

Desenvolvimento de um modelo de simulação computacional para apoiar o gerenciamento operacional dos processos de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar

DEVELOPMENT OF A COMPUTER SIMULATION MODEL TO SUPPORT THE OPERATIONAL MANAGEMENT OF SUGARCANE HARVEST, LOADING AND TRANSPORTATION PROCESSES

Recebido: 22 dez. 2021

Aprovado: 31 ago. 2022

Versão do autor aceita publicada online: 31 ago. 2022

Publicado online: 13 out. 2022

Como citar esse artigo - American Psychological Association (APA):

Lucas, P. I. J., & Rodrigues, J. de S. (abr./jun. 2024). Desenvolvimento de um modelo de simulação computacional para apoiar o gerenciamento operacional dos processos de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar. *Exacta*, 22(2), p. 379-405.

<https://doi.org/10.5585/exactaep.2022.21350>

Submeta seu artigo para este periódico

Processo de Avaliação: *Double Blind Review*

Editor: Dr. Luiz Fernando Rodrigues Pinto



Dados Crossmark



Desenvolvimento de um modelo de simulação computacional para apoiar o gerenciamento operacional dos processos de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar

DEVELOPMENT OF A COMPUTER SIMULATION MODEL TO SUPPORT THE OPERATIONAL MANAGEMENT OF SUGARCANE HARVEST, LOADING AND TRANSPORTATION PROCESSES

 Paulo Italo Jordão de Lucas e  José de Souza Rodrigues¹

¹ Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP) - Bauru, SP - Brasil

Nota dos autores

Autores declaram que não há conflito de interesses.

Resumo

Este trabalho objetivou desenvolver um modelo de simulação computacional das operações de corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar para apoiar a tomada de decisão, o gerenciamento operacional e melhorar o fluxo de colheita e abastecimento industrial. O método usado foi o *Design Science Research*, cujo resultado foi a construção do modelo com base em dados coletados em um estudo empírico em uma empresa do setor sucroenergético. O modelo foi validado pelos dados operacionais da empresa e avaliada sua utilidade para os processos de tomada de decisão gerencial. Os resultados indicam contribuições práticas para a gestão operacional do setor sucroenergético, sendo que foi possível avaliar a redução de 7 caminhões e de 40 carretas sem que houvesse perda de desempenho pelo sistema. A pesquisa também gerou contribuições teóricas que incrementam a base de conhecimento sobre gestão de organizações agroindustriais, a partir de lacunas encontradas em trabalhos anteriores.

Palavras-chave: simulação computacional, Promodel, operações agroindustriais, sucroenergético, corte, transbordo e transporte

DEVELOPMENT OF A COMPUTER SIMULATION MODEL TO SUPPORT THE OPERATIONAL MANAGEMENT OF SUGARCANE HARVEST, LOADING AND TRANSPORTATION PROCESSES

Abstract

This article aimed to develop a computer simulation model of sugarcane harvest, loading, transport and milling operations, which supports decision-making and operational management, and improves the flow of harvesting and industrial supply of the sugarcane. The method used was Design Science Research, whose result was the construction of the model based on data collected in an empirical study in a company in the sugarcane sector. The model was validated by company's operational data and its usefulness for managerial decision-making processes was evaluated. The results indicate practical contributions to the operational management of the sugarcane sector, and it was possible to evaluate the reduction of 7 trucks and 40 trailers without loss of system performance. The



research also generated theoretical contributions that increase the knowledge base on the management of agro-industrial organizations, based on gaps found in previous works.

Keywords: computer simulation, Promodel, agro-industrial operations, sugarcane sector, harvest, loading and transportation

1 Introdução

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Na Safra 20/21 a área colhida foi de aproximadamente 8.616.100 hectares e a produção foi de 654.504.921 toneladas de cana-de-açúcar no território brasileiro (CONAB, 2021).

O beneficiamento da cana-de-açúcar é composto de diversas etapas, sendo objeto deste estudo as operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar (CTT), que segundo Veiga Filho (1999) é constituído por subsistemas que se relacionam entre si e estabelecem um fluxo de matéria-prima das frentes de colheita às unidades industriais. Esses subsistemas apresentam níveis elevados de complexidade e impacto no setor sucroenergético, dado que as operações de CTT são as mais onerosas e representam aproximadamente 40% dos desembolsos na produção da cana-de-açúcar (Pecege, 2015; Milan e Rosa, 2015; Nova Cana, 2019).

As operações de CTT estão expostas a inúmeras variáveis, como: a) a densidade do canavial, que está ligada à fatores como a variedade, as operações de tratos culturais, as operações de preparo de solo, e as condições climáticas (Silva e Garcia, 2009), b) a quantidade transportada depende do tipo e formação das carretas (Machado *et al.*, 2018), c) o tempo entre o corte e o processamento é limitado pela perda de açúcar total recuperável (ATR) e rápida deterioração da cana-de-açúcar, impedindo elevados níveis de estoque de segurança (Grunow; Günther e Westinner, 2007), e d) o aumento da estrutura agrícola apresenta restrições de custo, por serem significativas fontes de capital imobilizado (Guerra, 2018).

Adotou-se a simulação computacional para a realização da pesquisa porque possibilita conduzir experimentos com uma abordagem probabilística e integradora de processos, favorecendo a observação de seu comportamento e a identificação de oportunidades de melhoria, reduzindo as incertezas na tomada de decisão (Pegden *et al.*, 1995; Morabito e Pureza, 2018). Este trabalho se enquadra como um modelo de simulação computacional de eventos discretos, com abordagem de dados estocástica (Chwif e Medina, 2015; Morabito e Pureza, 2018).

Cortez *et al.* (2016) apontam a necessidade de constantes mudanças e melhoria ininterrupta em toda a cadeia produtiva do setor Sucroenergético, sendo a simulação um recurso valioso para isso, que pode contribuir para evitar o desabastecimento industrial e o superdimensionamento da estrutura agrícola.

Dessa forma, somado às implicações gerenciais, propõe-se o seguinte problema de pesquisa: como criar um modelo de simulação computacional, que seja capaz de antecipar situações e contribuir com a tomada de decisão no gerenciamento das operações de CTT da cana-de-açúcar, para melhorar o fluxo de cana da colheita e do abastecimento industrial?

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo de simulação computacional das operações de corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar, que apoie a tomada de decisão e o gerenciamento operacional, e melhore o fluxo de colheita e abastecimento industrial da cana.

Para alcançar o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos: a) mapear os processos e as variáveis presentes nas operações de CTT; b) selecionar as variáveis de maior impacto no processo; c) desenvolver o modelo do processo em software de simulação computacional com aderência ao sistema real.

O modelo de simulação computacional desenvolvido permite observar o sistema real das operações de CTT e pode ser usado para aproveitar oportunidades para ganho de eficiência.

Além de incrementar a base de conhecimento científico sobre gerenciamento operacional no setor sucroenergético, o modelo desenvolvido gera impacto para: a) a indústria, visto que o setor



sucroenergético brasileiro é um dos mais competitivos do mundo e que sua dinâmica é regida, predominantemente, pela redução de custos (Barbieri; Carvalho; Sabbag, 2016); b) o País, considerando que o Brasil é um dos maiores exportadores de açúcar do mundo e que na Safra 13/14 o setor sucroenergético foi responsável por aproximadamente 2% do PIB brasileiro (Neves *et al.*, 2014); e c) a sociedade, pela relação com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis da ONU (2015), no que tange a produção de alimentos e utilização de combustíveis fósseis.

