

**ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE  
TRANSPORTE FLUVIAL DE CANA-DE-AÇÚCAR NO RIO  
TIETÊ ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO**

**Renata Carolina Barreiro Rodrigues, Edson Felipe Capovilla Trevisan**  
Departamento de Engenharia de Sistemas Logísticos – EPUSP  
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, 128- Cidade Universitária – 05508-900 –  
São Paulo – SP ; tel: 55-11-30911724  
recarol@gmail.com, edsontrevisan21@gmail.com

**Rodolfo Celestino Silva, Newton Narciso Pereira, Rui Carlos Botter**  
Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - EPUSP  
Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, 128- Cidade Universitária – 05508-900 –  
São Paulo – SP ; tel: 55-11-30911724  
rodolfocs.silva@gmail.com, newtonnaval@gmail.com, rcbotter@usp.br

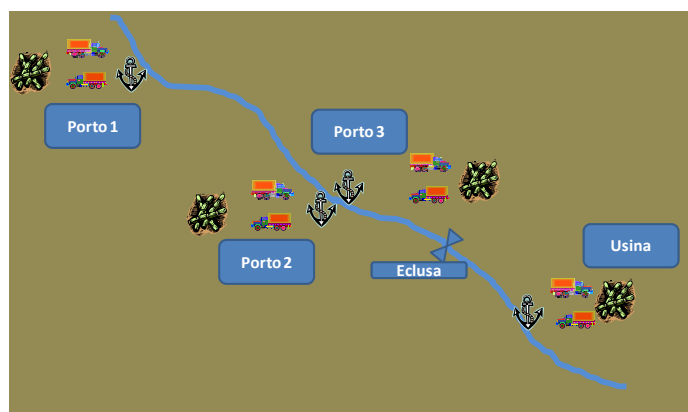
A plantação de cana-de-açúcar para produção de etanol é feita em localidades próximas ao rio Tietê, no interior do Estado de São Paulo. Devido à proximidade do rio, uma parte do transporte da cana até a usina é realizada através de comboios fluviais formados por um empurrador e três barcaças. O sistema conta com três portos de carga de cana, que contemplam quatro berços de atracação de barcaças, e cada porto opera em uma época específica da safra, dependendo de onde for realizada a colheita. Atualmente, o sistema fluvial transporta cerca de 5.000 toneladas de cana por dia. No entanto, pretende-se que o transporte fluvial seja capaz de atender 11.000 toneladas de cana a fim de se reduzir a carga do transporte rodoviário da região. Para isso, é necessário analisar a capacidade de transporte deste sistema fluvial, como um todo, incluindo portos, hidrovia e embarcações. Além disso, entre a usina e os portos de carregamento existe uma eclusa, cuja capacidade de operação também é levada em consideração. A análise deste sistema foi realizada através de um modelo de simulação de eventos discretos capaz de identificar os gargalos e entraves do sistema, proporcionando ao tomador de decisão uma maneira eficaz de propor melhorias ao sistema visando atender ao aumento de demanda esperado.

## 1. INTRODUÇÃO

Este estudo avalia a evolução da capacidade de um sistema de transporte de cana-de-açúcar pelo rio Tietê através de simulação de eventos discretos.

A plantação da cana-de-açúcar em questão é feita em localidades próximas à sub-bacia hidrográfica de Tietê/Batalha. O transporte da cana desde as frentes de plantação até os portos fluviais é feito por caminhões. Os caminhões, nos portos, são descarregados diretamente nas barcaças que são levadas por empurradores, em comboios de três barcaças, até a usina.

A cana é proveniente de três portos. A Figura 1.1 ilustra a posição dos portos na hidrovia, em relação à eclusa existente no trecho.



**Figura 1.1 - Desenho esquemático do sistema hidroviário.**

O porto 1 opera com dois berços de atracação para barcaças, enquanto os demais operam com apenas um berço.

A safra de cana acontece entre abril e novembro e, durante este período, os terminais não operam simultaneamente. A Tabela 1.1 mostra os meses de operação de cada terminal.

Apesar de a safra durar cerca de oito meses, é considerado que a usina opera apenas 190 dias no ano, devido a paradas, como por exemplo, para manutenção.

