



## 20º POSMEC

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

---

# *Modelagem Matemática do Problema de Otimização do Transporte em Usinas de Cana-de-Açúcar*

*Autor(es)*

Camilla Miguel Carrara LAZZARINI  
Ledan Naves OLIVEIRA SOBRINHO  
Ulisses Lima ROSA

*Orientadora:*

Sezimária F. Pereira SARAMAGO

---

Este estudo propõe uma solução para o problema de otimização da etapa de transporte (da etapa de Corte, Carregamento e Transporte - CCT) na indústria sucroalcooleira. Dessa forma, o modelo de simulação desenvolvido contempla a modelagem do sistema de transporte da cana-de-açúcar.

O objetivo é apoiar as principais decisões envolvidas na determinação do dimensionamento ótimo da frota 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.

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).

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

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.

Uma 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.

Neste trabalho foram consideradas as composições de frota do tipo Romeu e Julieta (25 t), Treminhão (45 t) e Rodotrem (65 t). Porém o modelo pode ser estendido para simular quantos e quais tipos de composições forem necessários.

A jornada de trabalho em usinas de açúcar é de 24 horas/dia. Dessa forma, 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. 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.

A cana-de-açúcar que chega à usina vem de pontos distintos, trabalhada por uma equipe autônoma, denominada frente de corte.

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.

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.

Utilizou-se como referência para os cálculos do custo dos veículos da frota própria 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).

Para o cálculo dos custos da frota terceirizada utilizou-se como referência planilhas de fretes da Central de Custos e Preços de Transportes, do Portal Guia do Transportador (GUIADOTRC, 2010). Para o caso em estudo, também foram consideradas as composições de frota do tipo Romeu e Julieta, Treminhão e Rodotrem. Além disso, para estabelecer o custo adotou-se que estes veículos poderiam percorrer até 1000 km por dia.

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.

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.

O modelo matemático desenvolvido considera o sistema de transporte da cana-de-açúcar para  $pc$  usinas e  $n$  frentes de corte. Os custos da frota irão compor a função objetivo do problema de otimização onde, pretende-se minimizar o custo de transporte de cana-de-açúcar entre as frentes de corte  $i$  e as usinas  $j$ .

Assim, na formulação do problema de otimização considera-se:

$$\begin{aligned}
 f(x) = & \sum_{j=1}^{nTVp \cdot m} \left( \frac{2 D_j CVT_k}{CVk_k} \right) x_j + \sum_{j=(nTVt \cdot m)+1}^{(nTVt \cdot m) \cdot \text{mod}} \left( 2 D_j CFRTER_k \right) x_j + \\
 & + \sum_{j=(nTVp \cdot m) \cdot \text{mod} + 1}^{(nTV \cdot m) + (nTVp \cdot m) + 1} \left( \frac{CFT_k}{30} + 2 D_j CVT_k \right) x_j + \\
 & + \sum_{j=(nTV \cdot m) + (nTVt \cdot m) \cdot \text{mod} + \text{mod}}^{(nTV \cdot m) + (nTVt \cdot m) \cdot \text{mod} + \text{mod}} \left( 2 D_j CVk_k CFRTER_k \right) x_j
 \end{aligned} \tag{1}$$

Sujeita a

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

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

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

Equação °1 representa a função objetivo do problema de otimização, onde deseja-se minimizar o custo de transporte das demandas de cana-de-açúcar das frentes de corte  $i$  para as usinas  $j$ . As Eq.°2 e °3 referem-se às restrições de colheita nas frentes de corte e de moagem nas usinas, respectivamente. A Eq.°4 representa a restrição do número máximo de veículos disponível para cada tipo de veículo próprio e terceirizado para realizar o transporte da demanda de cana-de-açúcar das frentes de corte  $i$  para as usinas  $j$ .