2 Fundamentação Teórica

Ripoli *et al.* (2007) ressaltam que para o sucesso das operações de CTT é necessário investir em eficiência logística, e Bateman *et al.* (2013) colocam a modelagem e simulação como ferramentas essenciais, uma vez que na logística a maioria dos aspectos relacionados à movimentação nas operações são incertos.

Analisando vinte e uma publicações na área, nota-se que há um esforço crescente em desenvolver e aplicar métodos quantitativos para apoiar a tomada de decisão das operações em sistemas agrícolas. No setor sucroenergético o destaque é para os modelos de planejamento da colheita e os modelos de programação do transporte da cana-de-açúcar, ambos relacionados ao sistema de CTT.

O Quadro 1 apresenta uma visão da pesquisa sobre o tema encontrada na literatura.

Quadro 1

Síntese dos trabalhos analisados

Tema Pesquisado	Autoria
Revisão de 31 trabalhos sobre os seguintes temas: a) planejamento da capacidade; b) planejamento dos tempos operacionais; c) alocação dos recursos para realização das operações nos períodos definidos; d) otimização dos trajetos das máquinas agrícolas durante as operações; e e) avaliação do desempenho dos equipamentos no campo.	Bochtis, Sorensen e Busato (2014)
Desenvolveram um modelo de simulação discreta, considerando o fluxo de matéria-prima, a partir de dados de quantidade e tempo, com o objetivo de reduzir o número de máquinas e avaliar o impacto econômico na operação	Arjona, Bueno e Salazar (2001)
Desenvolveram um modelo de simulação no software Arena, com o objetivo de analisar o desempenho dos processos de recepção da cana-de-açúcar e investigar configurações alternativas e políticas para suas operações	Iannoni e Morabito (2006)
Desenvolveu um modelo computacional baseado em simulação estocástica, com o objetivo de representar o envio de caminhões para as frentes de colheita.	Mundim (2009)
Desenvolveram um modelo de simulação discreta para a determinação de turnos de trabalhos dos operadores de equipamentos agrícolas	Silva, Alves e Costa (2011)
Desenvolveram um modelo para simulação no software Arena, para analisar como o desempenho das operações de CTT pode ser mensurado com a modelagem e simulação de eventos discretos.	Tomazela et al. (2017)
Desenvolveram um estudo de caso com simulação de eventos discretos para avaliar diferentes configurações do sistema de entrega de cana-de-açúcar nas usinas sucroenergética	Faria et al. (2019)
Desenvolveram um modelo de simulação computacional no software Arena, para analisar e propor melhoria na logística de entrada dos caminhões de cana-de-açúcar	Patitad, Watanabe e Wichaisri (2020)
Custos de colheita	Singh e Pathak (1994) Silva (2012)
Recepção de cana - da balança a moenda	Barnes et al. (1998) Higgins et al. (1998) Iannoni e Morabito (2002)
Sistema de colheita	Salassi e Champagne (1998) Silva (2006) Grunow, Gunter e Westner (2007) Ramos (2014)
Transporte de cana	Díaz e Pérez (2000) Higgins e Davies (2005)
Turnos de trabalho e equipamentos	Milan (1992) Bocanegra-Herrera e Vidal (2016)

Fonte: Autores

Os sistemas logísticos estruturados para integrar as operações agrícolas e industriais são importantes para assegurar a eficiência das unidades sucroenergéticas, sendo a modelagem e



simulação computacional de processos uma excelente ferramenta para estruturar esse sistema (Arjona, Bueno e Salazar, 2001; Iannoni e Morabito; 2006; Tomazella *et al.*; 2017).

Considerando a contribuição científica deste trabalho, apresenta-se como lacunas dos trabalhos avaliados que são supridas ou avançadas no presente artigo: a) a integração de todas as operações da cadeia; b) um modelo que proporcione agilidade na parametrização para gerar cenários a tempo de fornecer subsídios para tomada de decisão gerencial; c) que possa ser utilizado para diferentes horizontes de tempo, proporcionando flexibilidade ao período simulado; e d) cuja estrutura agrícola atenda mais de uma unidade industrial.

3 Método de Pesquisa

O método de pesquisa utilizado foi o *Design Science Research* (DSR). O DSR é um conjunto de técnicas analíticas que permitem o desenvolvimento de pesquisas nas diversas áreas e tem como objetivo estudar, pesquisar e investigar o artificial e seu comportamento, tanto do ponto de vista acadêmico quanto da organização, se constituindo em um processo rigoroso de projetar artefatos para resolver problemas, avaliar o que foi projetado e o que está funcionando, e comunicar os resultados obtidos (Simon, 1996; Bayazit, 2004; Vaishnavi e Kuechler, 2015).

A escolha desse método de pesquisa foi motivada pelo fato do DSR apresentar vantagens em relação às outras estratégias de pesquisa, destacando sua capacidade de fornecer contribuições teóricas e práticas, a partir da construção de um artefato. Pimentel, Filippo e Santos (2020) enfatizam que a pesquisa com desenvolvimento de artefatos deve: a) realizar revisões de literatura para diferentes propósitos; b) desenvolver conhecimento técnico e conhecimento teórico-científico; e c) realizar uma avaliação empírica com rigor.

Para a coleta de dados foram utilizados: entrevistas semiestruturadas, observação direta dos processos, documentos da empresa e extração de dados de bases da empresa referentes às operações de CTT. Destaca-se que para direcionar a coleta de dados e a construção do roteiro de pesquisa, foram definidos os seguintes elementos de pesquisa: a) funcionamento dos processos de CTT; b) funcionamento dos processos de recebimento da cana-de-açúcar; c) características das

frentes de colheita; d) características da estrutura de transporte; e e) comportamento do ritmo de moagem das indústrias.

As entrevistas para obtenção das informações agrícolas foram realizadas com o Gerente, o Gestor, os Supervisores e o Engenheiro das operações de CTT. Já as informações sobre o comportamento do ritmo de moagem e recebimento de cana foram coletadas a partir de entrevistas com o Gestor da Extração e o Especialista de Operações Integradas. Nesse ponto, destaca-se que a técnica de observação também foi utilizada para coletar essas informações e possibilitar a triangulação para entendimento do sistema real.

Além disso, foi utilizada a análise de documentos e base de dados para coletar informações sobre: o funcionamento dos processos, a partir de fluxos já mapeados e coletar dados quantitativos sobre os processos, tais como, a distância das frentes de colheita, a taxa de disponibilidade dos equipamentos, a densidade dos canaviais, e o ritmo de moagem, que foram extraídos a partir de softwares de gestão da própria empresa.

A coleta de dados foi realizada de forma iterativa, de modo que as informações coletadas retroalimentavam o processo de coleta, proporcionando maior profundidade ao estudo. No que tange ao horizonte de tempo, o estudo desenvolvido foi classificado como *cross-section* (transversal), com duração de aproximadamente cinco meses e os dados utilizados referentes ao período de uma safra.

Por fim, a análise de dados foi dividida entre: a) mapeamento dos processos; b) modelagem do processo; e c) teste, validação e utilização do modelo. O software selecionado para a simulação foi o Promodel, considerando que o mesmo já estava disponível no Laboratório de Simulação de Ambientes Organizacionais, utilizado para a realização da pesquisa.