**Tabela 1.1 - Duração de Operação de cada terminal.**

Terminal	Meses de Operação
Porto 1 – Berço 1	Abril a Novembro
Porto 1 – Berço 2	Abril a Junho
Porto 2	Julho a Setembro
Porto 3	Outubro e Novembro

Entre os portos e a usina existe uma eclusa, a eclusa de Bariri, que necessita ser transposta em todas as viagens feitas pelos empurradores. Estima-se que uma eclusagem, sem considerar espera das embarcações devido a filas, dure meia hora.

Na usina existe apenas um berço de descarga das barcaças que opera com duas pontes rolantes. As pontes trabalham em série e descarregam em uma mesa, como ilustra a Figura 1.2. A mesa tem capacidade para apenas uma garra, de forma que a garra 2 é descarregada, depois deslocada um pouco para a direita para que a garra 1 possa também ser descarregada.



**Figura 1.2 - Esquema do sistema de descarga na usina.**

## **2. METODOLOGIA**

Lakatos e Marconi (1991) definem método científico como um conjunto coerente de procedimentos racionais ou lógico-racionais para o alinhamento de pensamentos visando alcançar um objetivo comum. Sendo assim, definiu-se os seguintes passos, baseado em Gualda (1995):

1. Estruturação do problema;
2. Observações e absorção de conhecimentos;
3. Construção do Modelo/Teoria;
4. Teste do Modelo/Teoria;
5. Obtenção da solução;

## 6. Análise e validação da solução.

Neste contexto, os trabalhos de Stopford, M. (2009) e Branch, A. E. (2007) nortearam o desenvolvimento da teoria de custos de navegação e viabilidade técnica, enquanto os trabalhos de Brito, T.B. (2008) e Winston, W. (2003), guiaram o desenvolvimento da análise qualitativa das alternativas e também o desenvolvimento do modelo de simulação.

Com relação ao modelo de simulação de eventos discretos, este foi elaborado para a determinação das características da logística *inbound* do sistema (frota, estrutura dos terminais entre outros), possibilitando uma análise mais precisa.

No que tange ao desenvolvimento deste modelo, a metodologia utilizada foi baseada nos passos propostos por Peden et al. (1995) e posteriormente modificados por Botter (2002). Estas etapas são compostas basicamente por:

- a) Definição do problema;
- b) Planejamento do projeto;
- c) Definição do sistema;
- d) Formulação conceitual do modelo;
- e) Projeto preliminar do experimento;
- f) Preparação dos dados de entrada;
- g) Codificação do modelo;
- h) Verificação e validação do modelo;
- i) Projeto final do experimento;
- j) Experimentação e análises de sensibilidades;
- k) Análise e interpretação dos resultados;
- l) Implementação e documentação.

Paralelamente, Chwif & Medina (2006), nortearam o desenvolvimento do modelo. Estes autores dividem a elaboração do modelo em três etapas principais (Figura 2.1):

- 1) Concepção: onde se definem o sistema e os objetivos, além de se realizar o levantamento de dados e a modelagem conceitual;
- 2) Implementação: elabora-se o modelo computacional propriamente dito, sua verificação e validação;

3) Análise: onde são realizadas as simulações desejadas, análises de sensibilidade e análise de resultados.

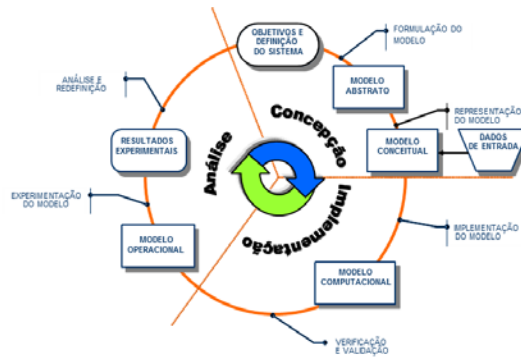


Figura 2.1– Metodologia de desenvolvimento do modelo de simulação (Chwif e Medina (2006))

### 3. MODELO CONCEITUAL

O sistema de transporte foi dividido em quatro subsistemas: a hidrovia, a eclusa, os terminais de carga e os terminais de descarga.

