

## ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES DO EFEITO ESTUFA EM UM SISTEMA DE TRANSPORTE DE CARGA

### ANALYSIS OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN A FREIGHT TRANSPORTATION SYSTEM

Geísa Pereira Marcilio\* E-mail: [isamarcilio@yahoo.com.br](mailto:isamarcilio@yahoo.com.br)  
João José de Assis Rangel\* E-mail: [joao.rangel@ucam-campos.br](mailto:joao.rangel@ucam-campos.br)  
Túlio Almeida Peixoto\* E-mail: [tulioap@gmail.com](mailto:tulioap@gmail.com)  
\* Universidade Cândido Mendes (UCAM), Campos dos Goytacazes, RJ, Brasil

**Resumo:** O objetivo deste trabalho foi analisar as emissões de gases provenientes das descargas de caminhões durante o transporte de cana-de-açúcar de fontes produtoras para uma determinada usina. Foram investigados cenários alternativos para a movimentação da carga considerando uma variável de desempenho do sistema, tempo de transporte, e as emissões gasosas produzidas. O método utilizado foi simulação a eventos discretos, cujo modelo computacional foi construído por meio do *software* livre e de código aberto denominado Ururau. Os resultados mostraram que a decisão quanto à escolha dos veículos em determinadas situações pode reduzir as emissões de gases geradas pela frota. Com isso, foi demonstrada a possibilidade de redução dessas emissões apenas pela introdução de modificações em procedimentos operacionais, sem necessidade de investimentos em novas tecnologias.

**Palavras-chave:** Simulação. Gases do efeito estufa. Transporte. Emissões. Cana-de-açúcar.

**Abstract:** The aim of this work was to analyze gas emissions from a truck exhaust system during the transportation of sugarcane from producing sources to a particular mill. Alternative scenarios for the freight handling were investigated considering a system performance variable, transportation time, and gas emissions produced. The method applied was the discrete event simulation, which computational model was built using a free and open source software called Ururau. Results showed that the decision concerning the choice of vehicles in specific situations can reduce gas emissions generated by the fleet. Hence, it was demonstrated the possibility to reduce these emissions just introducing changes in operational proceedings, without investing in new technologies.

**Keywords:** Simulation. Greenhouse gases. Transportation. Emissions. Sugarcane.

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Byrne *et al.* (2010), a análise ambiental de *Supply Chain* (SC) tem sido alvo de estudos com o objetivo de escolher ambientes de trabalho mais sustentáveis. Neste contexto, Longo (2012) ressalta que a análise ambiental constitui um aspecto relevante frente ao atual cenário mundial. O autor ainda destaca que a eficiência do setor de transporte funciona como um mecanismo para promover a sustentabilidade ambiental com a redução das emissões de dióxido de

carbono (CO<sub>2</sub>), entre outros gases do efeito estufa (GEE). Em recente artigo, Rangel; Cordeiro (2015) realizaram o cálculo de emissões de GEE provenientes de transportes em um típico sistema logístico. Os autores demonstraram que não existe uma proporcionalidade clara entre as variáveis de desempenho e econômicas do sistema com as emissões produzidas pelos veículos.

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA da sigla em inglês *International Energy Agency*) (2015) apontaram que, em 2013, o setor de transporte foi responsável por 23% das emissões totais mundiais de CO<sub>2</sub>, perdendo apenas para o setor de eletricidade e de calor, que correspondeu a 42%. As emissões de GEE provenientes dos transportes tendem a provocar danos cada vez maiores ao meio ambiente, caso não sejam tomadas medidas para reduzir o avanço dessas emissões. O uso de caminhões para transporte de cargas pode proporcionar, em diversas situações, maior flexibilidade nas operações. Entretanto, há um conflito entre essas vantagens e os interesses ambientais devido aos elevados níveis de emissões provocados pela frota, conforme relatado por Richardson (2005). Dentre os tipos de sistemas logísticos para transporte de cargas, o sistema de transporte de cana-de-açúcar mostra-se de grande interesse para diversas pesquisas devido ao crescente consumo mundial de etanol associado a questões ambientais como produção limpa e renovável de combustíveis (RODRIGUES *et al.*, 2014).

Neste contexto, Iannoni; Morabito (2002) destacaram que o sistema de transporte para o abastecimento de cana-de-açúcar representa uma importante fonte de oportunidade para o aumento da eficiência de uma usina sucroalcooleira. Os mesmos autores utilizaram Simulação a Eventos Discretos (SED) para a realização de sua pesquisa, assim como Fioroni *et al.* (2013). A construção de modelos computacionais possibilita elaborar e analisar diversos cenários e obter resultados que podem apoiar gestores em processos de tomada de decisões, conforme visto no trabalho de Arjona *et al.* (2001).

Diante disso, o objetivo deste artigo foi analisar as emissões de GEE provenientes do processo de transporte de cana-de-açúcar e utilizar como exemplo o sistema logístico de uma usina sucroalcooleira. Para tanto, o método usado baseou-se em SED e utilizou o *software* livre e de código aberto Ururau, como visto no trabalho de Peixoto *et al.* (2017). Destaca-se que Dagkakis; Heavey (2015)

citaram a aplicação do *software* Ururau e o indicaram para gestão de SC e para análise das emissões de CO.

O presente artigo foi organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos da pesquisa. A seção 3 descreve o sistema de corte, carregamento e transporte da cana-de-açúcar, que compõe o estudo. A seção 4 apresenta o *software* utilizado para as simulações. A seção 5 mostra o modelo de simulação construído para as análises, a metodologia utilizada e os processos de verificação e validação do modelo. A seção 6 apresenta os cenários simulados e fornece uma análise dos resultados obtidos. Finalmente, a seção 7 expõe as principais conclusões.

## **2 SIMULAÇÃO A EVENTOS DISCRETOS E ANÁLISE DE EMISSÕES DE GASES**

A utilização de técnicas de simulação constitui-se como uma ferramenta capaz de imitar o funcionamento de inúmeros tipos de operações para compreender o seu comportamento e, com isso, auxiliar nas decisões ambientais. Um modelo de simulação computacional bem construído permite uma análise consistente de sistemas, como o SC, por exemplo, e possibilita melhor compreensão dos fenômenos envolvidos, com baixo custo, quando comparado com outros tipos de modelos (RANGEL; CORDEIRO, 2015). Por meio dos modelos computacionais, é possível testar vários cenários e, assim, verificar os impactos que aconteceriam no sistema caso determinada decisão fosse tomada. A seguir, são apresentados alguns trabalhos em que foram empregados modelos de SED aplicados às questões ambientais.

Jaegler; Burlat (2012) concentraram-se nas emissões de CO<sub>2</sub> ao longo do SC desde as emissões oriundas dos transportes até o armazenamento de estoques. Desenvolveu-se um modelo de SED para simular um SC de três elos, com quatro variáveis sintonizáveis fornecidas: capacidade de produção, localizações, meio de transporte e tipos de produtos. Os dados foram obtidos de um grande fabricante e distribuidor de ventilação e sistemas de ar condicionado. O objetivo do estudo foi comparar os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> em diferentes configurações e cenários, ajudando gestores a selecionar os SC mais sustentáveis ambientalmente.

Lättilä; Henttu; Hilmola (2013) destacaram que a diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub> é uma das tarefas mais importantes da sociedade do século XXI. Os autores

apontaram, então, que uma alternativa seria a utilização de um terminal intermodal terrestre (portos secos). O estudo comparou duas configurações: na primeira, os carregadores dirigiram-se diretamente a um porto marítimo, já na segunda, eles utilizaram portos secos. Na avaliação de ambos os sistemas, feita por modelos de SED, os autores estavam interessados em duas questões: os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> e os custos para transportar as mercadorias em diferentes configurações. Os resultados encontrados foram comparados com uma situação em que as emissões eram minimizadas em vez dos custos.

Jaegler; Burlat (2014) continuaram sua pesquisa concentrando-se nas emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> ao longo do SC. Os autores desenvolveram um modelo de SED que utilizou a política de gestão de produção de ponto de reabastecimento para atender à demanda por meio de estoques. O modelo, aplicado a dois casos industriais (indústria têxtil e de refrigeração), considerou a capacidade de produção mediante um indicador de eficácia global do equipamento (OEE, em inglês), a localização das empresas e os tipos de produtos. O objetivo foi comparar as emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes de diferentes configurações.

Fahimnia; Sarkis; Eshragh (2015) apresentaram uma análise exploratória que investigou algumas questões críticas envolvendo o debate de produção enxuta versus verde no nível tático do planejamento. Um modelo de planejamento do SC foi utilizado para investigar compensações entre custo e degradação ambiental, incluindo emissões de carbono, consumo energético e geração de resíduos. O modelo também incorporou aspectos como dimensionamento de lotes para transporte e capacidade de retenção de armazéns. Os resultados indicaram que embora algumas práticas enxutas provoquem resultados verdes, principalmente com a redução de desperdícios e *lead time*, nem todas as práticas enxutas do nível tático estão alinhadas com resultados verdes. Os autores ainda destacaram que uma situação estritamente enxuta se apresenta como uma alternativa pouco vantajosa do ponto de vista sustentável se empregado em SC não flexíveis, ao passo que seria preferível, sob o aspecto ambiental, uma situação menos enxuta em um sistema de SC mais flexível.

Iannone *et al.* (2016) desenvolveram um estudo cujo objetivo foi avaliar o impacto das decisões de gestores no planejamento operacional com foco particular sobre a movimentação dos veículos. Devido à alta complexibilidade do problema,

causada principalmente pela natureza estocástica das variáveis envolvidas, utilizou-se um modelo de SED construído em Arena Rockwell. Foram descritas as operações do terminal, as decisões de operação e os custos envolvidos em processos terminais não formalizados. O trabalho avaliou o impacto econômico das diferentes alternativas operacionais sobre os custos logísticos e as emissões de GEE.

