

Dinâmica do suprimento de cana em usinas sucroalcooleiras: efeitos do uso de frota mista

Marco Giunta¹

João Eduardo Azevedo Ramos da Silva²

¹Graduando do curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Campus de Sorocaba, SP, Brasil. E-mail: marco.giunta@estudante.ufscar.br

²Departamento de Engenharia de Produção de Sorocaba – DEP-So, Universidade Federal de São Carlos - UFSCar, Campus de Sorocaba, SP, Brasil. E-mail: jesilva@ufscar.br

Resumo: O presente estudo avalia, através de um modelo de simulação, o abastecimento de uma usina sucroalcooleira que opera com frota de caminhões mista, composta por rodotrens e treminhões. Para a indústria sucroalcooleira, a logística representa uma questão chave, já que é responsável pelo abastecimento contínuo de cana-de-açúcar a usina ao longo da safra. A coordenação de uma frota mista constitui um desafio, dada a diferença operacional das diversas opções de composições veiculares de carga (CVC). A pesquisa avalia o sistema de abastecimento de uma usina, variando a composição da frota, a quantidade de pontos de descarga e a forma como esses pontos são atendidos. Como ferramenta foi utilizada a modelagem e simulação de eventos discretos para representar as operações de abastecimento da usina. Para a análise dos cenários foram ponderados o risco de desabastecimento da moenda, o estoque, a utilização da moenda, a quantidade de cana entregue diariamente e o tempo de permanência dos veículos na usina. Foi avaliada a performance do sistema com diferentes configurações, de modo a encontrar alternativas viáveis para cada mix de composição da frota. Os cenários com maior participação de rodotrens apresentaram melhor desempenho. Ainda, foram ressaltados os desafios de operar com uma frota mista também encontrados na literatura, como o dimensionamento e coordenação dos diferentes tipos de veículos e a adoção e interpretação dos indicadores para avaliar o desempenho da frota.

Palavras-chave: simulação de eventos discretos; logística; cana-de-açúcar; frota.

Abstract: This study evaluates, using a discrete-event simulation, the supply of a sugar and ethanol mill that operates with a mixed truck fleet, composed of road trains and trucks with two trailers. For the sugar and ethanol industry, logistics represents a key issue since it is responsible for the continuous supply of sugarcane to the mill throughout the harvest. The mixed fleet coordination represents a challenge, given the operational differences between the various vehicle types. This paper evaluates a mill's supply system by varying the fleet composition, the number of unloading points, and how these points are serviced. Discrete-event modeling and simulation are used as a tool to represent the mill's supply operations. To analyze the scenarios, the risk of mill supply shortage, storage, mill utilization, the amount of sugarcane delivered daily, and the time the vehicles remain in the mill are the indicators evaluated. The system's performance was evaluated with different configurations to find viable alternatives for each fleet composition mix. The scenarios with greater participation of road trains showed better performance. Furthermore, the challenges of operating with a mixed fleet, also found in the literature,

were stressed. These challenges are such as the dimensioning and coordination of the different types of vehicles and the adoption and interpretation of indicators to evaluate the performance of the fleet.

Keywords: discrete-event simulation; logistics; sugarcane; fleet.

1 Introdução

No ano-safra 2020-2021, o Brasil produziu 640,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar; 40,2 milhões de toneladas de açúcar e; 31,1 milhões m³ de etanol anidro e hidratado. Ainda durante esse período, a exportação do açúcar e do etanol renderam, respectivamente, 8,8 e 1,2 milhões US\$ F.O.B. (Brasil, 2020). Dessa forma, o setor sucroalcooleiro se mostra de grande relevância para a economia da nação.

A colheita e o transporte até as usinas são processos críticos para as empresas desse ramo. Por ser um insumo perecível, é importante reduzir o tempo entre o corte da cana até a sua moagem. Desse modo, a logística se torna uma questão fundamental para a indústria sucroalcooleira, havendo um contínuo esforço para minimizar prazos de entrega, níveis de estoque para moagem e presença de filas (Lamsal et al., 2016).

Para tratar da questão logística, parte das empresas no Brasil opta pela utilização de frotas mistas, com um mix de composições rodoviárias, sendo as mais utilizadas as composições veiculares de carga (CVCs) do tipo rodotrem e treminhão. Contudo, esses veículos diferem quanto à composição e à capacidade de carga. Enquanto o peso bruto total combinado (PBTC) do rodotrem é limitado a 74t, o limite do treminhão é 63t (Brasil, 2006).

É importante ressaltar que, recentemente, foi homologada pelo CONTRAN, órgão responsável por coordenar os órgãos do Sistema Nacional de Trânsito, um novo limite de 91t para a composição rodoviária rodotrem (Brasil, 2021). Contudo, como essa nova medida foi estabelecida após a realização do presente estudo, foi utilizado o limite de 74t.

Dessa forma, existem dificuldades quanto ao dimensionamento da frota, à adoção de certas estratégias de suprimento e à coordenação e programação das chegadas dos veículos nas usinas (Dominico-Díaz & Daquinta-Gradaille, 2019; Sudtachat, 2018; Faria et al., 2019). Assim, as empresas podem manter frota mista no Brasil, especialmente no caso de rodotrem e treminhão, devido à transição tecnológica, a composição antiga (treminhão) substituída pela moderna (rodotrem) ou à topografia da área de colheita.

Nesse último caso, o treminhão consegue operar em áreas mais declivosas graças à melhor distribuição de peso sobre os eixos de tração, em comparação com o rodotrem.

Tratando-se então, mais especificamente, dos processos de recepção da cana nas usinas, estão englobados, de forma geral, pesagem, sondagem da carga, armazenagem intermediária e descarga na usina (Faria et al., 2019). O estoque intermediário está associado à inconstância dos prazos necessários à produção e ao transporte da carga ao longo do canal de suprimentos, conforme apresentado por Ballou (2006). Dessa forma, a quantidade de pontos de descarga influencia na gestão do estoque, uma vez que é necessário atender todos os pontos, para garantir a continuidade da moagem. Para isso, o estoque precisa ser mantido em um nível adequado para sincronizar o ritmo das remessas discretas dos veículos carregados com o processo contínuo de moagem.

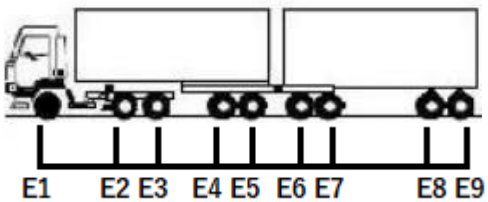
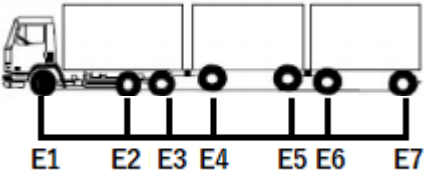
Como objetivo geral, a pesquisa avalia um sistema de recepção de cana-de-açúcar com frota mista formada por rodotrens e treminhões, bem como a variação da quantidade de pontos de descarga. Como objetivos específicos, avaliam-se: (i) a variação do mix entre tipos de composições rodoviárias e os consequentes efeitos no abastecimento do insumo; e (ii) os impactos da mudança das regras de direcionamento dos veículos para os pontos de descarga.