#### 3.1. Hidrovia

O subsistema hidroviário é responsável pelo tempo de viagem entre os terminais de origem (carga) e destino (descarga) e vice-versa. Este tempo é influenciado por diversos fatores: velocidade do comboio, transposição da eclusa, tempo de atracação/desatracação, etc.

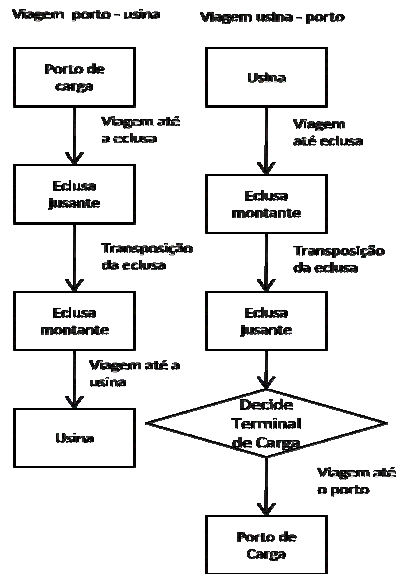


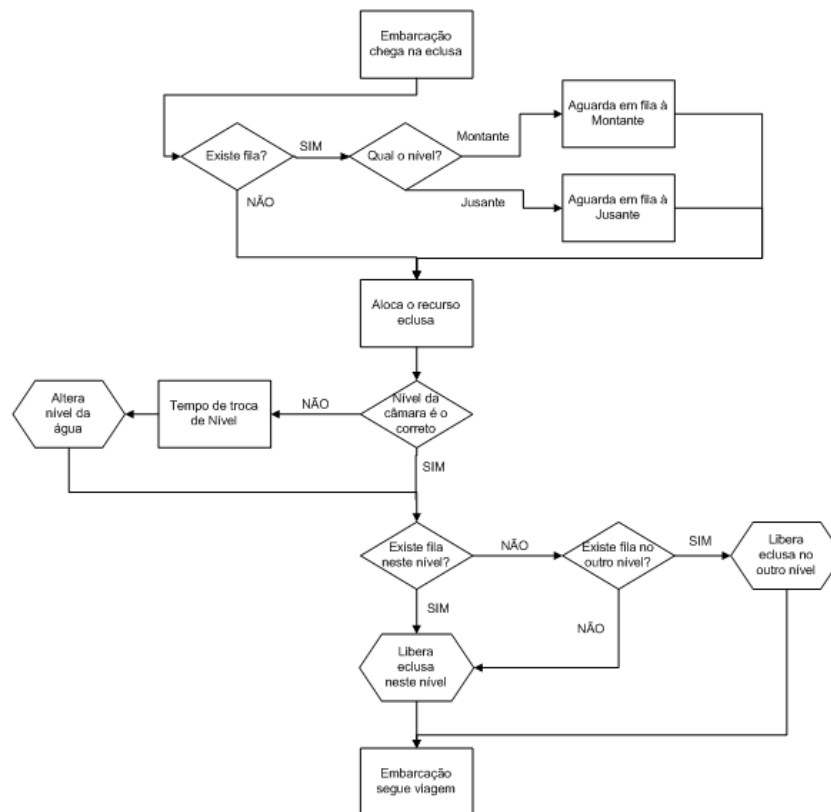
Figura 3.1.1 - Modelo conceitual da hidrovía.

### 3.2. Eclusa

Uma embarcação, ao chegar a uma eclusa, poderá sujeitar-se a uma das situações abaixo:

- Existe fila de embarcações a sua frente, em seu mesmo nível;
- A eclusa está livre e com o nível d'água no mesmo nível em que se encontra a embarcação;
- A eclusa está livre, mas com nível d'água no nível oposto ao que se encontra a embarcação;
- A eclusa está ocupada, com uma eclusagem sendo feita para o nível em que se encontra a embarcação;
- A eclusa está ocupada, com uma eclusagem sendo feita para o nível oposto em que se encontra a embarcação e não há fila no lado oposto;
- A eclusa está ocupada, com uma eclusagem sendo feita para o nível oposto em que se encontra a embarcação e há uma fila no lado oposto.

O funcionamento do subsistema eclusa é apresentado na Figura 3.2.1.