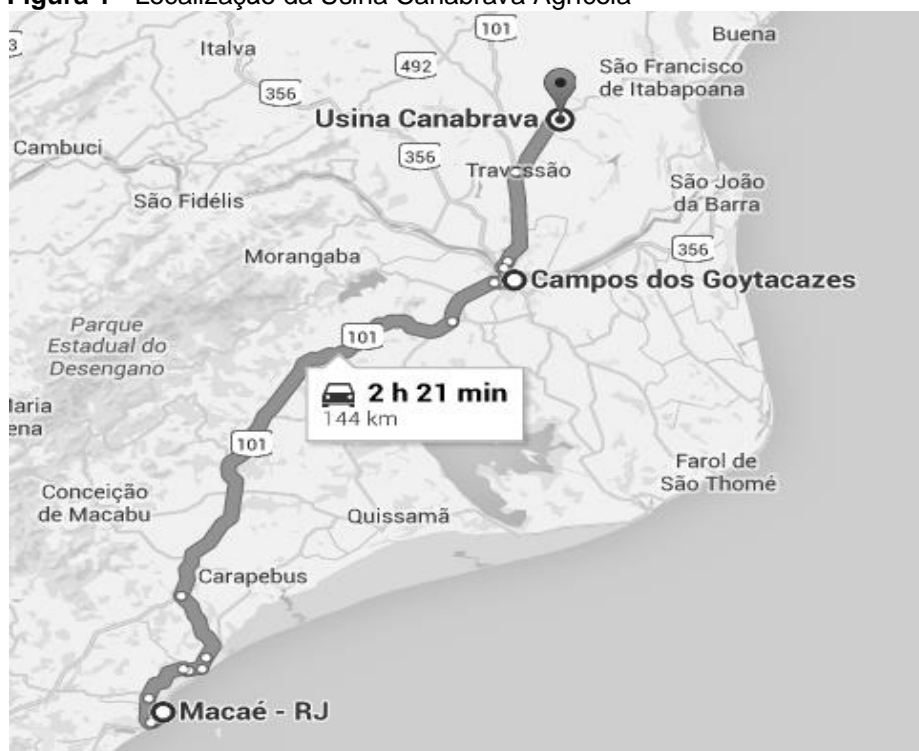
### **3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA**

O sistema analisado é um típico sistema de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar, conhecido como CCT. Esse sistema pode ser observado de forma semelhante em outros trabalhos, tais como os de Rangel *et al.*, (2013), Fioroni *et al.*, (2013) e Scheidl *et al.*, (2015).

#### **3.1 Localização e funcionamento da usina**

Para esta pesquisa, foi tomada como exemplo a Usina Canabrava Agrícola localizada no norte do estado do Rio de Janeiro, conforme ilustrado pela Figura 1. Sua localização é próxima aos municípios de Campos dos Goytacazes e Macaé, cidades de grande representatividade dentro do estado devido à exploração petrolífera na Bacia de Campos. A área de abrangência das fontes de matéria-prima da Usina varia de 10 a 70 km, aproximadamente.

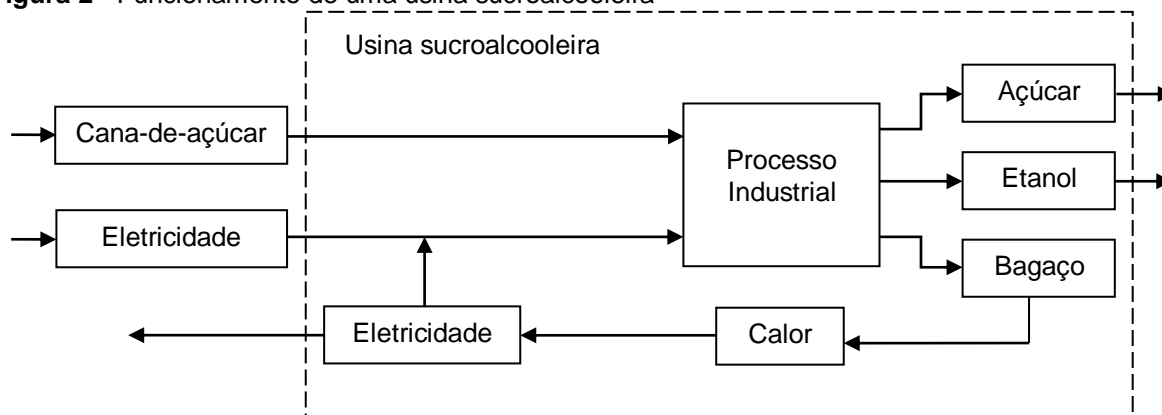
**Figura 1 - Localização da Usina Canabrava Agrícola**



Fonte: Google Maps® (2015)

A Canabrava Agrícola, criada em 2011, é um grupo empresarial que atua exclusivamente no estado do Rio de Janeiro na produção de etanol hidratado, combustível e energia elétrica. Sua localização decorre do fato de a região possuir grandes extensões territoriais, propícias para o cultivo da cana-de-açúcar, e pela aptidão cultural para a manipulação desta matéria-prima. Dentro deste contexto, a Figura 2 mostra um diagrama do funcionamento de uma usina sucroalcooleira.

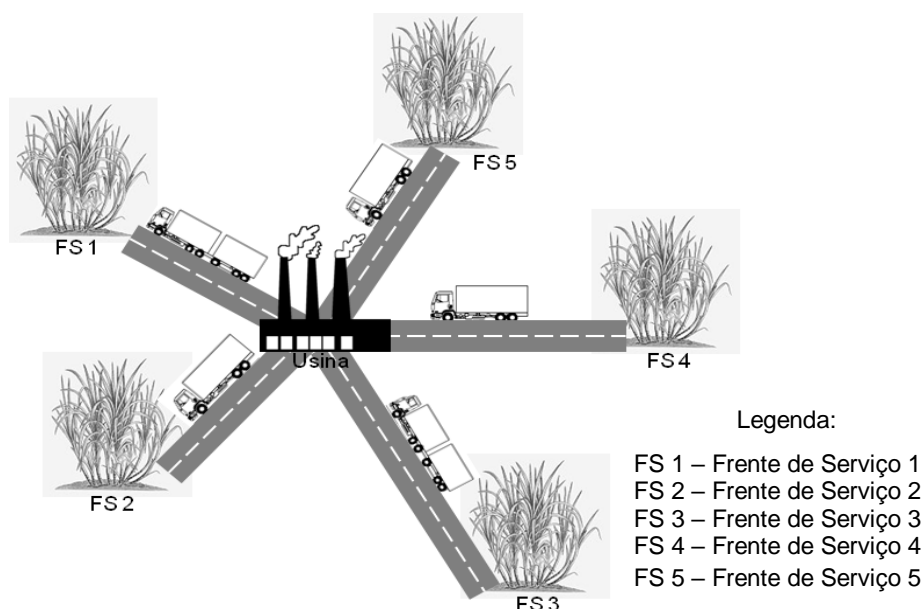
**Figura 2 - Funcionamento de uma usina sucroalcooleira**



Fonte: Elaborado pelos autores

Neste sistema, a cana-de-açúcar sai do campo, das chamadas Frentes de Serviço (FS), e vai para a usina, onde passa pelo processo industrial, que a transforma em açúcar ou etanol e eletricidade por meio da combustão do bagaço. A Figura 3 ilustra o processo de transporte de cana-de-açúcar com seus principais aspectos e características. Na parte central, está a usina e, no seu entorno, as diversas FS (FS1, FS2, FS3, FS4 e FS5), que funcionam como fonte de matéria-prima, localizadas em diversos pontos. As distâncias relativas entre as FS têm importância insignificante no sistema, pois a estratégia logística da usina procura alocar as FS mais próximas. Assim, o modelo considerou apenas as distâncias entre as FS e a usina, que tem efeito importante no sistema.

**Figura 3** - Esquema do sistema de transporte da cana-de-açúcar

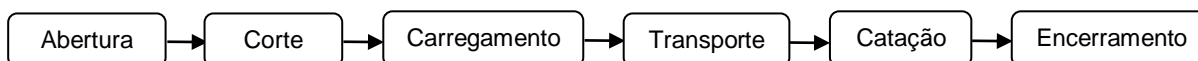


**Fonte:** Adaptado de Rangel *et al.* (2013)

### 3.2 Abastecimento de cana-de-açúcar

O processo logístico para o abastecimento da cana-de-açúcar que sai do campo até chegar à usina é descrito na Figura 4 com a seguinte estrutura: abertura do sistema; corte da cana-de-açúcar; carregamento nos caminhões; transporte para a usina; catação das pontas remanescentes; e encerramento da operação.

**Figura 4** - Etapas para o abastecimento de cana-de-açúcar

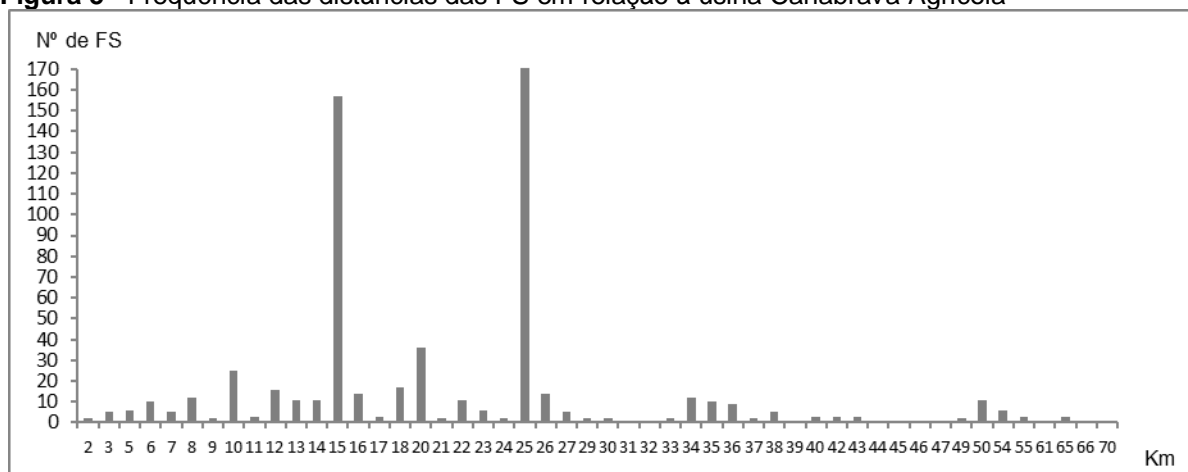


**Fonte:** Elaborado pelos autores

Observe que os processos do CCT são caracterizados por formar um tipo de sistema com operações em série. A primeira etapa do processo, chamada abertura, consiste em um cadastro realizado pela usina contendo os dados pessoais do fornecedor da cana-de-açúcar e de sua propriedade denominada fundo agrícola. Em um segundo caso, o fornecedor da cana-de-açúcar é a própria usina que, mediante o arrendamento de terras, realiza o cultivo da mesma.

Na segunda etapa, é realizado o corte da cana-de-açúcar nas FS, o qual pode ocorrer de forma manual ou mecanizada, com o uso de colheitadeiras. Cada FS possui uma distância diferente em relação à usina, o que influencia no tempo de transporte da carga. A Figura 5 ilustra a distribuição das distâncias entre as FS e a usina e permite observar que 9,81% das FS estão localizadas até 10 km de distância da usina; 49,05% ficam posicionadas até 20 km; 87,70% estão até 30 km; e 94,44% ficam até a distância de 40 km. Ou seja, no caso particular desta usina, a maior parte da matéria-prima está localizada próximo à mesma.

