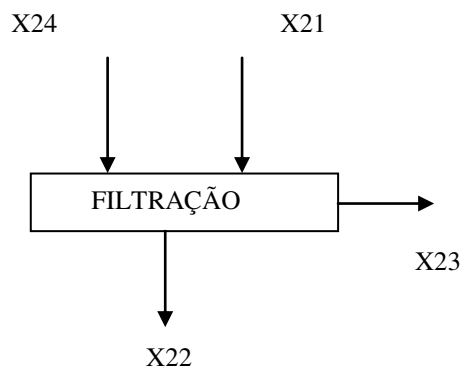
$$0,93.X19 \leq X20 \leq 0,97.X19$$

Por sua vez, a vazão de lodo (X21), estabelecida com base no rendimento deste processo, corresponde a 0,4% da vazão do caldo para decantação (X19), ou seja:

$$X_{21} = 0,004.X_{19}$$

6.1.2.2.5. Filtração

Esta etapa do processo corresponde à passagem do lodo (X₂₁) pelos filtros rotativos, visando recuperar os açúcares dissolvidos neste material. A operação ocorre com adição de água (X₂₄), a qual dissolve e retorna os açúcares contidos no caldo remanescente (X₂₃) para a operação de calagem. Resulta deste processo a fase sólida denominada de torta (X₂₂).



A equação geral da operação de filtração, é:

$$-X_{22} - X_{23} + X_{24} + X_{21} = 0$$

A vazão da torta obtida situa-se entre 70% e 80% da corrente de lodo, logo:

$$0,7.X_{21} \leq X_{22} \leq 0,8.X_{21}$$

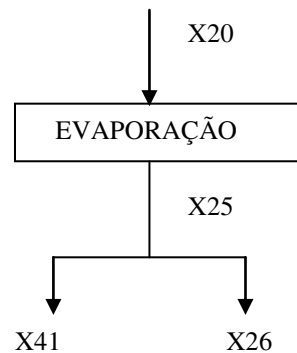
Por sua vez, a água de filtragem entra em paralelo com a vazão de lodo à taxa de 80% desta. Portanto, tem-se que:

$$X_{24} = 0,8.X_{21}$$

6.1.2.2.6. Evaporação

Diz respeito à operação para concentração do caldo clarificado (X₂₀), em evaporadores de múltiplo efeito, resultando na corrente denominada de xarope (X₂₅). Neste

processo é evaporada entre 65% e 80% de toda a água contida no caldo clarificado. Esses limites, variam em função do tipo de cana, e portanto do caldo, e, principalmente, do processo de embebição do bagaço durante a moagem. O diagrama que representa o balanço desses fluxos encontra-se a seguir.



Neste processo é evaporada entre 65% e 80% de toda a água contida no caldo clarificado. Portanto, a corrente de saída (X25) pode ser escrita como função da corrente de entrada (X20), ou seja:

$$0,20.X20 \leq X25 \leq 0,35.X20$$

O xarope obtido neste processo (X25), tem dois destinos. Uma parte deste (X41), irá compor o magma, que é a base de cristais para o cozimento da massa de primeira. A outra parte (X26), segue para a seção de cozimento.

O balanço do xarope pode ser resumido como sendo:

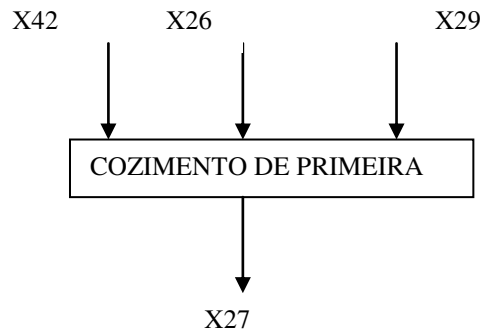
$$-X25 + X41 + X26 = 0$$

6.1.2.2.7 Cozimento da massa de primeira

Corresponde ao processo de cozimento do xarope (X26), o qual ocorre juntamente com o magma (X42) e com o mel rico (X29). Esta operação, resulta na massa cozida (X27),

a qual deverá ser destinada à obtenção do açúcar final, após submeter-se às operações de centrifugação e secagem.

Deste modo, o fluxo das correntes entrando e saindo da operação de cozimento da massa de primeira, poderá ser representada pelo digrama a seguir:



Esta operação é um recurso gargalo (Capítulo 5), e sua máxima produção seria obtida caso grande parte do caldo (70%) fosse desviado para açúcar. Também com base no IPT (09), isto resultaria, no máximo, em 28 t/h de açúcar (488 kg de açúcar/t de massa), e exigiria 57,36 t/h de massa a ser descarregada (X27). Portanto:

$$-X27 + X26 + X29 + X42 \leq 57,36$$

Por sua vez, a corrente de mel rico pode ser dada por:

$$-X29 + 1,008.X27 - 0,681.X26 - 1,046.X42 = 0$$

A vazão de magma para o cozimento (X42), é função do xarope para magma (X41), e do açúcar de segunda (X40). Logo, pode-se escrever, que:

$$-X41 + 1,024.X42 - 0,38.X40 = 0$$

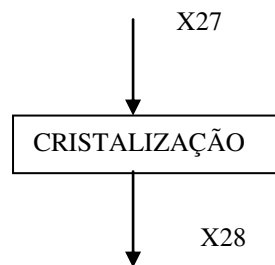
Já a massa cozida que flui do cozedor (X27), é equivalente a 78% das correntes de entrada (07), ou seja: magma (X42), xarope (X26) e mel rico (X29). , tem-se:

$$-X27 + 0,78 (X26 + X29 + X42) = 0$$

6.1.2.2.8. Cristalização da massa de primeira

Apesar de ocorrer cristalização complementar nos cristalizadores, esta operação constitui-se, efetivamente, em apenas um repouso da massa cozida antes de ser transferida ao processo de centrifugação. Como não há perdas neste processo, pode-se considerar que a

vazão de massa que deixa o cristizador (X28), é a mesma que entra neste equipamento (X27).

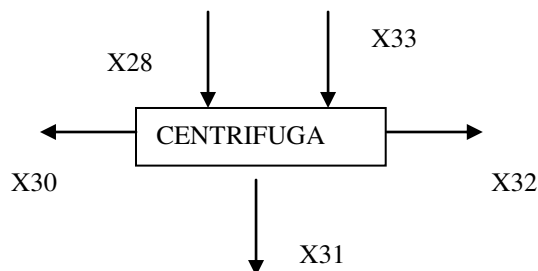


Pode-se, então escrever:

$$-X27 + X28 = 0$$

6.1.2.2.9 Centrifugação da massa de primeira

Esta operação visa separar a fase rica em sacarose cristalizada (X31), que irá constituir-se em açúcar propriamente dito, das correntes menos concentradas, quais sejam: o mel rico (X32) e o mel pobre (X30). Este processo é feito com a adição de água e/ou vapor (X33).



O balanço global nas centrífugas pode ser expresso como sendo:

$$-X31 - X30 + X28 - X32 + X33 = 0$$

Por sua vez a vazão de açúcar para o secador corresponde a 50% do fluxo de massa cristalizada (X28) e de vapor (X33). Ou seja:

$$X31 = 0,5.(X28 + X33)$$

A corrente de vapor para a centrifugação da massa é equivalente a 0,57% da vazão de massa a ser centrifugada (X28). Portanto, tem-se que:

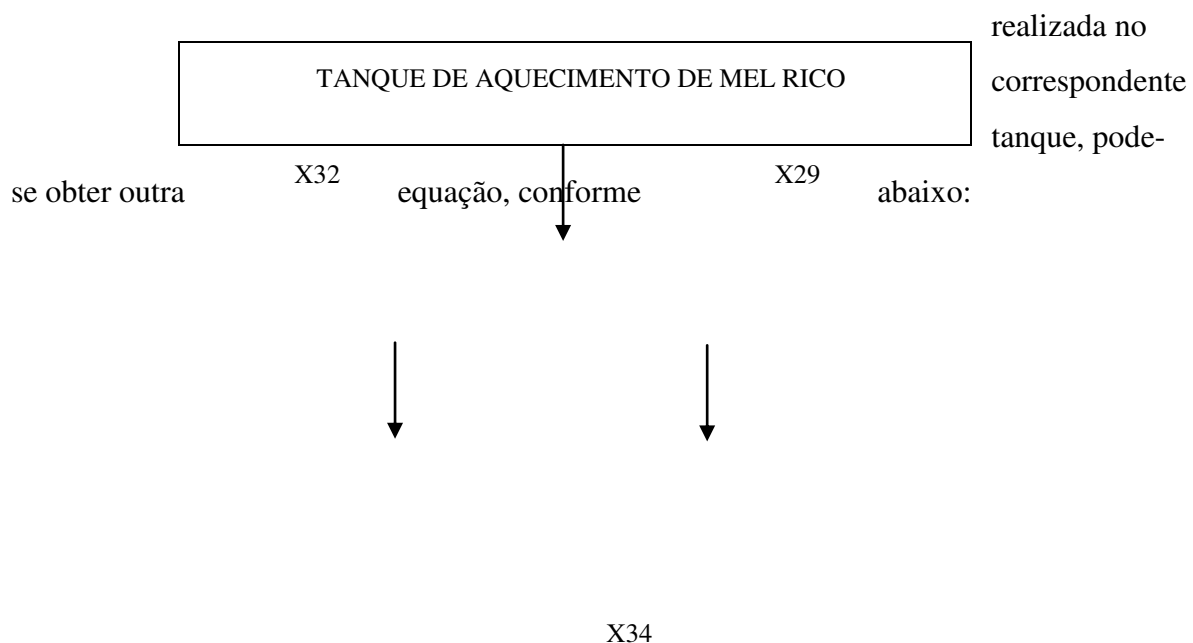
$$X33 = 0,0057.X28$$

A vazão de mel pobre (X30), que será transferida ao tanque de aquecimento para cozimento da massa de segunda, corresponde, pelos dados referenciados, a 41,88% da massa cristalizada (X28). Ou seja:

$$X30 = 0,4188.X28$$

6.1.2.2.10. Tanque de aquecimento de mel rico

A vazão final de mel rico (X29) já foi estabelecida no balanço do cozimento da massa de primeira, entretanto, com a operação de aquecimento deste mel com vapor (X4),



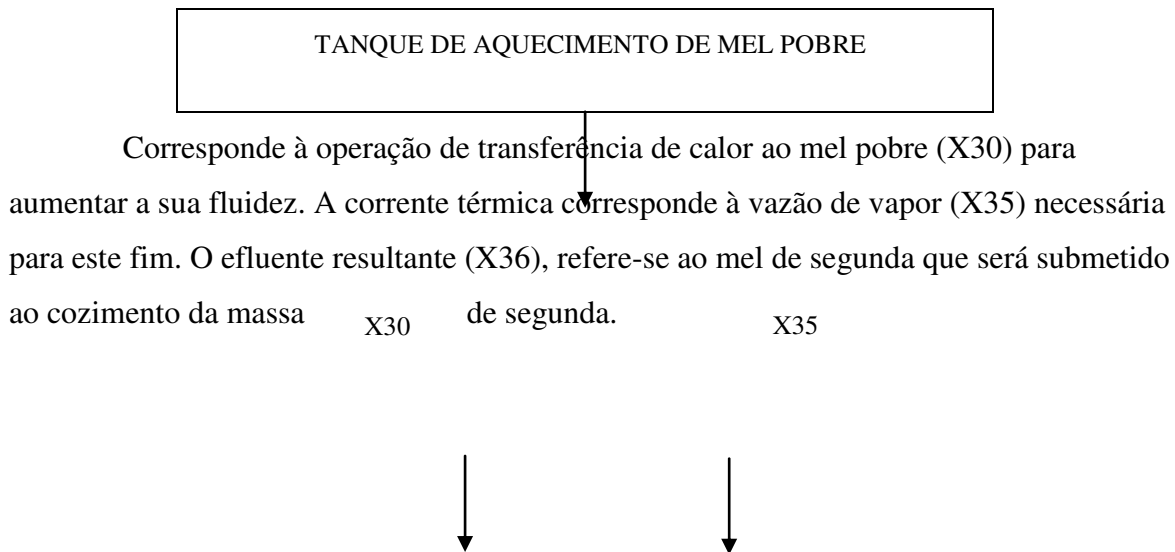
O balanço desta operação, poderá ser dado por:

$$-X_{29} + X_{32} + X_{34} = 0$$

Por sua vez, no tanque de aquecimento, o mel rico (X₂₉) corresponde a 97,0% da composição formada por este e o vapor de aquecimento. Logo, pode-se escrever que:

$$X_{32} = 0,97.X_{29}$$

6.1.2.2.11. Tanque de aquecimento de mel pobre



Não são registradas perdas nesta operação, portanto, o balanço deverá ser dado pela equação:

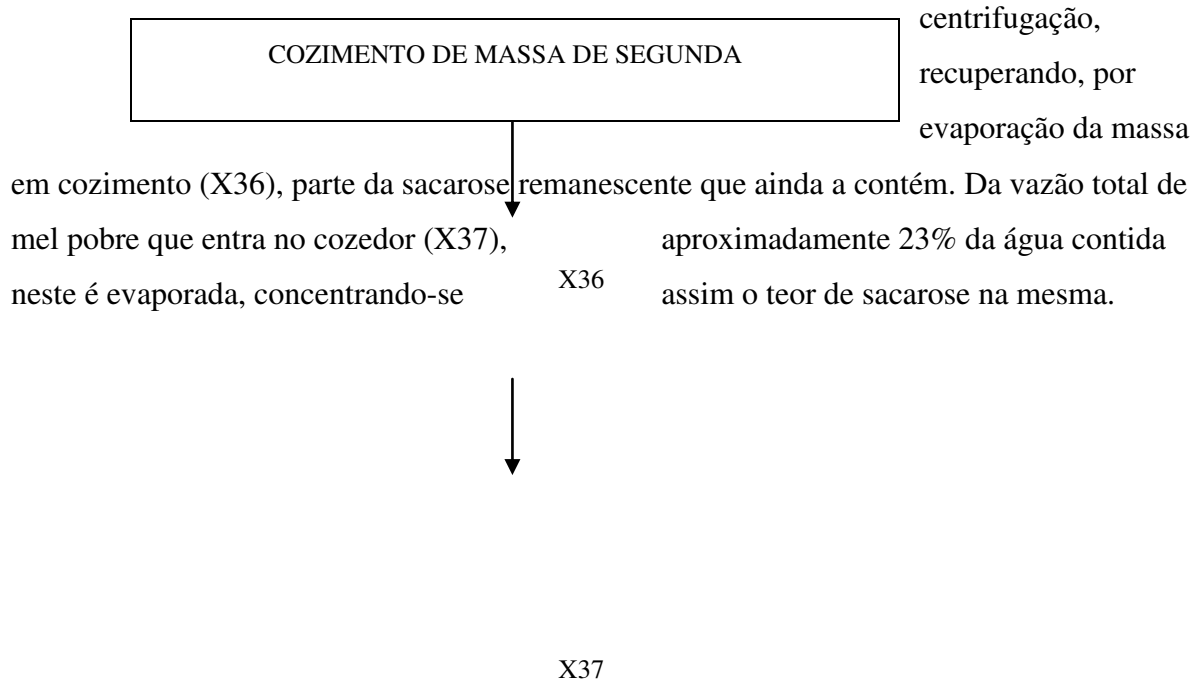
X₃₆

$$-X_{36} + X_{30} + X_{35} = 0$$

6.1.2.2.12. Cozimento de massa de segunda

Durante o cozimento da massa de primeira, com xarope de pureza entre 83% e 88%, mais de 60% da sacarose é cristalizada. Entretanto, a continuação da cristalização nos próprio vasos, torna-se bastante ineficiente e dificultosa devido às características físicas da massa residual obtida, o mel pobre resultante da centrifugação da massa de primeira, material este sólido e de difícil separação. Assim, para a recuperação da sacarose residual faz-se necessário mais um processo de cozimento, realizado em novos vasos, sendo

precedido da operação anterior, adição de vapor, o que permite a obtenção de um material menos viscoso (X37) e, portanto, passível de ser submetido a novo processo de

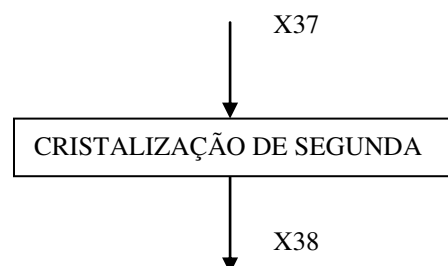


Conforme o estabelecido na representação acima, e considerando-se a perda de água durante o cozimento, o balanço global nesta operação, será:

$$X37 - 0,77.X36 = 0$$

6.1.2.2.13. Cristalização da massa de segunda

De maneira equivalente ao que ocorre com a massa de primeira, a massa de segunda após cozimento irá completar a formação dos cristais durante o repouso nos cristalizadores. Assim, pode-se considerar que a taxa de massa que entra nos cristalizadores (X37) é igual à que flui deste (X38).

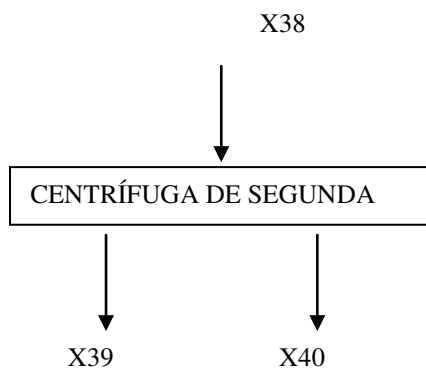


Logo, pode-se escrever:

$$X_{37} - X_{38} = 0$$

6.1.2.2.14. Centrifugação da massa de segunda

Através deste processo obtém-se duas correntes: o açúcar de segunda (X40), que deverá compor, juntamente com o xarope, o magma, que é a base do cozimento da massa de primeira, e o mel de segunda (X39), que será destinado à obtenção de álcool.



O balanço global nesta operação, resume-se a:

$$X_{38} - X_{39} - X_{40} = 0$$

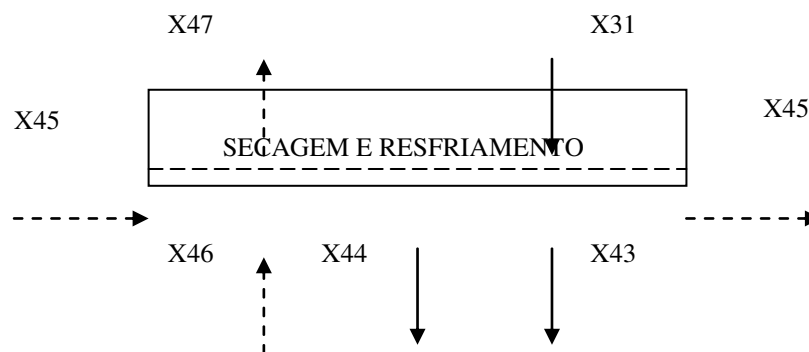
Por sua vez, os dados de referência indicam que a taxa de açúcar de segunda é equivalente a 55,0% da massa a ser centrifugada (X38), portanto, tem-se que:

$$X_{40} - 0,55.X_{38} = 0$$

6.1.2.2.15. Secagem resfriamento do açúcar

O açúcar que deixa a centrífuga (X31), contém umidade de até 2,0%, e temperatura entre 55°C e 60°C. Essas condições não são adequadas para o armazenamento subsequente. Desta forma, as operações de secagem e resfriamento se fazem necessárias. Para tanto, o vapor de escape (X45) circula através dos trocadores de calor do secador aquecendo o ar de secagem (X46) que ao mesmo tempo está sendo aspirado para o seu interior, percolando o fluxo de açúcar (X31) em contra-corrente. Esse processo resulta em açúcar seco (X43) e numa pequena fração de açúcar (X44) que é arrastada pelo ar de secagem através do ciclone do secador (X44), o qual será refundido e retorna ao cozimento.

