

MODELO DE OTIMIZAÇÃO DO TRANSPORTE DE CANA-DE-AÇÚCAR DAS FRENTES DE CORTE PARA USINAS

Camilla Miguel Carrara Lazzarini, cacarrara@yahoo.com.br¹
Adelino Gussoni dos Santos, adelino_gussoni@hotmail.com¹
Sezimária F. Pereira Saramago, saramago@ufu.br²
Carlos Alberto Faria, cafarria@ufu.br³

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2160, 38408-110, Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brasil.

²Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Matemática, Av. João Naves de Ávila, 2160, 38408-110, Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brasil.

³Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Av. João Naves de Ávila, 2160, 38408-110, Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brasil.

Resumo: *Este trabalho apresenta um modelo para o dimensionamento ótimo da frota própria de usinas de cana-de-açúcar. Trata-se de um modelo de programação linear que representa o sistema de transporte de cana-de-açúcar das frentes de corte dos fornecedores até a usina. O problema de otimização linear é formulado considerando como variáveis de decisão a quantidade de cana a ser colhida em cada frente de corte dos fornecedores e a quantidade de cada tipo de veículo a ser utilizado no transporte. As restrições impostas ao problema consideram a quantidade máxima de cana a ser colhida nas frentes de corte, a capacidade máxima de moagem das usinas e o número máximo disponível dos tipos de veículos. Utilizando duas ferramentas de otimização, simulações computacionais são apresentadas resolvendo cenários nos quais a disponibilidade de tipos de veículos é modificada.*

Palavras-chave: *programação linear, modelagem do transporte, usinas de cana-de-açúcar, CCT.*

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é atualmente o maior produtor de açúcar e álcool do mundo e, também, o maior exportador destes produtos. Segundo dados UNICA (2010), o setor canavieiro processou na safra 2008/2009 o equivalente a 569,1 milhões de toneladas de cana, com produção de 31,0 milhões de toneladas de açúcar e 27,5 bilhões de litros de álcool.

O álcool brasileiro é um produto que vinha sendo tradicionalmente consumido pelo mercado interno. Porém, nestes últimos anos, vem ganhando também o mercado externo. Dados da UNICA (2010) indicam que as exportações de álcool alcançaram a marca de 4,7 bilhões de litros na safra 2008/2009, sendo nossos maiores importadores os Estados Unidos, com 32,18% do total exportado desta mesma safra. Este valor corresponde a 17,2% da produção nacional e coloca o Brasil como maior exportador de álcool do mundo. Além das exportações, o consumo de álcool combustível também vem crescendo no mercado interno devido ao advento dos carros flexíveis.

Outro produto que deve ser incorporado definitivamente no escopo da indústria canavieira é a energia elétrica proveniente da utilização do bagaço como combustível de centrais termoeletricas de biomassa.

Belik & Vian, 2002; Vian, 2003, afirmam que após um longo período de controle estatal sobre o mercado de açúcar e álcool, o setor sucroalcooleiro enfrenta as conseqüências do processo de desregulamentação ocorrido na década de 80. Esta desregulamentação provocou modificações drásticas na dinâmica do setor, tendo como algumas de suas conseqüências a modificação das estratégias competitivas adotadas pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira.

A adoção de estratégias implica um processo de melhoria dos departamentos agrícola, industrial e de marketing das empresas. Na área agrícola, este processo de mudança e racionalização foi observado por Eid (1996), que relata várias inovações importantes destacando as relacionadas ao aprimoramento dos sistemas logísticos por meio de novas estratégias gerenciais para o transporte da cana.

Iannoni e Morabito (2002) asseguram que os sistemas logísticos são hoje fundamentais para melhorar a eficiência operacional de usinas de cana-de-açúcar, pois atuam na integração de operações agrícolas e industriais.

Algumas particularidades da agroindústria sucroalcooleira são suficientes para caracterizá-la como um sistema logístico complexo e que demanda prioridade no planejamento de suas atividades.

De acordo com Paiva (2006), o planejamento das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar deve acontecer de forma coordenada e sistêmica, sendo que uma decisão sobre um recurso influencia diretamente em todo o sistema, dada a forte interação entre os recursos envolvidos.

Outra questão importante relacionada com a matéria prima é sua rápida degradação após a colheita. Uma vez colhida, a cana precisa ser entregue para industrialização em até 72 horas, induzindo um exigente planejamento logístico evitando-se, assim, o comprometimento da eficiência industrial.

Esse empenho no processo é determinante para alcançar o principal compromisso da área agrícola no período de safra: a manutenção da entrega de cana-de-açúcar para moagem. Durante a safra, que se estende por 8 meses, as usinas operam de modo ininterrupto e há a necessidade de se manter o abastecimento contínuo de cana.