A ferramenta utilizada para representar o sistema de corte, transbordo e transporte de cana, comparando cenários de interesse é a simulação de eventos discretos. Foi utilizado como base o modelo de Giunta & Silva (2019), buscando estendê-lo. Foram incorporados novos elementos visando maior aderência aos sistemas reais: procedimentos de trocas de turno, paradas para refeição, maior detalhamento das operações de transporte no campo, adição de pontos de descarga e da composição rodoviária tipo treminhão, formando, com os rodotrens, a frota de veículos mista.

2 Revisão da literatura

As duas combinações de veículos de carga utilizadas com maior frequência são o rodotrem e o treminhão, cujas características são resumidas no Quadro 1.

Quadro 1. Quadro comparativo entre os veículos rodotrem e treminhão

Silhueta	Grupo/nº de eixos	PBTC	Caracterização
	5/8	74	<p>RODOTREM (cavalo mecânico trucado + semi-reboques + reboque com dolly)</p> <p>E1: eixo simples; limite 6t</p> <p>E2E3: conjunto de eixos em tandem duplo; limite 17t</p> <p>E4E5: conjunto de eixos em tandem duplo; limite 17t</p> <p>E6E7: conjunto de eixos em tandem duplo; limite 17t</p> <p>E8E9: conjunto de eixos em tandem duplo; limite 17t</p>
	6/7	63	<p>TREMINHÃO (caminhão trucado + dois reboques)</p> <p>E1: eixo simples; limite 6t</p> <p>E2E3: conjunto de eixos em tandem duplo; limite 17t</p> <p>E4: eixo duplo; limite 10t</p> <p>E5: eixo duplo; limite 10t</p> <p>E6: eixo duplo; limite 10t</p> <p>E7: eixo duplo; limite 10t</p>

Fonte: adaptado de Brasil (2012)

O rodotrem é composto por uma unidade tratora, ou cavalo mecânico, à qual são engatados dois semi-reboques com carroceria para acomodação da carga. Esse tipo de veículo oferece a possibilidade de engate e desengate da unidade tratora em relação aos conjuntos de semi-reboque. Ainda, a capacidade de peso bruto total combinado (PBTC) é limitada para no máximo 74t pelo DENATRAN, órgão responsável por executar a Política Nacional de Trânsito e as normativas do CONTRAN (Brasil, 2006).

Já o treminhão é um caminhão trucado que traciona dois reboques formando ao total um conjunto com três compartimentos de carga. Nesse caso, o caminhão possui independência em relação aos reboques tracionados, contudo, a carroceria do caminhão é fixa na unidade tratora. O PBTC máximo limitado por lei é de 63 toneladas (Brasil, 2006).

Quanto aos desafios constatados pelo uso de frota mista, Dominico-Díaz & Daquinta-Gradaille (2019) apontam variações nos processos operacionais, como a diferença na capacidade de transporte e a diferença entre os tempos de pesagem e de descarga. Estes fatores adicionam complexidade no dimensionamento e na coordenação da frota.

Sudtachat (2018) também constata problemas com a programação de chegadas e coordenação para o transbordo em uma usina na Tailândia, que usa um sistema com frota mista. O autor relata que o descompasso entre o fornecimento do insumo e a moagem costuma resultar na formação de filas.

Outra variação possível está na adoção de estratégias como a do bate e volta. Essa estratégia consiste no desengate de um conjunto de semi-reboques carregado no pátio da usina e, na sequência, no engate de outro conjunto vazio para o veículo retornar à frente de colheita para um novo ciclo. Nesse caso, o estoque de cana é mantido sobre rodas, ou seja, o insumo permanece nos conjuntos até a transferência para a moagem. Esse mecanismo, portanto, aumenta o aproveitamento do cavalo mecânico (Faria et al., 2019).

No entanto, nem todos os veículos possuem independência da unidade tratora em relação aos compartimentos de carga. No caso do treminhão é possível desengatar apenas as duas carretas. Assim, há a necessidade de o treminhão efetuar o transbordo da carga vinculada à unidade tratora diretamente no ponto de descarga.

É importante ressaltar que a literatura aponta grande diversidade na composição da frota rodoviária utilizada pelas usinas (Quadro 2). Em seu estudo, Bocanegra-Herrera & Vidal (2016) constatam que, para o transporte, a usina retratada utilizava uma composição rodoviária formada por uma unidade tratora, um semi-reboque e três reboques. Já Faria et al. (2019) apontam que em uma usina em São Paulo eram utilizados apenas rodotrens.

Quadro 2. Síntese dos veículos apresentados em cada estudo

Autores (Ano)	Composição da frota
Bocanegra-Herrera & Vidal (2016)	Uma unidade tratora, um semi-reboque e três reboques
Faria et al. (2019)	Rodotrens
Sudtachat (2018)	Caminhões tocos (dois eixos) ou trucados (três eixos)
Dominico-Díaz & Daquinta-Gradaille (2019)	Uma unidade tratora e um reboque ou uma unidade tratora e dois reboques
Iannoni & Morabito (2002)	Rodotrem, treminhão, romeu e julieta e toco

Fonte: elaboração própria

Sudtachat (2018) identifica que a frota estudada era composta por caminhões toco (dois eixos) ou trucados (três eixos). Kusoncum et al. (2018) não definem um tipo específico de composição utilizada na frota, porém afirmam que as frentes de corte enviam para a usina diferentes tipos de veículos, com capacidades variadas.

Dominico-Díaz & Daquinta-Gradaille (2019) avaliaram o processo de transferência de cana em uma usina em Cuba com dois tipos de caminhões: um tipo caracterizado por uma unidade tratora e um reboque e o outro tipo caracterizado por uma unidade tratora e dois

reboques. Já Iannoni & Morabito (2002) realizaram um estudo de caso na região de Ribeirão Preto/SP para equacionar a política de descarregamento de veículos, devido à presença de quatro tipos de CVCs na usina: rodotrem, treminhão, romeu e julieta e toco.

A composição da frota depende da empresa, de regulamentações e do contexto em que ela se insere. Na Tailândia, é comum a produção em pequenas propriedades agrícolas, o que resulta no fornecimento irregular ao longo do período de colheita. Já no Brasil, a maior parte da cana-de-açúcar é proveniente de terras pertencentes à própria usina, facilitando a coordenação do suprimento (Lamsal et al., 2016).

Há ainda outros estudos que abordam as operações de corte, transbordo e transporte de cana quanto ao impacto financeiro. França et al. (2017) destacam que essas operações representam uma grande parte dos custos de produção do açúcar e do etanol. Foram avaliadas operações em diferentes cidades do estado de São Paulo no ano-safra 2016-2017. O estudo obteve, em média, um custo maior no corte, seguido do transporte e, por fim, do transbordo.

Na Tailândia, a logística de abastecimento (*inbound*) das usinas de cana de açúcar - que envolve as operações de cultivo, colheita, transporte e gestão do estoque - representa a maior porção de custos logísticos. As proporções de custos entre as logísticas *inbound*, interna, e para distribuição (*outbound*) são de, respectivamente, 60%, 26% e 14%. Um dos motivos para esse destaque de custos para a logística *inbound* está na quantidade de operações, maquinário e veículos exigidos (Kusoncum et al., 2018).

2.1 Uso da ferramenta de modelagem e simulação

A simulação é definida como uma imitação do funcionamento de um sistema real ao longo de um intervalo de tempo, gerando uma história artificial do sistema representado que permite a realização de inferências pelo analista. O comportamento do sistema é estudado a partir do desenvolvimento de um modelo, utilizando-se uma série de premissas expressas através de relações matemáticas e lógicas (Banks et al., 2010).