O micro-fluxo do processo de secagem, pode ser resumidamente estruturado conforme a seguir:



Fazendo-se o balanço apenas da secagem, pode-se calcular, por diferença, a vazão de açúcar que flui através do ciclone do secador, bem como a vazão de açúcar seco, ou seja:

$$X44 = X31 - X43$$

Os cálculos das correntes X45 (vazão de vapor de escape) e X46 (vazão de ar seco) baseiam-se em suas variações de umidade e temperatura, na entrada e saída do secador. Entretanto, dada a necessidade da realização de cálculos mais detalhados, os mesmos foram disponibilizados no Anexo H. As equações para os cálculos de suas respectivas vazões, são:

$$X45 = 0,036.X46,$$

$$X46 = 1,24.X31$$

6.1.2.3. Referente à co-geração de eletricidade

Apesar da Norma Institucional (Portaria MME 227/1999) garantir a compra de toda energia co-gerada, conforme já apresentada no item 6.1.1.3, o limite máximo da geração elétrica dependerá da capacidade de conversão de bagaço em eletricidade, bem como da oferta interna deste, entretanto não superior a 30% do bagaço total, já que não menos que 70% deste deverá estar disponível para fins de geração de vapor de processo, conforme detalhado no Capítulo 4 (item 4.4).

A conversão de bagaço em eletricidade (X14) foi calculada com base em fundamentos termodinâmicos. Considerou-se que a turbina é alimentada com vapor (pressão entre 18 e 21kgf/cm²) proveniente das caldeiras, expandindo-o até valores em torno de 1,8 kgf/cm². Esse efeito transforma a energia interna do fluxo de vapor em energia mecânica, disponível no eixo da turbina. A velocidade deste é ajustada à velocidade do gerador, que converte a energia mecânica em energia elétrica.

Os rendimentos termodinâmicos desse processo situam-se entre 38,2%, empregando-se turbinas de simples estágio, muito comuns até meados dos anos de 1990, e 69%, para arranjos multi-estágios nos projetos atuais. No presente estudo adota-se o valor intermediário médio de 54%, provavelmente mais próximo da realidade da média dessas unidades industriais. Assim, com base nos coeficientes térmicos adotados pelo Ministério de Minas e Energia para a elaboração do Balanço Energético Nacional (35), pode-se chegar ao resultado a seguir:

$$\frac{1,0 \text{ t de bagaço}}{0,209 \cdot tEP^1} \times \frac{0,290 \cdot tEP^1}{1,0 \cdot MWh} = 1,3876 \frac{\text{t de bagaço}}{MWh}.$$

Dividindo-se esse resultado pela eficiência da co-geração (54%), obtém-se a relação correspondente de 2,57 toneladas de bagaço a ser queimado nas caldeiras para cada MWh obtido, ou seja 1,0 tonelada de bagaço equivale a 0,39 MWh¹.

A energia elétrica excedente, que corresponde à parcela não consumida nas instalações industriais, poderá ser comercializada, caso o preço do MWh se justifique. A equação de conversão de bagaço em eletricidade poderá, então, ser escrita como segue:

¹ 1. tep = tonelada equivalente de petróleo, unidade adotada no Balanço Energético Nacional (35).

$$\text{Vazão efetiva máxima de eletricidade} = 0,39.X13$$

6.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Conforme já evidenciado, o objetivo do presente estudo, será maximizar o lucro pela produção e venda dos produtos: álcool anidro, álcool hidratado, açúcar, torta eletricidade e vinhaça. Para tanto, faz-se necessário levantar os seus respectivos preços de venda e custos de produção.

Quanto aos custos especificamente, deve-se destacar que foram desconsiderados os custos fixos, vez que a maioria dessas indústrias já alcançaram a maturidade econômica dos seus empreendimentos e, portanto, pressupõe-se tais custos já foram totalmente amortizados.

6.2.1. LEVANTAMENTO DE PREÇOS DE VENDA E CUSTOS

Tanto os preços quanto os custos, referem-se aos valores médios (arredondados para o inteiro mais próximo) praticados no Estado de São Paulo durante o mês de maio de 2003. A Tabela 6.1, apresenta os preços, os custos e os correspondentes lucros unitários dos produtos em análise, com suas respectivas fontes de informação.

Tabela 6.1. Preços, custos e lucros unitários dos produtos e sub-produtos

PRODUTO	Preço	Custo	Lucro
AÇÚCAR	R\$610/t ¹	R\$270/t	R\$340/t
ÁLCOOL ANIDRO	R\$855/t ¹	R\$355/t ²	R\$500/t
ÁLCOOL HIDRATADO	R\$763/t ¹	R\$333/t ²	R\$430/t
ELETRICIDADE	R\$100,00/MWh ³	R\$80,00/MWh ⁴	R\$20/MWh
VINHAÇA	R\$2,0/t ⁵	R\$1,0/t ⁵	R\$1,0/t
BAGAÇO	R\$28,00/t ⁶	R\$18/t ⁶	R\$10/t
TORTA	R\$10/t	R\$5,00/t ⁷	R\$5,00/t

Fontes: 1 Referência (36); 2 Referência (37); 3 Referência (38); 4 Referência (39); 5 Estimado com base nas Referências (32) e (40); 6 Estimado em 70% (preço) e 45% (custo) da cana, com base nas Referências (32) e (40); 7 Estimado com base nas Referências (32) e (40).

Para o açúcar, tomou-se como referência o do tipo cristal, acondicionado em sacas de 50 Kg, destinado ao mercado interno, posto usina, e para pagamentos à vista. Foram desconsiderados os impostos devidos, quais sejam: ICMS (7%), PIS (1,65%) e COFINS (7,6%).

Quanto aos álcoois (anidro e hidratado), têm-se como referência o preço pago pelas distribuidoras, posto destilaria, também deduzidos os impostos devidos.

Para a eletricidade, por sua vez, apesar do valor normativo fixado ser de R\$93,77/MWh, Resoluções da ANEEL (266/98 e 487/2002) autorizam comercializações entre 88,50% e 111,5%, do mesmo, o que resulta em um intervalo de preços tarifários entre R\$82,98/MWh e R\$104,55/MWh. Com base no Mercado Atacadista de Energia (MAE) e na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (38), constatou-se um valor médio praticado em torno de R\$100/MWh, sendo este o valor tomado como referência. Em relação aos seus custos de produção (R\$80/MWh), por razões de facilidade de acesso aos dados, foi adotado o valor fornecido pela Usina Agrovale (39), localizada no município de Juazeiro, Bahia, cuja geração na safra 2001/2002, registrou 7,5 MWh.

Em relação à vinhaça, admite-se (32), conforme já discutido (item 6.1.1.1), que quando aplicada a taxas entre 80 m³/ha e 120 m³/ha, substitui parte das necessidades de nutrientes, os quais, caso fossem adquiridos no mercado, demandariam recursos da ordem US\$78,00/ha (40). Este, portanto, foi considerado como sendo o lucro, caso a vinhaça viesse a substituir os fertilizantes necessários à lavoura. Convertendo-se esse valor para a moeda nacional (R\$2,50/US\$), chega-se a R\$1,95/t de vinhaça (com dosagem de 100t de vinhaça/ha). Entretanto, mesmo esta não sendo comercializada, incidem custos de transporte para a sua aplicação na área de cultivo. Abatendo-se do lucro bruto tais custos (estimados em R\$0,95/t), com sua aplicação na lavoura ter-se-ia um lucro unitário equivalente a apenas R\$1,00/t de vinhaça.

Parâmetros similares foram adotados em relação à receita com a torta, a qual também substitui parte dos adubos fosforados, sendo que os custos neste caso, referem-se ao transporte à lavoura para distâncias inferiores a 15 Km da base industrial, por ser este o raio de aplicação geralmente considerado pelas usinas.

Apesar dos valores dos lucros unitários aqui fundamentados terem sido tomados como referência para a construção do modelo matemático, sabe-se que a formulação deste não é estática, devendo responder, evidentemente, a possíveis variações desses valores, para diferentes cenários, entretanto, no contexto em que a realidade operacional e comercial seja adequada. Busca-se, deste modo, a capacidade de poder simular ganhos marginais

(evidentemente que isto também poderia ser feito com os preços praticados no mercado) com o objetivo de maximizar o lucro total e os seus respectivos impactos nos resultados das vazões obtidas pela otimização do modelo matemático.

6.2.2. FORMULAÇÃO DA FUNÇÃO OBJETIVO

Sendo p_i os preços praticados no mercado em relação ao produto i (ou sub-produto), e sendo c_i os correspondentes custos variáveis unitários, então a formulação matemática da função objetivo, o lucro total (LT), corresponderá ao somatório do produto entre o lucro unitário $(p_i - c_i)$ e as correspondentes vazões dos produtos obtidos (X_i), ou seja, $LT = (p_i - c_i).X_i$. Deste modo, o objetivo perseguido será maximizar $\sum_{i=1}^n (p_i - c_i).X_i$. Entretanto, como a diferença $(p_i - c_i)$, corresponde ao lucro por unidade produzida e comercializada, para cada produto ou sub-produto i , e de acordo com os valores constates na Tabela 6.1, pode-se escrever que:

$$LT(X) = 500.X_8 + 430.X_9 + 1.X_{10} + 20.X_{14} + 10.X_{15} + 5.X_{22} + 340.X_{43}$$

O modelo consiste, então, em maximizar $LT(X)$, sujeito às restrições conforme já discutidas, as quais serão consolidadas no item 6.2.2.1.

As variáveis de decisão, que representam as escolhas possíveis do que se deseja determinar, corresponde, no presente estudo, aos valores das diferentes correntes (X_i) referentes à produção de açúcar e álcool e seus sub-produtos comercializáveis.

Por outro lado, segundo STEVENSOM (41), para que se possa utilizar eficazmente os modelos de programação linear, determinadas premissas devem ser satisfeitas:

1. Linearidade: tanto a função-objetivo quanto as restrições são relações lineares em relação às variáveis de decisão, e atendem aos princípios de:

- Proporcionalidade (a quantidade do recurso consumido por uma atividade deve ser proporcional ao nível dessa atividade na solução final)

- Aditividade (o lucro total deve ser a soma das parcelas associadas a cada atividade)

- Separabilidade (pode-se identificar, de forma separada o lucro (ou o consumo de recursos) específico das operações de cada atividade)

2. Divisibilidade: as variáveis de decisão admitem valores fracionários

3. Certeza: as restrições já são conhecidas ou podem vir a ser conhecidas

4. Não-negatividade: as variáveis de decisão não podem assumir valores negativos.

A partir de uma comedida análise sobre o modelo aqui discutido, pode-se concluir que o mesmo está de acordo com todas essas premissas.

6.2.2.1. Consolidação das restrições

De acordo com os fundamentos discutidos no item 6.1 do presente Capítulo, bem como nos Capítulos 4 e 5, pode-se estabelecer as suas equações e inequações matemáticas, como sendo as limitações à maximização do lucro total. Destaca-se, entretanto, que as restrições aqui anotadas são as mais limitantes em relação a cada vazão do processo produtivo, tanto para álcool quanto para açúcar, e estão listadas de acordo com a classificação já adotada, ou seja: E (equipamentos), BM (balanço de massa) e M (mercado). No caso da produção de álcool, por exemplo, o fluxo de material de forma semi-contínua que circula através das operações (fermentação, centrifugação e destilação), tem como gargalo a operação de destilação, cuja capacidade máxima de 337t/h, é inferior às demais, sendo esta, portanto, a mais limitante. Da mesma forma das restrições relativas à vinhaça, M3 e M4, apenas a M4 entrará no cálculo da otimização, por ser mais restritiva que a M3.

As restrições formuladas neste modelo compreendem os três possíveis tipos, ou seja: menor ou igual ($\leq$), maior ou igual ($\geq$), e simplesmente igual ($=$).

Uma restrição do tipo *menor ou igual*, implica existir um limite superior para quantidade de algum recurso escasso disponível para utilização. Uma restrição do tipo *maior ou igual* especifica um valor mínimo que deve ser alcançado na solução final. Por

sua vez a restrição do tipo *igual*, é mais restritiva, por especificar exatamente qual deveria ser o valor de uma variável de decisão. Os dois primeiros tipos estão de acordo com as limitações do processamento nos equipamentos e de mercado para produtos e sub-produtos. Por sua vez, as restrições do tipo *igual*, referem-se às equações do balanço material dos produtos durante as operações para produção de açúcar e álcool.

Em relação à produção de álcool especificamente, foram estabelecidos três balanços. O primeiro que correlaciona a vazão da vinhaça (X10) com a vazão da mistura hidro-alcoólica obtida na destilação ($0,8274.X3$), o segundo, que envolve a decisão de quanto álcool hidratado enviar para a desidratação (X7) e, o terceiro, que refere-se à conversão de álcool hidratado (X9) em álcool anidro (X8).

Por sua vez, o balanço que envolve as vazões de caldo e cana, bem como do caldo em processamento, tem por objetivo determinar, de forma estequiométrica, o fluxo das correntes entre cada operação, e a taxa de matéria-prima a ser entregue para a moagem.

O balanço material que envolve a produção de açúcar ocorre em maior número, até porque o processo é muito mais complexo, compreendendo uma diversidade de operações unitárias bastante superior do que a produção alcooleira. Conforme destacado anteriormente, todas essas restrições foram fundamentadas no item 6.1 deste Capítulo.

6.2.2.1.1. Restrições comuns à produção de açúcar e álcool

Dizem respeito às operações unitárias das etapas iniciais do processo produtivo, as quais, diante das peculiaridades deste processo, independem do produto a que se destina. Ou seja, para se fazer tanto açúcar quanto álcool, tais operações, necessariamente, devem ocorrer.

1) E1: CAPACIDADE DE MOAGEM (X_0): $X_0 \leq 517$

2) E2: EXTRAÇÃO/BAGAÇO TOTAL (X11): $0,25.X_0 \leq X_{11} \leq 0,30.X_0$

3) E3: EXTRAÇÃO/BAGAÇO VAPOR (X12): $0,70.X_{11} \leq X_{12} \leq 0,80.X_{11}$

4) E4: EXTRAÇÃO/BAGAÇO ELETRICIDADE (X13): $X_{13} \leq 0,30.X_{11}$

5) E5: ELETRICIDADE CO-GERADA (X14): $X_{14} = 0,39 \cdot X_{13}$

6) E6: SOBRA DE BAGAÇO: $X_{15} \leq X_{13}$

7) E7: EXTRAÇÃO/CALDO MISTO: $0,990 \cdot X_1 \leq X_o \leq 0,9775 \cdot X_1$

8) BM1: BAGAÇO TOTAL: $-X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{15} = 0$

9) BM2: CALDO MISTO E CALDO PRÉ TRATADO : $-0,9920 \cdot X_1 + X_2 = 0$

10) BM3: CALDO PARA AÇÚCAR E ÁLCOOL: $-X_2 + X_3 + X_{16} = 0$

11) M10 (BAGAÇO PARA OUTROS FINS): $X_{13} + X_{15} \leq 0,30 \cdot X_{11}$

6.2.2.1.2. Restrições exclusivas da produção de álcool

12) E8 (DESTILAÇÃO): $0,0642 \cdot X_3 \leq 15$

13) E9 (RETIFICAÇÃO): $0,9244 \cdot X_7 \leq 10$

14) E10 (TANCAGEM): $X_8 + X_9 \leq 25$

15) M2:CALDO PARA ÁLCOOL (X3) : $0,30 \cdot X_2 \leq X_{16} \leq 0,70 \cdot X_2$

16) M3 (ÁLCOOL HIDRATADO): $1 \leq X_9 \leq 6$

17) M4 (ÁLCOOL ANIDRO): $3 \leq X_8 \leq 8$

18) M6 (VINHAÇA): $12(X_7 + X_9) \leq X_{10} \leq 16(X_7 + X_9)$

19) BM4 (ANIDRO E HIDRATADO): $0,0642 \cdot X_3 = X_7 + X_9$

20)M5(VINHAÇA): $0,8916 \cdot X_3 = X_{10} + 0,0642 X_3$; ou, $X_{10} - 0,8274 \cdot X_3 = 0$

21)BM6: CONVERSÃO DE HIDRATADO EM ANIDRO: $X_8 - 0,9244 \cdot X_7 = 0$

6.2.2.1.3. Restrições exclusivas da produção de açúcar

- 22) E11: SULFITAÇÃO (X17): $X_{17} - 1,00083.X_{16} \leq 300$
- 23) E12: DECANTAÇÃO (X20): $0,93.X_{19} \leq X_{20} \leq 0,97.X_{19}$
- 24) E13: FILTRAÇÃO (X22): $0,70.X_{21} \leq X_{22} \leq 0,80.X_{21}$
- 25) E14: EVAPORAÇÃO (X25): $0,20.X_{20} \leq X_{25} \leq 0,35.X_{20}$
- 26) BM7: CALAGEM: $-X_{18} + X_{23} + 1,0016 X_{17} = 0$
- 27) BM8:AQUECIMENTO: $X_{19} - X_{18} = 0$
- 28) BM9:DECANTAÇÃO: $-X_{20} + X_{19} - X_{23} - X_{22} + X_{24} = 0$
- 29) BM10:DECANTAÇÃO: $X_{21} - 0,004.X_{19} = 0$
- 30) BM11:FILTRAÇÃO: $-X_{22} - X_{23} + X_{24} + X_{21} = 0$
- 31) BM12:FILTRAÇÃO: $X_{24} - 0,8.X_{21} = 0$
- 32) BM13:EVAPORAÇÃO: $-X_{25} + X_{41} + X_{26} = 0$
- 33) BM14: COZIMENTO DE PRIMEIRA: $-X_{27} + X_{26} + X_{29} + X_{42} = 0$
- 34)BM15: COZIMENTO PRIMEIRA: $-X_{29} + 1,008.X_{27} - 0,681.X_{26} - 1,046.X_{42} = 0$
- 35) BM16:COZIMENTO DE PRIMEIRA: $-X_{41} + 1,024.X_{42} - 0,38.X_{40} = 0$
- 36)BM17:COZIMENTO PRIMEIRA: $-X_{27} + 0,78.(X_{26} + X_{29} + X_{42}) = 0$
- 37) BM18: CRISTALIZAÇÃO DE PRIMEIRA: $-X_{27} + X_{28} = 0$
- 38)BM19: CENTRIFUGA DE PRIMEIRA: $-X_{31} - X_{30} + X_{28} - X_{32} + X_{33} = 0$
- 39) BM20:CENTRIFUGAÇÃO DE PRIMEIRA: $X_{31} - 0,5.(X_{28} + X_{33}) = 0$
- 40) BM21:CENTRIFUGAÇÃO DE PRIMEIRA: $X_{33} - 0,0057.X_{28} = 0$

- 41) BM22:CENTRIFUGAÇÃO DE PRIMEIRA: $X_{30} - 0,4188.X_{28} = 0$
- 42) BM23: TANQUE DE MEL RICO: $-X_{29} + X_{32} + X_{34} = 0$
- 43) BM24: AQUECIMENTO DE MEL RICO: $X_{32} - 0,97.X_{29} = 0$
- 44) BM25: TANQUE DE MEL POBRE: $-X_{36} + X_{30} + X_{35} = 0$
- 45) BM26: COZIMENTO DE SEGUNDA: $X_{36} - X_{37} - X_{44} = 0$
- 46) BM27: COZIMENTO DE SEGUNDA: $X_{37} - 0,77.X_{36} = 0$
- 47) BM28:CRISTALIZAÇÃO DE SEGUNDA: $X_{37} - X_{38} = 0$
- 48) BM29:CENTRIFUGAÇÃO DE SEGUNDA: $X_{38} - X_{39} - X_{40} = 0$
- 49) BM30: CENTRIFUGAÇÃO DE SEGUNDA: $X_{40} - 0,54.X_{38} = 0$
- 50) BM31: SECAGEM DO AÇÚCAR: $X_{46} - X_{31} + X_{44} = 0$
- 51) BM32: SECAGEM DO AÇÚCAR: $X_{46} - 1,24.X_{31} = 0$
- 52) BM31: SECAGEM DO AÇÚCAR: $X_{45} - 0,036.X_{46} = 0$
- 53) M1:CALDO PARA AÇÚCAR (X_{16}): $0,30.X_2 \leq X_{16} \leq 0,70.X_2$
- 54) M7:AÇÚCAR (X_{43}): $10 \leq X_{43} \leq 25$
- 55) M8 :TORTA (X_{22}): $5 \leq X_{22} \leq 10$
- 56) BM32 :TORTA (X_{22}): $X_{22} - 0,044.X_{43} = 0$

6.3. SIMULAÇÃO

De acordo com PERRY & CHILTON (42), simulação seria a técnica de se fazer experimentos amostrais no modelo desenvolvido para o sistema, a fim de se avaliar o seu

comportamento. Ainda segundo os autores, isto permite que os experimentos possam ser feitos no modelo, em lugar de no próprio sistema real, visto que, neste, poderia demandar bastante tempo, ser inconveniente, ou mesmo ser de custo elevado.