**Figura 5** - Frequência das distâncias das FS em relação à usina Canabrava Agrícola



**Fonte:** Elaborado pelos autores

A terceira etapa compreende a atividade de carregamento da cana-de-açúcar. No corte mecanizado, a colheitadeira realiza simultaneamente as operações de corte e carregamento no caminhão que fica posicionado ao lado da mesma. Já no






corte manual, o carregamento ocorre pelo uso de embarcadeiras que coletam a cana-de-açúcar no solo e a depositam nos caminhões até enchê-los.

Na quarta etapa, realiza-se o transporte da cana-de-açúcar para a usina que ocorre sempre pelo modal rodoviário. Para esta atividade, são utilizados vários tipos de caminhões e reboques de propriedade da usina e/ou terceiros. As composições mais comuns, observadas no Quadro 1, são: caminhão plataforma; caminhão plataforma com um semirreboque acoplado; e cavalo mecânico com dois reboques acoplados.

O tempo de transporte da cana-de-açúcar tem uma relação inversa com a taxa de sacarose. Ou seja, quanto menor for o tempo entre o corte da cana-de-açúcar e o processamento da mesma na usina, maior será o rendimento do processo. Iannoni; Morabito (2002) demonstraram que a gestão do transporte é fundamental para melhorar a eficiência operacional da usina e conferir qualidade à cana-de-açúcar que é transportada. Assim, a estratégia utilizada para configurar o transporte da matéria-prima para a usina tem influência na qualidade do produto e, por sua vez, terá influência também nas emissões geradas pelos veículos no transporte da carga.

**Quadro 1** - Composições de veículos mais comuns utilizados no transporte de cana-de-açúcar

COMPOSIÇÃO	ESQUEMA	DESCRIÇÃO
Truck/Toco/Caminhão simples		Caminhão plataforma
Romeu e Julieta		Caminhão plataforma com um semirreboque acoplado
Rodotrem		Cavalo mecânico com dois reboques acoplados

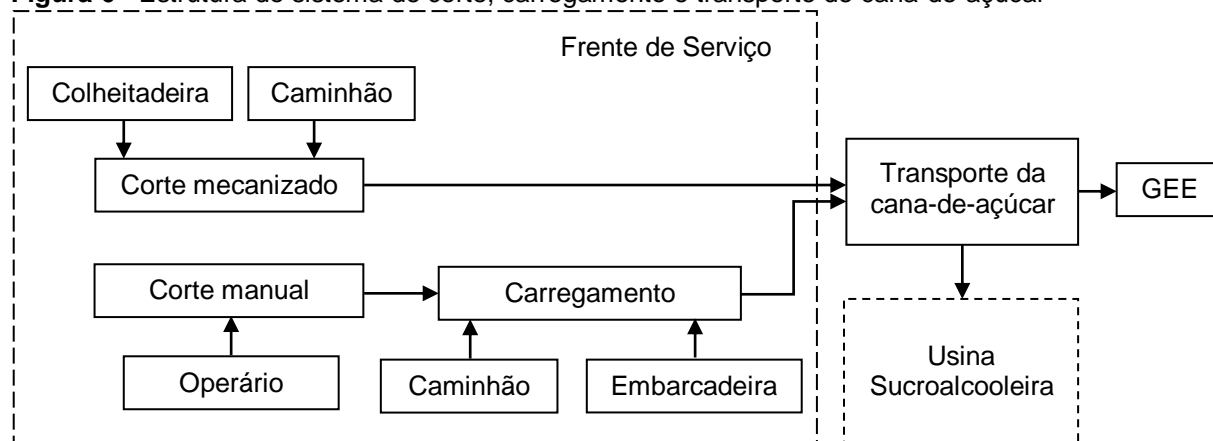
Fonte: Silva (2006)

A quinta etapa compreende a atividade de catação, que, por meio do recolhimento manual de canas remanescentes na FS, visa aproveitar ao máximo a colheita, o que é vantajoso tanto para a usina como para o produtor rural.

Finalmente, na sexta etapa, ocorre o processo de encerramento na usina ao se informar que as atividades em uma determinada FS foram finalizadas. Nesse ponto, é necessária a mudança do local de colheita, visto que a FS já não possui matéria-prima e há outros pontos em espera para alocação de recursos para iniciar a colheita.

O funcionamento geral do sistema de CCT da cana-de-açúcar é representado pelo diagrama da Figura 6. Nesta Figura, observa-se que o corte manual e/ou mecanizado ocorre na FS assim como o carregamento. Os equipamentos utilizados variam de acordo com o tipo de corte, no qual podem ser utilizados caminhões, embarcadeiras e colheitadeiras. Em seguida, o caminhão carregado de cana-de-açúcar efetua o transporte para a usina. Tal atividade provoca emissões de GEE pelas descargas dos caminhões. Nas etapas de corte e carregamento da cana-de-açúcar, esses gases também são emitidos pelo uso de máquinas e equipamentos, entretanto, suas proporções são muito menores quando comparadas às emissões na etapa de transporte, por isso, a análise foi realizada para as emissões de GEE provenientes apenas da etapa de transporte.

**Figura 6** - Estrutura do sistema de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar



Fonte: Elaborado pelos autores

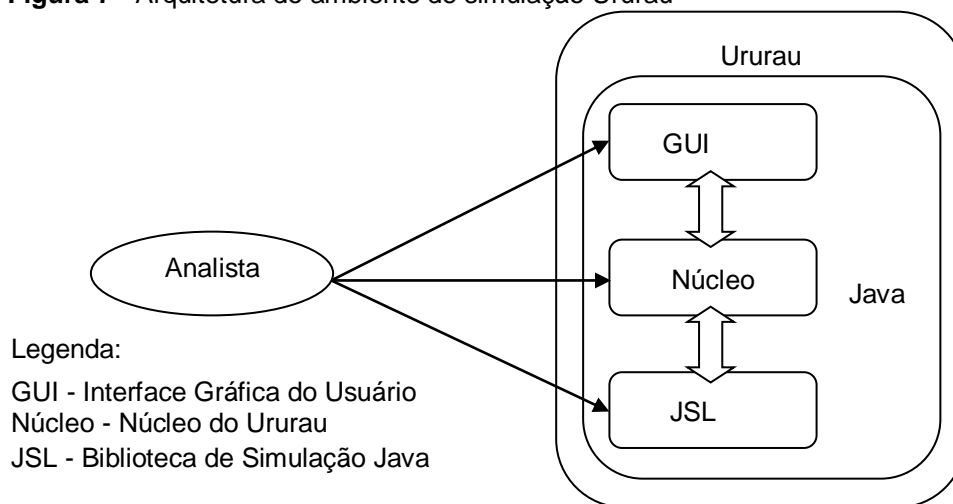
#### 4 O SOFTWARE URURAU

O *software* de simulação utilizado para a construção do modelo presente neste trabalho foi o Ururau. Trata-se de um *Free and Open-Source Software* (FOSS), isto é, um *software* de código aberto e sem custo de licença que utiliza a biblioteca de *software Java Simulation Library* (JSL) proposta por Rosseti (2008). Conforme apresentado por Peixoto *et al.* (2017), o Ururau é dividido em três camadas ilustradas na Figura 7. A camada inferior faz a conversão do modelo e é composta por uma série de comandos de processos, que utiliza uma sequência de eventos discretos. A camada intermediária, chamada núcleo, é composta por comandos para a criação, por exemplo, de entidades e comandos. Por último, a

camada superior é a conversão do modelo gráfico, que compreende um gráfico dirigido a uma sequência de comandos no núcleo do Ururau e facilita a criação dos modelos de simulação.

O modelo gráfico do Ururau é baseado em IDEF-SIM, que é uma linguagem utilizada para a descrição conceitual de um modelo de simulação, apresentada em Montevechi *et al.* (2010). Assim, a utilização deste simulador possui uma curva de aprendizagem menor, quando comparado com os demais, pois há uma proximidade entre o modelo conceitual e o modelo computacional. Além disso, o Ururau pode ser utilizado em diversos sistemas, como sistemas logísticos, e possui flexibilidade, tornando o usuário capaz de construir modelos personalizados, por meio da modificação direta do código fonte, para atender às necessidades específicas de um sistema sob análise (PEIXOTO *et al.*, 2017). O *software* Ururau pode ser acessado livremente em <http://ururau.ucam-campos.br/>.

**Figura 7** - Arquitetura do ambiente de simulação Ururau



**Fonte:** Adaptado de Peixoto *et al.* (2017)

O *software* possui, ainda, um módulo específico, chamado Emissões, para calcular as emissões de CO, permitindo contabilizá-las em gramas, conforme ilustrado na Figura 8. Na parte superior, Nome da Variável indica o local onde as variáveis são criadas e manipuladas. Na linha Tempo, é inserido o tempo de transporte, que deve ser informado em horas. Logo abaixo, em Parâmetros de Emissão, deve ser informado o coeficiente de emissões, que varia de acordo com o tipo de veículo em questão, a potência do veículo, a carga e o peso bruto total, que corresponde ao somatório da carga com a massa do veículo.

**Figura 8** - Módulo do Ururau para calcular as emissões de CO

The screenshot shows a software window titled "Emissões". It has a standard Windows-style title bar with minimize, maximize, and close buttons. The main area contains the following fields and labels:

- ID:** A text box containing "C1".
- Name:** A text box containing "Atribuição1".
- Nome da Variável:** A text box containing "var1".
- Tempo(h):** A text box containing "0".
- Parametros de Emissão:** A sub-section containing four text boxes:
  - Coeficiente de Emissões(g/kW.h):** Contains "1.0".
  - Potência(kW):** Contains "1.0".
  - Carga(kg):** Contains "0.0".
  - Peso Bruto Total(kg):** Contains "0.0".

At the bottom right of the window are two buttons: "ok" and "Cancel".