**Figura 3.2.1 - Processo de eclusagem.**

### 3.3. Terminais de Carga

O subsistema terminal de carga conta com 3 portos e 4 berços de embarque de cana. Quando o comboio viaja na direção jusante, ele decide para qual dos quatro terminais ele deve ir para efetuar a carga. Ao chegar, ele aloca no berço e efetua o desmembramento das barcaças. Ao desmembrar, a barcaça fica à espera do caminhão, caso haja. Este último chega ao terminal, efetua a pesagem e aloca o ponto de descarga, para o carregamento da barcaça. Quando a barcaça estiver cheia, ela aguarda o empurrador para ser agrupada ao comboio e seguir viagem. A Figura 3.3.1 ilustra o modelo conceitual do terminal.



**Figura 3.3.1 - Modelo conceitual dos terminais de carga.**

### **3.4. Terminal de Descarga**

No terminal de descarga fica localizada a usina. Nela, o comboio atracará e ficará em fila, caso haja. Acontece, então, o desmembramento e a alocação do equipamento de descarga na barça. Uma vez efetuada a descarga, a barça é liberada e aguarda o empurrador para seguir viagem em direção ao porto, como mostra o modelo conceitual da Figura 3.4.1.

**Figura 3.4.1 - Modelo conceitual do terminal de descarga.**

#### 4. CENÁRIO BASE

Foi considerado como cenário base, o cenário atual de transporte de 4.700 toneladas de cana por dia. Devido à qualidade da cana, 75% dela deve ser transportada pelo terminal 1 do porto 1 enquanto os demais 25% de cana são carregados nos outros terminais.

Como explicado anteriormente, os terminais de carga são alimentados por caminhões que fazem a viagem frente – porto. Ao chegar no porto, os caminhões devem realizar uma pesagem para, depois, serem descarregados diretamente nas barcaças. Ao sair do terminal, os caminhões devem realizar pesagem na mesma balança.

Existe apenas um equipamento de carga de barcaças (descarga de caminhões) em cada terminal. Sendo assim, só é possível carregar uma barcaça por vez e, esta só pode ser carregada por um caminhão por vez. O empurrador fica aguardando no terminal até que três barcaças estejam cheias para que ele possa começar a viagem com destino à usina. A Tabela 4.1 contém os dados referentes à carga das barcaças nos terminais. A Tabela 4.2 contém os dados referentes aos dados da viagem do comboio cheio.

**Tabela 4.1 - Dados referentes ao carregamento da barcaça nos terminais.**

	Porto 1 Terminal 1	Porto 1 Terminal 2	Porto 2	Porto 3
Tempo de desmembramento do comboio (h)	0,5	0,5	0,5	0,5
Tempo de atracação da barcaça (h)	0,12	0,12	0,12	0,12
Capacidade da barcaça (t)	432	408	408	408
Tx. de carga da barcaça (tph)	194	157	157	157
Tempo de desatracação da barcaça (h)	0,12	0,12	0,12	0,12
Tempo de acoplamento do comboio (h)	0,5	0,5	0,5	0,5
Número de barcaças adicionais (#)	3	0	0	0

**Tabela 4.2 - Dados referentes à viagem porto - usina.**

	Porto 1 Terminal1	Porto 1 Terminal2	Porto 2	Porto 3
Barcaças por comboio (#)	3	3	3	3
Capacidade comboio (t)	1296	1224	1224	1224
Distância porto – eclusa (km)	45	45	24	24
Distância porto – usina (km)	77	77	56	56
Velocidade comboio cheio (km/h)	10,9	10,9	10,9	10,9
Tempo de eclusagem (h)	0,5	0,5	0,5	0,5

Na usina em questão, existe apenas um ponto de descarga de barcaças. Sendo assim, quando um comboio chega, ele é desmembrado. Caso o berço esteja desocupado, uma das barcaças é alocada no berço para realizar a descarga enquanto as demais aguardam em fila até que o berço seja desocupado novamente. Caso, ao chegar o comboio, o berço esteja ocupado, todas as barcaças devem aguardar em fila. Os dados de entrada referentes à descarga na usina estão listados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 - Dados de entrada referente à descarga.**