Para IANNONI & MORABITO (43), no setor sucro-alcooleiro a simulação tem sido utilizada para apoiar tomadas de decisões estratégicas, geralmente no contexto das revisões e melhorias das operações de produção. Alguns trabalhos que empregam essa ferramenta na agroindústria canavieira, podem ser vistos em YAMADA (44) e MATHEW (45).

Por sua vez, segundo RUSSELL & TAYLOR (46), o propósito básico da maioria dos estudos de simulação é comparar alternativas, e por isso o programa de simulação deverá ser flexível o suficiente para acomodar prontamente as opções que poderão ser consideradas. Entretanto, como frequentemente é impossível prever exatamente que alternativas viáveis serão descobertas durante o curso do estudo, é essencial que sejam incluídas no programa flexibilidade para modificações rápidas e simples.

Além da existência de simuladores clássicos, a exemplo do GPSS (*General Purpose Simulation Systems*, 1961) e do SIMSCRIPT (1963), a comunidade científica, dispõe ainda de aplicativos de fácil acesso como são os casos do *software Arena* (47) e do *software* de planilha eletrônica *Excel* da Microsoft®, o qual contém uma rotina denominada *solver* (48). Por entender que a metodologia proposta neste estudo se adequa à planilha *solver*, bem como diante de sua disponibilidade, fez-se a opção pela simulação empregando-se a mesma.

6.4. INTERPRETAÇÃO DOS PARÂMETROS RELATIVOS AO SOLVER

Segundo LACHTERMACHER (49), uma vez construído o modelo do problema e gerado a otimização correspondente, deve-se fazer o mapeamento dos resultados para se avaliar as implicações das variações dos coeficientes da função objetivo bem como dos limites das constantes das restrições, sobre os valores otimizados das variáveis de decisão e da função objetivo. Neste sentido, dois tipos de relatórios podem ser obtidos com o aplicativo *solver*: O relatório de resposta e o relatório de sensibilidade.

O relatório de resposta além de apresentar o valor otimizado da função-objetivo e das variáveis de decisão, informa ainda se há folga ou excesso nos limites estabelecidos para as restrições, ou seja, sinaliza quanto à possibilidade de ganhos marginais por incremento ou decremento das mesmas.

A coluna *status*, que tem as expressões *sem agrupar* e *agrupar*, indicam essas possibilidades. O *agrupar* (valor igual a zero), significa que o lado esquerdo da restrição (LHS) tem o mesmo valor do lado direito (RHS), quando forem substituídos os valores da solução ótima. Isto significa que todo o recurso disponível (RHS), foi consumido, o que leva à inexistência de folga ou excesso, justificando a atribuição do valor nulo, que vem indicado na coluna *transigência*. Diz-se nesse caso que a restrição *amarra* a solução. Mas quando tiver o *status sem agrupar*, a coluna *transigência* apresentará a quantificação da folga ou excesso, tendo valor diferente de zero, e a restrição não *amarra* a solução. Isto só é válido para inequações, pois para as equações de balanço o resultado do lado direito deverá ser nulo.

As restrições que não amarram a solução têm *folga* (quando a restrição for do tipo $\leq$), ou tem *excedente* (se for do tipo $\geq$). Ou seja, a folga, está relacionada ao limite superior, enquanto que o excesso, ao limite inferior.

Por sua vez, o relatório de sensibilidade avalia a elasticidade da solução ótima, isto é, analisa o quanto podem variar as constantes da função objetivo e os limites das restrições, sem que a solução ótima sofra alterações.

No primeiro quadro deste relatório (*células ajustáveis*), analisam-se os coeficientes da função objetivo, indicando o quanto é possível aumentar (*permissível acréscimo*) ou diminuir (*permissível decréscimo*) esses valores. Do ponto de vista dos princípios do método *simplex*, o que se deseja nesse caso é saber o quanto se pode variar a inclinação do plano que representa a função objetivo, sem que a solução ótima mude para outro vértice. A coluna *reduzido custo*, indica o quanto um coeficiente da função objetivo de uma variável original deve melhorar antes de se tornar básica, isto é não nula. Portanto se os valores assumidos forem nulos, não há o que se melhorar.

No segundo quadro, que refere-se às restrições, é feita uma análise de sensibilidade em relação aos seus limites, conforme estabelecido na modelagem

matemática. Os valores dados nas colunas *permissível acréscimo* e *permissível decréscimo*, correspondem ao que se pode somar ou subtrair do valor inicial da restrição sem que a solução ótima mude de vértice. Entretanto, se essa restrição contiver o vértice ótimo, então, mesmo sem mudar de vértice, a solução ótima encontrada, bem como o seu valor ótimo, alteram-se. Contudo são alterações em torno de uma solução com a mesma estrutura, já que não há mudanças no conjunto de variáveis que formam a base da solução ótima.

Finalmente, o *preço sombra* avalia o lucro marginal resultante caso se possa aumentar o valor de determinado recurso (restrição) que já se encontra em seu limite máximo, ou seja, quanto se pode lucrar a mais quando se aumenta uma unidade do recurso. Cada restrição tem um *preço-sombra* (no caso um *lucro sombra* ou *lucro marginal*) correspondente, mas se uma restrição não *amarra* uma solução, seu *preço-sombra* é igual a zero, o que significa que o aumento ou redução, em uma unidade não terá outro efeito sobre o resultado da função objetivo senão o de aumentar ou diminuir a sua folga ou excesso.

Por outro lado, dentro do intervalo permitido de variações das restrições, o valor do *preço-sombra* permanecerá constante, portanto, o ganho total da função, será alterado na razão do produto do ganho (ou perda) marginal pelo número de unidades variadas. Entretanto, para variações fora do intervalo permitido, o valor da função objetivo, poderá não sofrer alteração, sendo constante, se o novo *preço sombra* for nulo.

6.5. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Após ter submetido o modelo formulado (item 6.2) ao programa *solver*, obtiveram-se os resultados completos da otimização (Cenário original), os quais encontram-se nos seguintes Apêndices: I (planilha *solver* contendo todas as variáveis de decisão e restrições), J (relatório de resposta) e K (relatório de sensibilidade).

Uma vez atendidas a todas as restrições impostas pelo programa, o resultado final otimizado, gerado pelo programa *solver* (apêndice I), conforme consta no Relatório de Resposta (Apêndice J), registrou um lucro total de R\$14.910,28/h.

Isto permite estimar uma receita líquida anual de aproximadamente R\$75.148.000,00 (setenta e cinco milhões cento e quarenta oito mil reais), para um tempo de produção de 210 dias/safra. Este valor está em torno dos obtidos por indústrias do

segmento, para capacidades equivalentes à deste estudo, conforme consta nos resumos financeiros do periódico Balanço Anual, editado pelo Jornal Gazeta Mercantil (50).

Os detalhamentos desses resultados, contendo as variáveis mais impactantes, serão apresentados a seguir. As variáveis foram selecionadas em função de sua representatividade para o modelo, a exemplo da possibilidade de geração de receita e a sensibilidade quando se permite variar os limites de suas restrições.

6.5.1 RESULTADOS PARA OS COEFICIENTES E CONSTANTES DAS RESTRIÇÕES

O objetivo é analisar quanto existe de diferença entre o que foi estabelecido para as restrições das variáveis e os correspondentes valores otimizados que foram encontrados, ou seja se existem *folgas* ou *excessos* das mesmas, cujos significados foram explicitados no item 6.4 do presente capítulo. A Tabela 6.2, apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6.2. *Relatório de Resposta* com as possíveis variações para as restrições.

Variável	Valor Final	Transigência	
		Excesso	Folga
Cana de açúcar	517,00 t/h	0	0
Relação Cana-de-açúcar/caldo	528,90 t/h	0	6,611
Destilação	14,65 t/h	0	0,345
Retificação	8,00 t/h	0	2,00
Mercado para álcool hidratado	6,00 t/h	5,00	0
Mercado para álcool anidro	8,00 t/h	5,00	0
Vinhaça para lavoura	188,86 t/h	13,01	45,606
Mercado para açúcar	22,58 t/h	12,58	2,42
Torta para a lavoura	9,90 t/h	0	1,24
Caldo destinado para açúcar	296,41 t/h	296,41	228,26
Caldo destinado para álcool	228,26 t/h	228,26	296,41
Bagaço total obtido	155,10 t/h	25,85	0

Bagaço para geração de vapor	108,57 t/h	0	15,51
Bagaço para eletricidade	23,27 t/h	0	23,26

Fonte: Extraído do Relatório gerado pelo programa solver, conforme consta no Apêndice J.

Quanto à cana-de-açúcar (X_o), observa-se que o valor encontrado na otimização (517 t/h), amarra a solução, isto é, não apresenta folga ou excesso. Entretanto, é suficiente explorar apenas o limite inferior do intervalo da relação (rendimento) entre cana e caldo (que varia de 0,9775 a 0,990 t de cana/t de caldo) para se chegar ao resultado otimizado. Assim, conforme indica o *relatório de resposta*, pode-se diminuir o limite superior em até 1,25 % ($6,611 \div 528,90$) sem que o resultado otimizado seja modificado. Constata-se ainda, que o valor obtido é igual à capacidade máxima de moagem para a indústria de referência, conforme o estudo do IPT (09). Portanto, aumentos na extração de caldo, não levaria, necessariamente, ao aumento do lucro total.

Em relação aos produtos, podem ser feitas as observações a seguir. Quanto à capacidade de destilação e retificação, constata-se que ainda existem folgas tanto na possibilidade de esgotamento do vinho, quanto na desidratação do álcool, correspondendo a 0,345 t/h, para o primeiro e 2,00t/h, no segundo. Deste modo, *pequenos* aumentos nas respectivas demandas, já seriam suficientes para esgotar esses recursos. Para o açúcar, as restrições mais limitantes estabelecidas correspondem a balanços de massa (restrições do tipo =) e, portanto, não existem folgas nem excessos.

Por sua vez, quanto as restrições relativas às demandas de produtos e subprodutos, pode-se, a partir da Tabela 6.2, fazer as afirmações que se seguem.

Inicialmente deve-se considerar o destino do caldo misto, que poderá ser dirigido à produção de açúcar e/ou álcool. Os limites estabelecidos foram bastante amplos, variando entre um valor nulo (0%) e sua totalidade (100%) para quaisquer dos casos. Entretanto, os valores finais ótimos encontram-se em valor intermediário, sendo de 296,41 t/h, destinados à fabricação de açúcar, e 228,26 t/h para álcool, o que corresponde às porcentagens de 56,49% e 43,51%, respectivamente. Por isso, ambos registram folga e excesso, cujos valores são complementares, ou seja, o somatório do excesso do caldo destinado ao açúcar com o correspondente excesso para álcool, totaliza 524,67 t de caldo/h (100%).

Quanto aos álcoois, o anidro e o hidratado, ambos registram valores finais que coincidem com os limites superiores de suas capacidades restritivas (6,0 t/h e 8,0 t/h) não existindo folga, portanto. Por sua vez para os limites inferiores de demanda, ambos registram excessos, os quais ocorrerem na mesma taxa (5,0 t/h). Porém, conforme discutido no item 6.1.1, as possibilidades de aumento de demanda desses produtos, são elevadas no médio prazo, em função do apelo mundial que vem se dando sobre o emprego de combustíveis renováveis. Neste sentido, as pequenas folgas registradas na capacidade da destilaria, poderiam ser facilmente consumidas durante esse período.

Para o açúcar, os seus limites de comercialização foram fixados entre 10 t/h e 25 t/h, sendo que o valor final situou-se no interior desta faixa e não em suas extremidades, apresentando assim, folga e excessos em relação a estes limites. Para o limite superior registra-se uma folga de 2,42 t/h, e para o limite inferior da restrição o excesso calculado foi de 12,58 t/h. Pelo exposto nos fundamentos das restrições (item 6.1.1) é mais provável ocorrer aumentos do que diminuições de demanda, pelo menos no curto e médio prazos. Isto sugere, portanto, que sendo as capacidades das operações de tratamento do caldo e de cozimento recursos gargalos, provavelmente por serem intermitentes, estas deveriam ser redimensionadas caso esta tendência viesse a se confirmar.

Quanto aos sub-produtos, as demandas pelos mesmos referem-se aos seus respectivos empregos no próprio contexto agro-industrial, como são os casos da vinhaça da torta e do bagaço, ou a comercializações diretas, como é o caso da eletricidade co-gerada. À exceção deste último, a demanda de todos os demais, está vinculada à correlação de produção com o produto final e, portanto, condiciona os limites restritivos.

Em relação à vinhaça, a taxa de produção otimizada encontrada, de 188,86 t/h, equivale à relação de 13,49 litros de vinhaça/litro de álcool, portanto dentro da faixa média das usinas nacionais (entre 12 l/t e 16 l/t). As variações permitidas para os limites desta corrente, sem que se interfira no resultado, são: aumentar o limite inferior (175,85 t/h) em até 13,01 t/h ou reduzir em até 45,61 t/h o limite superior (234,47 t/h). Excessos ou mesmo produções muito baixas deste efluente podem implicar em problemas quanto ao seu emprego na área agrícola. Conforme visto no item 6.1.1, a aplicação da vinhaça na lavoura obedece aos limites de 244 t/h e 367 t/h. Estes limites não foram considerados no programa *solver*, por serem menos restritivos que as limitações de produção impostas.

Para a torta, o valor final otimizado, foi de 9,90 t/h. Os seus limites estão relacionados à vazão do bolo filtrante, correspondendo a 80% (superior) e 70% (inferior) deste. Como a vazão da massa filtrante é de 12,38 t/h, constata-se que o limite superior foi alcançado, revelando que há folga para esta restrição, podendo ser reduzida em 1,24 t/h.

Quanto à produção total de bagaço, tem-se que o resultado otimizado utiliza o limite superior de sua relação com a taxa de moagem, ou seja, de 30%. Isto resulta que este limite seria de 155,10 t/h, não existindo folga, portanto. Já para o limite inferior estabelecido (129,25 t/h), há excesso, podendo ser aumentado em até 25,85 t/h, sem modificar os resultados obtidos. Porém, é pouco provável que as variações desta correlação (cana/bagaço) possam ser ainda mais reduzidas, em decorrência da variabilidade do teor de fibra das diferentes variedades de cana processadas pelas usinas.

A vazão de bagaço (155,10 t/h) destina-se à geração de vapor de processo, geração elétrica, ou mesmo para outros fins. O primeiro destino é praticamente impositivo, podendo ser consumida entre 70% e 80% da vazão total. O resultado otimizado neste caso, foi de 108,57 t/h, que corresponde ao seu limite inferior (70%), implicando, consequentemente, em folga para o limite superior da restrição (124,08 t/h) o qual poderia ser reduzido em até 15,51 t/h. A prioridade da aplicação dos 30% restantes (46,53 t/h), tem sido para a geração de energia, podendo ainda, caso ocorra sobra, empregá-lo para outros fins. Quanto ao seu destino para eletricidade, observa-se que foi explorado apenas parte (50%) de seu limite (46,53 t/h), cujo valor final, foi de 23,27 t/h. Portanto, constata-se a existência de folga em seu limite superior, o qual poderá ser reduzido em até este mesmo valor, já que foi utilizado apenas a metade da mesma. A outra metade (23,27 t/h), evidentemente, poderá ser direcionada à comercialização do bagaço para outras finalidades (geração de vapor em indústrias nas proximidades das usinas, e a de alimentação animal, são as mais frequentes).

6.5.2 RESULTADOS RELATIVA AOS COEFICIENTES DA FUNÇÃO OBJETIVO

Refere-se às variações permitidas, máximas e mínimas, dos coeficientes da função objetivo, sem que as vazões de cada corrente da solução ótima (variáveis), alterem-se.

O fato de os valores finais das vazões não serem afetados, é importante, pois, pode-se ter aumentos de receita sem exigir aumento na capacidade, e nem comprometer as restrições. Os resultados referentes às variações permitidas, encontram-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.3. Variações permitidas nos coeficientes da função objetivo

Variável	Valor Final	Coeficiente objetivo	Acréscimo permitido	Decréscimo permitido
Álcool anidro (X8)	8,00	500	Ilimitado	74,66
Álcool hidratado (X9)	6,00	430	Ilimitado	36,82
Vinhaça para lavoura (X10)	188,86	1	Ilimitado	2,85
Torta de filtro (X22)	9,90	5	70,73	780,19
Açúcar cristal (X43)	22,58	340	31,02	116,92
Bagaço para outros fins (X15)	23,27	10	Ilimitado	2,20
Eletricidade (X14)	9,07	20	5,64	45,64

Fonte: Extraído do Relatório gerado pelo programa solver, conforme consta no Apêndice K

Evidentemente que à medida que se modificam os coeficientes da função objetivo, que representam o lucro unitário de cada parcela do lucro total, este será modificado, para maior ou para menor, mas as vazões dentro das variações permitidas, não serão afetados.