Banks et al. (2010) apontam que os sistemas mais simples podem ser resolvidos a partir de métodos matemáticos, mas que muitos sistemas reais são tão complexos que a adoção dos métodos matemáticos se torna inviável. Nesses casos, a simulação permite imitar o comportamento desses sistemas, fornecendo ao analista medidas de desempenho que se aproximam às do sistema real. Freitas Filho (2008) reforça que o diferencial da simulação

é a investigação do objeto de estudo sem a necessidade de alterá-lo, facilitando experimentações de diferentes cenários.

As vantagens trazidas pelo uso da simulação discreta são pertinentes para o estudo em questão. Para a variação da composição da frota de veículos, do número de pontos de descarga e da regra de atendimento desses pontos, pode-se realizar perguntas do tipo “O que aconteceria se...?”, cuja resposta é obtida via modelo. A interface gráfica do modelo auxilia no entendimento do sistema, de forma a identificar gargalos, interpretar variações dos níveis de estoque, ociosidade de equipamentos e paradas da moenda.

2.2 Aplicações no setor sucroalcooleiro

Entre as áreas de aplicação, a simulação atua na parte de logística, transporte e distribuição (Banks et al., 2010; Prado, 2004). No setor sucroalcooleiro, há diversos estudos que utilizam modelagem e simulação para resolver problemas relacionados ao transporte e transbordo da cana-de-açúcar.

Bocanegra-Herrera & Vidal (2016) utilizaram a simulação de eventos discretos como apoio para gestão da colheita, transporte e descarregamento de cana no pátio de usinas na Colômbia. O estudo considerou diferentes cenários, avaliando como medidas de desempenho a quantidade de cana transferida para a usina, o tamanho das filas, o tempo de ciclo dos veículos e o número de paradas na moagem. Os cenários permitiram a análise do sistema em três diferentes situações: nos períodos chuvosos, no caso em que a frente de corte estaria mais distante, e para o caso de implantação de um novo layout com a estratégia do bate e volta. Dessa forma, o modelo forneceu informações sobre o comportamento da usina nessas situações e as alternativas para o funcionamento do sistema. A simulação revelou que a adoção do bate e volta viabiliza a diminuição em 36% do tempo gasto pelos caminhões nas filas para o transbordo na usina.

Outro exemplo de aplicação da simulação de eventos discretos na indústria sucroalcooleira é o caso apresentado por Faria et al. (2019). O estudo avalia três diferentes layouts para a recepção de cana em uma usina. Os layouts consistem na adoção do sistema bate e volta antes da pesagem e sondagem do veículo; na adoção do sistema depois da pesagem e sondagem; e sem a adoção do bate e volta. Nesse caso, a simulação permitiu a utilização de um método de decisão multi-critério a partir de diferentes medidas de desempenho, além da possibilidade de variação da estrutura de equipamentos e veículos. Para cada cenário foram variados: o número de veículos para o transporte de cana, o

número de conjuntos semi-reboques mantidos em reserva e o total de tratores para o reboque dos conjuntos cheios até o ponto de descarga. Cada alternativa foi ponderada por medidas como o custo da frota, o risco de parada da moenda e o tempo gasto pelos veículos na usina. Com isso, Faria et al. (2019) concluíram que o layout com bate e volta antes da pesagem e sondagem foi o que obteve melhor desempenho.

Kusoncum et al. (2018) observaram a formação de filas na entrada de uma usina da Tailândia considerando dois cenários. O primeiro cenário consiste na mudança da regra dos veículos descarregarem na moenda, passando a empregar a regra FIFO (*First In First Out*) e eliminando prioridades que existiam anteriormente. O segundo cenário, formado a partir do primeiro, aloca os veículos para os pontos de descarga com base na proximidade da frente de origem do veículo. A adoção de ambas as alternativas apresentou o melhor desempenho, indicando uma redução no tempo de fila de 11,4%.

Já Lozano-Moreno & Maréchal (2019) também tratam da logística no setor sucroalcooleiro na Colômbia, mas com uma abordagem diferente. O estudo engloba o suprimento tanto da cana como dos resíduos da colheita para a produção de etanol de segunda geração. As medidas de desempenho consideradas avaliam os impactos ambientais gerados no transporte. O custo e a energia relacionada à utilização dos equipamentos e as emissões de carbono pelo uso do diesel são algumas dessas medidas. Foram comparados cenários com três estratégias: transporte da cana e espera para o posterior transporte do resíduo; transporte do resíduo enfardado, sem haver espera no campo e; transporte integrado, juntando a cana e o resíduo para posterior separação na usina. Como conclusão, o transporte integrado foi avaliado como a melhor alternativa e assim, os autores reportam que a modelagem e a simulação ofereceram uma unicidade em relação a outros estudos sobre impactos ambientais da indústria de etanol.

Os estudos apontados revelam que a técnica de modelagem e simulação se mostra presente na literatura acerca do setor sucroalcooleiro. Essa ferramenta revela-se versátil para a avaliação de estratégias logísticas para o sistema de recepção de cana nas usinas.

3 Metodologia

Nesta seção são apresentadas a caracterização da pesquisa, a descrição do objeto de estudo, a descrição de procedimentos e a forma de coleta de dados e de análise dos resultados.

3.1 Caracterização da pesquisa

O estudo pode ser caracterizado como exploratório quanto ao objetivo, pois procura-se a familiarização com o tema da pesquisa (Gil, 2002). No caso, busca-se explorar o comportamento de uma usina sucroalcooleira, variando os pontos de descarga, regras de direcionamento a esses pontos e o mix de composição da frota de veículos.

A abordagem é quantitativa, conforme Turrioni & Mello (2012), uma vez que a pesquisa utiliza a técnica de modelagem e simulação de sistemas discretos. De maneira geral, os autores apontam que a técnica de modelagem e simulação pode ter quatro propósitos:

- Aprofundar o conhecimento sobre a forma de operação do sistema;
- Formar políticas operacionais e recursos para melhorar a performance do sistema;
- Avaliar novos conceitos e/ou sistemas antes de implementá-los;
- Obter informações sem interferir no sistema real.

A pesquisa compartilha dos propósitos apresentados, em especial ao de aprofundar o conhecimento sobre a forma de operação do sistema, uma vez que é avaliado o comportamento da usina ao variar a composição da frota e o atendimento dos pontos de descarga.

Por empregar variáveis que seguem distribuições de probabilidade, o modelo elaborado é considerado estocástico. O modelo é também dinâmico, por contemplar variáveis que se modificam ao longo do período simulado. Complementarmente, visto que não há delimitações claras quanto a condições cíclicas de início e término do funcionamento da usina, o sistema é classificado como não terminal (Banks et al., 2010). Nesse caso, há interesse em estudar a usina a partir de um regime estável, em equilíbrio dinâmico.

Conforme Turrioni & Mello (2012), a pesquisa pode ser classificada como aplicada, quanto à natureza. Esse tipo de pesquisa é caracterizado pelo interesse dos resultados serem aplicados ou utilizados na solução de problemas presentes na realidade.