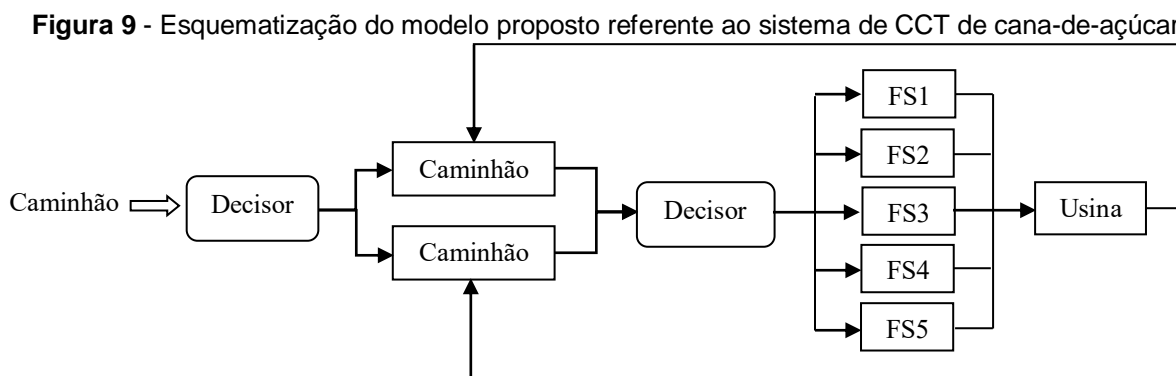
Fonte: Software Ururau

## 5 MODELO DE SIMULAÇÃO

A construção do modelo de simulação seguiu a metodologia proposta por Banks *et al.* (2010), em que foram cumpridos os seguintes passos: formulação do problema; definição do objetivo e plano geral do projeto; elaboração do modelo conceitual; coleta de dados; tradução do modelo conceitual; verificação; validação; experimentação; execução e análise; rodadas; documentação e relatório e implementação. A etapa de verificação seguiu as etapas sugeridas por Sargent (2013) e a validação do modelo ocorreu pela comparação entre o modelo computacional e o sistema real.

O modelo foi elaborado com base no sistema típico de CCT de cana-de-açúcar ilustrado na Figura 3, seção 3.1 (Localização e funcionamento da usina). A Figura 9 ilustra, de forma esquemática, como foi construído o modelo e apresentam-se os seguintes elementos: caminhão, decisor, FS e usina. O funcionamento desse sistema de transporte ocorre da seguinte maneira: o caminhão chega ao decisor para direcionar qual o tipo de veículo a ser usado para o transporte, em seguida, outro decisor direciona o caminhão para uma das FS. Esse desvio ocorre de acordo com as características de cada FS, que se referem à distância entre esta e a usina, à potência do veículo e à carga transportada pelo caminhão. A seguir, em cada FS

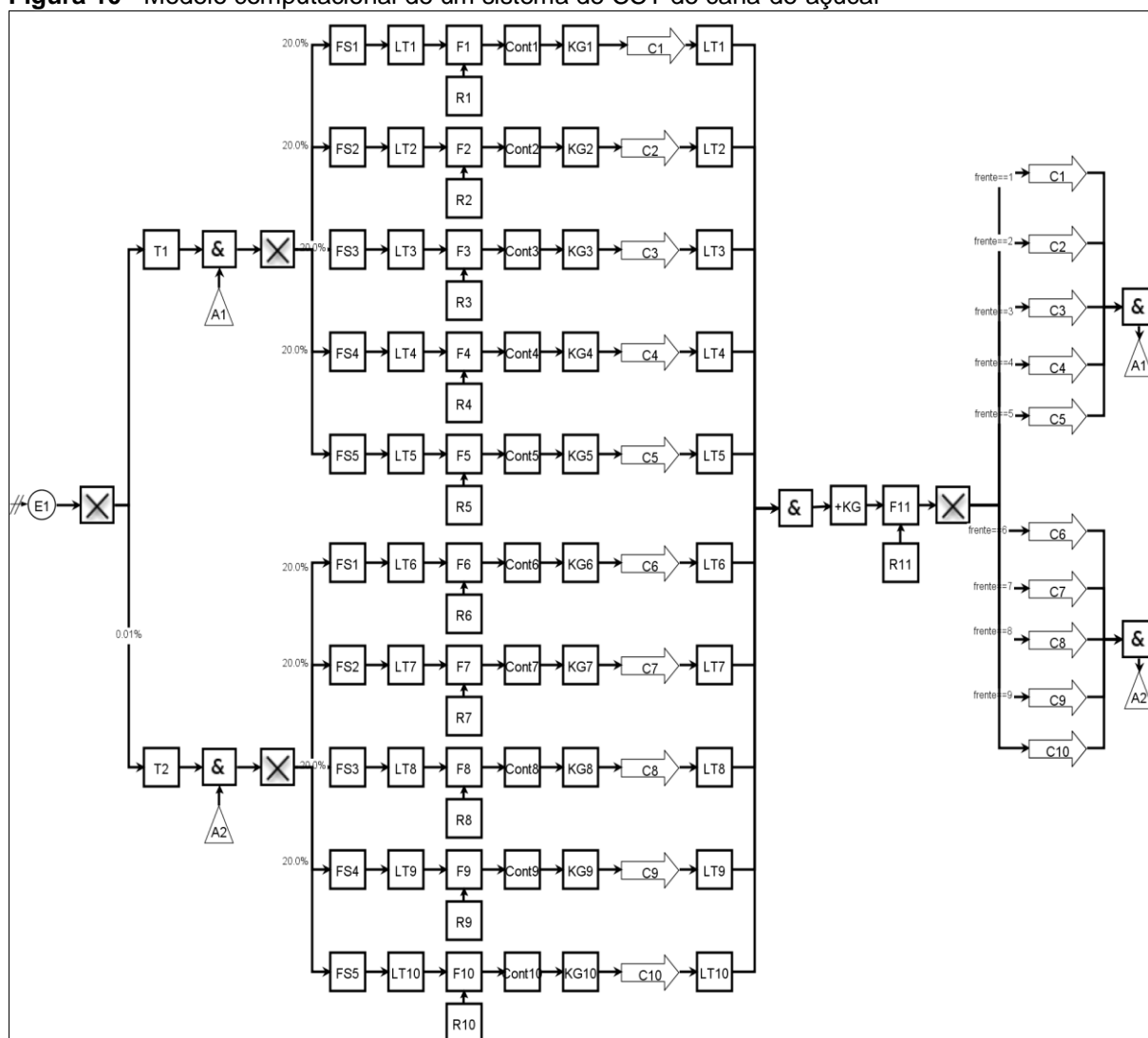
(FS1, FS2, FS3, FS4 e FS5), é realizado o embarque da cana-de-açúcar, e o caminhão se dirige para a usina transportando a carga. Ao chegar à usina, ocorre o desembarque da cana-de-açúcar e, posteriormente, o caminhão retorna à FS para realizar outro carregamento.



**Fonte:** Elaborado pelos autores

O sistema do problema proposto foi traduzido para o modelo computacional no Ururau, conforme ilustrado na Figura 10. O módulo E1 é responsável por criar os caminhões canavieiros, restringidos ao número máximo de 150 veículos. O modelo utilizou cinco FS ativas (FS1, FS2, FS3, FS4 e FS5), localizadas em pontos distintos. Os carregamentos realizados pelas FS são representados por F1/F6, F2/F7, F3/F8, F4/F9, F5/F10, enquanto F11 representa o processo de descarregamento na usina. Os recursos R1/R6, R2/R7, R3/R8, R4/R9 e R5/R10 são as equipes de carregamento que incluem máquinas e operários, enquanto R11 compreende os recursos necessários para o descarregamento. Os módulos C1/C6, C2/C7, C3/C8, C4/C9, C5/C10 realizam o cálculo das emissões de CO. KG1/KG6, KG2/KG7, KG3/KG8, KG4/KG9 e KG5/KG10 são responsáveis por calcular a quantidade de cana-de-açúcar que cada caminhão transporta em cada FS. O módulo +KG é utilizado para obter, ao final do experimento, o total de carga transportada pelos caminhões considerando todas as frentes. Os contadores (Cont1/Cont6, Cont2/Cont7, Cont3/Cont8, Cont4/Cont9 e Cont5/Cont10) armazenam a quantidade de caminhões que passam por cada FS. Os módulos LT1/LT6, LT2/LT7, LT3/LT8, LT4/LT9 e LT5/LT10 realizam o cálculo do tempo de transporte, que representa o percurso entre cada FS e a usina e vice-versa. Os módulos com a marcação de “X” são os decisores para desvio de fluxo. Os parâmetros da simulação podem ser vistos de forma detalhada no Apêndice A.

**Figura 10** - Modelo computacional de um sistema de CCT de cana-de-açúcar



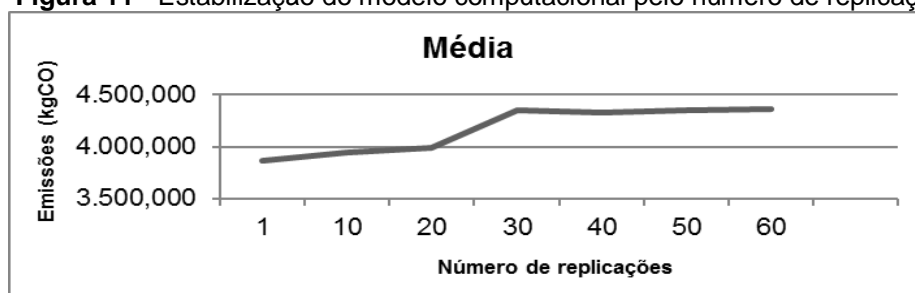
Fonte: Elaborado pelos autores por meio do software Ururau

### 5.1 Verificação do modelo de simulação

A verificação de um modelo computacional é realizada para assegurar que a programação utilizada no modelo e sua implementação estejam corretas. Para o presente modelo, foram utilizadas algumas técnicas presentes na literatura apresentadas por Freitas Filho (2008). Foram atribuídos valores determinísticos às variáveis do modelo com o objetivo de prever as respostas do sistema e verificar a presença de erros nos seus vários módulos. A construção do modelo ocorreu de forma gradativa, a fim de se observar e capturar quaisquer mudanças acentuadas nos resultados que caracterizassem erros no programa. Variações sobre os dados de entrada indicaram as respostas do modelo adequadas e consistentes. A lógica da modelagem foi testada e os resultados obtidos demonstraram que o modelo realizou

o pretendido. Cada rodada do modelo foi processada com 50 replicações de 168 horas, a fim de representar uma semana de trabalho contínuo. O número de replicações foi determinado quando os resultados dos valores médios da variável *emissions* convergiram apresentando erro de 9 %. A Figura 11 mostra o processo de estabilização dos valores das replicações. Para isso, foram realizados testes no intervalo de 1 a 60 replicações, observando os resultados da variável emissões, em kgCO.