A vantagem do modelo formulado, consiste em se verificar possíveis cenários de oscilações de preços dos produtos e/ou dos custos do processo produtivo, e suas conseqüências sobre a oferta. Entretanto, a função objetivo foi modelada com base no lucro unitário (e não nos preços) dos seus correspondentes componentes. Nesse sentido, serão analisadas as possibilidades de variações do referido lucro para os produtos e sub-produtos a serem comercializados. Obviamente que para um mesmo valor de custo unitário, variações no lucro marginal são decorrentes de oscilações do preço de venda praticado.

Quanto aos álcoois (hidratado e anidro), constatam-se que como os seus respectivos valores finais coincidiram com os correspondentes limites superiores de suas restrições de demanda (6 t/h e 8 t/h), então mesmo aumentando-se ilimitadamente o valor dos seus lucros unitários atuais (R\$430/t e R\$500/t), a solução ótima não sofrerá modificações, já que as correntes não poderão ser alteradas. Por sua vez, são permitidas reduções de R\$36,82/t para o hidratado e de R\$74,66/t, para o anidro, cujos valores finais passariam a ser de R\$393,18/t, para o hidratado e, R\$425,34/t para o anidro. É claro que aumentos nos lucros unitários desta corrente proporcionariam aumentos no lucro total, sendo este o cenário desejado. Entretanto, ainda que a restrição superior de demanda seja

ampliada, a limitação seguinte seria a capacidade instalada atual que, conforme dimensionada no Capítulo 5, é de 15 t/h para o hidratado e de 10 t/h para o anidro.

Reduções abaixo do previsto, além de diminuir o lucro total, impõem a necessidade de se trabalhar com maior capacidade ociosa. Fixando-se, por exemplo, a contribuição marginal do hidratado e reduzindo-se a do anidro (ou vice-versa), têm-se um gradual deslocamento do caldo para a fabricação do açúcar, até o limite superior de demanda deste. Em caso de lucro unitário que se julgue insuficiente frente aos custos (lucro do anidro nulo, por exemplo), pode-se supor uma oferta nula do produto; mas como o limite de aceitação do açúcar já teria sido alcançado, deverá ocorrer redução na atual taxa de moagem que passaria de 517 t/h, para 476,85 t/h, caso essas modificações fossem feitas.

Em relação ao açúcar, para o lucro unitário calculado (R\$340/t) admite-se uma variação que vai de um aumento de R\$31,02/t a uma redução de R\$116,92/t. Deste modo os valores finais estariam entre R\$223,08/t e R\$371,02/t, sem ter alterações nos valores das correntes. Porém, de maneira equivalente à simulação de preços feita para o álcool, pode-se supor variações em seu lucro unitário para valores abaixo do permitido, sem que ocorram alterações, e avaliar o seu impacto no lucro total e as modificações nas taxas de produção.

Neste caso, anulando-se o lucro unitário do açúcar, e admitindo-se que não se possa ampliar as vendas de álcool, o único efeito possível é, do mesmo modo que ocorreu com o álcool, a redução na taxa de moagem, passando para 227,80t/h.

Quanto aos sub-produtos, vinhaça e torta, geralmente aplicados na lavoura, pode-se afirmar que em relação ao primeiro, por este encontrar-se vinculado à produção de álcool, o qual já alcançou o seu limite superior, pode-se aumentar ilimitadamente a sua contribuição para o lucro total (R\$1,00/t), sem qualquer efeito sobre os valores das correntes. Pode-se ainda suprimir esta contribuição (lucro unitário nulo) que o resultado também não será modificado. Quanto à torta admite-se um aumento de R\$70,73/t, passando a R\$75,73/h, ou igualmente uma redução que levasse à nulidade desta contribuição, sem também modificar a solução final dos valores das demais variáveis.

Por sua vez, o bagaço de cana empregado para outros fins encontra-se em seu limite máximo (23,27t/h), já que deve ser inferior à parcela destinada à geração de eletricidade. Deste modo, observa-se que o valor do lucro unitário fixado para o mesmo

(R\$10/t), poderá ser aumentado ilimitadamente, sem interferir no valor das taxas de produção. Entretanto, a redução permitida para que esta situação seja mantida, é de R\$2,20/t, fixando-se, deste modo o valor do lucro em R\$7,80/t. Variações abaixo deste valor, levando até a anulação do seu lucro unitário, implicaria no deslocamento de sua parcela para a geração de eletricidade, a qual sairia de 23,27t/h, para 46,54t/h.

Por fim, a eletricidade cujo lucro unitário é de R\$20/t, pode ter este valor aumentado de R\$5,64, para R\$25,64/t, ou ser reduzido a zero (ou menor, podendo chegar a – R\$25,64/t) sem interferências sobre os valores finais das correntes. A possibilidade de aumento, implicaria em deslocar toda a produção de bagaço para outros fins. Os preços divulgados nos últimos editais do PROINFA, para novos projetos, conforme evidenciado no item 6.2.1, tem atraído poucos investimentos. Este cenário (lucro nulo) é, portanto, bastante aceitável no contexto do presente modelo. Segundo empresários do setor (51), o preço que poderia deslançar novos investimentos seria de R\$110/MWh que, com base nos custos de referência aqui adotados, levaria a um lucro unitário de R\$30/MWh.

Conforme observado no relatório de sensibilidade (Apêndice K), lucros unitários a partir de R\$25,65/MWh, seriam suficientes para justificar o uso do bagaço não empregado na produção de vapor (46,53t/h) para a geração de eletricidade, portanto relativamente próximo do que sugerem os empresários do setor. Do mesmo modo, este resultado poderá ser encontrado quando a remuneração do bagaço para outros fins for inferior a R\$7,15/t.

Logicamente que estando estes valores fora das variações permitidas, tem-se modificações no valor final da geração elétrica o que, conseqüentemente, exigiria uma capacidade instalada compatível, o que poderá não estar disponível.

6.5.3 RESULTADOS DA ANÁLISE MARGINAL COM BASE NO *PREÇO SOMBRA*

Os resultados gerados pelo *solver*, e resumidos na Tabela 6.4, indicam que as restrições impostas à taxa de moagem, à comercialização dos álcoois e de eletricidade, bem como ao bagaço, alcançam o limite superior. Assim, a questão seria avaliar os benefícios do uso do lucro marginal caso se pudesse dispor de mais capacidade para esses recursos.

Tabela 6.4. Valores finais com as variações permitidas para *lucro marginal*.

Variável ¹	Valor Final	Lucro Marginal	Limites das Restrições ²	Acréscimo permitido	Decréscimo permitido
Cana para moagem (Xo)	517,00	27,26	517	31,27	162,73
Álcool hidratado (X9)	6	36,82	6 (LS) ³	0,34	2,03
Álcool hidratado (X9)	6	0,00	1 (LI) ⁴	5,00	Ilimitado
Álcool anidro (X8)	8	74,66	8 LS)	0,319	1,883
Álcool anidro (X8)	8	0,00	3 (LI)	5,00	Ilimitado
Torta de filtro (X22)	9,90	0,00	0	1,23	Ilimitado
Açúcar cristal (X43)	22,58	0,00	25 (LS)	Ilimitado	2,41
Açúcar cristal (X43)	22,58	0,00	10 (LI)	12,58	Ilimitado
Bagaço total (X12)	155,10	2,67	0	Ilimitado	25,85
Bagaço total (X12)	155,10	0,00	0	25,85	Ilimitado
Bagaço outros fins (X15)	23,27	1,10	0	46,53	46,53
Bagaço Eletricidade (X13)	23,27	0,00	0	Ilimitado	23,26
Eletricidade (X14)	9,09	20,00	0	Ilimitado	9,07

1. À exceção da eletricidade (medida em MWh/h, para as vazões e R\$/Mwh para o lucro marginal), as demais variáveis estão expressas em t/h para as vazões, e R\$/t para o lucro marginal. 2. Valores nulos referem-se a restrições de balanço de massa; 3. Limite Superior; 4. Limite inferior.

Fonte: Extraído do Relatório gerado pelo programa solver, conforme consta no Apêndice K.

Em relação à capacidade de extração de caldo (moagem de cana), deve-se considerar, que apesar do seu considerável potencial para ganhos marginais (R\$27,26/t), investimentos diretos na planta de extração (preparo e moagem da cana) devem vir acompanhados de outros investimentos tanto a montante (disponibilidade de matéria-prima e infra-estrutura de transporte e descarga) quanto a jusante (operações unitárias, armazenamento e escoamento da produção), cujos recursos, geralmente de grande monta, poderão não estar disponíveis ou mesmo ser de elevado custo de oportunidade.

Quanto ao álcool hidratado, o valor do seu *lucro sombra*, de R\$36,82/h, deverá ser mantido neste patamar apenas para pequenas variações em sua restrição superior de demanda (6 t/h), ou seja um acréscimo de 0,34t/h (passando para apenas 6,34t/h) ou redução de 2,03 t/h (passando para 3,97 t/h). Deste modo, a sua contribuição atual para o lucro total variaria desde um aumento de R\$12,52/h (o que elevaria o lucro total de R\$14.910,28 para R\$14.922,80/h) até uma redução de R\$74,75/h (o que diminuiria o lucro total de R\$14.910,28 para R\$14.835,24/h). Dentro desta faixa de variação o lucro *sombra* não será modificado. Valores maiores ou menores que os limites permitidos, implicariam em uma nova solução.

Entretanto, a possibilidade de aumento de consumo para o hidratado, está vinculada a uma efetiva política pública de estímulo à retomada do seu uso liderada pelo

Governo Federal, no sentido de recuperar a desgastada imagem em que o mesmo ficou submetida, durante a prolongada crise de desabastecimento ocorrida entre os anos de 1989 e 1991, levando a constrangimentos e dificuldades de locomoção para proprietários dos veículos movidos a esse combustível. Dessa época em diante, a participação dos modelos exclusivamente a álcool nas vendas totais, começam a declinar. Conforme estatísticas divulgadas pela ANFAVEA (03) as vendas desses veículos que em 1989 representavam 47,30% do total, cai para os desprezíveis 0,1% em 1998, a partir do que começa a reagir, situando-se atualmente em aproximadamente 3,0 % do mercado. Outras razões para o desinteresse do consumidor pode ainda ser apontado pelo reduzido número de modelos e a abertura do mercado para importações de veículos movidos a diesel e gasolina, conforme destacam analistas do setor (52). Trata-se de uma situação relativamente complexa: as montadoras desejam exportar modelos a gasolina, os empresários e o governo podem desejar direcionar a produção e exportação de açúcar, faltam incentivos fiscais a essa fonte renovável e o sucateamento dos modelos a álcool já é elevado.

Por outro lado, a despeito das dificuldades analisadas, deve-se considerar que o provável cenário de preços para os combustíveis fósseis no médio prazo seja de alta, em decorrência do crescente aumento nos preços do petróleo que vem se registrando no contexto internacional. Além do mais, a indústria automotiva tem inovado na tecnologia do uso de combustíveis, fabricando veículos sob o rótulo de *flexfuell* onde o etanol hidratado é uma das opções. Assim, como o preço final ao consumidor é geralmente menor para o álcool do que para a gasolina, espera-se que o combustível renovável possa levar vantagem durante o abastecimento do veículo no posto.

Por sua vez, em relação ao álcool anidro, cujo valor *marginal* estabelecido foi de R\$74,66/h, também apresenta uma estreita faixa de possibilidades de variação do seu limite superior de demanda (8t/h), sem que a contribuição marginal seja alterada. Neste caso, as variações permitidas correspondem a um acréscimo de 0,32t/h (passando para apenas 8,32 t/h) ou redução de 1,88 t/h (passando para 6,12 t/h). Deste modo, a sua contribuição atual para o lucro total variaria desde um aumento de R\$23,82/h (o que elevaria o lucro total de R\$14.910,28 para R\$14.934,10/h) a até uma redução de R\$140,36/h (o que diminuiria o lucro total de R\$14.910,28 para R\$14.769,92/h).

O cenário para o anidro, contudo, é muito mais favorável no que se refere à possibilidade de aumento de demanda no curto e médio prazos. Este funciona como um aditivo à gasolina C, tendo uma variabilidade permitida entre 22% e 25% do seu volume. Portanto está associado aos carros que empregam este combustível, cujas vendas apresentam geralmente desempenhos significativamente mais expressivos que os modelos a álcool, ainda que os preços ao consumidor sejam maiores. Isto porque as opções de modelo, potência e prazo de entrega dos veículos a gasolina são muito mais favoráveis a este do que aos movidos exclusivamente a álcool. Além disto, o anidro já está consolidado como uma *commoditie* internacional, sendo comercializado na Bolsa de Mercadorias e Futuros (53), inclusive em Nova York (*New York Board of Trade*). Pesa ainda a seu favor os frequentes interesses de países como a Alemanha e o Japão para seu emprego de modo similar ao que ocorre no Brasil, ou seja como um aditivo.

Outra análise a ser feita, diz respeito aos esforços recentes para a aplicação do anidro como matéria-prima para a transesterificação de óleos vegetais no contexto do programa instituído pelo Governo brasileiro conhecido como *biodiesel* (54), o qual deverá complementar a oferta de diesel de origem mineral com o de oleaginosas. Como o consumo anual de óleo diesel é de 37,6 bilhões de litros, a estimativa é de que com a adição de apenas 2,0% de biodiesel ao diesel, prevista para o início do ano de 2005, sejam necessárias a produção de 752 milhões de litros do diesel vegetal e, como o etanol anidro participa entre 10% a 20% na reação de transesterificação, pode-se estimar uma demanda extra que deve situar-se em torno de 225 milhões de litros anualmente, podendo dobrar até 2012, já que a participação do biodiesel na mistura foi planejada para ser crescente.

Em relação ao bagaço, a sua contribuição marginal encontrada foi de R\$2,67/h. A partir de então, dois contextos podem ser analisados: a produção total de bagaço e as correspondentes parcelas destinadas para eletricidade e para outros fins. Caso seja possível extrair mais bagaço por tonelada de cana processada, pode-se dispô-lo para um ou ambos desses destinos. Destaca-se, contudo, que a produção de bagaço está condicionada às características da matéria-prima, principalmente à sua composição fibrosa. Segundo DELAGADO (55), as variedades de cana industrializadas no Brasil, apresentam teor de fibra que variam entre 10% e 16%. A cana tida como padrão (12,5% de fibra), com umidade entre 49% e 51%, resulta em uma relação de até 30% de bagaço; tendo sido este o

patamar selecionado pela solução otimizada do *solver*. Portanto, para que se consiga obter maiores taxas de bagaço, faz-se necessário processar variedades com maior concentração em tecido fibroso, gerando, porém, como efeito, problemas de desgastes por abrasão nos equipamentos de preparo e moagem de cana.

O bagaço destinado à geração elétrica registra um *lucro sombra* nulo. Isto decorre em razão de que o seu emprego para este fim estar condicionado à sobra de bagaço, prioritariamente destinada à geração de vapor de processo, cuja demanda mínima é de 70% do bagaço total obtido na moagem. Logo, a demanda de bagaço para eletricidade só poderá chegar a até 30% do bagaço total. Entretanto, como o valor otimizado encontrado (23,27 t/h) corresponde a apenas 15%, ainda a uma folga de 15% (que são as outras 23,27 t/h) em seu limite, o que justifica a nulidade de sua contribuição marginal.

Quanto à eletricidade, o seu valor *sombra* calculado, foi de R\$20/h. Este valor poderá ser mantido constante para uma extensa faixa de variação de sua restrição, permitindo-se aumentos ilimitados ou redução de até 9,073 t/h. Entretanto, do ponto de vista do modelo formulado, a restrição estabelecida para tanto *amarra* a solução, ou seja o valor do lado direito é exatamente igual ao do lado esquerdo da equação restritiva. Isto porque a geração de eletricidade, está condicionada ao trabalho mecânico necessário à sua conversão nos turbo-geradores, realizado pelo vapor que é oriundo da queima de bagaço para tal fim. Esta relação está estabelecida na exata proporção de 39% (que é o fator de conversão de bagaço em eletricidade). Isto implica que a eletricidade co-gerada seja de 9,07 Mwh/h (resultado do produto entre 0,39 e a parcela de bagaço destinada à co-geração, de 23,27 t/h). Desse modo, retirar uma unidade adicional (passando para 10,07 Mwh/h) de energia implicaria em somar à sua correlação com o bagaço mais 4,29% (o fator de conversão saltaria de 39% para 43,29%). Neste caso o lucro total aumentaria de R\$14.910,28/h para R\$19.930,28/h. Como os grupos geradores atualmente mais eficientes promovem uma recuperação de energia de até 54%, então o aumento permitido deveria ser limitado a mais 15%. O mesmo fundamento deverá ser aplicado para a redução permitida, entretanto no contexto da situação real aplicada, esta não poderia ser inferior a 7,91 t/h, já que os grupos geradores menos eficientes em operação garantem uma conversão em torno de 34%.

A despeito desta análise, à luz dos coeficientes tecnológicos, deve-se também levar em consideração que, com base legal, conforme já evidenciado no item 6.1.1.3, toda a energia co-gerada de fonte renovável tem assegurada a sua compra pela concessionária de energia da região de origem. Assim, todo o esforço tecnológico para ampliação da oferta estará correspondida pela imediata demanda. Mas o que os empresários questionam, na verdade, é se a tarifa estabelecida, de fato seria satisfatória a ponto de justificar investimentos nesta geração.

Por sua vez, o emprego de bagaço para outros fins, cuja contribuição *sombra* foi de R\$1,10/h, está condicionado prioritariamente ao seu destino para a geração elétrica. A parcela total para ambos os casos poderá ser no máximo de 30% do bagaço resultante da moagem, ou seja de 46,53 t/h. Como o valor otimizado encontrado foi de 23,27 t/h, o que corresponde à metade do valor total, pode-se ter variações desta restrição entre um aumento ou redução de mesmo valor (23,27 t/h) sem que o lucro sombra, seja modificado (utilizando a totalidade das 46,53 t/h de bagaço gerado ou dispensando-a integralmente). Isto significa, que este valor é único para a opção *outros fins*, já que a exclusividade do emprego para uma dessas alternativas, eliminaria a outra.