3.2. Descrição do objeto de estudo

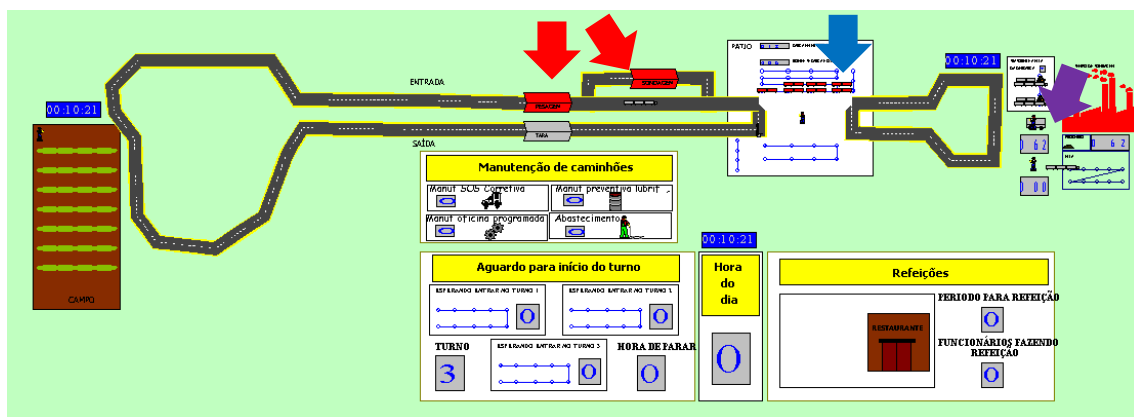
O objeto de estudo compreende, de maneira geral, as operações de logística *inbound* para produção de álcool e açúcar a partir de cana. Kusoncum et al. (2018) dividiram a cadeia de suprimento dessa indústria em três diferentes seções (Figura 1).

Figura 1. Divisão da cadeia de suprimentos da indústria sucroalcooleira

Inbound Logistics	Internal Logistics	Outbound Logistics
Cultivation	Production Plan	Marketing
Harvest	Production and Quality Control	Production Transportation and Distribution
Transportation	Material Transfer	Warehouse Management
<i>Mill Yard Management</i>	Packing and Storage	Export Management
	Information Management	Information Management

Fonte: Kusoncum et al. (2018)

A logística interna, que se refere aos processos de natureza contínua que ocorrem dentro da usina, e a logística *outbound*, que diz respeito à distribuição e comércio do produto, não foram abordados no presente estudo. Assim, o objeto de estudo está na logística *inbound*, mais especificamente nos processos de transporte de cana do campo até o sistema de recepção da usina. Os processos de colheita também são retratados, embora menos detalhados por não serem o foco do estudo. Para facilitar a visualização do sistema modelado, foi elaborada a Figura 2.

Figura 2. Imagem do objeto de estudo representado no modelo de simulação

Fonte: Elaboração própria

O modelo elaborado retrata um sistema de recepção de cana. Esse sistema compreende: a) os processos de pesagem do veículo na entrada (pesagem bruta), sondagem da carga e uma segunda pesagem do veículo na saída (pesagem da tara), destacados pela seta vermelha; b) um pátio para o estoque de cana sobre rodas (em carretas), destacado pela seta azul; c) o(s) ponto(s) para efetuar a descarga na moenda, destacados pela seta roxa. No caso, o pátio funciona como um estoque intermediário para evitar o desabastecimento

da usina. Dessa forma, a quantidade de pontos de descarga pode afetar o nível de estoque exigido para manter a usina abastecida.

Além disso, a composição da frota afeta o funcionamento do sistema. Por se tratar de uma frota mista de veículos, variáveis como o tempo de descarga e volume transportado em cada viagem dependerão do tipo de veículo considerado. Outra diferença está na adoção da estratégia do bate e volta, no caso da usina idealizada, todo rodotrem adota o bate e volta e todo treminhão deve realizar a transferência de carga direto no ponto.

Partindo dessas premissas, planejou-se as experimentações feitas no modelo. Para variar o mix de veículos na frota, foram elaborados diferentes cenários alterando-se gradativamente em 20% a proporção entre os rodotrens e treminhões, partindo de uma frota homogênea de rodotrens em direção à frota composta somente por treminhões.

Ainda foram analisados dois sistemas, com um e dois pontos de descarga e, no caso de dois pontos, variou-se a política de descarga. As regras experimentadas no modelo foram a de alocação das descargas nos pontos dedicadas para cada tipo de CVC *versus* compartilhadas (FIFO).

3.3. Descrição de procedimentos

Para a realização do estudo foi adotado o procedimento conforme Freitas Filho (2008):

- **Etapa de planejamento:** Foram definidos o problema e os objetivos do estudo, bem como seu planejamento, que envolveu a definição dos cenários a serem analisados: variando o mix de veículos, a quantidade de pontos de descarga e as regras de atendimento dos pontos. O modelo conceitual utilizado como ponto de partida foi o do estudo de Giunta & Silva (2019).
- **Etapa de modelagem:** Foram incorporados no modelo de Giunta & Silva (2019) a representação dos procedimentos de trocas de turno, de paradas para refeição e de paradas para manutenção dos veículos. Ainda, foi introduzido o treminhão, e mais um ponto de descarga para avaliação dos cenários.
- **Etapa de experimentação:** Foram inicialmente calculados os tempos transiente (*warm-up*) e total do modelo de simulação. Com esses dados, seguiu-se para os experimentos de interesse e execução das simulações dos cenários planejados.
- **Tomada de decisão e conclusão do projeto:** Dentro desse passo, Freitas Filho (2008) sugere questões a serem avaliadas: “Como comparar as alternativas entre

si?”, “Como identificar a melhor alternativa de um conjunto?” e “Como garantir estatisticamente os resultados?”. Desse modo, foi identificada a melhor solução com base em indicadores.

3.4. Forma de coleta de dados e análise de resultados

Para avaliar o sistema modelado, utilizou-se medidas de desempenho quantitativas como o nível do estoque intermediário; o percentual de utilização da moenda, para identificar o risco de desabastecimento; a entrega diária de cana-de-açúcar; e o tempo de permanência do veículo na usina. Os registros do estoque e da utilização da moenda foram feitos de maneira contínua ao longo do período simulado. O volume armazenado de cana-de-açúcar foi apontado em termos de “tempo de moagem”.

A coleta de dados foi realizada através da revisão da literatura, mais especificamente, do estudo de Giunta & Silva (2019), cujo modelo foi adotado como base, e do estudo de Silva (2006), de forma a obter os dados para a incorporação dos treminhões no modelo de simulação. Os dados operacionais coletados como manutenções, tempos de deslocamento, pesagem e descarregamento estão expostos no Apêndice A. Outros parâmetros, como a estrutura de equipamentos da usina e cargas adotadas dos veículos, estão apresentados no Apêndice B.

A partir de Silva (2006), foram obtidas as velocidades médias dos treminhões carregados e vazios, para obter o tempo de percurso e a permanência no campo, a qual foi aproximada para uma distribuição triangular. Já para o peso líquido do treminhão e do rodotrem, foram considerados, respectivamente, 48t e 58t, dado o limite do peso bruto total combinado de 63t e 74t, estabelecido pelo DENATRAN (Brasil, 2012).

4. Descrição do caso estudado e aspectos computacionais

Os cenários foram elaborados visando representar uma configuração específica do sistema produtivo retratado, em concordância com a definição de cenário utilizada na literatura (Freitas Filho, 2008; Prado, 2004). Para facilitar as análises do estudo, os cenários foram inicialmente subdivididos em três casos:

- S1 – Um ponto de descarga com regra de atendimento compartilhada;
- S2 – Dois pontos de descarga com regra de atendimento compartilhada;
- S3 – Dois pontos de descarga dedicados à um tipo de CVC.