4 Apresentação e Discussão dos Resultados

Esta seção está dividida em três subseções: a) mapeamento dos processos de CTT; b) modelagem do processo e construção do modelo no Promodel; e c) verificação, validação e utilização do modelo.

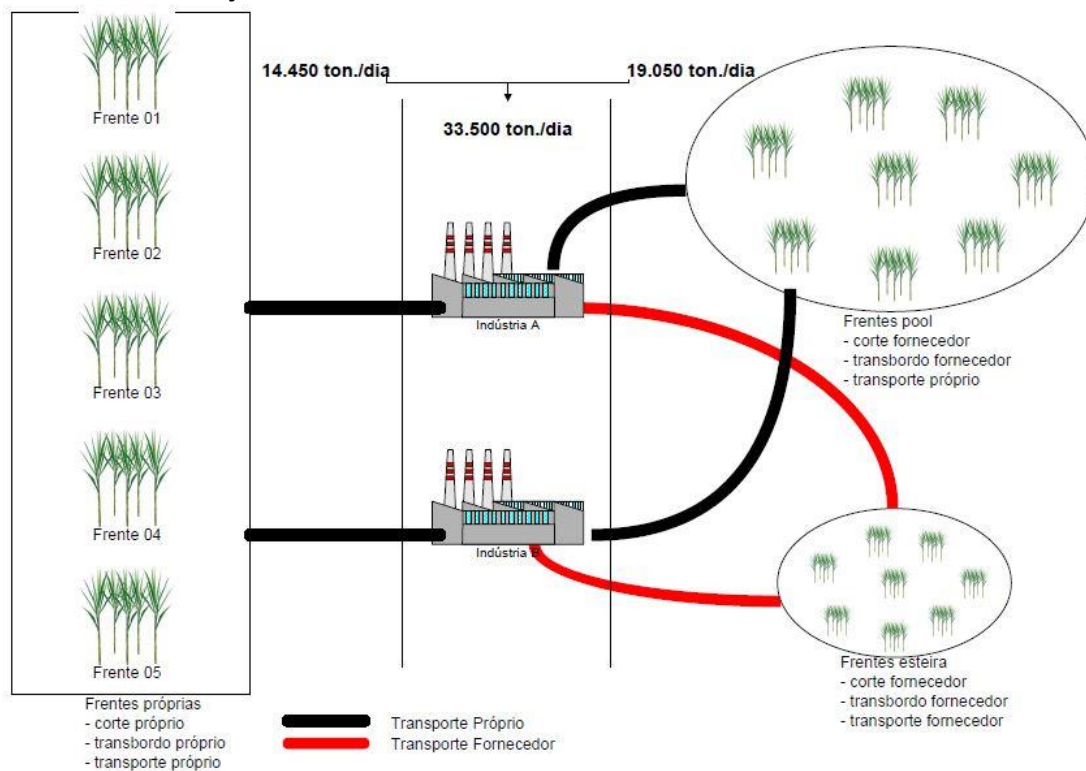
4.1 Mapeamento dos Processos

A

Figura 1 apresenta o fluxo de matéria-prima. O sistema tem capacidade de moagem de 33.500 toneladas de cana-de-açúcar por dia, divididos em duas unidades de processamento industrial, sendo a Indústria 1 com capacidade de 21.000 toneladas e a Indústria 2 com capacidade de 12.500 toneladas.

Figura 1

Fluxo de cana-de-açúcar



Fonte: Autores

Existem duas classes envolvidas no corte e transporte da cana, com capacidade, respectivamente, de 14.450 e 19.050 toneladas por dia. As frentes de colheita própria são divididas em cinco frentes, de modo que a operação de colheita, transbordo e transporte são realizados por equipamentos da estrutura própria da empresa.

As frentes de fornecedores são divididas em duas classes, *pool* e *esteira*, Na primeira as operações de corte e transbordo são de responsabilidade dos fornecedores e o transporte é

realizado por estrutura própria. Na segunda todas as operações são de responsabilidade dos fornecedores.

No modelo as frentes de colheita representam as operações de corte e transbordo e tem como principal saída uma taxa de produção de cana; o transporte da cana-de-açúcar das frentes de colheita para as usinas têm como variáveis de maior importância o tempo de deslocamento e o volume de cana transportado; e a indústria, que envolve o recebimento e a moagem da cana-de-açúcar, tendo como principais variáveis os tempos dos processos de recebimento e o ritmo de moagem da usina.

No que se refere ao subsistema de produção de cana-de-açúcar das frentes de colheita, a Figura 2 apresenta a simplificação para a criação do modelo, em que apenas a indisponibilidade climática e o índice de colheabilidade entram no modelo de simulação computacional. O índice de colheabilidade foi calculado a partir de uma simulação de Monte Carlo, da variabilidade do processo, e da equação da Figura 3.

Figura 2

Simplificação da produção de cana das frentes de colheita



Fonte: Autores

Figura 3

Cálculo do índice de colheitabilidade

Índice de Colheitabilidade																
	A	B	C	D												
$\text{Tx. Produção FC (ton./h)} = \frac{\text{TCH (ton./ha)}}{(10.000 / 1,5)} \times (\text{VM corte (Km/h)} \times 1000) \times \text{Disp. corte/elevador (\%)} \times \text{Qty. Colhedoras}$																
A	$\frac{\text{TCH (ton./ha)}}{(10.000 / 1,5)}$	Transformação da densidade de cana-de-açúcar, que é dada em toneladas de cana por hectare, em toneladas de cana por metros lineares.														
B	$(\text{VM corte (Km/h)} \times 1000)$	Transformação da velocidade média que é dada em quilômetros por hora, em metros por hora.														
C	$\text{Disp. corte/elevador (\%)} =$	$(1 - (\text{Indisp. Mec. (\%)} + \text{Indisp. Log (\%)} + \text{Indisp. Adm (\%)})) \times (1 - \text{\% de manobra (\%)})$														
D	Qty. Colhedoras	Multiplicação da taxa de produção de cana-de-açúcar de uma colhedora pela quantidade de máquinas da frente de colheita														
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Legenda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Tx. Produção FC</td> <td>Taxa de produção da frente de colheita</td> </tr> <tr> <td>TCH</td> <td>Densidade do canavial - Tonelada de cana por hectare</td> </tr> <tr> <td>VM corte</td> <td>Velocidade média de colheita</td> </tr> <tr> <td>Disp. corte/elevador</td> <td>Disponibilidade da colhedora para atividade de corte</td> </tr> <tr> <td>Qty. Colhedoras</td> <td>Número de colhedoras da frente de colheita</td> </tr> </tbody> </table>					Legenda		Tx. Produção FC	Taxa de produção da frente de colheita	TCH	Densidade do canavial - Tonelada de cana por hectare	VM corte	Velocidade média de colheita	Disp. corte/elevador	Disponibilidade da colhedora para atividade de corte	Qty. Colhedoras	Número de colhedoras da frente de colheita
Legenda																
Tx. Produção FC	Taxa de produção da frente de colheita															
TCH	Densidade do canavial - Tonelada de cana por hectare															
VM corte	Velocidade média de colheita															
Disp. corte/elevador	Disponibilidade da colhedora para atividade de corte															
Qty. Colhedoras	Número de colhedoras da frente de colheita															

Fonte: Autores

A

Figura 4

Fluxo do processo de transporte

apresenta o fluxo de transporte, considerando o percurso da frente de colheita para a usina e o retorno da usina para as frentes de colheita. As variáveis para configuração desse subsistema no modelo são a velocidade média do transporte, a distância entre as frentes de colheita e as indústrias, o tempo de carregamento na frente de colheita, a capacidade de carga das carretas, além da disponibilidade dos caminhões e das carretas.