Dessa forma, numa situação ideal, Silva (2006) afirma que a entrega de cana na usina deve ocorrer sem interrupções e com o menor tempo possível entre colheita e moagem. A gerência agrícola das usinas tem a responsabilidade de coordenar as operações de corte, carregamento e transporte (CCT) para proporcionar matéria prima de qualidade e sem falha de abastecimento, uma vez que os custos de *setup* na área industrial são muito altos. A busca pela moagem de uma matéria prima de melhor qualidade tem levado as usinas a reduzir a quantidade de cana estocada no pátio. Para isso, a confiabilidade do sistema de transporte deve ser alta.

A necessidade de manter a continuidade do abastecimento de cana na usina reforça a importância de realizar o planejamento adequado das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar para a indústria, cujo principal aspecto é a alocação dos recursos para estas atividades.

Nesta pesquisa pretende-se solucionar o problema de otimização da etapa de transporte (da etapa de CCT) na indústria sucroalcooleira. Dessa forma, o modelo de simulação desenvolvido contempla a modelagem do sistema de transporte da cana-de-açúcar e a sua utilização como ferramenta gerencial para a determinação do dimensionamento ótimo da frota própria de veículos de uma usina de açúcar e álcool.

2. SISTEMAS DE CORTE, CARREGAMENTO E TRANSPORTE (CCT)

As operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar podem ser realizadas de várias formas, alterando-se os parâmetros, como o tipo de corte (corte manual ou mecanizado) e/ou o tipo de equipamento utilizado (carregadoras, colhedoras, tratores-reboque, etc.).

O transporte da cana é predominantemente do tipo rodoviário, com o emprego de caminhões que transportam cana inteira (colheita manual) ou cana picada (colheita mecânica). Há diversos tipos de composições de transporte para cana-de-açúcar, sendo os mais utilizados o caminhão com um reboque (Romeu e Julieta), o caminhão com dois reboques (Treminhão) e o cavalo-mecânico com dois semi-reboques (Rodotrem), que são apresentados na Tab. (1).

Tabela 1. Composições usuais para o transporte de cana

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

A frota pode ser homogênea ou ter várias categorias de caminhões com diferentes capacidades e características operacionais.

A cana-de-açúcar que chega à usina vem de pontos distintos, trabalhada por uma equipe autônoma, denominada frente de corte. As frentes de corte operam com equipamentos diferentes conforme o tipo de cana (corte manual/colheita mecanizada).

O transporte é efetuado de forma repetitiva entre a usina e as frentes de corte. A principal característica deste sistema é que um caminhão, a cada viagem, visita apenas um ponto de fornecimento de cana, retornando em seguida à usina. As frentes de corte não são constantes, podendo alterar diariamente em localização e número.

Segundo Hahn (1994 *apud* Mundim, 2009), o número de frentes de corte trabalhadas diariamente varia de 3 até mais de 12, de acordo com a quantidade de cana estimada em cada frente e a capacidade de moagem diária da usina. Estas frentes encontram-se a diferentes distâncias da usina, fazendo com que a quantidade de caminhões em direção a uma frente de corte seja diferente de outra frente com o mesmo potencial de colheita.

De acordo com a composição de transporte e o tipo da carroceria utilizada, variam a necessidade de potência do motor do caminhão, a capacidade de carga transportada por viagem, as velocidades de deslocamento (vazio e carregado), o tipo de carregamento no campo e o tipo de descarga na usina.

Caso o dimensionamento do transporte não esteja adequado, poderão ocorrer problemas de abastecimento de cana na usina. Segundo Caixeta et al (1998), as operações de CCT respondem por 30% do custo da cana entregue para moagem, e na seqüência desses custos, após a moagem, o transporte é a operação mais cara, seguida pelo carregamento. Assim, chega-se a uma situação em que a ociosidade no transporte é preferível a uma falta de cana para moagem.

As operações de corte, carregamento e transporte (CCT) envolvem equipamentos de custos elevados, tais como colhedoras, carregadoras, tratores e caminhões. O planejamento da utilização desses recursos de produção requer decisões quanto à sua quantificação.

Para auxiliar a tomada de decisão uma das opções é empregar a simulação computacional. Esta técnica permite a análise dinâmica da interação entre os elementos do sistema.

A simulação computacional é uma linha de atuação da Pesquisa Operacional (PO) que pode ser utilizada pela gerência agrícola das usinas para auxiliar a tomada de decisão. Silva (2006) afirma que a simulação visando atingir os objetivos de desempenho (qualidade, custo, confiabilidade, rapidez e flexibilidade) do sistema de corte, carregamento e transporte (CCT) permite a avaliação comparativa de sistemas retratando cenários reais sem a necessidade de implementá-los.

No setor sucroalcooleiro a simulação tem sido utilizada para investigar novas estratégias gerenciais e equipamentos, a um custo relativamente baixo para as usinas.