6.5.4 RESULTADOS COM BASE EM CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Conforme já evidenciado, pode-se ter tantos cenários alternativos ao original quanto forem possíveis as oscilações de preços dos produtos (mantendo-se constante os custos de produção), porém limitados à capacidade produtiva. Naturalmente que outras opções, além das variações de preços, também poderiam ser simuladas, entretanto, nem sempre condizentes com a realidade operacional e comercial atualmente vigentes. Situações por exemplo, em que se pudesse produzir exclusivamente açúcar ou álcool, é uma delas. Porém, é pouco provável que o empresário, dispondo de uma instalação desta complexidade, direcione a sua produção apenas em uma direção. Além do mais, esta característica produtiva sucro-alcooleira, se não ímpar é, pelo menos desejável, já que podendo-se atuar em segmentos tão distintos, alcança-se uma confortável flexibilidade para direcionar a produção, ora privilegiando o adoçante ora o combustível. Isto revela, portanto, a capacidade de se obter ganhos tanto por economia de *escala* (verticalizando a produção

com um ou outro produto majoritariamente) quanto de *escopo*, pela composição balanceada de ambos e, evidentemente, dos demais sub-produtos.

Considerando-se, deste modo tais fundamentos, passa-se a apresentar e analisar apenas dois outros possíveis cenários, quais sejam:

I) Redução do lucro unitário do álcool hidratado para o valor de R\$393/t, ou aumento do lucro unitário do açúcar para o valor de R\$372/t (correspondem a valores inteiros, a partir dos quais, pelo programa *solver*, as taxas de produção das correntes sofreriam modificações).

II) Aumento da capacidade de moagem explorando os limites do *lucro marginal*.

6.5.4.1 Breve análise do Cenário I

A planilha *solver* com os resultados para este cenário, encontra-se no Apêndice II. De acordo com esses resultados, constata-se que em quaisquer desses casos (valorização comercial do açúcar ou desvalorização do álcool), a solução otimizada encontrada esgota o limite superior da capacidade de comercialização de açúcar (25 t/h), que antes era de 22,58 t/h. Contudo, como foi mantida constante a taxa de moagem (517 t/h) a obtenção de mais açúcar, deveu-se exclusivamente ao direcionamento do caldo para este fim. Assim, com o aumento do lucro do açúcar para R\$372/t, a parte do caldo que antes era destinada à produção de álcool hidratado (31,74 t/h) seria desviada para a fabricação do adoçante. A proporção do destino do caldo, seria agora de 62,54% (328 t/h) para açúcar, e de 37,46 % (196,52 t/h) para álcool. No cenário original era de 56,49% (296,41 t/h) para açúcar e 43,51% (228,26 t/h) para álcool. Desse modo, a produção do combustível ficaria reduzida de 2,04 t/h, saindo de 6,0 t/h para 3,96 t/h.

Caso esse Cenário se concretize, o lucro total horário aumentaria 4,86%, saindo de R\$14.910,28 para R\$15.635,25. Conforme evidenciado, esse aumento dar-se-ia pela exploração do limite superior de comercialização do açúcar e, em menor escala, evidentemente da torta, cuja vazão também aumenta. A participação no lucro dos demais produtos não diretamente vinculados à produção de álcool (bagaço e eletricidade) não é modificada, pois a taxa de moagem de cana e a disponibilidade de bagaço, não alteraria.

Com base nos fundamentos discutidos no Capítulo 1, bem como no item 6.5.2, do presente Capítulo, pode-se afirmar que o cenário em discussão é bastante factível, vez que o açúcar consiste em um produto muito mais comercializável, tanto no plano nacional quanto no internacional, do que o álcool hidratado. Deste modo, vislumbrar preços (e portanto lucros), maiores para o adoçante, insere-se em um contexto previsível que poderá ser realizável em curto ou médio prazos, com chances de se concretizar muito maiores do que em relação ao combustível.

6.5.4.2 Breve análise do Cenário II

O propósito neste caso, é maximizar o lucro total aproveitando-se do potencial do *lucro marginal* (R\$27,26), relativo à capacidade produtiva, cuja restrição a limita a 517 t de cana/h. Este valor do *lucro marginal*, portanto, seria mantido para aumentos de capacidades de até 31,27 t/h, que, se incorporada à capacidade atual, a aumentaria para 548,27 t/h. Isto não quer dizer que para taxas de moagem ainda maiores o processo não seria igualmente vantajoso, mas apenas que a análise se restringe às variações previstas no Cenário original otimizado (de acordo com os resultados registrados no Apêndice I).

Os resultados obtidos com esta simulação, conforme constam no Apêndice I2, revelam um lucro total horário de R\$15.762,86, portanto R\$852,58/h, a mais do que o Cenário atual, de R\$14.910,28/h (com capacidade de moagem de 517 t/h). Constata-se aqui, mais uma vez, que o aumento do valor do lucro máximo, dá-se pela exploração do limite superior de comercialização do açúcar (e em menor escala também da torta), mantendo-se o lucro unitário de todas as contribuições da função objetivo.

Assim, a vazão de caldo para açúcar alcançaria o mesmo valor do Cenário I (328,15 t/h), mas como a capacidade de moagem foi aumentada sem aumentar a demanda de álcool, o único efeito seria completar o limite de comercialização de açúcar. Isto justifica a manutenção da taxa de caldo do Cenário original (228,26 t/h). Porém, as relações destes seriam modificadas para 41,02 % (caldo para álcool) e para 58,98 % (caldo para açúcar).

Esta opção, contudo, exige investimentos em infra-estrutura não apenas nas moendas propriamente ditas, mas em toda a planta de extração, a qual inclui o conjunto de picadores e facas rotativas (preparo da cana para moagem). Além dessas operações, investimentos a montante, tanto em cultivo de matéria-prima quanto em infra-estrutura de

transporte, carga e descarga de cana, e a jusante, capacidade de processamento dos equipamentos, também seriam necessários. Há, portanto, de se avaliar se o ganho marginal com a produção de mais açúcar compensariam tais investimentos. O presente trabalho não se propõe a aprofundar esta discussão, a qual poderia ser avaliada em estudos posteriores.

A Figura 6.1, a seguir, relaciona os valores finais dos lucros totais horários otimizados para os respectivos Cenários analisados.

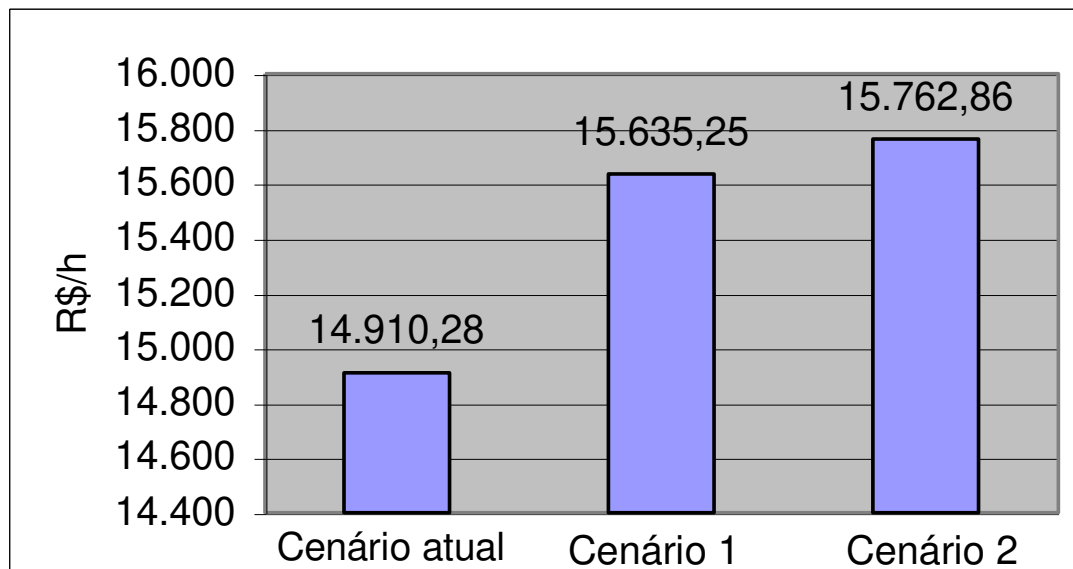


Figura 6.1. Comparação entre os cenários alternativos

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A área de estudos da presente tese, otimização da produção sucro-alcooleira, traduz-se em uma das mais importantes no plano técnico-científico para o referido segmento, vez que racionalizando-se o processo produtivo, pode-se ter organizações mais produtivas e, portanto mais competitivas, assegurando-se, dessa forma, as suas sobrevivências no mercado.

As operações da indústria do açúcar e do álcool, assim como outras atividades de manufatura, que envolve elevadas demandas de matéria-prima perecível, constituem-se em atividades bastante complexas, não apenas pela necessidade de pronto processamento do material, diante do seu potencial de deterioração, mas sobretudo pelo alto índice de interações e de interdependências entre as variáveis de processo das três funções da organização, aqui resumidamente simplificadas como: agrícola, industrial e comercial.

A desagregação hierárquica dessas funções, conforme fundamentado no Capítulo 1, facilitou a estruturação de dois modelos matemáticos: o primeiro referiu-se à *modelagem da fila de espera para o descarregamento da matéria-prima*, cujo objetivo foi proceder o balanceamento, de modo otimizado, da infra-estrutura de transporte e descarga de cana com a capacidade de moagem da indústria; já o segundo, por sua vez, voltou-se para a *maximização do lucro total pela produção e venda de produtos e sub-produtos*, com a consequentemente otimização das operações unitárias, baseada em programação linear.

Os resultados advindos da hipótese formulada, primeiro otimizar a infra-estrutura de transporte e descarregamento, seguido do modelo de maximização do lucro, ao invés de se proceder de modo inverso, revelou-se ser aplicadamente adequada e situa-se no contexto não apenas das operações unitárias necessárias para essas indústrias, mas também no âmbito financeiro das mesmas. Isto foi comprovado tanto pela validação dos modelos

(Capítulo 3), quanto pelos resultados que encontram-se divulgados em literaturas especializadas (08) e (45).

7.1. CONCLUSÕES REFERENTES À MODELAGEM DA FILA DE ESPERA

Quanto ao balanceamento da oferta de matéria-prima com a capacidade de processamento das moendas, estruturado com base nos modelos de *filas de espera*, pode-se concluir que apesar do padrão estatístico das taxas de chegadas dos veículos de transporte de cargas não aderir, de modo geral, à distribuição de *poisson*, conforme se supunha inicialmente, não proporcionou grandes desvios em relação à realidade operacional, conforme indicam os resultados obtidos, além do mais, para parte dos dados analisados, pôde-se constatar que essas variáveis aproximavam-se dessa hipótese, como foi o caso do período da madrugada.

Por sua vez, mesmo se constatando a aderência para os dados de serviço, condição necessária para dar continuidade à modelagem com base na hipótese formulada, conforme evidenciado nos Capítulos 2 e 3, salienta-se que nenhum dos modelos teóricos de *filas de espera* disponíveis, ajustam-se integralmente à realidade operacional do sistema de transporte e descarga de cana em usinas, já que este serviço, apesar de sofrer desvios dos planos estabelecidos, o que lhe confere um certo grau de aleatoriedade, a exemplo de eventos tais como, quebra de máquinas, quebra de veículos de carga e de transporte, excesso de chuvas, e de variabilidades no *modus operandi* de conduzir equipamentos e veículos, dentre outros, caracteriza-se por ser uma atividade de planejamento relativamente bem definida, fato que pode distanciá-lo do padrão estatístico presumido.

Ainda no plano estatístico, os resultados obtidos mostraram que o fluxo dos caminhões no período matutino (06:00h/12:00h) comporta-se de forma equivalente ao vespertino (14:00h/19:00h), predominando chegadas e serviço com distribuições não-markovianas (apesar de uma certa aleatoriedade). Provavelmente nestes dois turnos o processo de corte e transporte de cana insere-se melhor no contexto do planejamento agrícola, sendo relativamente previsível.

Por sua vez, no período correspondente ao *almoço* (12:00h/14:00h), foi verificado que em algumas das datas analisadas a taxa de serviço máxima (s_{μ}) era inferior à taxa média de chegada λ , caracterizando-se como modelos fora da condição de equilíbrio. Esses

casos, de modo surpreendente (já que acreditava-se que o ritmo das chegadas diminuíssem nesse horário), indicaram ser indispensável a operação plena dos três tombadores, já que a taxa média de ocupação do sistema situava-se acima de 80,0 %, quando se empregavam apenas dois equipamentos.

Por outro lado, os períodos estabelecidos como *noturno* (19:00h/24:00h) e *madrugada* (00:00h/ 06:00h), são, provavelmente, os que mais se aproximam de um comportamento estatístico *markoviano*, distanciando-se um pouco, das regras impostas ao planejamento de corte e transporte de cana para a usina, melhor ajustando-se, conseqüentemente, à modelagem aqui proposta.

Finalmente, pode-se concluir que apesar dos procedimentos aqui adotados ter buscado compor diferentes capacidades de transporte a fim de se adequar às necessidades de moagem, outras estratégias, também poderiam ser adotadas, a exemplo da regularização das chegadas, empregando-se apenas caminhões do tipo *toco* (*infra-estrutura já existente*), de modo que estas pudessem ser relativamente constantes (0,236 veículos/minuto), visando atender à exata taxa de moagem da usina (170 t/h). Na verdade, este seria um procedimento no plano da gestão da produção baseada nos princípios do *just-in-time*, cujo propósito seria apenas enviar matéria-prima à medida que o processo fosse gradualmente demandando. Isto, porém, apesar de não gerar taxa para estoques ($\theta_i = 0$), não implica que não possa ter aumento da quantidade de cana em espera em determinados turnos, vez que, a depender da taxa de serviço praticada, o quociente $\lambda/\mu.s$, que mede o índice de ocupação dos tombadores, caso aumente, poderia implicar na formação de *fila de espera* na usina ou no campo e, conseqüentemente, de cana-de-açúcar também em espera, o que não é desejável, sobretudo em razão da perecibilidade desta matéria-prima.

7.2. CONCLUSÕES REFERENTES À MODELAGEM DA PROGRAMAÇÃO LINEAR

Esta modelagem também mostrou-se relativamente completa. Para tanto, foi desenvolvida uma função objetivo cujos coeficientes, correspondentes aos lucros unitários de produtos e sub-produtos, representavam os resultados financeiros de suas respectivas produções e comercializações. Complementaram ainda o modelo, nada menos que 44 variáveis de decisão, e 70 restrições, de ordem tecnológica, comercial bem como de

capacidade de armazenagem e de absorção dos produtos e sub-produtos resultantes. O modelo, mostrou-se ainda bastante sensível às variações tanto dos limites das restrições quanto dos coeficientes da função objetivo.

Na verdade, isto é decorrência do tipo de empreendimento em estudo, produtor simultâneo de açúcar e de álcool, em função de suas peculiaridades, visto que no que se refere ao *mix* de produção, tem a possibilidade de explorar a matéria-prima na direção (majoritária ou equilibrada) de um ou outro produto, podendo maximizar seus resultados financeiros por economia de escala ou de escopo. Nesse contexto, o modelo responde a uma ampla variação na escala de processamento de cana, tanto para capacidades maiores quanto para menores do que a tomada como referência (517 t/h). Para cada uma dessas variações, obtém-se diferentes composições ótimas do *mix* de produtos, sub-produtos e demais correntes de processo, bem como o correspondente lucro maximizado.

Ao se observar os resultados obtidos no Relatório de Sensibilidade (Apêndice K), no que se refere aos coeficientes da função objetivo (lucros unitários), conclui-se que para os produtos energéticos (álcoois e eletricidade) por esgotarem a capacidade produtiva, não geram novas vazões, ainda que o mercado possa promover melhores preços. Isto, entretanto, não é observado para os demais produtos e sub-produtos. Para o açúcar, por exemplo, cujo lucro unitário encontrado, de R\$340/t, indica que preços que promovessem lucros unitários acima de R\$371,00/t, já deslocariam uma fração do caldo para a sua fabricação, resultando em um maior lucro total máximo.

Quanto ao Relatório de Resposta (Apêndice J) conclui-se que de todas as restrições estabelecidas, à exceção daquelas relativas aos balaços de massa (tipo =), apenas as restrições para alguns produtos e sub-produtos, coincidem com seus respectivos limites superiores (restrições do tipo $\leq$), indicando, portanto, que existe a possibilidade de ganhos marginais caso esses limites viessem a ser expandidos. Isto implica que pode-se ter aumento no lucro total toda vez que ocorrerem esses ganhos. As restrições que alcançaram os limites superiores, e portanto apresentaram lucros marginais, foram os álcoois (anidro e hidratado), e o bagaço (total e excedente). A eletricidade, apesar de ter registrado lucro marginal, sua restrição é uma equação de balanço (tipo =), estando condicionada à disponibilidade de bagaço para tal fim, o qual atinge apenas a metade do valor do seu limite superior e, sendo assim, o seu lucro marginal é nulo, conforme foi constatado. A restrição

neste caso, é de excesso; e como o excedente de bagaço empregado para outros fins está limitado ao seu emprego para eletricidade, coincidindo exatamente com o valor encontrado, justifica-se o fato deste aproveitamento registrar lucro marginal, ao contrário do aproveitamento para fins de geração de eletricidade.

Finalizando, pode-se afirmar que o valor máximo do lucro total (R\$14.910,28/h), resultante do modelo configurado, implementado para a citada capacidade de referência, situa-se em torno dos valores alcançados por indústrias do segmento de açúcar e álcool, com potencial de produção equivalente à do presente estudo. Isto demonstra, mais uma vez, que o modelo matemático elaborado, de fato está de acordo com a realidade operacional destes empreendimentos.

7.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diante das diversas questões levantadas ao longo do presente trabalho, pode-se sugerir algumas linhas de ação futuras para o tratamento das mesmas, quais sejam:

1. Conforme evidenciado no Capítulo 1, as facilidades de obtenção de dados disponibilizados pela usina situada no Estado da Bahia, e sua adequação à metodologia proposta no presente trabalho, apesar de ter favorecido o estudo sobre o comportamento da *fila de espera*, não se apresentaram tecnicamente convenientes para a implementação do modelo de programação linear para fins de maximização do lucro, exigindo, que para tanto, esses dados fossem levantados em referencial teórico-aplicado. Nesse contexto, resultados ainda mais expressivos provavelmente podem ser obtidos, caso esses dois modelos sejam realizados dentro de uma mesma unidade produtora, ou ainda em diferentes unidades, mas que fossem efetivamente ajustadas (com capacidades equivalentes).

2. Dentre as diversas contribuições desta tese, pode-se citar a aplicação do teste de aderência das distribuições de probabilidade das taxas de chegada e de serviço, conforme discutidas nos Capítulos 2 e 3. Os resultados obtidos, apesar de indicarem a *não-convergência* para as distribuições em análise (*poisson e exponencial*), poderiam ser diferentes, caso um maior número de amostras fossem tomadas para tratamento e análise. Sugere-se, portanto, que mais boletins de pesagem de cana, para diferentes safras, sejam tomados para análises. Além do mais, poderiam também ser incluídos períodos de

prováveis regimes transientes (início e final da safra), o que favoreceria a comparação com os resultados obtidos para os períodos analisados, tidos como estacionários.

3. Apesar dos testes não terem comprovadas as referidas aderências, o trabalho foi conduzido como se tal hipótese fosse verdadeira, chegando-se a resultados satisfatórios, conforme já evidenciados. Entretanto, seria pertinente estudar o comportamento da formação dessas filas considerando-se que as mesmas fossem *não-markovianas*. Isto também permitiria uma comparação e significância com os resultados aqui obtidos.