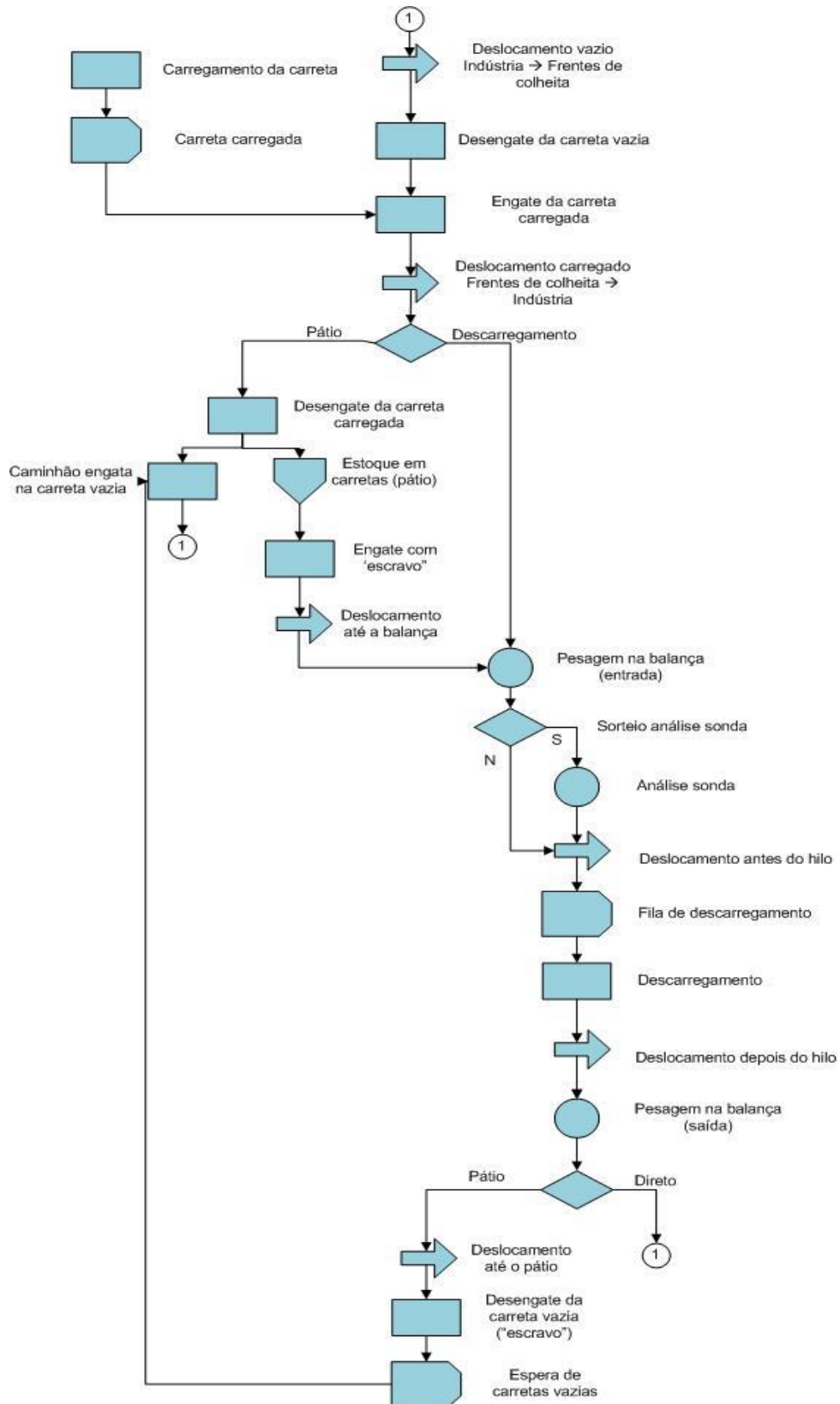
O subsistema de recebimento usou o tempo de cada uma das etapas: pátio de estoque de cana, em que há as operações de desengate e engate; pesagem na balança; coleta na sonda PCTS



(Pagamento de Cana por Teor de Sacarose); e descarregamento no hilo. O sorteio para a análise da sonda PCTS, o ritmo de moagem e a localização do pátio de estoque de cana também foram considerados e são diferentes em cada uma das usinas.