3. MODELAGEM DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

A modelagem matemática de otimização consiste na representação de um sistema real através do uso de lógica e de ferramentas matemáticas, de forma que as melhores condições de operação do sistema possam ser determinadas. Se existem n decisões a serem adotadas então se associam a cada decisão uma variável designada variável de decisão. Para expressar a medida de desempenho do modelo, deve-se associar uma função numérica das variáveis de decisão denominada função objetivo. As limitações de recursos envolvidos no sistema são demonstradas pelo uso de equações ou inequações chamadas restrições do modelo, podendo tanto ser de natureza quantitativa quanto de natureza lógica.

Os modelos determinísticos aplicados ao planejamento e controle da produção (PCP) são as mais tradicionais ferramentas utilizadas da Pesquisa Operacional (PO). Dentre estes modelos destacam-se os que utilizam programação linear (PL), devido à sua adequação a vários problemas práticos e à possibilidade de conversão de modelos não lineares em lineares, e modelos que utilizam programação linear inteira mista (PIM) devido à utilização de variáveis inteiras e contínuas num mesmo modelo linear.

A modelagem de um sistema tem como principal função o auxílio à tomada de decisão. Assim, torna-se indispensável identificar a capacidade operacional dos equipamentos do processo em estudo.

Nesta pesquisa a modelagem foi escrita de forma genérica, ou seja, é adaptável à necessidade de análise para estudos diversos onde o número de frentes de corte e de usinas é variável. O estudo buscou assegurar cana na usina para atendimento da moagem diária.

O objetivo é apoiar as principais decisões envolvidas no planejamento da frota própria de veículos de uma usina de açúcar e álcool de forma a auxiliar a geração de planos de produção eficazes para o período de safra.

Os sistemas de corte (colheita manual ou mecânica) e carregamento (tratores, carregadoras e colhedoras) ainda não foram incorporados ao modelo matemático, pois requerem uma maior especificação da área de estudo.

3.1. Parâmetros Gerais de Entrada

O modelo de simulação desenvolvido contempla a modelagem do sistema de transporte da cana-de-açúcar para três usinas e oito frentes de corte que têm capacidade total de moagem e de colheita, respectivamente, de 36.000 t/dia. Tabela (2) exhibe as restrições de colheita (rco) nas frentes de corte e as restrições de moagem (rmo) nas usinas e as distâncias das frentes de corte até as usinas.

Tabela 2. Demanda entre as frentes de corte e as usinas.

Frente de Corte		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Restrições de colheita (rco)
1	Demanda (t)	x_1	x_2	x_3	4.600
	Distância (km)	15	24	18	
2	Demanda (t)	x_4	x_5	x_6	5.000
	Distância (km)	5	17	26	
3	Demanda (t)	x_7	x_8	x_9	4.300
	Distância (km)	12	21	17	
4	Demanda (t)	x_{10}	x_{11}	x_{12}	4.900
	Distância (km)	23	19	30	
5	Demanda (t)	x_{13}	x_{14}	x_{15}	5.100
	Distância (km)	28	17	20	
6	Demanda (t)	x_{16}	x_{17}	x_{18}	4.500
	Distância (km)	15	39	17	
7	Demanda (t)	x_{19}	x_{20}	x_{21}	3.600
	Distância (km)	25	16	18	
8	Demanda (t)	x_{22}	x_{23}	x_{24}	4.000
	Distância (km)	15	11	34	
Restrições de moagem (rmo)		12.000	15.000	9.000	36.000

Neste trabalho foram consideradas as composições de frota do tipo Romeu e Julieta, Treminhão e Rodotrem. Porém o modelo pode ser estendido para simular quantos e quais tipos de composições forem necessários.

O caminhão Romeu e Julieta transporta em média 25 toneladas e transporta a maior parte da cana inteira da usina, além de parte da cana picada. O Treminhão é composto de “cavalo” e três carretas acopladas, e carrega em média 45 toneladas de cana picada. O terceiro tipo de caminhão é Rodotrem que carrega em média 65 toneladas de cana picada.

Considerou-se que os três tipos de veículos podem trafegar 24 horas por dia, ou seja, não há restrição de horário para circulação dos veículos.

Pode ser que ocorra um estoque temporário no pátio das usinas em determinados períodos ao longo do dia, porém toda a cana colhida será moída no mesmo dia.

A jornada de trabalho em usinas de açúcar é de 24 horas/dia. Os turnos de trabalho dos operadores e motoristas são estabelecidos levando-se em conta as restrições legais - adoção de três turnos, com oito horas de duração cada um.

Tempo de carga e descarga é o tempo médio para carregamento e descarga da composição. Os motoristas utilizam desse tempo para realizarem eventuais necessidades, inclusive suas refeições. O tempo de carga e descarga para o caminhão Romeu e Julieta é em média 0.70 horas. O Treminhão leva em média 1.25 horas para realizar a carga e descarga. O caminhão do tipo Rodotrem gasta em média 1.80 horas.

Tempo de parada corresponde ao tempo diário gasto em possíveis paradas para abastecimento, manutenção do veículo, etc. Considerou-se tempo de parada total de 2 horas. Dessa forma, o tempo útil de trabalho do veículo por dia é de 22 horas.