4. O presente estudo considerou que os veículos transportadores de cana encontravam-se previamente carregados na lavoura, vez que, controlou-se apenas as chegadas na usina, não levando-se em conta o tempo necessário ao seu carregamento. Elevadas reduções na taxa de descarga, ou interrupções da mesma, por razões de quebra dos guindastes ou de algum equipamento crítico do processo de fabricação, promove o aumento das *filas de espera* não apenas na usina, mas também na lavoura durante o processo de carregamento dos veículos. Este efeito, além de outros, tem como consequência o aumento no decaimento da taxa de sacarose, tanto da cana depositada nos caminhões ainda na lavoura, quanto aquela que ainda aguarda para ser colhida. Isto, evidentemente, implica no aumento de custos por perdas de sacarose, mesmo antes de ser transportada. Desse modo, esta fase do processo também deveria ser considerada em um próximo trabalho.

5. Ainda em relação à otimização com base nos conceitos de filas de espera, pode-se também sugerir que se considere a possibilidade da moagem de cana que foi previamente picada durante o processo de colheita mecanizada. Tal observação implicaria em reconsiderações no que diz respeito à disciplina da fila, com consequências sobre o modelo matemático. Isto ocorreria, porque os veículos contendo cana picada teriam prioridade de descarregamento em relação aos demais, visto que a cana nessas condições (picada) registra taxas de decaimento de sacarose superior às daquelas que foram apenas queimada e, portanto, deverá ser descarregada e prontamente processada pelo tandem de moagem.

6. Alguns aperfeiçoamentos na Programação Linear também podem ocorrer. Um dos casos, por exemplo, diz respeito ao deslocamento de parte do mel de segunda para a produção de álcool, justificado quando os preços do açúcar implicarem em maiores lucros

unitários. Na presente programação, quando isto ocorre, constata-se evidentemente que uma parte do caldo que antes era destinado à produção de álcool, é deslocado para açúcar, o que já era esperado, promovendo a redução da corrente de álcool de menor lucro unitário, no caso o hidratado. Entretanto, aumentos na fabricação do adoçante, implica em mais produção de mel, o qual é matéria-prima para álcool. Dessa forma, nesses casos poder-se-ia compensar a redução do caldo para álcool, pelo excedente de mel que fora gerado durante a fabricação do açúcar, sem a necessidade de redução da produção do álcool, fato que aumentaria ainda mais o valor máximo do lucro total. Assim, uma nova programação deveria considerar esta rota, o que incluiria a variável mel para outros fins.

7. Outra sugestão em relação à programação Linear, diz respeito à possibilidade de se considerar a produção de açúcar e de álcool de forma independente. Até então o que predomina no plano nacional, está de acordo com o que foi desenvolvido no presente trabalho, entretanto, diante do apelo ambiental internacional na direção da substituição de combustíveis fósseis pelos renováveis, é provável que unidades alcooleiras independentes passem a ser mais representativas no médio prazo. O tratamento isolado interfere em pelo menos duas ações em relação ao caso aqui apresentado: 1) exclusividade da matéria-prima (cana e caldo) para álcool, e 2) indisponibilidade interna do mel e/ou xarope para a fermentação, já que estes estão vinculados à fabricação do açúcar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

01. BRASIL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Plano Agrícola e Pecuário 2003/2004. Brasília, DF. MAPA/SPA, 2003.
02. UNIÃO DA AGRO-INDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO – UNICA. Estatística de Safra. Disponível em www.portalunica.com.br/files/estatisticas Acesso em 21 dez. 2003.
03. ASSOCIAÇÃO DOS FABRICANTES DE VEÍCULOS AUTOMOTORES – ANFAVEA. Anuário Estatístico 2003. Produção e vendas por combustível. Disponível em: <http://www.portalunica.com.br>. Acesso em 10 jan. 2004.
04. MORAES, Márcia A. F. D; SHIKIDA, Pery, F. A (org); et al. Agroindústria canavieira no Brasil: Evolução, desenvolvimento e desafios. São Paulo, SP. Ed. Atlas, 2002. 367p.
05. CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. Revista Indústria Brasileira, out/2004.
06. HART, C. E; BABCOCK, B. A. Implications of the WTO on the redesign of US farm policy. Card briefing paper 01-BP32, center of agricultural and rural development, Iowa State University, 2001.
07. FRITH, M; HARVEST, B.: How EU sugar subsidies devastate Africa. Global Policy Forum, 22/06/2005. Disponível em: http://www.globalpolicy.org.uk/html/body_eu_sugar.html. Acesso em 30/09/2005.
08. YOURDON, E. Análise estruturada moderna. São Paulo, SP. Ed. Campus, 3ª edição, 1990.
09. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS: Conservação de Energia na Indústria do açúcar e do álcool. Manual de Recomendações/Carlos Augusto de Camargo (Coord). São Paulo, 1990.
10. PRADO, Darcy S. Teoria das filas e da simulação. Belo Horizonte, MG. Ed. EDG 1999.
11. LARRY, Ritzman P; KRAJEWSKI, Lee J. Administração da produção e operações. São Paulo, SP. Ed. Pearson/Prentice Hall, 2004.

12. BRONSON, Richard. Pesquisa operacional. São Paulo, SP: Mc Graw Hill, 1985.
13. WAGNER, Harvey, M. Pesquisa operacional. São Paulo, SP. Ed. Campus, 1986
14. HILLIER, Frederick S; LIEBERMAN, Gerald J. Introduction to operations research. New York, Ed. McGraw-Hill, 2001.
15. CONWAY, W.; MAXWELL, L.; HILLIER, F.S. A Multiple server queueing model with state dependent service rate. In. Journal of Industrial Engineering, n.15: 153-157, 1964.
16. GROSS, D; HARRIS, C. M. Fundamentals of queueing theory. New York, 1974.
17. ANDRADE, Eduardo, L. Introdução à pesquisa operacional. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
18. PINHEIRO, João I. D. Análise estatística de dados. Rio de Janeiro. Instituto de Matemática (UFRJ), 1988.
19. SPIEGEL, Murray, R. Estatística. São Paulo, SP: Ed. Mc Graw-Hill do Brasil, 1977
20. NEUFELD, John. L. Estatística aplicada à administração usando excell. São Paulo, SP. Ed. Prentice Hall, 2001.
21. CHANG, Yih-Long; SULLIVAN, Robert S. QSB+ : Version 2.1. New Jersey. Ed. Prentice Hall, 1996.
22. AMORIM, Henrique V. Impact of sugar cane quality on sugar and alcohol yields. INT. SUGAR JNL, 2000. V.102; N° 1214.
23. Entrevista com o Sr. Nelson José dos Santos. Diretor da Associação dos Fornecedores de Cana da Bahia (ASPLANA). 05/10/2004.
24. Entrevista com o Sr. José Amaro Gomes da Silva. Gerente de Transporte da Usina Aliança. 12/10/2004.
25. PIDD, M. Modelagem Empresarial : Ferramentas para a tomada de decisão. São Paulo, SP. Ed. Bookman, 1998.
26. Entrevista com o Engenheiro Químico João Santana. Gerente de Produção da Usina Aliança. 25/11/2004.

27. PAYNE, John H. Operações unitárias na produção de açúcar de cana. São Paulo, SP. Ed. Nobel, 1989.
28. GOLDBARG, Marco C; LUNA, Henrique P. L. Otimização combinatória e programação linear: Modelos e Algoritmos. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2000.
29. BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional, Brasília, 2003.
30. BRASIL, MINISTÉRIO DE AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. Agricultura em números: Anuário 2003, Brasília, 2003.
31. ÚNIAO DA AGROINDUSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO - UNICA. Acompanhamento de Safra 2002/2003: Safra garante abastecimento. Disponível em: <http://www.portалunica.com.br>. Acesso em 10 de abril 2002.
32. SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, IV. 1988. Anais. Copersucar, Piracicaba, SP.
33. JORNAL CANA. Total de unidades produtoras diminui de 320 para 292. Jornal Cana, nº 115, Ribeirão Preto, SP, julho 2003.
34. JORNAL CANA. Boas perspectivas para o açúcar brasileiro. Disponível em: < <http://www.jornalcana.com.br>>. Acesso em 22 jul. 2004.
35. BRASIL, MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional, Brasília, 2003.
36. CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA AGRÍCOLA APLICADA – CEPEA. Indicadores de preços. Disponível em: < <http://cepea.esalq.usp.br>>. Acesso em 20 jul. 2004.
37. FILHO, A. A. V. Vale a pena reinventar o pró-alcool no Brasil. Instituto de Economia Agrícola do Estado de São Paulo. Disponível em < <http://www.iea.sp.gov/artigos>>. Acesso em 17 jun. 2003.
38. CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Preços. Disponívem em: <http://www.ccee.org.br/mercados>>. Acesso em 22 jul. 2004.

39. SILVA, Marcelo. A. M (Gerente da Usina Agrovale, Bahia). Dados resumo da safra 2002/2003. Publicação eletrônica [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <annas@ufba.br> em 10 de março/2004.
40. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Agroecologia da cana-de-açúcar: insumos. Disponível em: <<http://www.cana.cnpemembrapa.br/canain.html>>. Acesso em 03 mai. 2003.
41. STVENSON, Willam. J. Administração das operações de produção. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2001.
42. PERRY, Robert H. ; CHILTON, Cecil H. Manual de Engenharia Química. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 4^a ed., 1980.
43. IANNONI, Ana P.; MORABITO, Reinaldo. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. São Carlos, SP: Revista Gestão & Produção, vol 9, n^o 2, ago 2002.
44. YAMADA, M. C. Modelagem das cadeias de atividades produtivas da indústria sucro-alcooleiras visando a aplicação em estudos de simulação. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Escola de Engenharia de São Carlos/USP, São Carlos.
45. MATHEW, J.; RAJENDRAN, C. Scheduling of maintenance activities in sugar industry using simulation. Computers in industry, n.21, 1993.
46. RUSSEL, Roberta S.; TAYLOR III, Bernard W. Operations management. New Jersey: Ed. Prentice Hall, 2^a ed. 1998.
47. PRADO, Darcy. Usando o Arena em simulação. Belo Horizonte, MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.
48. RESEARCH AND EDUCATION ASSOCIATION. Problem Solver – Mathematics for engineers. New Jersey: 1994.
49. LACHTERMACHER, Gerson. Pesquisa operacional na tomada de decisão: Modelagem em excel. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2002.
50. JORNAL GAZETA MERCANTIL. Balanço Anual. Ano XXVIII, n. 28, SP. Ago 2004. Suplemento.

51. Produtores esperam benefícios do Proinfa. Jornal Cana, nº 116, Ribeirão Preto, SP. Ago. 2003.
52. JORNAL CANA. Consultor da UNICA expõe causas da redução nas vendas de carros a álcool. Disponível em: < <http://www.jornalcana.com.br>>. Acesso em 24 jun. 2004.
53. Contrato já é oficial em Nova Iorque. Jornal Cana, n. 124. Ribeirão Preto, abr. 2004.
54. BRASIL. Congresso. Senado. Lei nº 11.097. Regulamentação do Programa Brasileiro de Biodiesel. 14 de janeiro de 2005.
55. DELGADO, A .A. Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba: Apostila (Curso de Eng. Agrícola). Vol. I, pg. 45. 1977.

Apendice

A

UNIAO AGRICOLA LTDA						PRODUTO 1 - CANA				Pag.: 0001	
EMISSAO DE CERTIFICADO DE PESAGEM						SEM FILTRO				Data: 06/09/04	
PERIODO : 12/12/03 AS						ATE 12/12/03 AS 23:59:59				Hora: 13:49:18	
PLACA	CERTIFICADO	BRUTO	BAL	DATA	HORA	TARA	BAL	DATA	HORA	LIQUIDO	DURACAO
JLC4043	266.607	20.320	2	12/12	11:38	7.220	2	12/12	14:30	13.100	02:52
JLC4043	266.775	21.480	2	12/12	22:12	7.220	1	12/12	14:30	14.260	16:18
MUF2933	266.778	34.530	2	12/12	01:41	13.540	1	12/12	14:08	20.990	12:27
MF07201	266.779	24.320	2	12/12	01:42	7.210	1	12/12	14:07	17.110	12:25
JLC3962	266.780	27.110	2	12/12	09:34	10.140	1	12/12	17:54	16.970	08:20
BUA7191	266.781	21.790	1	12/12	09:37	10.770	1	12/12	10:14	11.020	00:37
KX80334	266.782	24.930	2	12/12	09:44	8.730	2	12/12	18:21	16.200	08:37
LUR0450	266.783	28.130	2	12/12	09:45	11.910	1	12/12	21:38	16.220	11:53
MFY1687	266.784	25.880	1	12/12	09:46	8.260	1	12/12	21:41	17.620	11:55
KFD0559	266.785	23.720	2	12/12	09:46	10.500	1	12/12	11:58	13.220	02:12
KTZ1638	266.786	24.970	2	12/12	09:51	11.380	1	12/12	09:58	13.590	00:07
KVH1116	266.787	25.440	2	12/12	09:53	9.920	1	12/12	10:11	15.520	00:18
KMS6389	266.788	21.350	2	12/12	09:54	9.730	1	12/12	15:42	11.620	05:48
LUR2543	266.789	30.590	2	12/12	09:55	11.920	1	12/12	17:26	18.670	07:31
MFY1827	266.790	23.980	1	12/12	09:56	6.920	1	12/12	17:27	17.060	07:31
KIK0941	266.791	22.840	2	12/12	10:22	10.620	1	12/12	12:14	12.220	01:52
MPE5840	266.792	33.090	2	12/12	10:26	13.510	1	12/12	11:41	19.580	01:15
BUA2101	266.793	23.590	2	12/12	10:29	6.860	1	12/12	11:42	16.730	01:13
BKN6195	266.794	28.900	1	12/12	10:48	11.090	1	12/12	14:18	17.810	03:30
DAH9831	266.795	22.050	1	12/12	10:48	7.810	1	12/12	14:17	14.240	03:29
F-09	266.796	22.500	2	12/12	10:21	6.380	1	12/12	10:21	16.120	00:00
BWJ4080	266.797	33.700	1	12/12	10:37	14.890	1	12/12	11:09	18.810	00:32
KTJ8014	266.798	26.580	2	12/12	12:13	9.820	1	12/12	19:15	16.760	07:02
KSD0613	266.799	25.530	1	12/12	10:57	9.610	1	12/12	12:06	15.920	01:09
JLA4056	266.800	24.430	1	12/12	10:59	10.470	1	12/12	12:22	13.960	01:23
SEB3355	266.801	32.760	2	12/12	09:49	9.860	1	12/12	09:49	22.900	00:00
BUA7191	266.802	28.320	1	12/12	09:40	10.770	1	12/12	10:15	17.550	00:35
KUT0008	266.803	22.340	2	12/12	10:32	9.450	1	12/12	10:33	12.890	00:01
LDB9176	266.804	33.170	2	12/12	12:13	11.650	1	12/12	12:27	21.520	00:14
KFR1853	266.805	26.650	2	12/12	10:27	9.730	1	12/12	10:27	16.920	00:00
KMS6400	266.806	34.410	2	12/12	10:23	10.840	1	12/12	10:23	23.570	00:00
KSN0265	266.807	24.760	1	12/12	12:10	8.400	1	12/12	15:49	16.360	03:39
BWN8316	266.808	31.970	1	12/12	12:09	10.910	1	12/12	22:38	21.060	10:29
RTT0365	266.809	28.580	1	12/12	10:55	10.550	1	12/12	15:45	18.030	04:50
GRY5495	266.810	24.850	2	12/12	11:27	9.680	1	12/12	11:33	15.170	00:06
KSC8915	266.811	31.390	2	12/12	09:26	10.380	1	12/12	09:26	21.010	00:00
BUS4516	266.812	28.350	2	12/12	09:29	12.750	1	12/12	09:35	15.600	00:06
JLC3933	266.813	17.860	1	12/12	09:31	6.460	1	12/12	09:35	11.400	00:04
BWN1477	266.814	30.220	1	12/12	09:32	11.560	1	12/12	09:39	18.660	00:07
LDB1075	266.815	27.660	1	12/12	09:32	12.200	1	12/12	09:47	15.460	00:15
LEK6998	266.816	28.350	2	12/12	09:21	9.450	1	12/12	09:41	18.900	00:20
SPZ4314	266.817	27.520	2	12/12	09:23	10.700	1	12/12	09:52	16.820	00:29
SEB3355	266.818	31.600	2	12/12	09:25	9.860	1	12/12	09:50	21.740	00:25
KTZ1638	266.819	28.760	2	12/12	09:28	11.380	1	12/12	09:58	17.380	00:30
KCF7320	266.820	23.610	2	12/12	09:30	10.040	1	12/12	10:05	13.570	00:35
JLA4413	266.821	15.910	2	12/12	09:38	6.710	1	12/12	10:00	9.200	00:22
MSL4550	266.822	24.610	2	12/12	09:41	9.720	1	12/12	10:07	14.890	00:26
KPK8015	266.823	30.700	2	12/12	09:43	9.440	1	12/12	10:08	21.260	00:25
BUA7191	266.824	26.670	2	12/12	09:48	10.770	1	12/12	10:15	15.900	00:27
KVH1116	266.825	26.560	2	12/12	09:57	9.920	1	12/12	10:10	16.640	00:13
JLC8426	266.826	25.750	2	12/12	10:00	11.840	1	12/12	10:17	13.910	00:17
KMS6400	266.827	35.550	2	12/12	10:06	10.840	1	12/12	10:24	24.710	00:18
F-09	266.828	21.310	2	12/12	10:08	6.390	1	12/12	10:19	14.920	00:11
KPR1853	266.829	28.990	2	12/12	10:10	9.730	1	12/12	10:28	19.260	00:18