Figura 4

Fluxo do processo de transporte



Fonte: Autores

4.2 Modelagem do Processo

A

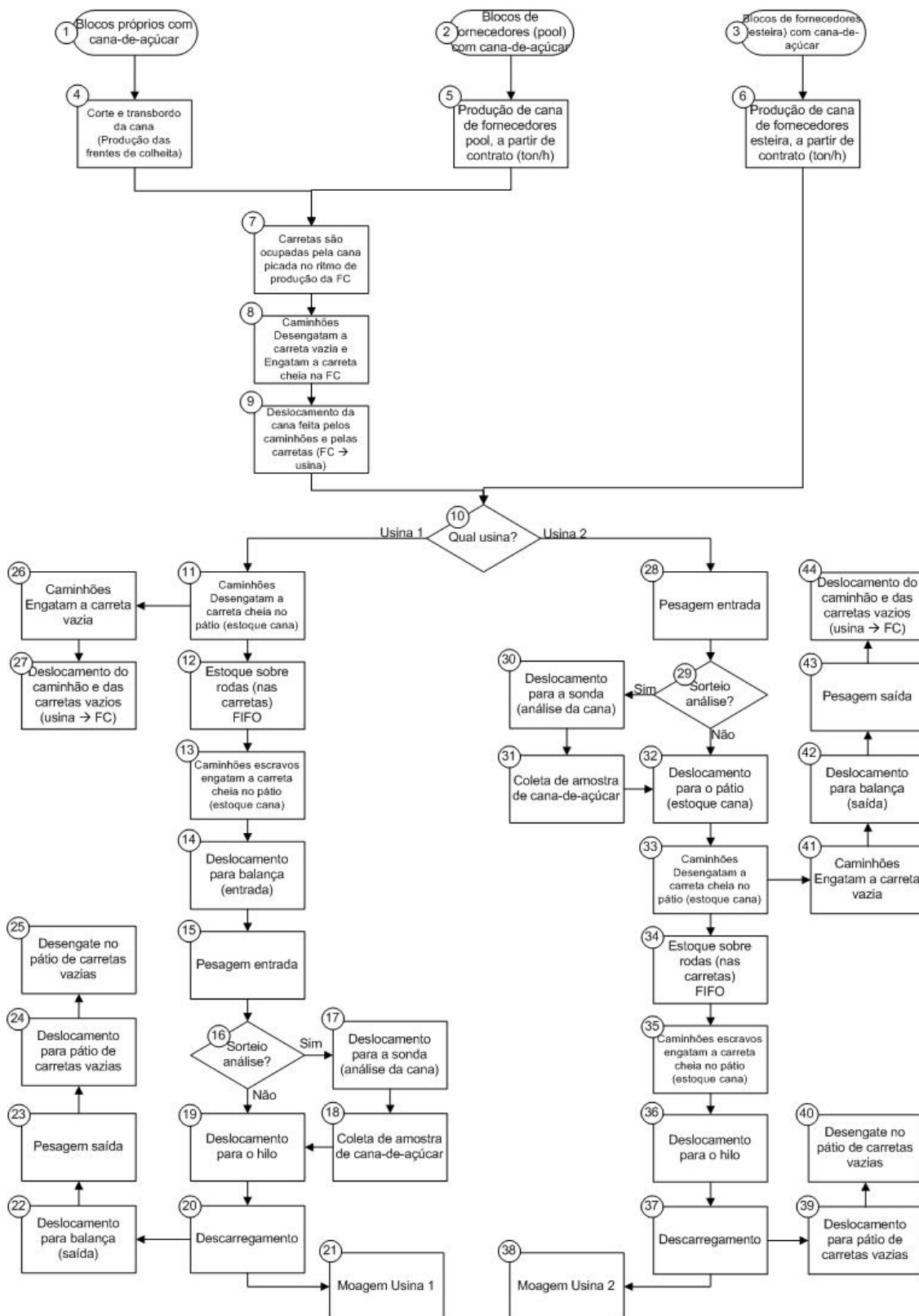


Figura 5 apresenta o modelo conceitual desenvolvido para o sistema.



Figura 5

Modelo conceitual do sistema de CTT



Fonte: Autores

Uma das lacunas identificadas nos estudos de modelagem e simulação dos processos de CTT é a falta de flexibilidade para um mesmo modelo simular o sistema em diferentes horizontes de tempo. Diante disso, para absorver essa lacuna, o modelo apresenta 70% das etapas mantidas em

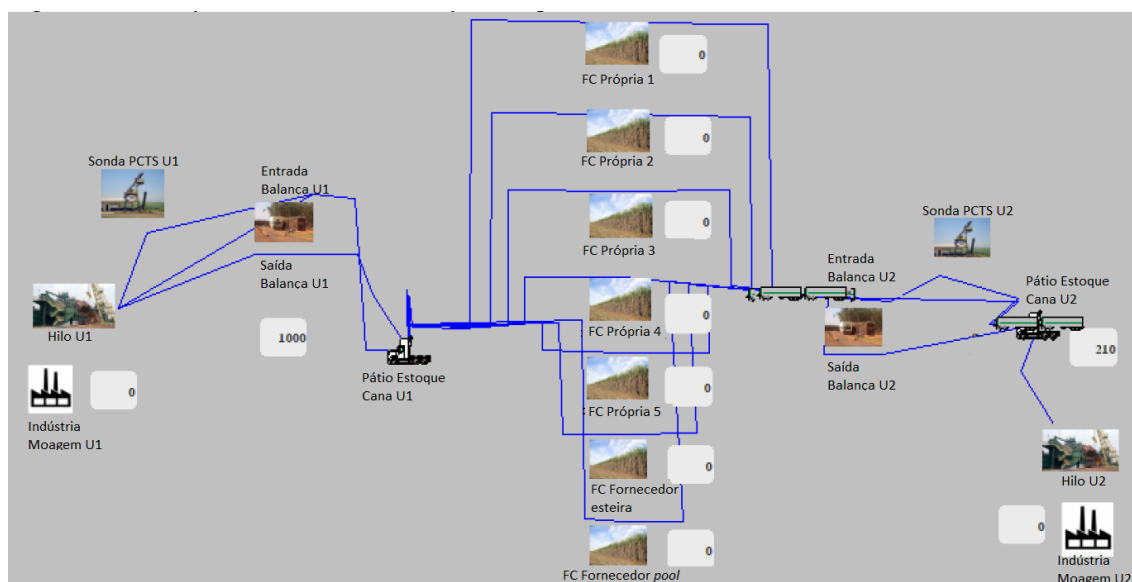
qualquer horizonte de simulação, de modo que os outros 30% referem-se a ajustes sazonais e ajustes por frente de colheita, representando, respectivamente, 18% e 12%.

A

Figura 6 representa o modelo desenvolvido no software Promodel.

Figura 6

Modelo de simulação computacional



Fonte: Autores

Os locais parametrizados no modelo foram: a) as frentes de colheita, sendo cinco próprias e duas de fornecedores (*pool* e esteira); b) o pátio estoque de cana; c) o pátio de carretas vazias; d) a entrada da balança; e) a saída da balança; f) a sonda PCTS; g) o hilo; e h) a indústria moagem. Sendo que a estrutura de recebimento é apresentada para as duas usinas.

Foram necessários outros locais para melhorar a aderência do modelo ao sistema real: a) locais de fila na entrada e saída das balanças, nas sondas PCTS e nos hilos das usinas; b) locais auxiliares nas frentes de colheita e nos hilos, para movimentação no fluxo contrário ao transporte de cana; c) locais para consolidação das cargas nas frentes de colheita; d) local auxiliar para o modelo iniciar com a configuração de operação.

O modelo apresenta uma entidade principal, a cana-de-açúcar (“eCanadeAçúcar”), além de outras três: a) “eConsolidadoCarreta”, responsável por consolidar a quantidade de cana-de-açúcar nos conjuntos carretas, considerando a variação de capacidade por unidade de carga e a quantidade de unidades de carga (que podem ser de três ou de duas carretas, a depender da formação do conjunto); b) “eMovimentação”, responsável por fazer o retorno dos equipamentos no fluxo contrário ao da cana-de-açúcar; e c) “eAux” que é responsável por construir a configuração do início do sistema, ou seja, os equipamentos distribuídos entre as indústrias e as frentes.

Dentre essas entidades, duas apresentam taxa de chegada, sendo a “eAux” com uma ocorrência no início do modelo em cada frente de colheita e nos pátios de carreta vazia das usinas, e a “eCanadeAçúcar” que apresenta chegadas periódicas em cada frente de colheita, calculadas pela simulação de Monte Carlo da equação de colheitabilidade, sendo as frentes de colheita própria e a frente de fornecedor esteira a cada 15 minutos e a frente de fornecedor *pool* a cada 3 minutos.

O modelo utiliza quatro tipos de recursos, a citar: 49 caminhões de linha, que são responsáveis pelo transporte entre as frentes de colheita e o pátio de estoque de cana; 13 caminhões bate e volta da usina 1 e 3 caminhões bate e volta da usina 2, que são responsáveis pelo transporte das carretas do pátio de estoque de cana para o hilo; e os 111 conjuntos carretas, que são responsáveis pelo transporte e acondicionamento da cana de açúcar das frentes de colheita ao hilo. Foi definida uma única rede de caminho, que passa por todos os locais do modelo.

O módulo de processamento do modelo é dividido em três grandes blocos: a configuração do início do sistema, o fluxo de matéria prima (cana-de-açúcar), e o fluxo de retorno dos caminhões e carretas para as frentes de colheita.

O bloco para configuração do início do sistema é responsável por fazer com que os caminhões de linha e as carretas iniciem o modelo de simulação nos locais de operação. Destaca-se que esse bloco só ocorre no início do modelo e envolve as frentes de colheita e o pátio de carreta vazia, que solicitam uma quantidade de recursos caminhão de linha e conjunto carretas no início da simulação.



Já o fluxo de matéria-prima é responsável pelos processamentos das frentes de colheita, do transporte da cana-de-açúcar para as usinas, das etapas de recebimento da cana-de-açúcar e do descarregamento na indústria. Para isso, de forma genérica, tem-se no Quadro 2 os elementos das duas usinas.