**Figura 11** - Estabilização do modelo computacional pelo número de replicações



Fonte: Elaborado pelos autores por meio das simulações realizadas no *software* Ururau

## 5.2 Validação do modelo de simulação

De acordo com Sargent (2013), a validação de um modelo computacional determina se o comportamento da saída do modelo de simulação possui a precisão requerida para a finalidade a qual se destina. O modelo computacional foi validado pela comparação dos resultados obtidos com dados do sistema real. A variável escolhida para validação foi a quantidade de cana-de-açúcar transportada das FS para a usina durante uma semana de trabalho contínuo cujo total é de 168 horas. Pela comparação entre a quantidade de cana-de-açúcar transportada no sistema real e a quantidade transportada no modelo, é possível mostrar a confiabilidade do modelo e prosseguir para a etapa dos experimentos. O modelo apresentou convergência com 50 replicações, logo, foram utilizados os valores absolutos das 8 replicações posteriores à estabilização (ou seja, da replicação 51 a 58). A Tabela 1 mostra a quantidade de cana-de-açúcar transportada, em toneladas, obtida pelo modelo, e as toneladas transportadas durante os meses de agosto e de setembro de 2015, mostradas por semana, com um total de oito semanas.

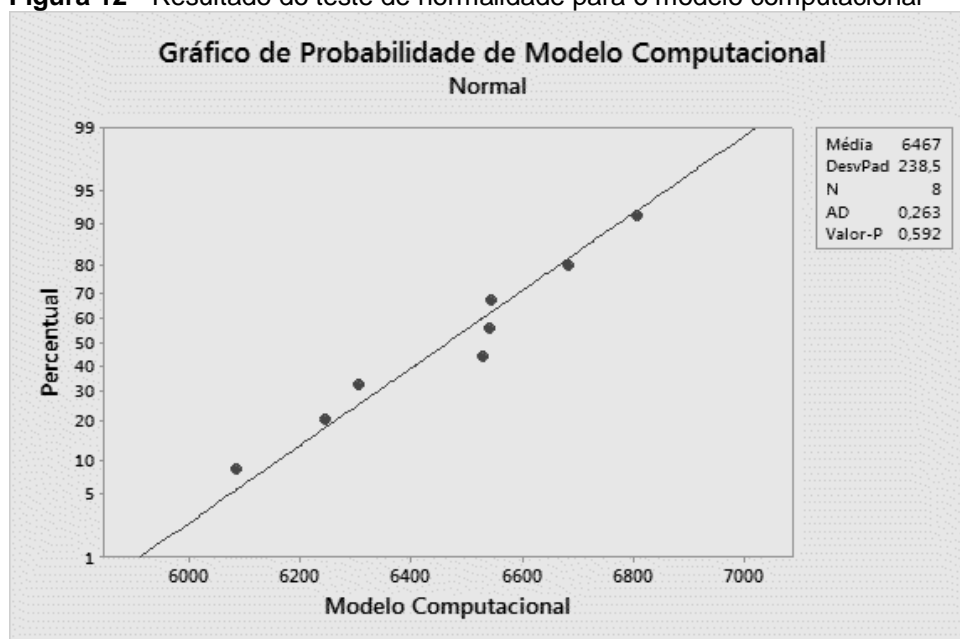
**Tabela 1** - Resultados gerados pelo Ururau comparado com o sistema real

Replicação	Total transportado no modelo computacional (toneladas/semana)	Semana	Total transportado no sistema real (toneladas/semana)
1	6244,000	1	4455,075
2	6530,000	2	4368,055
3	6682,000	3	11579,558
4	6542,000	4	6315,685
5	6086,000	5	2.347,60
6	6806,000	6	1.237,32
7	6304,000	7	2.954,25
8	6544,000	8	5.397,19
<b>Média</b>	<b>6467,250</b>		<b>4831,842</b>

**Fonte:** Elaborado pelos autores por meio das simulações realizadas no *software* Ururau

Sargent (2013) ainda relata que existem várias técnicas de validação de modelagem presentes na literatura. Nesta pesquisa, a validação do modelo computacional foi feita utilizando a técnica estatística do Teste de Hipóteses. Por meio do teste, é possível validar o modelo, isto é, mostrar que ele corresponde à realidade. Inicialmente, realizou-se o Teste de Normalidade para verificar se os dados tanto do modelo computacional como do sistema real seguiam uma distribuição normal. Em ambas as distribuições, o Valor-P alcançado foi superior ao nível de significância adotado de 0,05, mostrando que as distribuições de resultados podiam ser aproximadas por uma distribuição normal. Tais testes foram realizados pelo *software* MiniTab® versão 16, e os resultados estão apresentados nas Figuras 12 e 13.

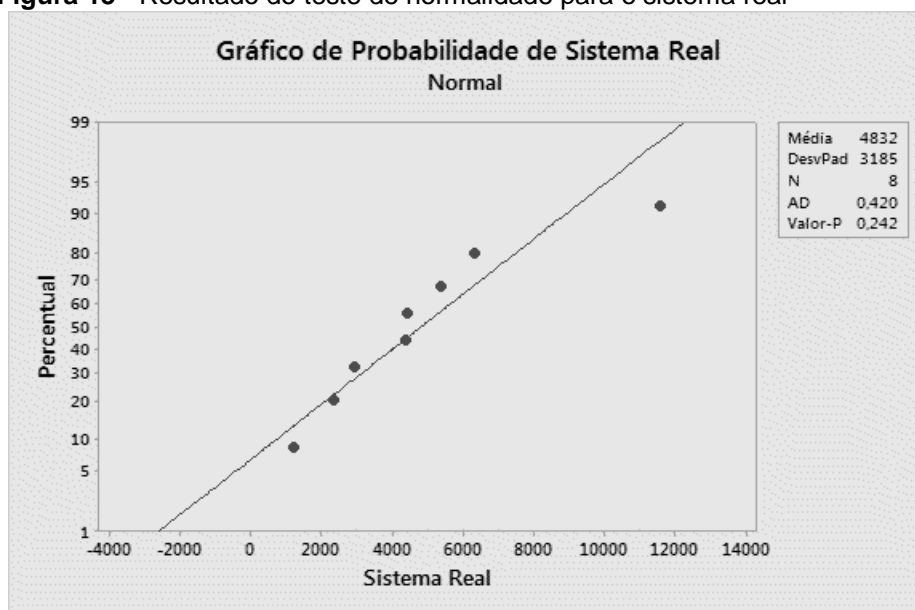
**Figura 12** - Resultado do teste de normalidade para o modelo computacional



**Fonte:** Elaborado pelos autores por meio do *software* MiniTab® 16



**Figura 13** - Resultado do teste de normalidade para o sistema real



**Fonte:** Elaborado pelos autores por meio do *software* MiniTab® 16

O passo seguinte foi comparar as médias do modelo computacional com o sistema real mediante o Teste de Hipóteses ou Teste T. Este teste traz a hipótese nula de que as médias são iguais e a hipótese alternativa de que as médias não são iguais. Para este teste, o nível de significância adotado foi de 0,05, e o resultado desta análise mostrou o Valor-P superior ao nível de significância adotado, aceitando a hipótese nula de que as médias são iguais. Tais resultados são apresentados nas Figuras 14, 15 e 16.

**Figura 14** - Resultado do Teste T analisando a média do modelo computacional com a média do sistema real

Teste T para 2 amostras para Modelo Computacional vs Sistema Real				
	N	Média	DesvPad	EP Média
Modelo Computacional	8	6467	238	84
Sistema Real	8	4832	3185	1126

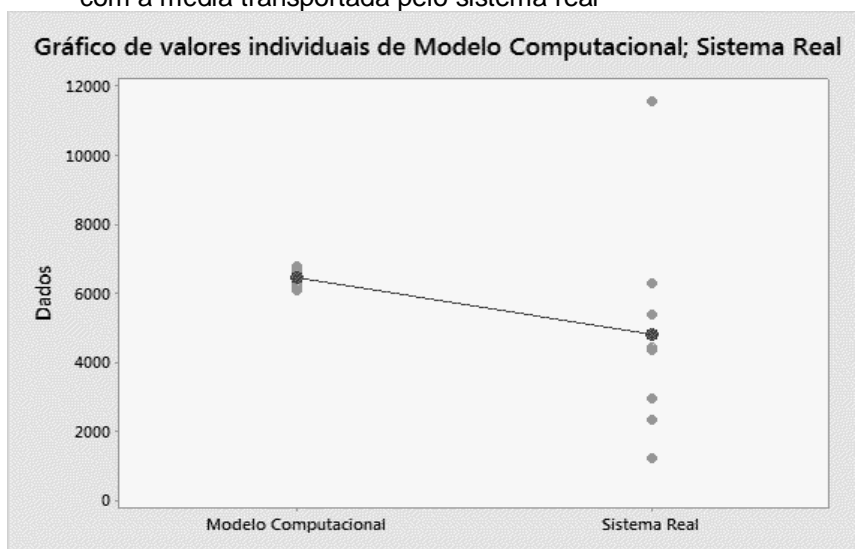
Diferença =  $\mu$  (Modelo Computacional) -  $\mu$  (Sistema Real)  
 Estimativa para a diferença: 1635  
 IC de 95% para a diferença: (-1035; 4306)  
 Teste T de diferença = 0 (versus  $\neq$ ): Valor T= 1,45 valor-P = 0,191 GL = 7

**Fonte:** Elaborado pelos autores por meio do *software* MiniTab® 16

Por meio dos gráficos observados, pode-se concluir a validação do modelo computacional proposto, pela igualdade entre a média desse modelo e a média do sistema real. O Valor-P apresentado de 0,191 maior que 0,05 indica a igualdade

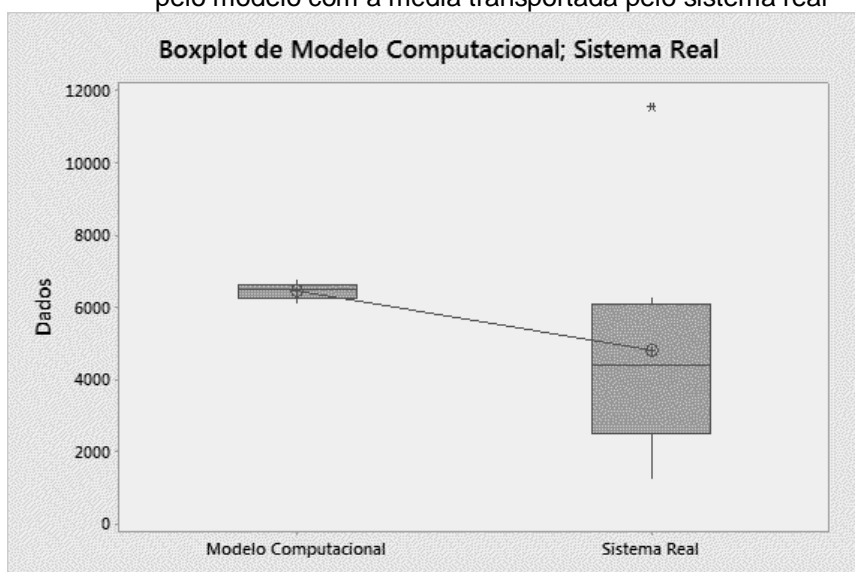
entre as médias. Desta forma, o modelo computacional presente nesta SED está estatisticamente validado e os resultados condizem com o sistema real.