Tempo de desmembramento do comboio (h)	0,5
Tempo de atracação da barcaça (h)	0,06
Taxa de Descarga da barcaça (tph)	181
Capacidade da barcaça (t)	426
Tempo de desatracação da barcaça (h)	0,06
Tempo de acoplamento do comboio (h)	0,5
Número de barcaças adicionais (#)	6
Velocidade comboio vazio (km/h)	13

Considerando todos os dados descritos acima, foi simulado o modelo para verificar as condições do cenário atual, o cenário base, de 4.700 toneladas por dia. Os resultados obtidos estão listados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 - Resultados Cenário Base.**

	Porto 1 Terminal1	Porto 1 Terminal 2	Porto 2	Porto 3	Usina
Carga Movimentada (t)	670.215	85.727	85.010	53.290	894.242
Ocupação (%)	70%	35%	35%	33%	90%
Total Movimentado (t)	894.242				
Total por dia (tpd)	4.707				

A Tabela 4.5 mostra a comparação entre os dados obtidos pela simulação e dados observados na operação real. Neste caso, foi simulada frota de 4 empurradores e 21 barcaças (como ocorre na operação real). É possível perceber que a simulação apresentou uma diferença de apenas 0,6% em relação aos dados reais, por isso, pode-se concluir que o modelo está representando corretamente a realidade, ou seja, o modelo está validado.

**Tabela 4.5 - Validação do Modelo através do cenário base.**

	Porto 1 Terminal 1	Porto1 Terminal 2	Porto 2	Porto 3	Usina
Comparação entre resultados (%)	99,2%	100,3%	99,7%	100,9%	99,4%

É possível identificar, analisando a Tabela 4.4, que o berço de descarga na usina está congestionado, pois ele tem uma ocupação de 90%. Foi concluído, então, que para aumentar a capacidade de carga do sistema o sistema de descarga deve ser redimensionado.

## 5. Análise de Sistema de Descarga

Uma possibilidade de melhoria para o sistema de descarga seria construir uma moega na lateral da barcaça com capacidade suficiente para a descarga das duas garras simultaneamente. Desta maneira, a operação de uma garra não

interferiria na operação da outra, de forma que a produtividade da operação não fosse prejudicada. Além disso, a distância entre a barcaça e a moega seria muito pequena, enquanto a distância entre a extremidade da barcaça e a mesa existente é de aproximadamente 20 metros. Para melhor compreensão, a Figura 5.1 ilustra esta melhoria.



**Figura 5.1 - Melhoria proposta para a descarga.**

### 5.1. Melhoria na Descarga – taxa 395 tph

Para este cenário, foram mantidas as mesmas premissas do cenário base, com exceção da taxa de descarga que foi considerada 395 tph. Nessas condições, o máximo que o sistema consegue transportar é 5.693 toneladas por dia.

**Tabela 5.1.1 - Resultados Cenário 1.**

	Porto 1 Terminal1	Porto 1 Terminal 2	Porto 2	Porto 3	Usina
Carga Movimentada (t)	810.638	100.263	105.262	66.712	1.082.875
Ocupação (%)	83%	43%	44%	40%	52%
Total Movimentado (t)	1.082.875				
Total por dia (tpd)	5.693				

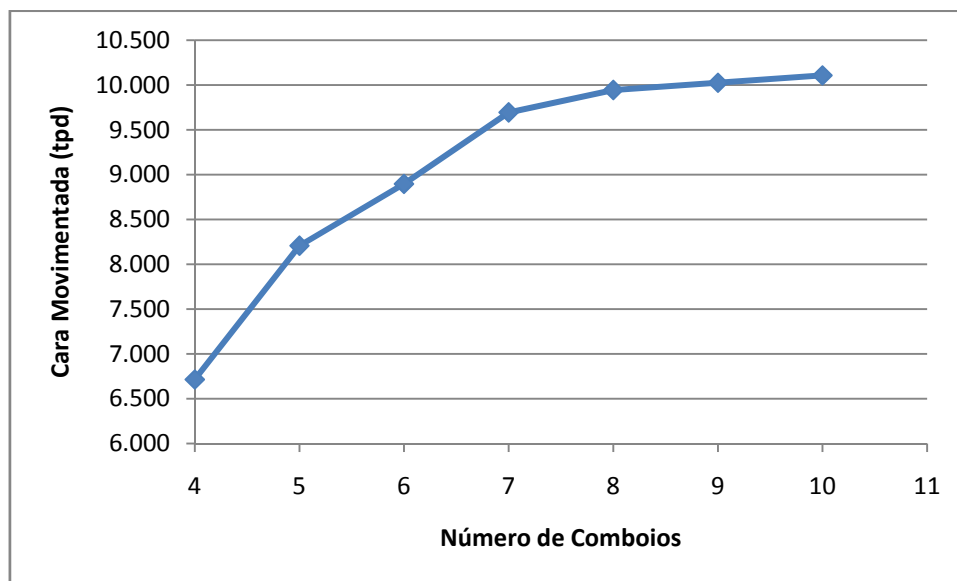
### 5.2. Dimensionamento para 11 mil tpd