Velocidade média adotada para as composições é de 50 km/h. Para estabelecimento desse valor levou-se em conta composições vazias e carregadas e estrada de terra e rodovias.

3.2. Cálculo dos Custos da Frota Própria (CCFP)

Esses custos irão compor a função objetivo do problema de otimização onde, o objetivo é minimizar o custo de transporte de 36.000 t/dia de cana-de-açúcar entre as frentes de corte i ($i=1, 2, \dots, 8$) e as usinas j ($j=1, 2, 3$), conforme os dados apresentados na Tab. (2).

Utilizou-se como referência para os cálculos do custo o Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas da NTC - Associação Nacional do Transporte de Cargas (NTC, 2001).

Custos de transferência correspondem às despesas do transporte de cargas entre dois terminais, ou entre origem e destino. No caso, refere-se à transferência da cana-de-açúcar entre as frentes de corte i e as usinas j . Divide-se em custos fixos e custos variáveis.

Os custos fixos referem-se às despesas operacionais do veículo que não variam com a distância percorrida, isto é, continuam existindo, mesmo com o veículo parado. Geralmente, são calculados por mês. O custo fixo de operação do veículo é composto das seguintes parcelas: Remuneração mensal do capital empatado; Salário do motorista; Salário de ajudante(s); Salário de oficina; Reposição do veículo; Reposição do equipamento; Licenciamento; Seguro do veículo; Seguro do equipamento; Seguro de responsabilidade civil facultativo; e Peças, acessórios e material de manutenção.

Os custos variáveis correspondem às despesas que variam com a distância percorrida pelo veículo, ou seja, que inexistem caso o veículo permaneça parado. O custo variável do veículo é composto das seguintes parcelas: Despesas com combustível; Lubrificantes; Lavagem e graxas; e Pneus e recauchutagens.

3.3. Formulação Matemática

Na formulação do problema de otimização considerou-se a seguinte função objetivo que visa minimizar o custo de transporte:

$$f(x) = \sum_{j=1}^{nTV * m} x_j * \frac{CVT_k * 2 * D_j}{CVk_k} + \sum_{j=(nTV * m)+1}^{(nTV * m) * var} x_j \left(\frac{CFT_k}{30} + CVT_k * 2 * D_j \right) \quad (1)$$

Sujeita a

$$\begin{aligned} x_1 + x_2 + \dots + x_{pc} &= rco_1 \\ x_{pc+1} + x_{pc+2} + \dots + x_{2*pc} &= rco_2 \\ &\vdots \\ x_{(n-1)*pc+1} + x_{(n-1)*pc+2} + \dots + x_{n*pc} &= rco_n \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} x_1 + x_{1+pc} + \dots + x_{1+(n-1)*pc} &= rmo_1 \\ x_2 + x_{2+pc} + \dots + x_{2+(n-1)*pc} &= rmo_2 \\ &\vdots \\ x_{pc} + x_{2*pc} + \dots + x_{n*pc} &= rmo_{pc} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned}
x_{(n^*pc)+1} + x_{(n^*pc)+2} + \dots + x_{(n^*pc)+pc} &\leq NVk_1 \\
x_{(n^*pc)+pc+1} + x_{(n^*pc)+pc+2} + \dots + x_{(n^*pc)+2^*pc} &\leq NVk_2 \\
&\vdots \\
x_{(n^*pc)+(n-1)^*pc+1} + x_{(n^*pc)+(n-1)^*pc+2} + \dots + x_{2^*n^*pc} &\leq NVk_n
\end{aligned} \tag{4}$$

A Equação (1) representa a função objetivo do problema de otimização, onde o objetivo é minimizar o custo de transporte das demandas de cana-de-açúcar das frentes de corte i para as usinas j . O valor 2 na equação representa o percurso de ida e volta do veículo, ou seja, a distância total a ser percorrida da usina até a frente de corte e seu retorno à usina. E o valor 30 transforma o custo fixo total de R\$/mês em R\$/dia. As Equações (2) e (3) referem-se às restrições de colheita nas frentes de corte e de moagem nas usinas, respectivamente. A soma das demandas de cana em cada frente de corte tem que ser igual à quantidade de cana colhida na mesma, e a soma de cana colhida nas frentes de corte que abastecem determinada usina deve ser igual à sua capacidade de moagem. A Equação (4) representa a restrição do número máximo de veículos disponível para realizar o transporte da demanda de cana-de-açúcar das frentes de corte i para as usinas j . Ou seja, a soma do número de veículos necessário para realizar o transporte da demanda de cana em cada frente de corte tem que ser menor ou igual à capacidade de transporte do número total de veículos disponível para essa frente de corte.