O fluxo de retorno dos caminhões e carretas para as frentes de colheita é responsável por fazer com que os caminhões e carretas que descarregam a cana na indústria volte, a partir de uma lógica, para as frentes de colheita. Tem-se no Quadro 3 os elementos das duas usinas.

Quadro 2

Processamento - fluxo matéria-prima

Frentes de colheita	é dividida em duas etapas, sendo a primeira relacionada a entidade “eCanadeAçúcar”, que define qual o tipo de carreta a ser carregada; verifica se há espaço na carreta; verifica se a carreta já está cheia e cria a entidade “eConsolidadoCarreta”. Essa segunda etapa é responsável por solicitar os recursos; aguardar o tempo de engate do caminhão no conjunto carretas; e decidir para qual usina vai enviar a carga. Essa lógica se repete para todas as frentes de colheita, exceto a de fornecedor esteira, que é simplificada por não ser considerado recursos;
Pátio estoque cana	é onde ocorrem as operações de desengate e liberação do caminhão de linha; engate do caminhão bate e volta. O pátio das usinas se diferencia pela lógica de roteamento, dado que na U1 o pátio é antes da balança e na U2 é antes do hilo;
Entrada da balança	apresenta o tempo de pesagem das carretas na entrada e o roteamento pode ser para a sonda PCTS ou o hilo na U1, e para a sonda PCTS ou para o pátio estoque cana na U2. Antes da entrada da balança existe uma fila para reproduzir o sistema.
Sonda PCTS	apresenta o tempo de processamento para coleta das amostras. Como a quantidade é realizada por sorteio é realizada a multiplicação da quantidade sorteada na distribuição pelo tempo padrão da coleta. Ressalta-se que a sonda PCTS também apresenta um local com fila;
Hilo/Indústria	apresenta o tempo de descarregamento com uma lógica parecida à análise da sonda PCTS, seguido pela liberação das entidades; e criação da “eMovimentação” para garantir o retorno dos recursos e iniciar no fluxo de retorno. Destaca-se que o hilo também apresenta fila e a indústria atua com o ritmo de moagem, sendo restrição do sistema.

Fonte: Autores

Quadro 3

Processamento - retorno para as frentes de colheita

Hilo	garante que os recursos caminhão bate e volta e o conjunto carretas permaneçam juntos, a partir da entidade “eMovimentação”, para seguir o fluxo de retorno para as frentes de colheita. O roteamento é para a saída da balança na U1 e para o pátio carretas vazias na U2;
Saída balança	apresenta o tempo de pesagem das carretas na saída, e na U2 também é realizada a decisão de qual frente de colheita retornar. O roteamento é para o pátio de carretas vazias na U1, e para as frentes de colheita na U2. Esse local também tem fila.
Pátio carreta vazia	é onde ocorrem as operações de desengate e liberação do caminhão bate e volta; engate do caminhão de linha; e no caso da U1 decisão de qual frente de colheita retornar. Os pátios de carretas vazias se diferenciam pela lógica de roteamento, dado que na U1 vai para as frentes de colheita e na U2 para a saída da balança;
Frente de colheita	é onde acontece a liberação da entidade auxiliar “eMovimentação” e os recursos caminhão de linha e carretas ficam disponíveis para o fluxo de matéria-prima.

Fonte: Autores

Foram utilizados outros elementos na programação do modelo, tais como: atributos, variáveis, distribuições do usuário; paradas e tempo de aquecimento.

Os atributos foram utilizados para: a) apoiar as lógicas de decisão para roteamentos, tais como o sorteio para a sonda PCTS, decisão de ida para as frentes de colheita; b) definir o tipo de carreta; c) consolidar o peso de cana que será usado em cada carga; d) apoiar o cálculo dos indicadores de tempo.

As variáveis complementaram a utilização dos atributos, de modo a medir o desempenho do sistema. Além da medição de indicadores, contabilização do peso das carretas e apoio aos sorteios e decisões para roteamento, as variáveis também foram utilizadas para verificação do modelo.

As distribuições do usuário também foram utilizadas para apoiar a construção do modelo, sendo usada para os sorteios e decisões, tais como: o sorteio para análise na sonda PCTS; o tipo de carreta; a distribuição de cana pelas usinas; e o retorno dos recursos para as frentes de colheita.

As paradas foram inseridas no modelo como segue: a) para manutenção dos recursos caminhão de linha, caminhão bate e volta e conjunto carretas; b) para abastecimento dos caminhões; c) por indisponibilidade climática nas frentes de colheita; d) por mudança de frente nas frentes de colheita. O tempo de aquecimento utilizado foi de 48 horas para normalizar o funcionamento do sistema.



Nesse ponto, tem-se dois aspectos relevantes: a) o modelo conceitual apresentou as paradas como índices de indisponibilidade dos locais ou recursos, no entanto para inseri-los no Promodel foi necessário transformá-los em dados de frequência e tempo de parada, então foram calculados o MTBF (*Mean Time Between Failures*) e o MTTR (*Mean Time to Repair*); b) as paradas de recursos devem entrar para qualquer horizonte de tempo de simulação, mas as paradas dos locais acontecem em um horizonte de tempo maior, sendo necessárias ativá-las somente para períodos maiores que três dias para as paradas de mudança de frente e uma semana para paradas climáticas.

4.3 Verificação, Validação e Utilização do Modelo

Essa subseção foi dividida em três etapas:

- a) verificação do modelo;
- b) validação do modelo; e
- c) utilização do modelo.

O modelo foi verificado utilizando o monitoramento dos fluxos no processo e a criação de indicadores para avaliar o desempenho do modelo. Foram avaliadas as funcionalidades dos fluxos de matéria-prima; de retorno para as frentes de colheita; e de configuração inicial do sistema. Os indicadores para verificação do modelo avaliados foram: a chegada de cana-de-açúcar nas frentes de colheita; o tempo das operações nos locais de recebimento de cana; o volume de moagem das usinas; a utilização dos recursos; e as filas, ciclos e *leadtime*.

Para a validação do modelo foram realizadas simulações com as configurações de cinco dias de safra, e feito o comparativo entre os resultados da simulação e os valores reais das produções das frentes de colheita (7) e da moagem das indústrias (2), totalizando 45 avaliações. Nesse ponto, vale destacar que a avaliação dessas variáveis garante o processo de validação para as três etapas do sistema.

Os desvios encontrados apresentam variação entre -13% e +14%, no entanto 73% desses desvios estão entre o intervalo de -5% e +5%. Nesse ponto, considerando a grandeza dos desvios e a

natureza probabilística do modelo, entende-se por satisfatório o comparativo entre o valor simulado e o valor real, tendo-se o modelo como representativo ao sistema estudado.

No que se refere à utilização do modelo foram simulados três cenários, de momentos distintos da safra, considerando a variação da produção das frentes de colheita e suas distâncias das usinas, e analisados sob as seguintes perspectivas: a) avaliação da ocupação dos recursos; b) avaliação da entrega de cana das frentes de colheita próprias; c) avaliação de filas, ciclos e *leadtimes*.

No que diz respeito à avaliação dos recursos, a partir de uma análise de sensibilidade com avaliação de cenários pessimista, realista e otimista de produção de cana e disponibilidade da estrutura de transporte, concluiu-se que é possível reduzir 7 caminhões de linha e 20 conjuntos de carretas (respectivamente 14,3% e 17,2% da estrutura total), sem perder desempenho no sistema de CTT. Destaca-se que pela perspectiva financeira, essa redução apresenta impacto de R\$ 2.611.525 por safra.