FABRIL AGRICOLA LTDA				PRODUTO 1 - CANA				Pag.: 0002			
FABRIL DE CERTIFICADO DE PESAGEM				SEM FILTRO				Data: 06/09/04			
PERIODO : 12/12/03 AS				ATE 12/12/03 AS 23:59:59				Hora: 13:49:18			
PLACA	CERTIFICADO	BRUTO	BAL	DATA	HORA	TARA	BAL	DATA	HORA	LIQUIDO	DURACAO
K0Z7090	266.830	26.350	2	12/12	10:13	7.920	1	12/12	10:30	18.430	00:17
K0Z2252	266.831	24.630	2	12/12	10:17	11.740	1	12/12	10:35	12.890	00:18
KUT0008	266.832	19.830	2	12/12	10:19	9.440	1	12/12	10:33	10.390	00:14
KUF1704	266.833	28.400	2	12/12	10:34	11.040	1	12/12	10:45	17.360	00:11
KL88858	266.834	26.910	2	12/12	10:36	10.600	1	12/12	10:51	16.310	00:15
KKA0929	266.835	33.740	2	12/12	10:38	13.830	1	12/12	11:06	19.910	00:28
KPY0536	266.836	26.460	2	12/12	10:39	6.930	1	12/12	11:07	19.530	00:28
KHF5857	266.837	30.030	2	12/12	10:40	11.540	1	12/12	10:49	18.490	00:09
KMS6811	266.838	22.870	2	12/12	10:42	8.940	1	12/12	10:54	13.930	00:12
KUE7000	266.839	26.230	2	12/12	10:44	8.950	1	12/12	11:03	17.280	00:19
KWJ4080	266.840	33.180	2	12/12	10:46	14.860	1	12/12	11:09	18.320	00:23
KSC8915	266.841	30.030	2	12/12	10:49	10.400	1	12/12	11:18	19.630	00:29
KTT2994	266.842	27.480	2	12/12	10:51	9.790	1	12/12	11:20	17.690	00:29
KFE5840	266.843	32.510	2	12/12	10:53	13.500	1	12/12	11:40	19.010	00:47
KDA2101	266.844	24.260	2	12/12	10:53	6.860	1	12/12	11:43	17.400	00:50
KSP0717	266.845	28.360	2	12/12	10:55	9.610	1	12/12	11:29	18.750	00:34
KMS6476	266.846	28.090	2	12/12	10:56	9.180	1	12/12	11:25	18.910	00:29
KBY5495	266.847	24.360	2	12/12	10:58	9.680	1	12/12	11:32	14.680	00:34
KRC1645	266.848	26.660	2	12/12	11:00	11.110	1	12/12	11:37	15.550	00:37
KDM4798	266.849	23.560	2	12/12	11:03	8.640	1	12/12	11:46	14.920	00:43
KWJ4122	266.850	33.180	2	12/12	11:06	15.210	1	12/12	11:55	17.970	00:49
KAO9202	266.851	27.120	2	12/12	11:06	8.640	1	12/12	11:55	18.480	00:49
LEK6998	266.852	21.680	2	12/12	11:08	9.400	1	12/12	11:49	12.280	00:41
KSE8355	266.853	31.980	2	12/12	11:11	9.890	1	12/12	12:03	22.090	00:52
KPD0559	266.854	25.660	2	12/12	11:13	10.500	1	12/12	11:58	15.160	00:45
KSD0613	266.855	24.250	2	12/12	11:15	9.610	1	12/12	12:05	14.640	00:50
KPD04014	266.856	24.750	2	12/12	11:16	9.480	1	12/12	12:11	15.270	00:55
KMS6021	266.857	25.280	2	12/12	11:22	9.870	1	12/12	12:17	15.410	00:55
KTK0941	266.858	27.070	2	12/12	11:24	10.620	1	12/12	12:14	16.450	00:50
KLA4056	266.859	28.920	2	12/12	11:28	10.420	1	12/12	12:21	18.500	00:53
KUG9176	266.860	30.660	2	12/12	11:30	11.640	1	12/12	12:26	19.020	00:56
KTO1956	266.861	19.390	2	12/12	11:31	5.420	1	12/12	12:29	13.970	00:58
KUT0008	266.862	23.640	2	12/12	11:34	9.500	1	12/12	12:30	14.140	00:56
KLC8426	266.863	26.760	2	12/12	11:38	11.810	1	12/12	15:34	14.950	03:56
KLC4041	266.864	21.120	2	12/12	11:40	6.550	1	12/12	15:36	14.570	03:56
KFB8617	266.865	32.730	2	12/12	11:45	14.460	1	12/12	21:14	18.270	09:29
KLC8201	266.866	19.230	2	12/12	11:46	7.060	1	12/12	21:16	12.170	09:30
KLC3962	266.867	28.900	2	12/12	11:48	10.150	1	12/12	17:55	18.750	06:07
KTT3101	266.868	28.050	2	12/12	11:51	12.010	1	12/12	21:54	16.040	10:03
KLC4042	266.869	19.260	2	12/12	11:52	6.970	1	12/12	21:56	12.290	10:04
KUF1704	266.870	29.160	2	12/12	11:54	11.060	1	12/12	15:17	18.100	03:23
KMS6400	266.871	32.130	2	12/12	11:56	10.840	1	12/12	15:23	21.290	03:27
KTT0365	266.872	27.850	2	12/12	12:00	10.560	1	12/12	15:45	17.290	03:45
K0Z2252	266.873	31.130	2	12/12	12:02	11.790	1	12/12	16:08	19.340	04:06
KLC4044	266.874	20.580	2	12/12	12:03	7.020	1	12/12	16:07	13.560	04:04
KSN0265	266.875	25.880	2	12/12	12:04	8.400	1	12/12	15:50	17.480	03:46
KUG0450	266.876	29.780	2	12/12	12:07	11.910	1	12/12	21:39	17.870	09:32
KPY1687	266.877	25.970	2	12/12	12:08	8.260	1	12/12	21:41	17.710	09:33
KTJ8014	266.878	27.530	2	12/12	12:11	9.820	1	12/12	19:15	17.710	07:04
KL88858	266.879	25.240	2	12/12	13:42	10.580	1	12/12	15:47	14.660	02:05
KMS6811	266.880	23.680	2	12/12	13:43	8.900	1	12/12	15:31	14.780	01:48
KHF5857	266.881	29.580	2	12/12	13:41	11.550	1	12/12	13:41	18.030	00:00
KWN1477	266.882	29.390	2	12/12	13:39	11.570	1	12/12	13:39	17.820	00:00
KPD04009	266.883	29.310	2	12/12	13:44	10.610	1	12/12	13:45	18.700	00:01

NIAO AGRICOLA LTDA						PRODUTO 1 - CANA						Pag.: 0005	
MISSAO DE CERTIFICADO DE PESAGEM						SEM FILTRO						Data: 06/09/04	
ERIOOO : 12/12/03 AS : : ATE 12/12/03 AS 23:59:59												Hora: 13:49:19	
=====													
LACA	CERTIFICADO	BRUTO	BAL	DATA	HORA	TARA	BAL	DATA	HORA	LIQUIDO	DURACAO		
=====													
CF7320	266.992	23.680	2	12/12	18:34	10.020	1	12/12	19:54	13.660	01:20		
KM6195	266.993	27.340	2	12/12	18:36	10.900	1	12/12	19:50	16.440	01:14		
PE5840	266.994	32.110	2	12/12	18:43	13.790	1	12/12	20:14	18.320	01:31		
QA2101	266.995	22.640	2	12/12	18:44	6.820	1	12/12	20:15	15.820	01:31		
QG1075	266.996	25.360	2	12/12	18:45	11.860	1	12/12	20:09	13.500	01:24		
MS6476	266.997	24.440	2	12/12	18:47	9.290	1	12/12	20:07	15.150	01:20		
PZ4314	266.998	24.950	2	12/12	18:48	10.690	1	12/12	20:10	14.260	01:22		
OZ2252	266.999	31.280	2	12/12	18:50	11.780	1	12/12	20:17	19.500	01:27		
LC4041	267.000	20.000	2	12/12	18:51	6.560	1	12/12	20:18	13.440	01:27		
QY5495	267.001	28.750	2	12/12	18:52	9.680	1	12/12	20:21	19.070	01:29		
SP0717	267.002	24.340	2	12/12	18:54	9.590	1	12/12	20:32	14.750	01:38		
RC1645	267.003	23.870	2	12/12	18:57	11.220	1	12/12	20:43	12.650	01:46		
RA0929	267.004	27.940	2	12/12	18:59	13.820	1	12/12	20:30	14.120	01:31		
EY0536	267.005	21.020	2	12/12	19:00	6.940	1	12/12	20:31	14.080	01:31		
LC8426	267.006	31.400	2	12/12	19:01	11.890	1	12/12	20:46	19.510	01:45		
MS6021	267.007	27.430	2	12/12	19:46	9.850	1	12/12	21:03	17.580	01:17		
UE7000	267.008	25.070	2	12/12	19:48	9.110	1	12/12	21:32	15.960	01:44		
TT2994	267.009	26.310	2	12/12	19:51	9.940	1	12/12	21:11	16.370	01:20		
DM4798	267.010	20.390	2	12/12	19:54	8.770	1	12/12	21:19	11.620	01:25		
FD0559	267.011	28.410	2	12/12	19:55	10.390	1	12/12	20:53	18.020	00:58		
FB8617	267.012	32.460	2	12/12	19:58	14.460	1	12/12	21:15	18.000	01:17		
LC8201	267.013	22.630	2	12/12	19:59	7.010	1	12/12	21:16	15.620	01:17		
OM9349	267.014	24.670	2	12/12	20:01	12.000	1	12/12	21:00	12.670	00:59		
FY4138	267.015	28.130	2	12/12	20:02	9.600	1	12/12	21:00	18.530	00:58		
GM0450	267.016	27.910	2	12/12	20:03	11.920	1	12/12	21:39	15.990	01:36		
FY1687	267.017	25.130	2	12/12	20:05	8.260	1	12/12	21:42	16.870	01:37		
TT3101	267.018	26.560	2	12/12	20:13	12.000	1	12/12	21:55	14.560	01:42		
LC4042	267.019	20.520	2	12/12	20:14	6.970	1	12/12	21:56	13.550	01:42		
BZ7050	267.020	25.570	2	12/12	20:16	8.080	1	12/12	21:28	17.490	01:12		
-09	267.021	22.910	2	12/12	20:19	7.190	1	12/12	21:24	15.720	01:05		
PU4014	267.022	24.180	2	12/12	20:21	9.520	1	12/12	21:05	14.660	00:44		
UF2933	267.023	29.400	2	12/12	20:34	13.810	1	12/12	22:12	15.590	01:38		
FB7201	267.024	22.850	2	12/12	20:35	7.240	1	12/12	22:12	15.610	01:37		
MS3470	267.025	30.260	2	12/12	21:30	11.680	1	12/12	22:36	18.580	01:06		
FPY1527	267.026	25.390	2	12/12	21:31	6.690	1	12/12	22:37	18.700	01:06		
MS6523	267.027	24.870	2	12/12	21:45	11.730	1	12/12	22:08	13.140	00:23		
NL5213	267.028	18.420	2	12/12	21:45	6.550	1	12/12	22:09	11.870	00:24		
=====													
DTAIS		6.682.910				2.536.790				4.146.120			
=====													
IERAL		6.682.910				2.536.790				4.146.120			

Apêndice

B

NOVA ALIANÇA S.A. PESAGEM ELETRÔNICA PRODUTO 1 - CANA
EMISSÃO DE CERTIFICADO DE PESAGEM SEM FILTRO
PERÍODO : 06/03/97 AS 00:00:00 ATE 06/03/97 AS 23:59:59

576

Pag.: 0001
Data: 07/03/97
Hora: 07:09:44

PLACA	CERTIFICADO	BRUTO	BAL	DATA	HORA	TARA	BAL	DATA	HORA	LIQUIDO	DURACAO
JLY9335	54.313	23.950	2	06/03	08:07	10.570	1	06/03	08:17	13.380	00:10
CM-6398	54.314	28.240	2	06/03	08:11	9.800	1	06/03	08:26	18.440	00:15
JLY9334	54.315	28.290	2	06/03	08:22	10.580	1	06/03	08:34	17.710	00:12
V-105	54.316	20.020	2	06/03	08:33	11.570	1	06/03	08:43	8.450	00:10
T-43	54.317	15.260	2	06/03	08:35	9.380	1	06/03	08:47	5.880	00:12
XC-2034	54.318	23.350	2	06/03	08:36	8.280	1	06/03	08:53	15.070	00:17
V-106	54.319	23.210	2	06/03	08:42	12.470	1	06/03	08:57	10.740	00:15
V-115	54.320	24.700	2	06/03	08:47	12.210	1	06/03	09:03	12.490	00:16
V-74	54.321	23.290	2	06/03	08:51	10.990	1	06/03	09:09	12.300	00:18
V-103	54.322	23.750	2	06/03	08:53	12.160	1	06/03	09:13	11.590	00:20
CD-8180	54.323	15.730	2	06/03	08:54	7.220	1	06/03	09:19	8.510	00:25
JLB8858	54.324	28.880	2	06/03	08:56	11.170	1	06/03	09:23	17.710	00:27
JLY9378	54.325	23.640	2	06/03	08:57	9.780	1	06/03	09:33	13.860	00:36
V-77	54.326	24.020	2	06/03	09:01	10.620	1	06/03	09:27	13.400	00:26
V-95	54.327	24.040	2	06/03	09:04	11.020	1	06/03	09:34	13.020	00:30
V-78	54.328	22.510	2	06/03	09:07	10.710	1	06/03	09:38	11.800	00:31
V-104	54.329	26.380	2	06/03	09:15	12.140	1	06/03	09:42	14.240	00:27
V-83	54.330	20.660	2	06/03	09:23	11.120	1	06/03	09:37	9.540	00:14
JLY9335	54.331	25.690	2	06/03	09:29	10.670	1	06/03	09:47	15.020	00:18
V-114	54.332	24.330	2	06/03	09:30	11.730	1	06/03	09:41	12.600	00:11
V-79	54.333	20.210	2	06/03	09:34	11.280	1	06/03	09:45	8.930	00:11
T-47	54.334	14.800	2	06/03	09:36	9.120	1	06/03	09:54	5.680	00:18
JMB5889	54.335	25.240	2	06/03	09:38	11.010	1	06/03	09:53	14.230	00:15
T-43	54.336	15.250	2	06/03	09:48	9.230	1	06/03	10:00	6.020	00:12
V-105	54.337	22.630	2	06/03	09:50	11.610	1	06/03	09:59	11.020	00:09
JLY9334	54.338	25.340	2	06/03	09:54	10.640	1	06/03	10:02	14.700	00:08
V-115	54.339	23.230	2	06/03	10:01	12.140	1	06/03	10:14	11.090	00:13
CM-6398	54.340	28.820	2	06/03	10:06	9.840	1	06/03	10:17	18.980	00:11
V-74	54.341	21.900	2	06/03	10:09	11.030	1	06/03	10:31	10.870	00:22
V-106	54.342	23.550	2	06/03	10:12	12.500	1	06/03	10:21	11.050	00:09
JNW4772	54.343	25.850	2	06/03	10:18	10.230	1	06/03	10:37	15.620	00:19
XC-2034	54.344	23.390	2	06/03	10:24	8.240	1	06/03	10:35	15.150	00:11
V-78	54.345	18.300	2	06/03	10:25	10.730	1	06/03	10:36	7.570	00:11
V-74	54.346	20.080	2	06/03	10:28	11.220	1	06/03	10:38	8.860	00:10
JMF6189	54.347	23.420	1	06/03	10:33	10.480	1	06/03	10:39	12.940	00:06
V-95	54.348	21.880	2	06/03	10:32	10.990	1	06/03	10:39	10.890	00:07
V-83	54.349	22.680	2	06/03	10:33	11.010	1	06/03	10:41	11.670	00:08
V-103	54.350	26.490	2	06/03	10:35	12.070	1	06/03	10:44	14.420	00:09
CD-8180	54.351	15.630	2	06/03	10:37	7.260	1	06/03	10:50	8.370	00:13
V-104	54.352	25.160	2	06/03	10:45	12.040	1	06/03	10:52	13.120	00:07
CA-6030	54.353	25.150	2	06/03	10:46	11.580	1	06/03	10:57	13.570	00:11
V-114	54.354	23.220	2	06/03	10:48	11.770	1	06/03	11:04	11.450	00:16
T-47	54.355	14.560	2	06/03	10:51	9.110	1	06/03	10:59	5.450	00:08
T-43	54.356	15.220	2	06/03	10:59	9.230	1	06/03	11:05	5.990	00:06
JLB8858	54.357	26.350	2	06/03	11:02	11.200	1	06/03	11:12	15.150	00:10
V-105	54.358	24.880	2	06/03	11:11	11.670	1	06/03	11:21	13.210	00:10
JMB5889	54.359	25.870	2	06/03	11:18	11.140	1	06/03	11:31	14.730	00:13
V-115	54.360	25.350	2	06/03	11:21	12.130	1	06/03	11:33	13.220	00:12
V-106	54.361	24.430	2	06/03	11:26	12.590	1	06/03	11:43	11.840	00:17
V-74	54.362	21.970	2	06/03	11:30	11.080	1	06/03	11:46	10.890	00:16
V-79	54.363	19.550	2	06/03	11:39	11.440	1	06/03	11:49	8.110	00:10
V-83	54.364	21.820	2	06/03	11:40	11.140	1	06/03	11:52	10.680	00:12
JLY9336	54.365	18.170	2	06/03	11:42	7.470	1	06/03	11:50	10.700	00:08
V-78	54.366	22.060	2	06/03	11:44	10.800	1	06/03	11:58	11.260	00:14

NOVA ALIANCA S.A PESAGEM ELETRONICA PRODUTO 1 - CANA
 EMISSÃO DE CERTIFICADO DE PESAGEM SEM FILTRO
 PERÍODO : 06/03/97 AS 00:00:00 ATE 06/03/97 AS 23:59:59