A notação adotada neste modelo (Eq. de (1) a (4)) está descrita a seguir:

- pc - número de usinas i ;
- n - número de frentes de corte j ;
- m - número de possibilidades de transporte (combinação entre usinas i e frentes de corte j);
- D_j - distância da frente de corte i até a usina j (km);
- x_j - demanda (t) de cana-de-açúcar e número de veículos que realiza o transporte entre frente de corte i para a usina j ;
- nTV - corresponde ao número de tipos de veículos considerados na modelagem;
- CFT_k - custo Fixo Total para o veículo tipo k (R\$/mês);
- CVT_k - custo Variável Total para o veículo tipo k (R\$/km);
- $NVkj$ - número máximo de veículos disponível para o transporte da cana-de-açúcar considerando a frente de corte 1 e as usinas 1, 2 e 3, a frente de corte 2 e as usinas 1, 2 e 3, e etc;
- $CVkk$ - capacidade do veículo k (t/viagem);
- $rcoj$ - restrições de disponibilidade de colheita nas frentes de corte i (ton/dia);
- rmo_j - restrições de capacidade de moagem nas usinas j (ton/dia);
- var - quantidade de variáveis de projeto consideradas no modelo. No caso, var é igual a 2, sendo que estamos considerando como variáveis de projeto a quantidade de cana a ser colhida e o número de veículos a realizar o transporte.

4. RESULTADOS

Utilizou-se dois códigos computacionais de Programação Linear para obtenção dos resultados como forma de comparação: Linprog e Mosek. Tabela (3) exhibe o resultado obtido para o Custo Fixo Total (CFT) e Custo Variável Total (CVT) para cada tipo de veículo considerado no trabalho.

Tabela 3. Custo Fixo Total (CFT) e Custo Variável Total (CVT) para cada tipo de veículo

	Romeu e Julieta	Treminhão	Rodotrem
Custo Fixo Total (R\$)	13.862,00	20.103,00	30.593,00
Custo Variável Total (R\$/km)	0,8821	1,0410	1,4886

4.1. Cenário 1

Este cenário foi desenvolvido considerando os três tipos de veículos na análise, neste caso, tem-se 144 variáveis de projeto e 35 restrições.

As tabelas a seguir apresentam os resultados para a demanda de cana a ser colhida e o número de veículos necessário para cada tipo de veículo para realizar o transporte da demanda de cana entre cada frente de corte e usina. Tabela (4) foi obtida utilizando a ferramenta Linprog e a Tab. (5) foi obtida utilizando a ferramenta Mosek.

De acordo com resultados exibidos nas Tab. (4) e (5) pode-se afirmar que para o Linprog foram determinados 93 veículos Treminhão obtendo um custo total de R\$ 86.181,00 por dia para realizar o transporte de 36.000 toneladas de cana-de-açúcar entre as frentes de corte e as usinas. As mesmas tabelas mostram que utilizando a ferramenta Mosek,

obteve-se o custo total de R\$ 84.114,00 por dia utilizando um total 93 veículos, sendo que 21 veículos são do tipo Romeu e Julieta, 70 Treminhão e 02 Rodotrem, respectivamente.

Tabela 4. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os três tipos de veículos e utilizando Linprog.

Frentes de Corte		Romeu e Julieta			Treminhão			Rodotrem		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	-	-	-	2700,0	-	1900,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	7	-	5	-	-	-
2	Demanda (t)	-	-	-	5000,0	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	12	-	-	-	-	-
3	Demanda (t)	-	-	-	4300,0	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	10	-	-	-	-	-
4	Demanda (t)	-	-	-	-	4900,0	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
5	Demanda (t)	-	-	-	-	5100,0	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	13	-	-	-	-
6	Demanda (t)	-	-	-	-	-	4500,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	-	13	-	-	-
7	Demanda (t)	-	-	-	-	1000,0	2600,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	3	6	-	-	-
8	Demanda (t)	-	-	-	-	4000,0	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	11	-	-	-	-

Tabela 5. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os três tipos de veículos e utilizando Mosek.

Frentes de Corte		Romeu e Julieta			Treminhão			Rodotrem		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	568,3	-	-	1791,9	-	2239,8	-	-	-
	Nº. veículos	2	-	-	4	-	5	-	-	-
2	Demanda (t)	2838,4	-	-	2161,6	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	9	-	-	5	-	-	-	-	-
3	Demanda (t)	984,2	-	-	3315,8	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	3	-	-	7	-	-	-	-	-
4	Demanda (t)	-	-	-	-	4423,3	-	-	476,7	-
	Nº. veículos	-	-	-	-	11	-	-	1	-
5	Demanda (t)	-	522,8	-	-	4177,2	400,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	2	-	-	10	1	-	-	-
6	Demanda (t)	-	-	211,5	339,8	-	3523,1	-	-	425,6
	Nº. veículos	-	-	1	1	-	10	-	-	1
7	Demanda (t)	-	960,0	-	-	440,0	2200,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	3	-	-	1	5	-	-	-
8	Demanda (t)	-	206,9	-	-	3793,1	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	1	-	-	10	-	-	-	-

4.2. Cenário 2

Este cenário foi desenvolvido considerando dois tipos de veículos em cada análise, o que representa um modelo com 96 variáveis de projeto e 27 restrições.