Na análise da entrega de cana, em um cenário pessimista a cota de entrega de cana própria não foi cumprida em nenhuma das 10.000 simulações, no cenário mais provável esse valor foi alcançado em 5,6% das simulações e em um cenário otimista a cota de entrega de cana própria foi alcançada em 98% das simulações.

A análise das filas, ciclos e *leadtime* do processo possibilitou uma visão holística das operações de CTT do sistema estudado, incluindo uma visão dos impactos causados na cadeia pela alteração de uma variável do sistema. Pelos cenários analisados, notou-se que o fluxo de cana interfere nas filas das operações de recebimento da Indústria 1, sendo sugestivo que as operações de PCTS e descarregamento no hilo se tornem gargalo em sistemas com alto fluxo de entrega; e o raio médio interfere proporcionalmente no *leadtime* de entrega de cana em ambas as usinas.

Nesse ponto destaca-se que no sistema real, esses cenários de filas, ciclos e *leadtime* mudam conforme a configuração do sistema, e que esse tipo de avaliação traz benefícios para a gestão operacional do sistema de CTT da cana-de-açúcar.

5 Considerações Finais



O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação computacional das operações de corte, transbordo, transporte e moagem da cana-de-açúcar, para apoiar a tomada de decisão e o gerenciamento operacional, com foco no fluxo da colheita e abastecimento industrial.

Para isso, foi realizado um *Design Science Research* nas operações de corte, transbordo e transporte da cana-de-açúcar, em uma empresa que atua no setor sucroenergético localizada no interior do estado de São Paulo. O trabalho foi fundamentado em três etapas, sendo: o mapeamento dos processos de CTT; a modelagem conceitual e computacional do processo de CTT; e os testes e validações do modelo construído no software Promodel.

O modelo de simulação computacional desenvolvido apresenta contribuições práticas para a gestão operacional do setor sucroenergético e teóricas para incrementar a base de conhecimento na área de pesquisa sobre gestão de organizações agroindustriais.

As contribuições práticas do modelo proporcionam condições para melhor tomada de decisão para: a) o planejamento operacional, diante do dimensionamento de estrutura e avaliação do fluxo de entrega de cana; b) decisões estratégicas, no que se refere à decisões de crescimento inorgânico e sinergias operacionais entre usinas; e c) desenvolvimento tecnológico, que contribui com o avanço dos movimentos da Indústria 4.0 e Agricultura 4.0.

Os elementos supracitados são fortes alavancas para a redução do custo das operações de CTT da cana-de-açúcar, de modo que, considerando que é a operação mais representativa no custo produtivo e que a dinâmica do setor é dada, predominantemente, pelo baixo custo, nota-se que essas contribuições práticas refletem em um fator de vantagem competitiva para a empresa.

As contribuições teóricas do modelo suprem as seguintes lacunas que contribuem para sua originalidade: a) integração de todas as operações da cadeia, desde as frentes de colheita até a moagem, proporcionando uma visão integrada das operações; b) flexibilidade de configuração do modelo para gerar cenários com agilidade, exigindo alteração em apenas 30% dos *inputs* para mudança da configuração do sistema; c) modelo único capaz de simular o sistema em diferentes

horizontes de tempo, podendo simular uma semana de moagem ou toda a safra; d) modelo que representa um sistema com uma estrutura agrícola que fornece para mais de uma indústria, possibilitando a utilização do modelo para conglomerados de usinas, cuja configuração não foi encontrada em nenhum trabalho avaliado.

Considerando que essas lacunas não foram encontradas ou foram apontadas como dificuldades nos modelos estudados no levantamento teórico, destaca-se que as contribuições supracitadas favorecem o avanço teórico do tema, cumprindo o segundo propósito da DSR, o de gerar conhecimento científico para a classe de problemas em estudo, a gestão de operações agroindustriais.

No que tange às limitações do estudo, tem-se que o modelo é único, baseado nos dados e processos de uma empresa; e que foi elaborado em um único software, que não dispõe de simulação dinâmica. Além disso para construção do modelo foi necessário simplificar as operações das frentes de colheita e utilizar um local único com valores médios para representar as frentes de fornecedores.

Em relação à utilização da configuração do sistema da empresa estudada, destacam-se, entre outros fatores a quantidade de equipamentos e de frentes de colheita, que são particularidades do sistema estudado, e em caso de replicação deve-se considerar a revisão desses pontos e de outras condições específicas. No entanto, como já visto, o fluxo de operação é representativo para o contexto sucroenergético atual.

A simplificação das operações das frentes de colheita e a utilização de um único local para as frentes de colheita de fornecedores teve como objetivo facilitar a construção do modelo. Como consequência, perde-se o detalhamento das operações de dentro desses locais e a possibilidade de variação dos cenários, de modo que tem-se controle somente com as variáveis de entrada e a taxa de produção das frentes, dada em toneladas por hora.

Apesar dessas limitações o modelo pode ser replicado em outras empresas ou produtores do setor sucroenergético.



Como sugestão de trabalhos futuros, ressalta-se: a) o desenvolvimento de um modelo de simulação para as operações do CTT da cana-de-açúcar que tenha como objetivo uma visão de custos operacionais; b) a utilização do modelo de simulação computacional desenvolvido neste trabalho para realizar um estudo de otimização do sistema produtivo de corte, transbordo e transporte da empresa estudada; c) a utilização do modelo desenvolvido para suportar abordagens da filosofia Lean, como a análise da cadeia de valor das operações de CTT; d) a utilização do modelo para suportar o desenvolvimento de ferramentas relacionadas à Agricultura 4.0; e e) a replicação e adaptação deste modelo de simulação computacional para outras cadeias agroindustriais.

Referências

- Arjona, E.; Bueno, G.; Salazar, L. (2001). An activity simulation model for the analysis of the harvesting and transportation systems of a sugarcane plantation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 32, 2001. p. 247–264. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(01\)00168-5](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(01)00168-5).
- Barbieri, R. S.; Carvalho, J. B. D.; Sabbag, O. J. (2016). Análise de viabilidade econômica de um confinamento de bovinos de corte. *Interações*, v. 17, n. 3, p. 357-369.
- Barnes, A. J. *et al.* (1998) Simulation modeling of sugarcane harvesting and transport delays. *Proceedings of The South African Sugar Technologists Association* p. 18-23.
- Bateman, R. E. *et al.* (2013). *Sistemas de simulação: aprimorando processos de logística, serviços e manufatura*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Bayazit, N. (2004). Investigating Design: A Review of Forty Years of Design Research, Massachusetts Institute of Technology. *Design Issues*, v. 20, n. 1, p. 16-29.
<http://dx.doi.org/10.1162/074793604772933739>.
- Bocanegra-Herrera, C. C.; Vidal, C. J. (2016). Development of a simulation model as a decision support system for sugarcane supply. *DYNA*, v. 83, p. 180 – 186.
- Bochtis, D.D.; Sorensen C.G.C.; Busato P. (2014). Advances in agricultural machinery management: A review. *Biosystems engineering*, vol. 126 p.69-81.