**Figura 15** - Gráfico individual analisando a média da quantidade transportada pelo modelo com a média transportada pelo sistema real



Fonte: Elaborado pelos autores por meio do *software* MiniTab® 16

**Figura 16** - Gráfico Boxplot com a comparação da média da quantidade transportada pelo modelo com a média transportada pelo sistema real



Fonte: Elaborado pelos autores por meio do *software* MiniTab® 16

## 6 EXPERIMENTOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

A execução do modelo de simulação foi realizada em uma máquina Dell com processador ADM Athlon™ 64 X2 Dual Core Processador 4200+ 2.20 GHz, Sistema Operacional Windows 7 Professional 64 bits. O modelo foi executado com o tamanho da rodada equivalente a 168 horas, o que corresponde a uma semana de

operação do sistema onde os veículos circulavam em regime contínuo para o abastecimento da usina. Cada rodada do modelo foi processada com 50 replicações. Este número de replicações foi determinado quando os resultados apresentaram convergência, com erro de 9%. O tempo total de simulação processado pela máquina foi de 12 segundos. Os cenários foram configurados de modo a se poder avaliar a estrutura do transporte da carga e considerar variáveis de desempenho e emissões de GEE.

## **6.1 Cenários simulados**

Os cenários consideraram as distâncias entre as FS e a usina, as potências dos veículos utilizados para o carregamento e o transporte da cana-de-açúcar, os coeficientes de emissões dos caminhões, a carga transportada, o peso bruto total (somatório entre a carga e a massa do veículo) e os tempos de carregamento e descarregamento da matéria-prima. As variáveis analisadas em todos os cenários foram: Tempo de Transporte (TT, h), Emissões de GEE (EM, gCO) e Carga Transportada (CT, t). O TT representa o tempo de carregamento na FS somado ao tempo de transporte da carga da respectiva FS até a usina. Ainda sobre a variável TT, pode-se dizer que ela é um importante indicador associado à qualidade da cana-de-açúcar. Ou seja, quando determinada quantidade de cana-de-açúcar chega até a usina em tempo menor, indica que tal quantidade pode ter um melhor teor de sacarose e, assim, ter sua produtividade mais elevada durante o processamento na usina. Isso devido ao fato de que a cana-de-açúcar inicia autocatálise de açúcar imediatamente após o seu corte, sendo tal catálise indesejada porque reduz a qualidade da matéria-prima após 24 horas e a torna inviável para moer após 72 horas de armazenamento. Nos cinco cenários o tempo de tráfego considerado foi de 168 horas.

### **Cenário 1**

Este cenário considerou cinco FS localizadas em pontos distintos com o transporte de cana-de-açúcar realizado por caminhões plataformas, cuja capacidade de carga é de 32 toneladas e a potência, de 202 kW.

## **Cenário 2**

Este cenário também considerou as mesmas cinco FS, contudo, neste caso, o transporte da cana-de-açúcar para a usina foi realizado por caminhões do tipo cavalo mecânico, cuja capacidade de carga é de 34 toneladas e a potência, de 324 kW.

## **Cenário 3**

O terceiro cenário trouxe uma combinação dos dois anteriores, isto é, foram utilizados tanto caminhões plataforma como caminhões do tipo cavalo mecânico (50% de cada tipo de veículo). Sendo assim, a potência dos caminhões variou, podendo ser 202 kW e 324 kW, assim como a capacidade de carga que foi de 32 toneladas e 34 toneladas.

## **Cenário 4**

O quarto cenário teve como foco simular o transporte da cana-de-açúcar considerando basicamente um aumento da distância percorrida pelos caminhões para transportar a matéria-prima da lavoura até a usina. Esse cenário manteve todos os parâmetros que foram utilizados no cenário 1, exceto a distância entre a FS e a usina que foi triplicada.

## **Cenário 5**

O quinto e último cenário simulado também teve por objetivo considerar o aumento da distância percorrida pelos caminhões para transportar a cana-de-açúcar para a usina. Esse cenário manteve todos os parâmetros utilizados no cenário 2, exceto a distância entre a FS e a usina, que foi triplicada.

A opção por simular os cenários 4 e 5 ocorreu devido à característica apresentada pela distribuição das lavouras que servem como fonte de matéria-prima para a usina investigada neste estudo. Ao se observar a Figura 5, percebe-se que a maior parte das lavouras está localizada mais próxima à referida usina. Esta característica pode não ser um fato recorrente para outras usinas. Ou seja, outras usinas podem possuir a maior parte de suas lavouras mais próximas ou mais distantes. Assim, optou-se por simular uma quantidade de cana-de-açúcar localizada em lavouras mais distantes da usina e avaliar o impacto que pode acontecer nas

variáveis analisadas (EM, TT e CT) devido a esta característica. Para facilitar o entendimento sobre cada cenário simulado neste estudo, a Tabela 2 apresenta uma síntese com as características de cada cenário.

**Tabela 2** - Visão geral dos cinco cenários simulados

<b>Características</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>	<b>Cenário 5</b>
<b>Tipo de veículo</b>	Caminhão plataforma	Cavalo mecânico	Caminhão plataforma e Cavalo mecânico	Caminhão plataforma	Cavalo mecânico
<b>Capacidade de carga</b>	32 toneladas	34 toneladas	32 toneladas e 34 toneladas	32 toneladas	34 toneladas
<b>Potência do veículo</b>	202kW	324kW	202kW e 324kW	202kW	324kW
<b>Tempo de tráfego</b>	168 horas	168 horas	168 horas	168 horas	168 horas
<b>Distância<sup>(1)</sup>(<sup>2</sup>) das FS até a usina</b>	<sup>1</sup> No modelo proposto, a distância entre cada FS e a usina é expressa por uma função (em horas) dentro do <i>template</i> das emissões.			<sup>2</sup> As funções (em horas) dentro do <i>template</i> das emissões utilizadas nos cenários 1, 2 e 3 foram utilizadas nos cenários 4 e 5 multiplicadas pelo número 3.	
<b>Variáveis analisadas</b>	EM (gCO) TT (h) CT (t)	EM (gCO) TT (h) CT (t)	EM (gCO) TT (h) CT (t)	EM (gCO) TT (h) CT (t)	EM (gCO) TT (h) CT (t)

Fonte: Elaborado pelos autores

## 6.2 Resultados e discussão

A Tabela 3 apresenta os resultados de cada um dos cenários do experimento simulado e suas respectivas FS, considerando-se as variáveis de saída EM (gCO), TT (h) e CT (t), além do somatório dos cinco cenários para cada variável.

Os resultados encontrados na Figura 17 mostram que a utilização apenas de caminhões do tipo plataforma (cenários 1 e 4) geraram menores níveis de EM quando comparados com os cenários 2 e 5 (caminhões do tipo cavalo mecânico). A substituição de veículos menores por veículos maiores aumentou as EM em ambos os casos. O terceiro cenário composto por frota mista, dividida em 50% para cada tipo de caminhão, ocupou uma posição intermediária nos níveis de EM, em relação aos demais cenários. Os cenários 4 e 5 apresentaram as maiores EM devido à distância percorrida pelos veículos ter sido aumentada.

**Tabela 3** - Resultados dos cinco cenários simulados

<b>Frentes de Serviço</b>	<b>Variáveis de saída</b>	<b>Cenário 1</b>	<b>Cenário 2</b>	<b>Cenário 3</b>	<b>Cenário 4</b>	<b>Cenário 5</b>
<b>FS 1</b>	EM (gCO)	13.197,436	19.583,270	16.720,092	41.269,959	58.906,681
	TT (h)	1,649	1,651	1,902	2,338	2,284
	CT (t)	1.212,160	1.285,880	1.270,720	1.258,240	1.285,200
<b>FS 2</b>	EM (gCO)	9.612,241	14.206,628	12.005,891	27.228,687	42.721,619
	TT (h)	1,372	1,368	1,652	1,876	1,880
	CT (t)	1.242,880	1.316,480	1.290,240	1.206,400	1.314,440
<b>FS 3</b>	EM (gCO)	3.671,797	5.495,178	4.671,813	11.143,287	16.919,912
	TT (h)	1,175	1,164	1,294	1,371	1,403
	CT (t)	1.242,880	1.317,160	1.295,520	1.254,400	1.324,640
<b>FS 4</b>	EM (gCO)	12.442,911	18.562,310	15.339,375	37.451,962	55.859,261
	TT (h)	1,487	1,497	1,826	2,272	2,308
	CT (t)	1.252,480	1.328,040	1.276,12	1.237,120	1.335,520
<b>FS 5</b>	EM (gCO)	11.934,558	26.956,189	18.938,869	36.574,052	59.608,599
	TT (h)	1,745	1,728	1,952	2,356	2,314
	CT (t)	1.255,040	1.331,440	1.275,320	1.269,120	1.345,720
<b>Total</b>	<b>EM (gCO)</b>	50.858,943	84.803,575	67.676,04	153.667,947	234.016,072
	<b>TT (h)</b>	7,428	7,408	8,625	10,213	10,189
	<b>CT (t)</b>	6.205,440	6.579,000	6.407,920	6.225,280	6.605,520

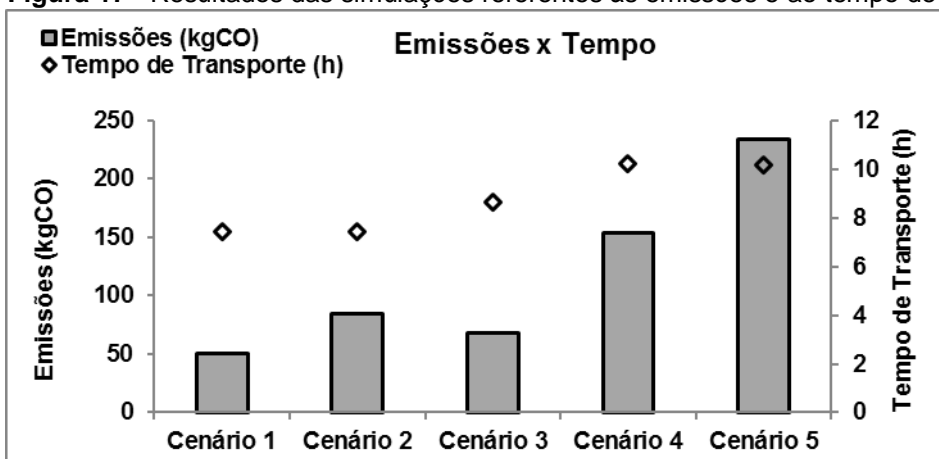
**Fonte:** Elaborado pelo autor por meio das simulações realizadas no *software* Ururau

Ainda na Figura 17, o TT, entre os cenários 1 e 2, não variou assim como nos cenários 4 e 5, evidenciando que o tipo de frota empregada para o transporte não exerceu influência sobre o tempo, visto que o trajeto se manteve em ambos os casos. O cenário 3 apresentou TT intermediário em relação aos demais devido ao uso de frota mista, representando, então, uma situação flexível para as usinas em termos de sustentabilidade e desempenho. Esse cenário representa a situação real vista em usinas, de modo geral, que empregam diferentes tipos de veículos, os quais, mesmo emitindo mais gases, são comumente usados devido à sua versatilidade. O emprego de caminhões mais potentes, entretanto, que não são mais rápidos, provoca um aumento nos níveis de emissões sem proporcionar redução no TT. Como opção, o uso de veículos com potência menor é preferível, pois emitem menos sem comprometer o TT.