Comparando as composições do tipo Romeu e Julieta e Treminhão, utilizando Linprog foram obtidos os mesmos resultados do Cenário 1 (dados exibidos na Tab. (4)). A Tab. (6) apresenta os resultados calculados pelo Mosek. De acordo com esta tabela, percebe-se que foi necessário o total de 95 veículos para realizar o transporte de 36.000 toneladas de cana-de-açúcar entre as frentes de corte e as usinas, sendo que desse total, 69 veículos é do tipo Treminhão. O custo total ótimo é de R\$ 84.293,00 por dia.

As Tab. (7) e (8) apresentam os resultados obtidos considerando, na análise, as composições Romeu e Julieta e Rodotrem. A Tab. (7) exhibe os resultados obtidos pela ferramenta Linprog, para a demanda de cana a ser colhida e o número de veículos necessário para cada tipo de veículo, para realizar o transporte desta demanda entre cada frente de corte e usina. Os resultados calculados com a aplicação do Mosek são mostrados na Tab. (8).

Tabela 6. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Treminhão e utilizando Mosek.

Frentes de Corte		Romeu e Julieta			Treminhão		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	568,3	-	-	1343,9	-	2687,8
	Nº. veículos	2	-	-	3	-	6
2	Demanda (t)	2838,4	-	-	2161,6	-	-
	Nº. veículos	9	-	-	5	-	-
3	Demanda (t)	984,2	-	-	3315,8	-	-
	Nº. veículos	3	-	-	7	-	-
4	Demanda (t)	-	859,2	-	-	4040,8	-
	Nº. veículos	-	3	-	-	10	-
5	Demanda (t)	-	522,8	-	-	4177,2	400,0
	Nº. veículos	-	2	-	-	10	1
6	Demanda (t)	435,5	-	189,1	352,3	-	3523,1
	Nº. veículos	2	-	1	1	-	10
7	Demanda (t)	-	960,0	-	-	440,0	2200,0
	Nº. veículos	-	3	-	-	1	5
8	Demanda (t)	-	206,9	-	-	3793,1	-
	Nº. veículos	-	1	-	-	10	-

Tabela 7. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Rodotrem e utilizando Linprog.

Frentes de Corte		Romeu e Julieta			Rodotrem		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	2700,0	-	1900,0	-	-	-
	Nº. veículos	9	-	6	-	-	-
2	Demanda (t)	5000,0	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	16	-	-	-	-	-
3	Demanda (t)	4300,0	-	-	-	-	-
	Nº. veículos	13	-	-	-	-	-
4	Demanda (t)	-	4900,0	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	17	-	-	-	-
5	Demanda (t)	-	5100,0	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	17	-	-	-	-
6	Demanda (t)	-	-	4500,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	-	19	-	-	-
7	Demanda (t)	-	1000,0	2600,0	-	-	-
	Nº. veículos	-	4	9	-	-	-
8	Demanda (t)	-	4000,0	-	-	-	-
	Nº. veículos	-	15	-	-	-	-

De acordo com a Tab. (7), observa-se que para o Linprog foram determinados somente veículos Romeu e Julieta. Neste caso, obteve-se um custo total de R\$ 94.186,00 por dia utilizando 125 veículos para realizar o transporte de 36.000 toneladas de cana-de-açúcar entre as frentes de corte e as usinas. Por outro lado, a ferramenta Mosek resultou em um custo total de R\$ 94.150,00 por dia utilizando um total de 96 veículos Romeu e Julieta e 16 veículos Rodotrem de acordo com dados exibidos na Tab. (8).

Comparando as composições do tipo Treminhão e Rodotrem, utilizando Linprog, foram calculados os mesmos resultados do Cenário 1 – Tab. (4) – onde foram gerados 93 veículos Treminhão obtendo o custo total de R\$ 86.181,00 por dia. A ferramenta Mosek não convergiu para o resultado ótimo.

4.3. Cenário 3

Este cenário foi desenvolvido considerando apenas um tipo de veículo em cada análise, o que representa um modelo com 48 variáveis de projeto e 19 restrições.

Utilizando a ferramenta Linprog e considerando apenas o veículo Romeu e Julieta na análise, obteve-se o custo total de R\$ 94.186,00 por dia utilizando um total de 125 veículos, de acordo com dados anteriormente exibidos na Tab. (7). Utilizando a ferramenta Mosek, os dados obtidos são exibidos na Tab. (9).

Tabela 8. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando os tipos de veículos Romeu e Julieta e Rodotrem e utilizando Mosek.