Dessa forma, cada caso engloba diferentes cenários com a alteração do mix da frota, mais especificamente, variando o mix em 20% para cada cenário. Para S1, S2 e S3, a quantidade inicial de rodotrens foi de 32 e a final foi de 0, com a variação das quantidades de Rodotrem/Treminhão seguindo a proporção de 1:1, conforme a sequência: 32/0; 26/6; 19/13; 13/19; 6/26; 0/32. Assim, o cenário com um ponto de descarga com regra de atendimento compartilhada e com 19 rodotrens e 13 treminhões seria o cenário com mix de 60% de rodotrens no caso S1.

Posteriormente, como decorrência da análise dos três casos iniciais – S1, S2 e S3, foi realizada a experimentação com dois pontos de descarga e alterando a proporção de substituição de Rodotrem/Treminhão para 2:3, de forma a compensar a menor carga transportada do treminhão em relação ao rodotrem. Desse modo, foram avaliados também os cenários subdivididos nos casos:

- S4 – Dois pontos de descarga com regra de atendimento compartilhada, com nova taxa de substituição de 2:3;
- S5 – Dois pontos de descarga dedicados, com nova taxa de substituição de 2:3.

Assim, a variação das quantidades de Rodotrem/Treminhão nestes cenários seguiu a razão de: 32/0; 26/9; 19/20; 13/29; 6/39; 0/48.

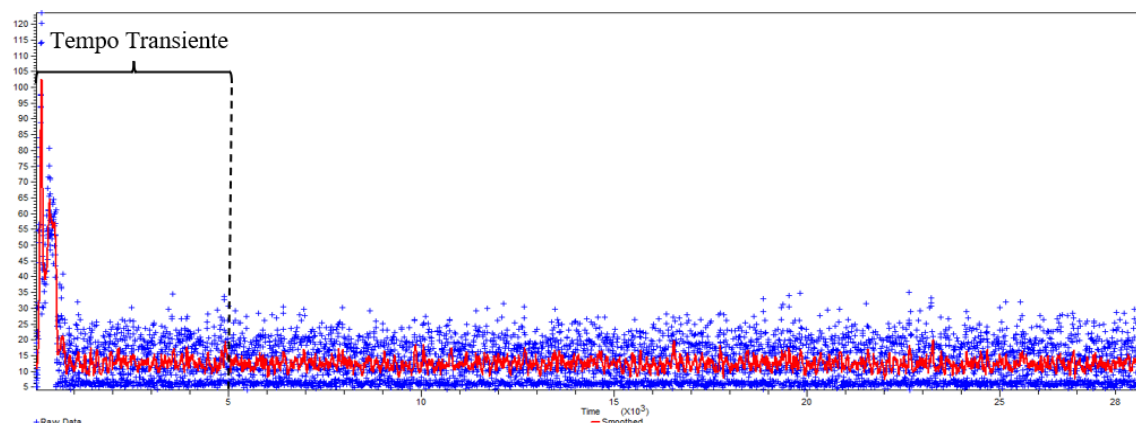
Também foram definidos os tempos da fase transiente e de simulação e o detalhamento das medidas de desempenho.

4.1. Testes computacionais

Cálculo da fase transiente (tempo de *warm up*)

Para o cálculo da fase transiente, foi utilizado o procedimento proposto por Freitas Filho (2008) para tratar de sistemas não-terminais. Inicialmente, foi selecionada uma medida de desempenho do modelo: o tempo de permanência dos veículos na usina e o seu desempenho ao longo do tempo. O período considerado foi de 20 dias (28.800 minutos) (Figura 3).

Figura 3. Comportamento do indicador de tempo na usina ao longo da simulação



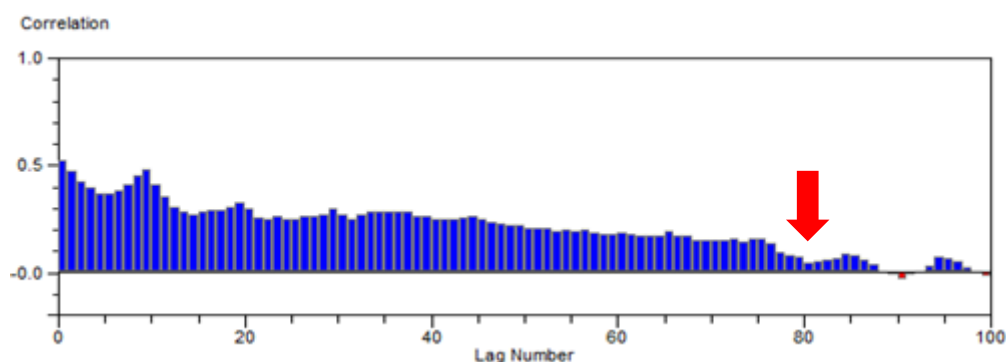
Fonte: Elaboração própria

Foi utilizada a média móvel como técnica de suavização da curva, a fim de facilitar a observação do comportamento do indicador. A análise visual dos registros da variável ao longo do modelo facilita a identificação do momento em que o comportamento do sistema entra em um regime estável. De modo conservador, foram escolhidos os primeiros 5.000 minutos como intervalo descartado.

Cálculo do tempo de simulação

Após a definição do tempo de *warm up*, prosseguiu-se com a determinação do tempo de simulação. O método proposto por Freitas Filho (2008) inicia com a formação de lotes de amostras da variável escolhida – no caso, tempo do veículo na usina - de tamanho n . O tamanho n deve ser suficiente para garantir uma baixa correlação entre as médias amostrais (Figura 4).

Figura 4. Correlação versus tamanho do lote amostral



Fonte: Elaboração própria

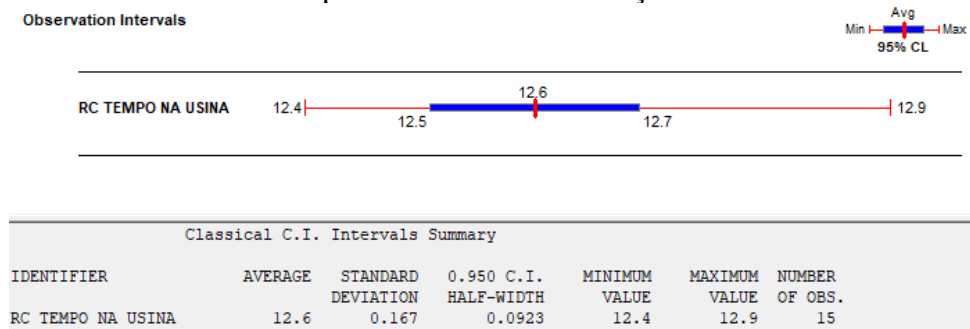
Como observado no gráfico, a correlação tende a diminuir à medida que o tamanho n do lote aumenta. O primeiro valor que atingiu a marca inferior a 0,05 foi para 81

observações, conforme indicado pela seta em vermelho (Figura 4). De maneira a garantir a independência entre as médias, multiplicou-se o valor n por um fator de segurança igual à dez, obtendo-se o novo tamanho de lote, 810.

A próxima etapa sugerida por Freitas Filho (2008) consiste na execução do modelo piloto. A simulação piloto com 15 amostras dos lotes considerados dura 61.965 minutos. Ao adicionar o tempo de *warm up*, o tempo total de simulação resulta em 66.965 minutos.

Para validar o modelo piloto analisou-se, novamente, o tempo de permanência do veículo na usina como variável de referência (Figura 5). Foi considerado, para um intervalo de confiança de 95%, a variação limite de 5% em torno da média amostral, em concordância com a literatura (Banks et al., 2010).