- Chwif, L.; Medina, A. C. (2015). *Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria & Aplicações*. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- CONAB. (2021). Companhia Nacional de Abastecimento 2021. Observatório agrícola. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. V. 7. Safra 2020/21. N. 4. Maio. Disponível em <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>, acesso em 15 jun. 2021.
- Cortez, J. W. *et al.* (2016). Quality of sugarcane mechanized planting. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural*, v. 36, n. 6, p. 1136-1144.
- Díaz, J.A.; Pérez, I.G. (2000). Simulation and optimization of sugarcane transportation in harvest season. *Proceedings of the 2000 Winter Simulation Conference*. p. 1114-1117.
- Faria, D. A. F.; Frazão, M. L. S.; Vieira, J. G. V.; Silva J. E. A. R.; Lemos, P. H. (2019). A combination of discrete event simulation and multi-criteria analyses to configure sugarcane drop and hook delivery systems. *EAGRI – Engenharia Agrícola*, p. 248 – 256.
- Grunow, M.; Günther, H.-O.; Westinner, R. (2007) Supply optimization for the production of raw sugar. *International Journal of Production Economics*, 110. p. 224–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.019>.
- Guerra, M. (2018). CTT: Transformando Aço em Números. *Revista Canavieiros*. N. 141. Ano XI. Março 2018. Disponível em [https://esalqlog.esalq.usp.br /upload/kceditor/files/2019/Canavieiros%20Mar%c3%a7o%20-%20Treinamento%20CTT%20ESALQ-LOG](https://esalqlog.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/2019/Canavieiros%20Mar%c3%a7o%20-%20Treinamento%20CTT%20ESALQ-LOG), acesso em 02 nov. 2019.
- Higgins A. J.; Davies, I. (2005). A simulation model for capacity planning in sugarcane transport. *Computers and Electronics in Agriculture*. 47 p. 85-102.
- Higgins, A.J.; *et.al.* (1998). Optimising harvest date in sugar production: A case study for the Mossman mill region in Australia I. Development of operations research model and solution. *Field Crops Research*. 57 p. 153-162, 1998.
- Iannoni, A. P.; Morabito, R. (2006). *A discrete simulation analysis of a logistics supply system*.



Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 42, p.191–210. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.tre.2004.10.002>.

Iannoni, A. P.; Morabito, R. (2002). 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.

Machado, A. M.; Vieira, J. C. L.; Boccaletti, H.; Surian, S. S. (2018) Logística na colheita mecanizada da cana-de-açúcar: corte, transbordo e transporte. *Revista Perspectiva em Educação, Gestão & Tecnologia*, V.7, n. 13, jan-jun. Disponível em

<[https://fatecitapetininga.edu.br/perspectiva/pdf/13/e13artigo%20\(3\).pdf](https://fatecitapetininga.edu.br/perspectiva/pdf/13/e13artigo%20(3).pdf)>, acesso em 29 out.

2019.

Milan, M. (1992) *Improving operational management of harvest, transport and mechanization for sugar cane in Brazil*. 1992. 241 p. Thesis (PhD. in Agricultural Engineering) Cranfield Institute of Technology, Silsoe College.

Milan, M.; Rosa, J. H. M. (2015). *Corte, transbordo e transporte (CTT): aspectos relevantes e uso de modelagem para CTT*. In: BELARDO, G. C. *et al.* Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar. Jaboticabal: SBEA, p.415-428.

Morabito, R.; Pureza, V. (2018). Modelagem e Simulação. In: CAUCHICK-MIGUEL, P. A. (Org.). *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. 3ª edição. Rio de Janeiro: Elsevier. p. 167 – 195.

Mundim, J.U.C. (2009). *Uso de simulação de eventos discretos para o dimensionamento de frota para colheita e transporte de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos) Escola Politécnica Universidade de São Paulo. São Paulo.

Neves, M. *et al.* (2014) *Mapeamento e quantificação da cadeia sucroenergética na safra 2013/2014*. Mimeo.

Nova Cana. (2019). Portal Nova Cana. Setor sucroenergético enfrenta custos mais altos de produção na temporada 2018/19. Disponível em <https://www.novacana.com/n/cana/safra/cresce-custo->

[producao-cana-de-acucar-safra-2018-19-290119](#), acesso em 24 jul. 2019.

ONU. (2015). Organização das Nações Unidas. *Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em <https://nacoesunidas.org/pos2015/agenda2030/>, acesso em 27 set. 2019.

Patitad, P.; Watanabe, W. C.; Wichaisri, S. (2020). A simulation study on sugarcane truck system for inbound logistics improvement. *IEEE 7th International Conference on Industrial Engineering and Applications*.

Pecege. (2015). *Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, Esalq. 78 p. Relatório apresentado à Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) como parte integrante do projeto Campo Futuro. Disponível em <https://projetos.pecege.com/wp-content/uploads/2018/10/2014.15.pdf>, acesso em 25 jul. 2019.

Pegden, C. D., Shannon, R. E.; Sadowski, R. P. (1995). *Introduction to simulation using SIMAN*. 2.ed. New York: McGraw-Hill.

Pimentel, M.; Filippo, D.; Santos, T.M. (2020). Design Science Research: pesquisa científica atrelada ao design de artefatos. *Revista de Educação a Distância e Elearning*. v. 3 n. 1.

Ramos, R.P. (2014). *Planejamento do plantio e da colheita de cana-de-açúcar utilizando técnicas matemáticas de otimização*. 2014. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Ripoli, T. C. C.; Ripoli, M. L. C.; Vicenti; Casagrandi, D.; IDE, B. Y. (2007). *Plantio de Cana-de-Açúcar: Estado da Arte*. 2ª Ed. Piracicaba.

Salassi, M.E; Champagne, L.P. (1998). A spreadsheet-based cost model for sugarcane harvesting systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 20 p. 215-227.

Silva, A.T.B. (2012). *Modelagem e simulação de processos (corte, carregamento e transporte) na produção agrícola de açúcar e álcool*. 2012. 106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia Civil Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia.



- Silva, F. I. C.; Garcia, A. (2009). *Colheita mecânica e manual da cana-de-açúcar: histórico e análise*. Nucleus, v.6, n.1, abr. p. 233 – 248.
- Silva, J.E.A.R.; Alves, M.R.P.A.; Costa, M.A.B. (2011). Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. *Gestão & Produção*. São Carlos v. 18 n. 1 p. 73-90.
- Silva, J.E.A.R. (2006). *Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar*. 2006. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- Simon, H. A. (1996). *The Sciences of the Artificial*. 3rd ed. Cambridge: MIT Press.
- Singh, G; Pathak, B.K. (1994). A decision support system for mechanical harvesting and transportation of sugarcane in Thailand. *Computers and Electronics in Agriculture* 11 p. 173-182.
- Tomazela, M. G. J. M.; Leandro, C. R.; Oliveira, M. C.; Campos, F. C. (2017). Simulação de eventos discretos na avaliação de um processo de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar. *Revista Espacios*, vol. 38, nº 21. p. 41. Disponível em: <http://www.revistaespacios.com/a17v38n21/17382141.html>, acesso em 25 nov. 2019.
- Vaishnavi, V. K., e Kuechler, W. (2015). *Design science research methods and patterns: innovating information and communication technology*. Crc Press.
- Veiga Filho, A. A. (1999). Estudo do processo de mecanização do corte na cana-de-açúcar: o caso do Estado de São Paulo. *Recitec, Recife*, v. 3, n.1, p.74-99.