Frentes de Corte		Romeu e Julieta			Rodotrem		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3	Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	3241,7	-	322,1	-	-	1036,2
	Nº. veículos	10	-	1	-	-	2
2	Demanda (t)	4496,5	-	-	503,5	-	-
	Nº. veículos	15	-	-	1	-	-
3	Demanda (t)	3758,3	-	-	-	-	541,7
	Nº. veículos	11	-	-	-	-	1
4	Demanda (t)	-	3470,0	-	-	1430,0	-
	Nº. veículos	-	12	-	-	3	-
5	Demanda (t)	-	4158,8	-	-	-	941,2
	Nº. veículos	-	14	-	-	-	2
6	Demanda (t)	-	-	3648,8	-	-	851,2
	Nº. veículos	-	-	15	-	-	2
7	Demanda (t)	-	1941,2	637,4	-	-	1021,4
	Nº. veículos	-	6	2	-	-	2
8	Demanda (t)	-	2642,4	-	-	1357,6	-
	Nº. veículos	-	10	-	-	3	-

Tabela 9. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando o veículo Romeu e Julieta e utilizando Mosek.

Frentes de Corte		Romeu e Julieta		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	2612,0	-	1988,0
	Nº. veículos	8	-	6
2	Demanda (t)	5000,0	-	-
	Nº. veículos	16	-	-
3	Demanda (t)	4268,5	31,5	-
	Nº. veículos	12	1	-
4	Demanda (t)	-	4900,0	-
	Nº. veículos	-	17	-
5	Demanda (t)	-	5100,0	-
	Nº. veículos	-	17	-
6	Demanda (t)	119,5	-	4380,5
	Nº. veículos	1	-	18
7	Demanda (t)	-	968,5	2631,5
	Nº. veículos	-	3	9
8	Demanda (t)	-	4000,0	-
	Nº. veículos	-	15	-

O custo total obtido por meio da ferramenta Mosek é de R\$ 93.287,00 por dia utilizando um total de 123 veículos.

Considerando o veículo Treminhão na análise e utilizando a ferramenta Linprog, de acordo com Tab. (4), exibida anteriormente, obteve-se o custo total de R\$ 86.181,00 por dia utilizando 93 veículos para o transporte de 36.000 toneladas de cana-de-açúcar. A ferramenta Mosek não convergiu para o resultado ótimo considerando na análise apenas o veículo Treminhão.

As Tabs. (10) e (11) apresentam a solução ótima encontrada considerando somente o veículo Rodotrem na análise.

Utilizando a ferramenta Linprog, de acordo com dados exibidos na Tab. (10), obteve-se o custo total de R\$ 103.150,00 por dia que corresponde a 78 veículos Rodotrem para o transporte de 36.000 toneladas de cana-de-açúcar. Com a aplicação da ferramenta Mosek, de acordo com dados exibidos na Tab. (11), o custo total encontrado foi de R\$ 102.160,00 por dia utilizando um total de 77 veículos.

Tabela 10. Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos considerando o veículo Rodotrem e utilizando Linprog.

Frentes de Corte		Rodotrem		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	2700,0	-	1900,0
	Nº. veículos	6	-	4
2	Demanda (t)	5000,0	-	-
	Nº. veículos	10	-	-
3	Demanda (t)	4300,0	-	-
	Nº. veículos	8	-	-
4	Demanda (t)	-	4900,0	-
	Nº. veículos	-	11	-
5	Demanda (t)	-	5100,0	-
	Nº. veículos	-	11	-
6	Demanda (t)	-	-	4500,0
	Nº. veículos	-	-	11
7	Demanda (t)	-	1000,0	2600,0
	Nº. veículos	-	2	6
8	Demanda (t)	-	4000,0	-
	Nº. veículos	-	9	-

Tabela 11. Resultados ótimos considerando o veículo Rodotrem e utilizando Mosek.

Frentes de Corte		Rodotrem		
		Usina 1	Usina 2	Usina 3
1	Demanda (t)	2030,4	-	2569,6
	Nº. veículos	4	-	5
2	Demanda (t)	5000,0	-	-
	Nº. veículos	10	-	-
3	Demanda (t)	4300,0	-	-
	Nº. veículos	8	-	-
4	Demanda (t)	-	4900,0	-
	Nº. veículos	-	11	-
5	Demanda (t)	-	5100,0	-
	Nº. veículos	-	11	-
6	Demanda (t)	669,6	-	3830,4
	Nº. veículos	2	-	9
7	Demanda (t)	-	1000,0	2600,0
	Nº. veículos	-	2	6
8	Demanda (t)	-	4000,0	-
	Nº. veículos	-	9	-

5. CONCLUSÃO

A agroindústria sucroalcooleira nacional mostra-se, historicamente, altamente competitiva, sempre em busca de alternativas, inovações e melhorias, tanto em relação à produtividade quanto à qualidade dos produtos. Este trabalho visa contribuir com mais uma opção de ferramenta de trabalho na busca por incrementos nos parâmetros de produtividade e eficiência visando melhoria e aperfeiçoamento da indústria canavieira.