Os resultados encontrados na Figura 18 mostram que os cenários 1 e 4 apresentam menores quantidades de CT em relação aos cenários 2 e 5. Já no cenário 3, a CT superou os cenários 1 e 2 sem elevar os níveis de EM. Dos cenários que utilizaram veículos menores (cenários 1 e 4), o primeiro cenário é mais interessante, pois emite menos do que o quarto cenário, sem comprometer a CT. O mesmo ocorre com os cenários que utilizam veículos maiores (cenários 2 e 5), onde o segundo cenário se mostra mais interessante do ponto de vista das EM sem reduzir a CT. O emprego de caminhões mais potentes, como ocorreram nos

cenários 2 e 5, mas que não são capazes de transportar quantidades superiores de carga, provoca um aumento injustificado nos níveis de emissões sem proporcionar ganho de escala.

**Figura 17** - Resultados das simulações referentes às emissões e ao tempo de transporte



**Fonte:** Elaborado pelos autores por meio das simulações realizadas no *software* Ururau

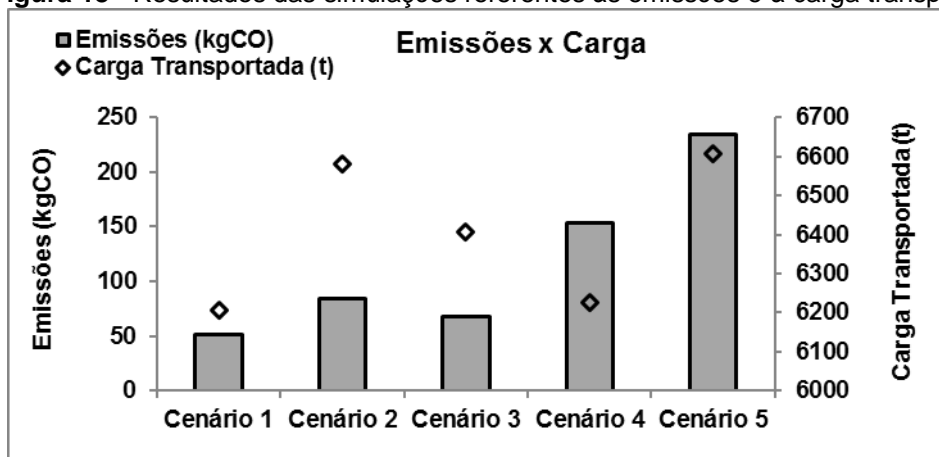
Em relação às distâncias entre as lavouras e as FS, percebeu-se que a variação das emissões dos dois cenários mais distantes (cenários 4 e 5) foi maior, correspondendo a 80.348,125 gCO, enquanto a variação entre os dois cenários mais próximos (cenários 1 e 2) foi menor, correspondendo a 33.944,632 gCO. Assim, o impacto na decisão sobre qual tipo de veículo deve ser escolhido para transportar a cana-de-açúcar aumentou à medida que as lavouras se distanciaram da usina. Isto é, para lavouras mais distantes, o impacto nas emissões devido à escolha do veículo mostrou-se maior.

As emissões de GEE representam um aspecto ambiental amplamente discutido em diversos países, com o objetivo de elaborar estratégias e metas capazes de mitigar as emissões sem conter o desenvolvimento da sociedade e as tecnologias. O mundo tem conseguido reduzir os níveis de emissões de CO<sub>2</sub> devido ao crescente apelo relacionado ao aquecimento global. O relatório *World Energy Outlook/WEO* (2015) da IEA (2015), demonstrou que há um possível desacoplamento entre expansão econômica e emissões de GEE pelo segundo ano consecutivo (2014 e 2015).

Neste contexto, o Brasil é destacado como o país que pode liderar esta transformação devido ao seu alto potencial de fontes energéticas renováveis, principalmente pelo uso do etanol. Apesar da atual redução do interesse pelo etanol

de primeira geração, este pode voltar a crescer no caso de o etanol de segunda geração apresentar viabilidade econômica. Além da modernização de veículos e uso de fontes renováveis, a reestruturação dos sistemas de transporte é vista como um importante mecanismo para uma economia de baixo carbono.

**Figura 18** - Resultados das simulações referentes às emissões e à carga transportada



Fonte: Elaborado pelos autores por meio das simulações realizadas no *software* Ururau

Por fim, os autores reconhecem a possibilidade de existirem erros nos valores absolutos das emissões calculadas. Um refinamento na modelagem do cálculo das emissões pode minimizar este erro. No entanto, a questão central desta análise está no valor relativo encontrado com respeito ao funcionamento do transporte e às variações geradas nas respectivas emissões gasosas. Nota-se que as emissões médias estão expressas em kgCO pela facilidade em calculá-las, contudo, por analogia é possível compreender o comportamento das emissões dos demais gases.

## 7 CONCLUSÕES

Este trabalho analisou as emissões de gases do efeito estufa em um sistema logístico sucroalcooleiro utilizando Simulação a Eventos Discretos. Com relação aos resultados obtidos, os principais elementos demonstrados referem-se às variáveis simuladas: emissões de gases, tempo de transporte e carga transportada. Em relação às emissões, percebeu-se a utilização de caminhões mais potentes, mas que, por não transportarem quantidades maiores, não apresentam vantagens ambientais. Outro fator relacionado às emissões refere-se às distâncias às quais as fontes produtoras se encontram da usina. Observou-se que, quando se aumentou a



distância percorrida pelo veículo, as taxas de emissões aumentaram significativamente. Com isso, concluiu-se que, no caso de uma usina possuir a maior parte de suas lavouras mais distantes, como ocorreu nos cenários 4 e 5, é preferível a utilização de caminhões com potência menor ou caminhões que, mesmo sendo mais potentes, possam transportar quantidades de cargas mais elevadas. O aumento do tempo de transporte não se mostrou na mesma proporção que as emissões. Já em relação à carga transportada, esta não apresentou variações expressivas, devido à proximidade entre os valores das capacidades de carga de ambos os tipos de veículos utilizados para o transporte da cana-de-açúcar.

Além disso, foi possível utilizar dados reais obtidos por meio de pesquisa de campo em uma usina sucroalcooleira para elaborar e validar o modelo computacional. Para isso, foi empregado o *software* livre e de código aberto Ururau que, apesar de ser um *software* embrionário, se mostrou eficiente e versátil, com baixo custo, correspondendo à expectativa de simular um sistema logístico e poder ser validado com dados de um sistema real. Não obstante, outros *softwares* de simulação também são capazes de realizar esses estudos.

O modelo de simulação desenvolvido neste estudo colaborou com a possibilidade levantada de se reestruturar um sistema logístico adaptando-se seus cenários de modo que seja possível alcançar uma economia de baixo carbono. Os resultados das simulações indicaram a possibilidade de redução de emissões de CO<sub>2</sub> e outros gases do efeito estufa sem a necessidade de elevados investimentos tecnológicos, apenas pela reorganização do sistema de transporte. Desta forma, conclui-se que a utilização adequada dos veículos pode reduzir as emissões geradas sem a necessidade de investimentos elevados.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) pelo apoio financeiro para esta pesquisa. Agradecem, ainda, à direção da Usina Canabrava Agrícola pelo fornecimento de dados, ao professor Eduardo Shimoda por sua ajuda na elaboração de gráficos e a Maria Marta Garcia por sua ajuda na tradução para o inglês de partes do texto.

## REFERÊNCIAS

- ARJONA, E.; BUENO, G.; SALAZAR, L. An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 32, n. 3, p. 247–264, 2001. [http://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00168-5](http://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00168-5)
- BANKS J.; CARSON J.S.; NELSON B.L.; NICOL, D. Discrete-event System Simulation, (2 ed ). Prentice-Hall: Englewood Cliffs, NJ, 210.
- BYRNE, P. J. HEAVEY, C.; RYAN, P.; LISTON, P. Sustainable supply chain design: Capturing dynamic input factors. **Journal of Simulation**, v. 4, n. 4, p. 213–221, 2010. <http://doi.org/10.1057/jos.2010.18>
- DAGKAKIS, G.; HEAVEY, C. A review of open source discrete event simulation software for operations research. **Journal of Simulation**, p. 1–14, 2015. <http://doi.org/10.1057/jos.2015.9>
- FAHIMNIA, B.; SARKIS, J.; ESHRAGH, A. A tradeoff model for green supply chain planning:A leanness-versus-greenness analysis. **Omega**, v. 54, p. 173–190, jul. 2015. <http://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.014>
- FIORONI, M. M.; SILVA, D. J. da; FRANZESE, L. A. G.; CERQUEIRA, M. J. B.; ALMEIDA, D. de A. de A. Modeling the sugar cane logistics from farm to mill. 2013 Winter Simulations Conference (WSC). **Anais...IEEE**, dez. 2013.
- FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas com aplicações arena**. 2. ed. São Paulo: Visual Books, 372, 2008.
- IANNONE, R. MIRANDA, S.; PRISCO, L.; RIEMMA, S.; SARNO, D. Proposal for a flexible discrete event simulation model for assessing the daily operation decisions in a Ro–Ro terminal. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 61, p. 28–46, fev. 2016. <http://doi.org/10.1016/j.simpat.2015.11.005>
- IANNONI, A. P.; MORABITO, R. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 2, p. 107–128, 2002. <http://doi.org/10.1590/S0104-530X2002000200002>
- IEA statistics. CO2 emissions from fuel combustion – highlights; 2015.<<http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>>.
- JAEGLER, A.; BURLAT, P. Carbon friendly supply chains: a simulation study of different scenarios. **Production Planning & Control**, v. 23, n. 4, p. 269–278, abr. 2012. <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2011.627656>
- JAEGLER, A.; BURLAT, P. What is the impact of sustainable development on the re-localisation of manufacturing enterprises? **Production Planning and Control**, v. 25, n. 11, p. 902–911, 2014. <http://dx.doi.org/10.1080/09537287.2013.776126>
- LÄTTILÄ, L.; HENTTU, V.; HILMOLA, O.-P. Hinterland operations of sea ports do matter: Dry port usage effects on transportation costs and CO2 emissions. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 55, p. 23–42, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.007>

LONGO, F. Sustainable supply chain design: an application example in local business retail. **SIMULATION**, v. 88, n. 12, p. 1484–1498, 2 out. 2012. <http://doi.org/10.1177/0037549712458983>

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F. de; COSTA, R. F. da S.; OLIVEIRA, M., L., M. de; SILVA, A. L. F. da. **Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: An application in a Brazilian tech company**. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. **Anais...IEEE**, dez. 2010.