Neste trabalho é apresentado um estudo de caso, sendo que foram adotadas três usinas e oito frentes de corte que têm capacidade total de moagem e de colheita, respectivamente, de 36.000 t/dia, conforme os dados apresentados na Tabela 1. Esta tabela também exibe 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 1: Demanda entre as frentes de corte e as usinas

|                            | Frente de Corte | Usina    | Usina    | Usina    | Restrições de colheita |
|----------------------------|-----------------|----------|----------|----------|------------------------|
| 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) |                 | 12.00    | 15.00    | 9.000    | 36.000                 |

Para obtenção dos resultados do problema de programação linear, utilizou-se o código computacional Linprog do Matlab. Para cada tipo de veículo considerado neste trabalho, a Tabela 2 exibe o valor calculado para o Custo Fixo Total (CFT) e Custo Variável Total (CVT) para a frota própria e, também, o Custo do Frete Terceirizado (CFRTER) adotado para a frota terceirizada. Neste estudo, foram considerados casos apenas com a frota própria, apenas com frota terceirizada e com ambos os tipos, para permitir a comparação das soluções ótimas encontradas.

Considerando-se separadamente a frota própria ou a terceirizada tem-se 144 variáveis de projeto e 35 restrições. Considerando as duas frotas simultaneamente, tem-se 288 variáveis de projeto e 35 restrições.

Tabela 2: Custo Fixo Total (CFT) e Custo Variável Total (CVT) para cada tipo de veículo

| Custos das Frotas  |                                       | Romeu e Julieta | Treminhão | Rodotrem  |
|--------------------|---------------------------------------|-----------------|-----------|-----------|
| Frota Própria      | Custo Fixo Total (R\$)                | 13.862,00       | 20.103,00 | 30.593,00 |
|                    | Custo Variável Total (R\$/km)         | 0,8821          | 1,0410    | 1,4886    |
| Frota Terceirizada | Custo Frete Terceirizado (R\$/ton*km) | 0,1620          | 0,1159    | 0,0910    |

A Tabela 3 apresenta 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 dadas as considerações e parâmetros adotados no trabalho.

Observa-se que a frota mista, composta por veículos próprios e terceirizados, 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. A frota mista composta de veículos do tipo Treminhão e Rodotrem apresentou um valor 2,04% inferior em relação a frota mista de veículos do tipo Treminhão.

Tabela 3: Resultados ótimos para a demanda de cana-de-açúcar e o número de veículos

|                       |             | Frota Própria | Frota Terceirizada | Frota Mista       |
|-----------------------|-------------|---------------|--------------------|-------------------|
| Romeu e Julieta       | Demanda (t) | -             | -                  | -                 |
|                       | Nº Veículos | -             | -                  | -                 |
| Treminhão             | Demanda (t) | 36.000        | -                  | 27.000            |
|                       | Nº Veículos | 93            | -                  | 70 (próprio)      |
| Rodotrem              | Demanda (t) | -             | 36.000             | 9.000             |
|                       | Nº Veículos | -             | 78                 | 19 (terceirizado) |
| Custo Total (R\$/dia) |             | 88.911,00     | 107.020,00         | 84.255,00         |

A segunda melhor opção é a frota mista composta de veículos do tipo Treminhão. Esta apresentou um valor 3,3% inferior em relação a frota própria composta do mesmo tipo de veículo. Logo, pode-se concluir que a ferramenta Linprog é útil e importante no planejamento operacional auxiliando os gestores na tomada de decisão.

### Agradecimentos

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

### REFERÊNCIAS

- GUIADOTRC (2010) Central de Custos e Preços de Transportes, do Portal Guia do Transportador. Disponível em: <http://www.guiadotrc.com.br/Custeio/metodologia.asp>.
- IANNONI, A. P. E 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*, v.9, n.2, p. 107-127.
- MATHWORKS (2006) Optimization Toolbox 3, User's Guide, The MathWorks, Inc.
- NTC (2001) Manual de Cálculo de Custos e Formação de Preços do Transporte Rodoviário de Cargas. Associação Nacional do Transporte de Cargas, v. 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.