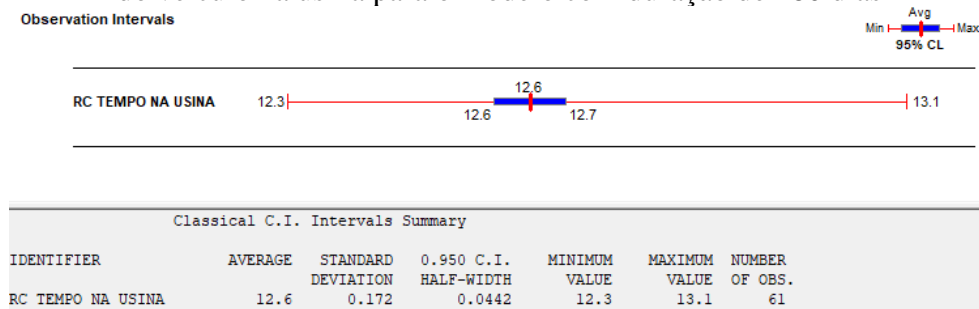
Figura 5. Intervalo de confiança de 95% no entorno da média de tempo de permanência do veículo na usina para o modelo com duração de 66.965 minutos



Fonte: Elaboração própria

No caso, o semi-intervalo de confiança (*half-width*) de 0,0923, representou 0,7% da média amostral, respeitando o limite estabelecido. Entretanto, optou-se por adotar 180 dias (259.200 minutos) como tempo total da simulação, uma vez que representa a duração da safra na região Centro-Sul do Brasil. Desse modo, foi realizada uma nova análise para a validação (Figura 6).

Figura 6. Intervalo de confiança de 95% no entorno da média de tempo de permanência do veículo na usina para o modelo com duração de 180 dias



Fonte: Elaboração própria

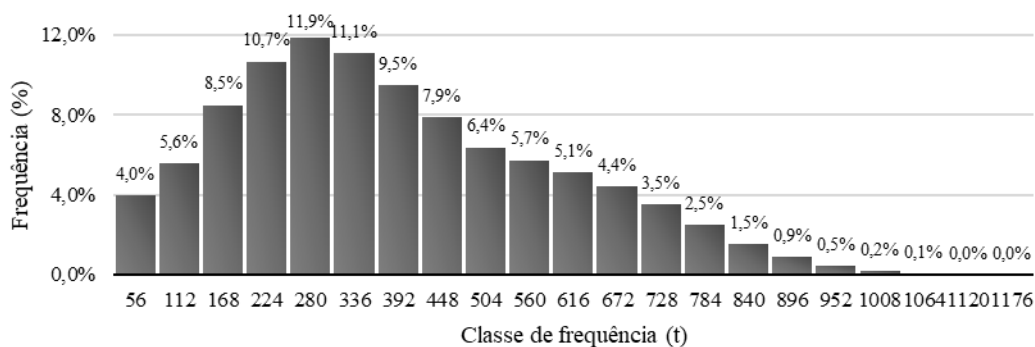
O semi-intervalo de confiança (*half-width*) obtido destarte, 0,4% da média amostral, também respeita o limite de 5% em torno da média da amostra.

4.2. Descrição das medidas de desempenho

Para a análise do desempenho dos cenários simulados, foi considerado um conjunto de indicadores:

- Risco de desabastecimento (%): Ao longo do período simulado (180 dias) foram realizados registros sistemáticos do estoque sobre rodas em intervalos de 5 em 5 minutos. Com esses dados foi elaborado um histograma com as classes de frequência das cargas de cana líquidas em estoque intermediário para cada cenário, conforme exemplo (Figura 7).

Figura 7. Histograma dos volumes de cana mantidos em estoque



Fonte: Elaboração própria

Assim, a menor classe de frequência, de 0t a 56t em estoque, representa a situação que foi considerada como risco de desabastecimento. No caso, o histograma exemplo aponta um risco de 4,0%. Um procedimento semelhante para a obtenção da medida de desempenho foi empregado no estudo de Faria et al. (2019).

- Utilização da moenda (%): Esta medida afere o tempo em que houve de fato desabastecimento na moenda. Nesse caso, a ociosidade indica que o estoque foi consumido ou o ritmo das transferências aos pontos de descarga não consegue acompanhar a capacidade nominal da moenda.
- Cana entregue (t): Representa a média de cana entregue a usina diariamente. A capacidade da usina idealizada é de 15.000t/dia, desse modo, as entregas diárias devem se aproximar a esse valor para suprir adequadamente o sistema. Tal indicador também foi utilizado por Iannoni e Morabito (2002),

Foi considerado gerenciável um risco de desabastecimento de até 2% e uma utilização da moenda de até 98%. Na prática, é possível reduzir o ritmo de consumo evitando

interrupções na usina. Volumes muito baixos ou muito altos de estoque foram considerados indícios negativos, uma vez que a carga em estoque pode indicar tanto um sistema subdimensionado, como um sistema superdimensionado.

5. Resultados e discussões

São inicialmente apresentados os resultados dos cenários obtidos para os casos: S1 – Um ponto de descarga com regra de atendimento compartilhada (Tabela 1); S2 – Dois pontos de descarga com regra de atendimento compartilhada (Tabela 2); e S3 – Dois pontos de descarga dedicados (Tabela 3).

Tabela 1. Resultados dos cenários S1

Mix frota (% rodo)	Utilização moenda	Carga máxima em estoque	Carga média em estoque	Cana entregue	Tempo médio na usina	Risco de desabastecimento
100%	99,3%	1.334	778	14.891	20,5	0,3%
80%	93,1%	1.392	849	13.968	27,5	1,4%
60%	84,6%	1.508	974	12.683	40,3	4,0%
40%	78,6%	1.566	1.042	11.787	49,2	7,9%
20%	72,7%	1.566	1.038	10.907	58,7	4,8%
0%	63,4%	986	519	9.506	75,7	4,0%

Fonte: elaboração própria

Tabela 2. Resultados dos cenários S2

Mix frota (% rodo)	Utilização moenda	Carga máxima em estoque	Carga média em estoque	Cana entregue	Tempo médio na usina	Risco de desabastecimento
100%	100,0%	1.334	750	14.999	19,0	1,5%
80%	99,6%	1.218	647	14.944	13,8	6,7%
60%	95,4%	580	164	14.319	14,9	7,8%
40%	90,7%	522	112	13.603	17,8	14,9%
20%	85,6%	464	72	12.841	19,5	17,6%
0%	81,3%	464	51	12.204	21,0	13,3%