Observa-se que tanto para a ferramenta Linprog quanto para a Mosek, a frota composta pelos três tipos de veículos é a melhor opção para realizar o transporte da cana-de-açúcar entre as frentes de corte e as usinas considerando as especificações adotadas para o modelo. Mosek apresentou um valor 2,4% inferior em relação a ferramenta Linprog e ainda distribuiu melhor o número de veículos entre os veículos disponíveis.

Nos outros casos, Mosek também distribuiu melhor que Linprog, porém não convergiu para 2 cenários (Treminhão x Rodotrem e Treminhão). A segunda melhor opção é a frota composta por veículos do tipo Romeu e Julieta e Treminhão. Os resultados obtidos apresentam suas diferenças, porém são valores próximos. Logo, pode-se concluir que as ferramentas são úteis e importantes no planejamento operacional auxiliando os gestores na tomada de decisão.

Ao final deste trabalho pode-se afirmar que um modelo de programação linear tem potencial para apoiar as decisões de dimensionamento da frota de uma usina de açúcar e álcool.

6. AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa contou com o apoio da CAPES e da FAPEMIG (processo TEC - APQ-01836-09).

7. REFERÊNCIAS

- Belik, W. and Vian, C. E. de F., 2002, “Desregulamentação estatal e novas estratégias competitivas da agroindústria canavieira em São Paulo”, In: MORAES, M. A. F. D de & SHIKIDA, P. F. A. (Organizadores), Agroindústria canavieira no Brasil: evolução, desenvolvimento e desafios, São Paulo, Brazil, Atlas.
- Caixeta Filho, J. V., Silva, N. D. V., Gameiro, A. H., Lopes, R. L., Galvani, P. R. C., Martignon, L. M., Marques, R. W. C., 1998, “Competitividade no *agribusiness* brasileiro: a questão do transporte em um contexto logístico”, In: FARINA, E. M. E. Q., ZYLBERSZTAJN, D. (Coord.), Competitividade no *agribusiness* brasileiro, São Paulo, Brazil, PENSA/FIA/FEA/USP, 1998, 194 p.
- Eid, F., 1996, “Progresso técnico na agroindústria sucroalcooleira. Informações Econômicas”. São Paulo, Brazil, Vol.26, No.5, pp. 29-36.
- Iannoni, A. P., Morabito, R., 2002, “Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta”, G&P – Gestão e Produção, Brazil, Vol.9, No.2, pp. 107-127.
- MathWorks, 2006, “Optimization Toolbox 3”, User's Guide, The MathWorks, Inc.
- Mosek, 2006, “The MOSEK optimization toolbox for MATLAB manual”, Version 4.0 (Revision 60), MOSEK ApS, Denmark.
- Mundim, J. U. C., 2009, “Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar”. 104 f. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Transportes. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil.
- Paiva, R. P. O., 2006, “Um modelo baseado em seleção de processos e dimensionamento de lotes para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool”. 182 f. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brazil.
- NTC, 2001, “Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas”. Associação Nacional do Transporte de Cargas, Vol. 2, 58 p.
- Silva, J. E. A. R. da., 2006, “Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar”. 145 f. Dissertação de mestrado. Departamento de Engenharia de Produção. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, Brazil.
- UNICA, 2010, Dados e Cotações, Estatísticas, União da Agroindústria Canavieira de São Paulo, Brazil.
- Vian, C. E. de F., 2003, “Agroindústria canavieira: Estratégias competitivas e modernização”, Campinas, Brazil, Átomo.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluídos neste trabalho.

OPTIMIZATION MODEL OF SUGARCANE TRANSPORT FROM CUTTING FRONTS FOR PLANTS

Camilla Miguel Carrara Lazzarini, cacarrara@yahoo.com.br¹
Adelino Gussoni dos Santos, adelino_gussoni@hotmail.com¹
Sezimária F, Pereira Saramago, saramago@ufu.br²
Carlos Alberto Faria, cafaria@ufu.br³

¹Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2160, 38408-110, Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brazil.

²Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Matemática, Av. João Naves de Ávila, 2160, 38408-110, Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brazil.

³Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Civil, Av. João Naves de Ávila, 2160, 38408-110, Santa Mônica, Uberlândia – MG, Brazil.

Abstract: *This paper presents an model for own fleet optimum design of the sugarcane plants. The sugarcane transport system from cutting fronts of the suppliers to the plant it is represented by a Linear programming model. The linear optimization problem is formulated considering as decision variables the amount of cane to be picked in each suppliers cutting fronts and the number of each vehicle type to be used in the transpot. The constraints imposed to the problem consider the maximum amount of cane picked in the cutting fronts, the maximum capacity of grinding cane in the plants and the available maximum number of the types of vehicles. Using two optimization tools, computer simulations are presented solving sceneries in which the availability of vehicles types is changed.*

Keywords: *linear programming, transport model, sugarcane plants, CCT.*