PEIXOTO, T. A.; RANGEL, J. J. DE A.; MATIAS, Í. DE O.; DA SILVA, F. F.; TAVARES, E. R. Ururau: a free and open-source discrete event simulation software. **Journal of Simulation**, 2017. <http://doi.org/10.1057/s41273-016-0038-5>

RANGEL, J. J. de A.; PEIXOTO, T. A.; MATIAS, I. de O.; SHIMODA, E.; OLIVEIRA, G. L. de.; CARDOSO, L.D. Simulation model in a free and open-source software for carbon monoxide emissions analysis. In **Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference**. **Anais...IEEE**, dez. 2013. <http://doi.org/10.1109/WSC.2013.6721570>

RANGEL, J. J. DE A.; CORDEIRO, A. C. A. Free and Open-Source Software for sustainable analysis in logistics systems design. **Journal of Simulation**, v. 9, n. 1, p. 27–42, 2015. <http://doi.org/10.1057/jos.2014.17>

RICHARDSON, B. C. Sustainable transport: analysis frameworks. **Journal of Transport Geography**, v. 13, n. 1, p. 29–39, mar. 2005. <http://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2004.11.005>

RODRIGUES, A. M.; REBELATO, M. G.; PAIXÃO, R. B. S.; ZEVIANI, C. H. Gestão ambiental no setor sucroenergético: uma análise comparativa. **Produção Online**, p. 1481–1510, 2014. <http://doi.org/10.14488/1676-1901.v14i4.1717>

Rosseti, M. D. Java simulation library (JSL): An open-source object-oriented library for discrete-event simulation in Java. **International Journal of Simulation & Process Modelling**, v. 4, n. 1, p.69–87, 2008. <http://doi.org/10.1504/IJSPM.2008.020614>

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. **Journal of Simulation**, v. 7, n. 1, p. 12–24, 7 dez. 2013. <http://doi.org/10.1057/jos.2012.20>

SCHEIDL, H. A.; SIMON, A. T.; PACAGNELLA JUNIOR, A. C.; SALGADO JÚNIOR, A. P. Environmental impacts of mechanization in Brazil's sugar and ethanol industry: The cutting, loading, and transportation process case. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, p. n/a–n/a, 9 jun. 2015. <http://doi.org/10.1002/ep.12159>

SILVA, J. E. A. R. da. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar**. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.



Artigo recebido em 04/05/2016 e aceito para publicação em 29/04/2017  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v17i2.2447>

**APÊNDICE A - Módulos do Ururau com descrição e dados de configuração**

Módulo		Nome	Descrição	Dados de configuração
Criar	E1		Criação de entidades	T. chegadas: EXPO(0.298) T. prim. chegada: 0.5h Máx. chegadas: 150 entidades
Decisor	X		Desvio de execução de padrão	Tipo: 2 caminhos por condição Tipo: N caminhos por condição Tipo: N caminhos por condição Tipo: N caminhos por condição
Carregamento1	F1, F6	Execução de processo		Tipo: Expressão Valor: GAMM(0.763,1.37)
Carregamento2	F2, F7			Tipo: Expressão Valor: TRIA(0.26,0.881,2)
Carregamento3	F3, F8			Tipo: Expressão Valor: GAMM(0.275,3.84)
Carregamento4	F4, F9			Tipo: Expressão Valor: LOGN(1.08,0.582)
Carregamento5	F5, F10			Tipo: Expressão Valor: GAMM(0.237,5.23)
Descarregamento	F11			Tipo: Expressão Valor: LOGN(3.62,3.71)
Recurso do carregamento1	R1	Adição de recurso		Capacidade: 1
Recurso do carregamento2	R2			
Recurso do carregamento3	R3			
Recurso do carregamento4	R4			
Recurso do carregamento5	R5			
Recurso do carregamento1	R6			
Recurso do carregamento2	R7			
Recurso do carregamento3	R8			
Recurso do carregamento4	R9			
Recurso do carregamento5	R10			

Recurso do descarregamento	R11		
Emissão1	C1	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission1  Tempo(h):  TRIA(1.08,1.33,1.9)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 32000kg  Peso Bruto Total: 42000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission1  Tempo(h): TRIA(0.33,0.88,2)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 10000kg  Peso Bruto Total: 42000kg</p>
Emissão2	C2	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission2  Tempo(h):  TRIA(0.4,0.787,1.88)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 32000kg  Peso Bruto Total: 42000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission2  Tempo(h):  NORM(0.569,0.162)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 10000kg  Peso Bruto Total: 42000kg</p>

Emissão3	C3	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission3  Tempo(h):  TRIA(0.03,0.313,0.79)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência ( ): 202kW  Carregamento: 32000kg  Peso Bruto Total: 42000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission3  Tempo(h):  TRIA(0.1,0.289,0.92)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 10000kg  Peso Bruto Total: 42000kg</p>
Emissão4	C4	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission4  Tempo(h):  TRIA(0.66,1.24,1.99)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 32000kg  Peso Bruto Total: 42000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission4  Tempo(h):  TRIA(0.39,1.14,1.96)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 10000kg  Peso Bruto Total: 42000kg</p>
Emissão5	C5	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission5  Tempo(h): NORM(1.24,0.294)  Coef. de emissões: 1.5g/kw*h  Potência: 202kW  Carregamento: 32000kg  Peso Bruto Total: 42000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission5  Tempo(h):  TRIA(0.53,1.1,1.92)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 202kW  Carregamento: 10000kg  Peso Bruto Total: 42000kg</p>

Emissão6	C6	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission6  Tempo(h):  TRIA(1.08,1.33,1.9)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 34000kg  Peso Bruto Total: 49000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission6  Tempo(h): TRIA(0.33,0.88,2)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 15000kg  Peso Bruto Total: 49000kg</p>
Emissão7	C7	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission7  Tempo(h):  TRIA(0.4,0.787,1.88)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 34000kg  Peso Bruto Total: 49000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission7  Tempo(h):  NORM(0.569,0.162)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 15000kg  Peso Bruto Total: 49000kg</p>

Emissão8	C8	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission8  Tempo(h):  TRIA(0.03,0.313,0.79)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 34000kg  Peso Bruto Total: 49000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission8  Tempo(h):  TRIA(0.1,0.289,0.92)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 15000kg  Peso Bruto Total: 49000kg</p>
Emissão9	C9	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	<p>Nome da variável: emission9  Tempo(h):  TRIA(0.66,1.24,1.99)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 34000kg  Peso Bruto Total: 49000kg  //</p> <p>Nome da variável: emission9  Tempo(h):  TRIA(0.39,1.14,1.96)  Coef. de emissões:  1.5g/kW*h  Potência: 324kW  Carregamento: 15000kg  Peso Bruto Total: 49000kg</p>



Emissão10	C10	Cálculo de emissões (FS para usina/usina para FS)	Nome da variável: emission10 Tempo(h): NORM(1.24,0.294) Coef. de emissões: 1.5g/kW*h Potência: 324kW Carregamento: 34000kg Peso Bruto Total: 49000kg // Nome da variável: emission10 Tempo(h): TRIA(0.53,1.1,1.92) Coef. de emissões: 1.5g/kW*h Potência: 324kW Carregamento: 15000kg Peso Bruto Total: 49000kg
Time1, Time2, Time3, Time4, Time5, Time6, Time7, Time8, Time9, Time10	LT1, LT2, LT3, LT4, LT5, LT6, LT7, LT8, LT9, LT10	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Valor: TNOW
Time1	LT1	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time1
Time2	LT2	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time2
Time3	LT3	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time3
Time4	LT4	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time4
Time5	LT5	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time5
Time6	LT6	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time6
Time7	LT7	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time7
Time8	LT8	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time8
Time9	LT9	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time9

Time10	LT10	Calcula o tempo de transporte entre FS e usina	Tipo: Atributo Atributo: time10
Contador1	Cont1	Conta as entidades	Tipo: Variável Valor: cont1+1
Contador2	Cont2		Tipo: Variável Valor: cont2+1
Contador3	Cont3		Tipo: Variável Valor: cont3+1
Contador4	Cont4		Tipo: Variável Valor: cont4+1
Contador5	Cont5		Tipo: Variável Valor: cont5+1
Contador6	Cont6		Tipo: Variável Valor: cont6+1
Contador7	Cont7		Tipo: Variável Valor: cont7+1
Contador8	Cont8		Tipo: Variável Valor: cont8+1
Contador9	Cont9		Tipo: Variável Valor: cont9+1
Contador10	Cont10		Tipo: Variável Valor: cont10+1
Capacidade1	KG1	Calcula quantidade transportada	Tipo: Variável Valor: cont1*45000
Capacidade2	KG2		Tipo: Variável Valor: cont2*45000
Capacidade3	KG3		Tipo: Variável Valor: cont3*45000
Capacidade4	KG4		Tipo: Variável Valor: cont4*45000
Capacidade5	KG5		Tipo: Variável Valor: cont5*45000
Capacidade6	KG6		Tipo: Variável Valor: cont6*48000
Capacidade7	KG7		Tipo: Variável7*48000 Valor: cont8*48000
Capacidade8	KG8		Tipo: Variável Valor: cont8*48000
Capacidade9	KG9		Tipo: Variável Valor: cont9*48000
Capacidade10	KG10		Tipo: Variável Valor: cont10*48000
SomaCapacidade	+KG	Soma todas as quantidades transportadas	Tipo: Variável Valor: kg1+kg2+kg3+kg4+kg5+ kg6+kg7+kg8+kg9+kg10