Fonte: elaboração própria

Tabela 3. Resultados dos cenários S3

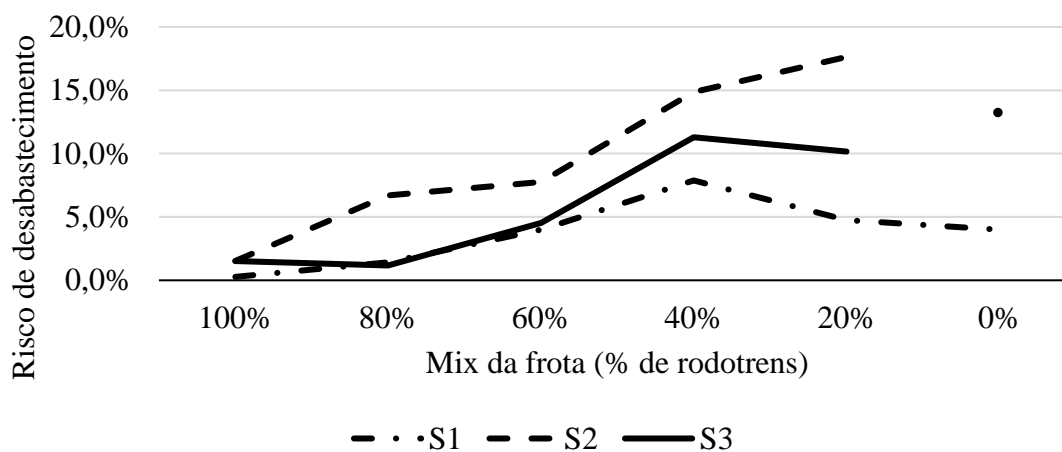
Mix frota (% rodo)	Utilização moenda	Carga máxima em estoque	Carga média em estoque	Cana entregue	Tempo médio na usina	Risco de desabastecimento
100%	100,0%	1.334	750	14.999	19,0	1,5%
80%	99,4%	1.160	682	14.904	13,8	1,2%
60%	95,7%	638	184	14.360	13,4	4,5%
40%	89,3%	580	145	13.399	22,6	11,3%
20%	79,4%	696	259	11.919	38,5	10,2%
0%	81,3%	464	51	12.204	21,0	13,3%

Fonte: elaboração própria

A variação do mix da frota foi apontada em termos da proporção dos rodotrens. Nos casos em que a frota é homogênea, especificamente para S3, ambos os pontos de descarga ficaram dedicados ao mesmo tipo de composição rodoviária, uma vez que seria incoerente manter um ponto dedicado a um veículo que não está presente na frota. Desse modo, os valores para frotas homogêneas (100% e 0%) em S2 e S3 foram iguais.

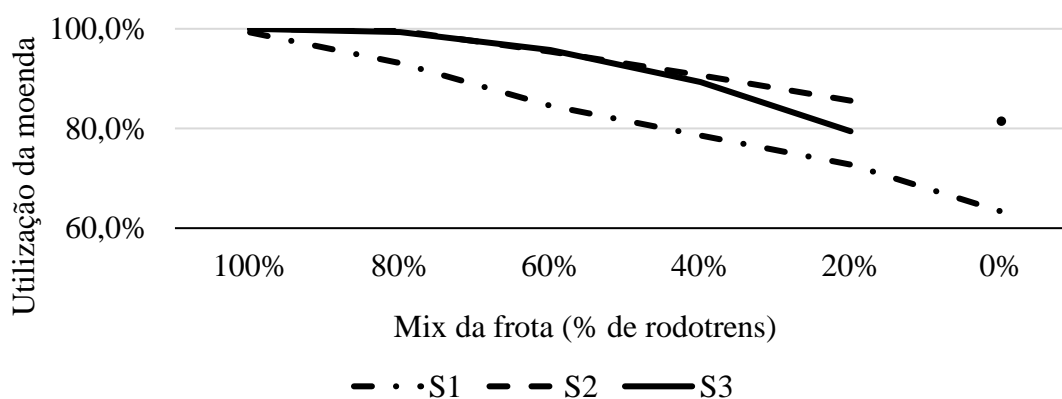
De forma geral, ao aumentar a proporção de treminhões no sistema, há uma tendência ao aumento no risco de falta de cana (Figura 8) e de desabastecimento da usina (Figura 9). Para facilitar a visualização da tendência, destacou-se a situação em que S2 e S3 têm frota homogênea (100%), a descontinuidade no gráfico destaca a mudança de regra para S3.

Figura 8. Risco de desabastecimento vs mix da frota



Fonte: elaboração própria

Figura 9. Utilização da moenda vs mix da frota



Fonte: elaboração própria

A tendência de comportamento pode ser explicada pelas características do treminhão de maior tempo para efetuar a descarga dos três volumes de carga do conjunto na usina e de

menor volume transportado por viagem. Essa diferença prejudica a quantidade de cana entregue diariamente para uma frota predominantemente composta por treminhão, o que aumenta o risco de paradas da usina.

Já o risco de desabastecimento apresenta maiores oscilações, como no caso com um ponto de descarga (S1), em que um decréscimo do número de rodotrens a partir de um mix de 40% aparenta gerar resultados positivos. Entretanto, ao analisar a utilização da moenda, nota-se uma aparente contradição, enquanto o risco de desabastecimento diminui, as paradas na moagem estão mais frequentes. O motivo para essa aparente contradição está na diferença de significado entre o risco de desabastecimento para o treminhão e para o rodotrem.

Enquanto para uma frota predominantemente composta por rodotrens, o risco de desabastecimento indica um nível de estoque mais crítico, que pode resultar em paradas na usina, para uma frota formada predominantemente por treminhões, essa medida de desempenho traz um falso indício de segurança. Essa situação é evidenciada na comparação dos cenários com um ponto (S1) e dois pontos (S2) de descarga com 0% rodotrens e 100% treminhões (Tabela 4)

Tabela 4. Comparação de S1 e S2 com 0% rodotrens

Cenário	Utilização moenda	Carga máxima em estoque	Carga média em estoque	Cana entregue	Tempo médio na usina	Risco de desabastecimento
S1 - 0%	63,4%	986	519	9.506	75,7	4,0%
S2 - 0%	81,3%	464	51	12.204	21,0	13,3%

Fonte: elaboração própria

No caso dos treminhões, o menor risco de falta de cana, apesar de corretamente apontar que os estoques sobre rodas estão mais altos, é, na verdade, um sintoma do descompasso entre as descargas discretas e a capacidade de consumo nominal da usina. O menor volume de carga do treminhão faz com que o tempo de descarga se torne um problema, à medida que o ritmo de transferência de carga não acompanha a velocidade de consumo da moenda de 625t/h (ou 15.000t/dia), formando assim um acúmulo de cana em estoque. Assim, a cana em estoque não consegue ser descarregada, ainda que mais treminhões sejam incorporados ao sistema.

Tal problema não é constatado com o rodotrem, o qual possui um limite de PBTC maior e maior rapidez na descarga do conjunto completo, à medida que descarrega duas carretas ao invés de três, como no caso do treminhão. Desse modo, reforça-se o desafio encontrado

ao se trabalhar com frota mista. É importante o analista ter uma visão crítica em relação aos resultados obtidos e às medidas de desempenho adotadas, uma vez que podem ter significados diferentes dependendo das características de cada veículo da frota estudada.

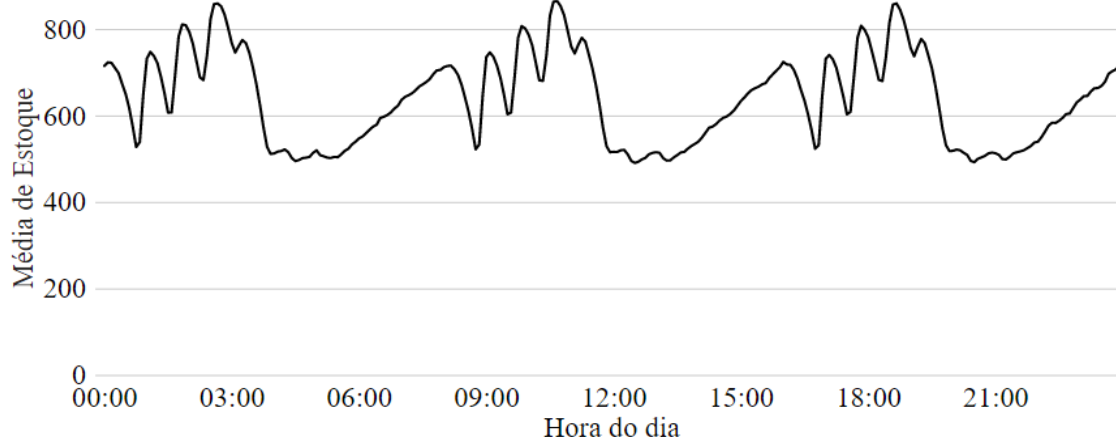
Ainda, reforça-se que o motivo de se operar com frota mista é, em geral, por conta de algum tipo de limitação. Para o Brasil, essas limitações podem estar relacionadas com a topografia dos terrenos da usina, onde o treminhão conseguiria operar nas áreas mais declivosas, ou podem estar relacionadas com o alto custo de alteração de uma frota mais antiga (treminhões) para uma mais moderna (rodotrens), sendo a transição feita aos poucos à medida que os veículos antigos chegam ao final da vida útil. Na Tailândia, Sudtachat (2018) aponta também que essa limitação pode estar relacionada pela composição da frota depender dos veículos de diversos pequenos agricultores, cada um com autonomia para escolher o tipo de composição rodoviária para efetuar as entregas.