Um aumento na demanda do cenário anterior, mantendo a proporção de que 75% da carga deve ser carregada no terminal 1 do porto 1, implica num congestionamento deste terminal, limitando o sistema em 6.794 toneladas por dia.

Eliminando agora esta restrição de carga, analisa-se a possibilidade de operar com apenas 3 terminais no sistema (um terminal em cada porto). Sendo assim,

as taxas de carregamento dos portos 2 e 3 foram elevadas para 230 tph (a do terminal 1 do porto 1 foi mantida em 200 tph).

A Figura 5.2.1 mostra o resultado obtido. Para frotas com mais que 7 empurradores (e 30 barcaças), o ganho no sistema passa a ser insignificante. Isto acontece porque a ocupação do terminal de descarga da usina atinge 94%, e este, novamente, passaria a ser o gargalo do sistema.



**Figura 5.2.1 - Carga movimentado no sistema com variação da quantidade de comboios.**

Ao adicionar um berço auxiliar no terminal de descarga da usina, com produtividade de 230 tph, o sistema passa a ser capaz de transportar 11.187 toneladas de cana por dia com frota de 8 empurradores e 33 barcaças.

## 6. CONCLUSÃO

A simulação de eventos discretos mostrou-se um método eficaz para a análise do sistema hidroviário proposto. A ferramenta desenvolvida apontou claramente os gargalos do sistema em cada etapa, e possibilitou a proposição de adaptações eficientes no sistema, a fim de se atingir o objetivo proposto.

A análise do sistema de movimentação de carga específico mostrou que são necessários dois berços na usina para descarregar 11.000 toneladas por dia, mesmo considerando uma operação eficiente no berço principal.

Além disso, a concentração da carga em apenas um terminal mostrou-se muito prejudicial à operação do sistema. A flexibilização desta carga aos demais terminais atribui ganhos significativos à operação.

A frota necessária para atender a demanda proposta no sistema é de 8 empurradores e 33 barcaças. Esta frota não implica em problemas de navegabilidade, uma vez que o grande gargalo da navegação, a eclusa, não atingiu níveis de operação críticos e, por isso, não foi considerada objeto deste estudo.

## **7. REFERÊNCIAS**

BOTTER, R.C. (2002). Tratamento de dados em simulação discreta, Tese de Livre-Docência apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

BRANCH, A. E. (2007). Elements of Shipping (8a Edição ed.). Routledge.

BRITO, T.B. (2008). Modelagem e simulação de um terminal regulador de contêineres. Trabalho de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

CHWIF, L., & MEDINA, A. (2007). Modelagem e Simulação de Eventos Discretos. São Paulo: Ed. do Autor.

GUALDA, N.D.F. (1995). Terminais de Transporte: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional". Tese de Livre Docência apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

LAKATOS, E. M., & MARCONI, M. A. (1973). Metodologia Científica. São Paulo: Ed. Atlas.

PEDGEN, C. D.; SHANON, R. E.; SADOWSKI, R. P. (1995). Introduction to simulation using SIMAN. McGraw-Hill: 2nd ed., NY,

STOPFORD, M. (2009). Maritime Economics (3a Edição ed.). Routledge.

WINSTON, W. (2003). Operations Research Applications and Algorithms (4a Edição ed.). Thompson.