Pag.: 0002
 Data: 07/03/97
 Hora: 07:09:56

PLACA	CERTIFICADO	BRUTO	BAL	DATA	HORA	TARA	BAL	DATA	HORA	LIQUIDO	DURACAO
T-47	54.367	14.600	2	06/03	11:46	9.130	1	06/03	11:58	5.470	00:12
V-113	54.368	29.660	2	06/03	11:49	12.270	1	06/03	12:01	17.390	00:12
V-95	54.369	23.410	2	06/03	11:51	11.020	1	06/03	12:00	12.390	00:09
V-103	54.370	24.460	2	06/03	11:53	12.120	1	06/03	12:03	12.340	00:10
CM-6398	54.371	28.250	2	06/03	11:55	9.910	1	06/03	12:11	18.340	00:16
V-104	54.372	29.860	2	06/03	11:57	12.120	1	06/03	12:14	17.740	00:17
V-51	54.373	26.250	2	06/03	11:59	13.310	1	06/03	12:10	12.940	00:11
JLY9378	54.374	23.920	2	06/03	12:04	9.590	1	06/03	12:18	14.330	00:14
JMA6429	54.375	26.520	2	06/03	12:06	13.180	1	06/03	12:21	13.340	00:15
JMF6189	54.376	24.450	2	06/03	12:09	10.550	1	06/03	12:22	13.900	00:13
CO-8180	54.377	14.800	2	06/03	12:12	7.290	1	06/03	12:24	7.510	00:12
T-43	54.378	15.750	2	06/03	12:13	9.260	1	06/03	12:45	6.490	00:32
JLC4029	54.379	23.430	2	06/03	12:16	10.990	1	06/03	12:29	12.440	00:13
XC-2034	54.380	24.390	2	06/03	12:17	8.270	1	06/03	12:34	16.120	00:17
V-105	54.381	24.710	2	06/03	12:19	11.760	1	06/03	12:30	12.950	00:11
V-114	54.382	24.320	2	06/03	12:20	11.710	1	06/03	12:32	12.610	00:12
V-77	54.383	27.250	2	06/03	12:36	10.540	1	06/03	12:47	16.710	00:11
CM-5027	54.384	14.370	2	06/03	12:46	6.350	1	06/03	12:57	8.020	00:11
V-74	54.385	20.040	2	06/03	12:49	11.000	1	06/03	13:00	9.040	00:11
JLY9335	54.386	25.990	2	06/03	12:51	10.520	1	06/03	13:03	15.470	00:12
V-51	54.387	26.410	2	06/03	12:59	13.260	1	06/03	13:15	13.150	00:16
T-47	54.388	16.290	2	06/03	13:07	9.050	1	06/03	13:19	7.240	00:12
JLC4030	54.389	22.140	2	06/03	13:09	10.600	1	06/03	13:17	11.540	00:08
V-78	54.390	19.900	2	06/03	13:10	10.700	1	06/03	13:17	9.200	00:07
V-83	54.391	19.760	2	06/03	13:11	11.110	1	06/03	13:21	8.650	00:10
V-79	54.392	21.220	2	06/03	13:13	11.350	1	06/03	13:20	9.870	00:07
V-115	54.393	25.640	2	06/03	13:14	12.150	1	06/03	13:25	13.490	00:11
V-106	54.394	25.530	2	06/03	13:18	12.530	1	06/03	13:30	13.000	00:12
CA-6030	54.395	26.010	2	06/03	13:20	11.710	1	06/03	13:35	14.300	00:15
JNW4772	54.396	25.350	2	06/03	13:26	10.220	1	06/03	13:37	15.130	00:11
JLY9334	54.397	25.970	2	06/03	13:27	10.680	1	06/03	13:40	15.290	00:13
V-95	54.398	22.310	2	06/03	13:36	10.910	1	06/03	13:47	11.400	00:11
V-104	54.399	30.270	2	06/03	13:39	12.190	1	06/03	13:52	18.080	00:13
T-43	54.400	16.080	2	06/03	13:41	9.180	1	06/03	13:48	6.900	00:07
CM-6398	54.401	25.830	2	06/03	13:43	9.830	1	06/03	13:53	16.000	00:10
V-114	54.402	24.550	2	06/03	13:45	11.680	1	06/03	13:58	12.870	00:13
JMG5889	54.403	25.230	2	06/03	13:46	11.090	1	06/03	13:57	14.140	00:11
CO-8180	54.404	15.640	2	06/03	13:49	7.220	1	06/03	14:07	8.420	00:18
V-105	54.405	24.080	2	06/03	13:53	11.800	1	06/03	14:04	12.280	00:11
JMA6429	54.406	26.530	2	06/03	13:58	13.160	1	06/03	14:09	13.370	00:11
V-74	54.407	19.350	2	06/03	14:00	11.040	1	06/03	14:10	8.310	00:10
JMF6189	54.408	22.890	2	06/03	14:02	10.530	1	06/03	14:12	12.360	00:10
JLB8858	54.409	27.330	2	06/03	14:07	11.120	1	06/03	14:16	16.210	00:09
V-51	54.410	27.200	2	06/03	14:08	13.210	1	06/03	14:25	13.990	00:17
V-78	54.411	21.500	2	06/03	14:11	10.720	1	06/03	14:24	10.780	00:13
V-77	54.412	26.580	2	06/03	14:15	10.640	1	06/03	14:28	15.940	00:13
T-47	54.413	15.960	2	06/03	14:21	8.970	1	06/03	14:29	6.990	00:08
V-79	54.414	20.710	2	06/03	14:22	11.370	1	06/03	14:34	9.340	00:12
V-106	54.415	24.720	2	06/03	14:24	12.490	1	06/03	14:37	12.230	00:13
V-83	54.416	21.010	2	06/03	14:26	11.130	1	06/03	14:35	9.880	00:09
V-115	54.417	28.010	2	06/03	14:33	12.090	1	06/03	14:44	15.920	00:11
JLC4029	54.418	26.040	2	06/03	14:39	11.000	1	06/03	14:52	15.040	00:13
JLC8199	54.419	22.760	2	06/03	14:43	11.710	1	06/03	14:53	11.050	00:10
JLY9336	54.420	18.390	2	06/03	14:44	7.450	1	06/03	14:58	10.940	00:14

54

NOVA ALIANÇA S.A PESAGEM ELETRONICA PRODUTO 1 - CANA
 EMISSÃO DE CERTIFICADO DE PESAGEM SEM FILTRO
 PERÍODO : 06/03/97 AS 00:00:00 ATE 06/03/97 AS 23:59:59

Pag.: 0005
 Data: 07/03/97
 Hora: 07:12:05

PLACA	CERTIFICADO	BRUTO	BAL	DATA	HORA	TARA	BAL	DATA	HORA	LIQUIDO	DURACAO
V-115	54.529	20.430	2	06/03	21:28	12.220	1	06/03	21:36	8.210	00:08
V-51	54.530	26.260	2	06/03	21:36	13.170	1	06/03	21:46	13.090	00:10
V-119	54.531	32.060	2	06/03	21:37	17.000	1	06/03	22:01	15.060	00:24
V-114	54.532	21.230	2	06/03	21:39	11.480	1	06/03	21:53	9.750	00:14
V-106	54.533	20.940	2	06/03	21:41	12.560	1	06/03	21:49	8.380	00:08
V-81	54.534	18.540	2	06/03	21:42	10.780	1	06/03	22:49	7.760	01:07
V-95	54.535	19.610	2	06/03	21:44	11.150	1	06/03	21:55	8.460	00:11
V-80	54.536	20.060	2	06/03	21:45	10.760	1	06/03	22:50	9.300	01:05
V-105	54.537	21.870	2	06/03	21:48	11.810	1	06/03	22:07	10.060	00:19
JLC4029	54.538	24.940	2	06/03	21:50	11.080	1	06/03	22:13	13.860	00:23
JMA6429	54.539	26.600	2	06/03	21:52	13.200	1	06/03	22:03	13.400	00:11
XC-2034	54.540	23.860	2	06/03	22:33	8.280	1	06/03	22:47	15.580	00:14
JNW4772	54.541	24.300	2	06/03	22:41	10.290	1	06/03	22:53	14.010	00:12
JMB5889	54.542	24.170	2	06/03	23:20	11.080	1	06/03	23:49	13.090	00:29
JMA6429	54.543	26.800	2	06/03	23:30	13.180	1	06/03	23:47	13.620	00:17
TOTAIS	5.288.520					2.553.000				2.735.520	
GERAL	5.288.520					2.553.000				2.735.520	

APÊNDICE C

BASE DE CÁLCULO PARA OS CUSTOS DA ESPERA(CW) E SERVIÇO (CS)

I) CUSTO DA ESPERA PELO SERVIÇO

Para o cálculo do custo da espera (CW), foram considerados os seguintes itens, com os respectivos parâmetros:

1. Remuneração do motorista do caminhão

- a) Salário médio: R\$900/mês
- b) Encargos trabalhistas: 190%
- c) Período de trabalho: 22 dias (durante 8 horas/dia)

Com estes dados, pode-se computar os custos referentes ao motorista, ou seja:

$$\bullet \text{ Remuneração dos motoristas} = \frac{900 \times 1,90}{22 \times 8} = R\$9,72 / \text{ca min h\~ao.hora}$$

2. Consumo de combustível

- a) Rendimento médio dos veículos: 1,75 litros de óleo diesel/hora (Estimado com base em 70% do consumo do veículo em movimento)
- b) Preço do óleo diesel: R\$1,60/litro

Com esses dados pode-se calcular o correspondente custo, ou seja:

$$\bullet \text{ Custo do combustível} = R\$2,80/\text{caminhão.hora}$$

3. Perdas de açúcar

Segundo AMORIM (21), o rendimento da produção de açúcar decai à razão de 0,2487 Kg/tonelada de cana, por hora de espera para a moagem, ou seja: $\frac{0,2487 \text{ Kg de açúcar}}{\text{tonelada de cana.hora}}$. Assim, em função do peso de cana em espera para o

descarregamento, dado pelo produto entre a carga média (12 toneladas) e número de

veículos no sistema de fila (L), e supondo que o custo do açúcar seja aproximadamente de R\$1,00/Kg, tem-se que o custo associado ao seu decaimento, será dado por:

- $Custo\ de\ Perdas = 12.L.0,2487 = R\$2,984.L / hora.$

Desse modo, o custo total da espera (CW), em função do tempo e do número de veículos que aguardam para descarregar, será dado por:

- $CW = R\$(9,72.L + 2,80.L + 2,98.L) = R\$ (15,50.L / hora)$

II) CUSTO DA OFERTA DO SERVIÇO

Por sua vez, o custo do serviço (CS), dependerá do número de tombadores (s), disponíveis. Os itens considerados neste caso, foram:

1. Remuneração dos operadores dos guindastes (mão-de-obra)

- a) Salário = R\$750/mês (30 dias/mês)
- b) Número de turnos = 2 (cada um de 12 horas)
- c) Número de operários por turno = 2
- d) Encargos trabalhistas = 190%

Com estes dados, pode determinar o custo dos operários do tombador, ou seja:

- $Custo\ da\ mão-de-obra = \frac{R\$750 \times 2 \times 3 \times 1,90}{30 \times 24} = R\$11,88 / tombador.hora$

2. Manutenção

Com base em informações do setor de manutenção da Usina Aliança, a estimativa dos custos envolvidos em cada tombador, por safra, são:

- a) Cabos de aço dos guindastes: em média são repostos 3 cabos, ao custo unitário de R\$1.000/cabo.
- b) Manutenção elétrica e mecânica: R\$1.000

c) Lubrificação: 40 litros de óleo, ao preço unitário de R\$4,00/litro

Considerando-se que em média são moídas 456.000 toneladas de cana por safra, à razão de 170 t/h, têm-se que os custos relativos à manutenção dos guindastes, poderá ser dado por:

- $$R\$ \frac{(3 \times 1.000 + 1.000 + 40) \cdot 170 \text{ t/h}}{456.000 \text{ t}} = R\$1,51 / \text{tombador.hora}$$

c) Energia elétrica

Segundo DELGADO (50), a potência de guindastes equivalentes aos instalados na Usina Aliança é de 70 Cv (ou 51,45 kW), assim, em função da taxa de utilização (*f*) dos mesmos, e sendo a tarifa cobrada pela distribuidora de R\$0,24 kW, têm-se que o custo da energia elétrica poderá ser dado por:

- $$\text{Custo de energia} = R\$51,45 \times 0,24 \times f = R\$ 12,34 \times f / \text{tombador.hora}$$

Desse modo, o custo total de oferta do serviço (CS), deverá ser dado por:

- $$CS = R\$(11,88.s + 1,51.s + 12,34.s \cdot f) = R\$ (13,39 + 12,34 \cdot f).s / \text{hora}$$

APÊNDICE D

CÁLCULOS DAS NOVAS TAXAS DE CHEGADAS PARA O CENÁRIO 1

Foram levantadas as frequências observadas em cada período analisado de cinco caminhões do tipo *toco*, conforme a Tabela D1, a seguir:

Tabela D1. Frequências observadas de cinco veículos nos intervalos de tempo

Veículo	00:00/06:0h	06:00/12:00h	12:00/14:00h	14:00/19:00h	19:00/24:00h
GUA 7191	5	2	0	2	0
JLC 4029	1	1	1	5	3
MPY 1827	4	2	1	1	0
AEE 5056	4	1	0	1	0
JLC 3962	4	1	1	1	0
Total	18	7	3	10	3
λ_{ad}^1 (veic/min)	0,05	0,019	0,025	0,033	0,010

1. λ_{ad} , Taxa de chegadas adicional, com valores expressos em chegadas/minuto, calculadas dividindo-se a frequência de chegadas de cada período pelo tempo correspondente, convertendo-se para o padrão minutos.

As taxas de chegadas destes cinco veículos foram calculadas dividindo-se a frequência total encontrada, pelo tempo decorrido (em minutos) para cada período. Adicionando-se essas taxas às anteriormente calculadas para os 50 veículos, conforme consta na tabela 3.7, resulta nas taxas de chegadas esperadas para o cenário 1 (λ_{c1}). A Tabela D2, apresenta os resultados obtidos.

Tabela D2. Cálculo das taxas de chegadas.

Taxas de chegadas	00:00/06:00 h	06:00/12:00 h	12:00/14:00 h	14:00/19:00 h	19:00/24:00 h
λ_{ad}	0,050	0,019	0,025	0,033	0,010
λ	0,103	0,247	0,270	0,347	0,188
λ_{c1}	0,153	0,266	0,295	0,380	0,198

APÊNDICE E

MEMÓRIA DE CÁLCULO DAS TAXAS DE CHEGADA PARA O CENÁRIO 2

O presente Apêndice trata do cálculo correspondente às novas taxas de chegadas dos caminhões *toco* remanescentes, após à substituição de 6 destes veículos, com capacidade individual de 12 t, por 4 conjuntos de maior capacidade denominados de *Romeu e Julieta*, capazes de transportar 24 t por viagem.

Como o Cenário 1 previa o aumento de cinco unidades do tipo *toco*, adotou-se o seguinte procedimento para o Cenário 2: acrescentou-se mais um desses veículos ao Cenário 1, correspondente ao caminhão de placa JLB 8858, tendo sido contabilizada a frequência de chegadas de seis veículos. A taxa média de chegadas para estes foi então calculada dividindo-se a frequência total pelo tempo decorrido (em minutos). Os dados para tanto, estão na Tabela E1

Tabela E1. Frequências observadas de seis veículos

Veículo	00:00/06:00h	06:00/12:00h	12:00/14:00h	14:00/19:00h	19:00/24:00h
GUA 7191	5	2	0	2	0
JLC 4029	1	1	1	5	3
MPY 1827	4	2	1	1	0
AEE 5056	4	1	0	1	0
JLC 3962	4	1	1	1	0
JLB 8858	3	1	1	4	3
Total	21	8	4	14	6
λ_{ad}^1	0,058	0,022	0,033	0,047	0,020

1. λ_{ad} , Taxa de chegadas de 6 veículos *toco*, com valores expressos em chegadas/minuto, calculadas dividindo-se a frequência de chegadas de cada período pelo tempo correspondente (em minutos).

Calcularam-se as chegadas dos veículos *toco*, subtraindo-se da taxa atual (Tabela 3.7), as chegadas dos 6 veículos *toco* da Tabela E1. Como foram retirados 6 veículos de circulação, a população destes passa a ser de 44 caminhões. A Tabela E2, mostra os resultados da taxa de chegadas dos veículos remanescentes.

Tabela E2. Cálculo das novas taxas de chegadas (com apenas 44 veículos *toco*)

Horário	Taxa atual (λ_A)	Taxa 6 veículos (λ_{ad}^1)	Taxa Cenário 2 (λ_{C2})
00:00/06:00	0,103	0,058	0,045
00:06/12:00	0,247	0,022	0,225
12:00/14:00	0,270	0,033	0,237
14:00/19:00	0,347	0,047	0,300
19:00/24:00	0,188	0,020	0,168

APÊNDICE F - LEGENDA DAS VAZÕES DE MATERIAIS E ENERGIA

As correntes submetidas às diferentes operações no processo produtivo, foram simbolizadas de acordo com a legenda abaixo. São as variáveis de saída da programação. À exceção da eletricidade (Mwh), todos os demais fluxos estão em t/h.

Xo = Vazão de cana para moagem

X1 = Vazão de caldo misto enviado ao tratamento preliminar

X2 = Vazão de caldo pré-tratado

X3 = Vazão de caldo para o preparo do mosto

X4 = Vazão de mosto para a fermentação

X5 = Vazão de vinho bruto para a centrifugação

X6 = Vazão de vinho delevedurado para destilação

X7 = Vazão de álcool de álcool hidratado para retificação

X8 = Vazão de álcool anidro para o tanque de armazenamento

X9 = Vazão de álcool hidratado para o tanque de armazenamento

X10 = Vazão de vinhaça para a lavoura

X11 = Vazão total de bagaço

X12 = Vazão de bagaço para geração de vapor de processo

X13 = Vazão de bagaço para geração de eletricidade

X14 = Vazão de eletricidade co-gerada

X15 = Vazão de bagaço para outros fins

X16 = Vazão de caldo misto para sulfitação

X17 = Vazão de caldo misto para calagem

X18 = Vazão de caldo misto para aquecimento

X19 = Vazão de caldo misto para decantação

X20 = Vazão de caldo clarificado para evaporação

X21 = Vazão de lodo para filtração

X22 = Vazão de torta para a lavoura

X23 = Vazão de caldo que retorna à seção de calagem

X24 = Vazão de água de lavagem da torta

X25 = Vazão total de xarope

X26 = Vazão de xarope para cozimento de primeira

X27 = Vazão de massa cozida de primeira para os cristalizadores

X28 = Vazão de massa cristalizada para centrifugação

X29 = Vazão de mel rico para o cozimento de primeira

X30 = Vazão de mel pobre para aquecimento

X31 = Vazão de açúcar centrifugado para a secagem

X32 = Vazão de mel rico para aquecimento

X33 = Vazão de vapor para a centrífuga de primeira

X34 = Vazão de vapor para aquecimento do mel rico

X35 = Vazão de vapor para aquecimento do mel pobre

X36 = Vazão de mel pobre para cozimento de segunda

X37 = Vazão de massa cozida de segunda para os cristalizadores

X38 = Vazão de massa cristalizada para a centrífuga de segunda

X39 = Vazão de mel de segunda para a destilaria

X40 = Vazão de açúcar de segunda para o magma

X41 = Vazão de xarope para o magma

X42 = Vazão de magma para o cozimento da massa de primeira

X43 = Vazão de açúcar seco para estocagem

X44 = Vazão residual de açúcar recuperado do ciclone do secador

APÊNDICE H – CÁLCULOS PARA A SECAGEM DO AÇÚCAR

A corrente X46 (vazão de ar seco) é função da vazão de açúcar (X31) que entra no secador, sendo dada pela equação (1) abaixo:

$$(1) \ X46 = X31 \frac{(x_a^e - x_a^s)}{(x_{ar}^e - x_{ar}^s)}, \text{ onde:}$$

x_a^e = Umidade do açúcar na entrada do secador = 0,022 Kg água / Kg de açúcar úmido

x_a^s = Umidade do açúcar na saída do secador = 0,001 Kg de água / Kg de açúcar seco

x_{ar}^e = Umidade do ar na entrada do secador = 0,036 Kg de água / Kg de ar seco

x_{ar}^s = Umidade do ar na saída do secador = 0,019 Kg de água / Kg de ar seco

Assim, substituindo esses valores na equação (1), tem-se que:

$$X46 = 1,24.X31$$

Por sua vez, a vazão de vapor de escape que alimenta o secador (X45), é função da vazão de ar seco (X46), sendo dado pela equação (2) abaixo:

$$(2) \ X45 = X46 \frac{(h_{ar}^e - h_{ar}^s)}{(h_v^e - h_{co})}, \text{ onde:}$$

h_{ar}^e = Entalpia do ar na entrada do secador = 1.315,54 KJ / Kg

h_{ar}^s = Entalpia do ar na saída do secador = 1.236,41 KJ / Kg

h_v^e = Entalpia do vapor na entrada do secador = 2.721 KJ / Kg

h_{co} = Entalpia do condensado = 548,9 KJ / Kg

Desse modo, substituindo esses valores na equação (2), tem-se que:

$$X45 = 0,036.X46$$