Não é incomum as empresas sucroalcooleiras operarem com veículos que diferem quanto ao limite de peso da composição rodoviária e tempo de descarga. No estudo de Iannoni & Morabito (2002), estão presentes quatro diferentes composições, com divergências quanto às características citadas. Dominico-Díaz & Daquinta-Gradaille (2019) também apontam variações dentro da frota nos processos de descarga e na capacidade de carga. Ainda, Sudtachat (2018) descreve o desafio das usinas na Tailândia de coordenar as entregas de cana dos veículos nos sistemas compostos também por frotas mistas.

Quanto à avaliação dos cenários, para os sistemas que operaram com 100% rodotrens, apenas um ponto de descarga foi suficiente para atender o limite estipulado de risco abaixo de 2% e utilização da moenda acima de 98%. Adicionar um segundo ponto de descarga geraria um aumento da estrutura da usina, cuja redundância poderia ser justificada para prevenir interrupções em casos de quebras. Além disso, dentre todos os cenários simulados, os que operaram com 100% de rodotrens obtiveram os melhores resultados de forma geral.

Para o cenário em questão, com 100% de rodotrens e um ponto de descarga, o comportamento do estoque ao longo do dia oscilou, em média, entre 500t e 900t. A Figura 10 representa a média dos registros do estoque feitos ao longo do período simulado para um dia representativo.

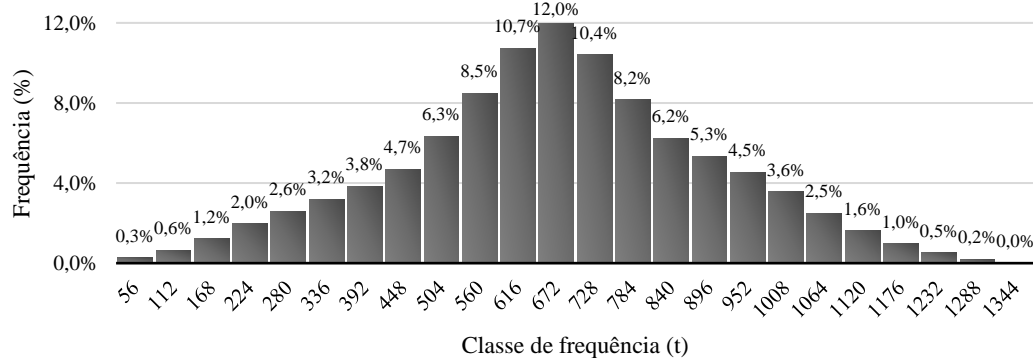
Figura 10. Comportamento no cenário de 100% rodotrens e um ponto de descarga do estoque ao longo do dia, em média



Fonte: elaboração própria

É possível verificar que os níveis de estoque tendem a permanecer baixos por volta das 4h, 12h e 21h. O comportamento harmônico da curva está associado às três trocas de turno que ocorrem às 7h, 15h e 23h e às três pausas para refeição com duração de 1h por turno. Conforme a Tabela 1, a carga média permaneceu em 778t e o volume máximo atingido foi de 1334t. Para visualizar a frequência do estoque, ainda para o cenário com um ponto de descarga e 100% de rodotrens, foi elaborado o histograma da Figura 11.

Figura 11. Histograma das frequências dos volumes de estoque no cenário com 100% rodotrens e um ponto de descarga



Fonte: elaboração própria

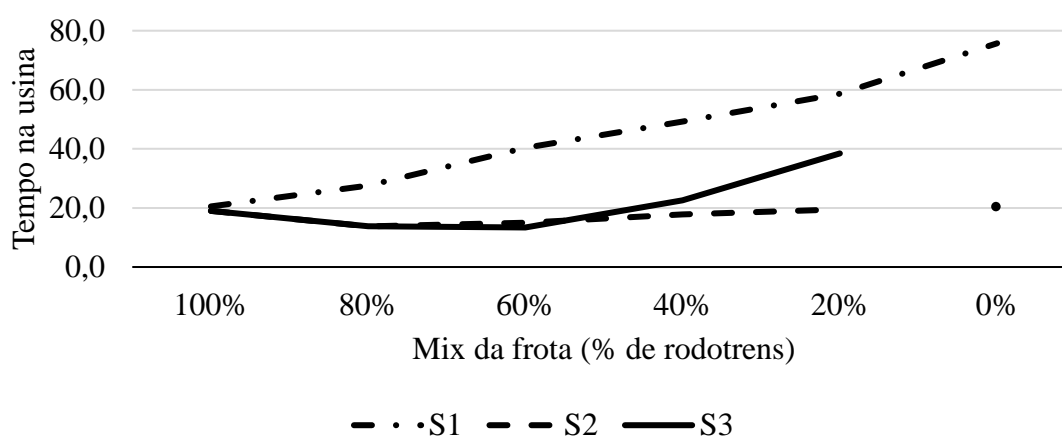
Como observado, em 0,3% do tempo o estoque sobre rodas permanece em um volume menor que 56t. Esse limite não necessariamente implica em uma interrupção da moagem, uma vez que o veículo pode ainda estar efetuando a transferência de carga.

Já para os sistemas que operam com 80% ou 60% da frota composta por rodotrens, os cenários com dois pontos de descarga apresentaram melhores resultados. Dessa forma,

com o aumento no número de treminhões, se torna interessante a adoção de um segundo ponto de descarga. A política de pontos de descarga dedicados, comparando com a regra de atendimento compartilhada, obteve uma melhora no risco de desabastecimento e uma melhora pouco expressiva na utilização da moenda também.

A partir da proporção de 60% de rodotrens, o aumento no número de treminhões torna inviável a adoção da alternativa de apenas um ponto de descarga. Nesses casos, o ponto não atende mais as demandas de moagem, o que aumenta o tempo gasto dos veículos na usina em virtude da geração de filas (Figura 12).

Figura 12. Comparação dos tempos de permanência na usina



Fonte: elaboração própria

Nos cenários dentro do caso S3, a formação de filas também configura um problema, à medida que o aumento de treminhões eleva a competição pelo mesmo ponto de descarga. A exceção nessa situação está ao atingir o estado de frota homogênea (0% ou 100% de rodotrens), momento em que se permitiu o acesso do mesmo tipo de veículo em ambos os pontos de descarga.

Adicionalmente, o treminhão não possui independência da unidade tratora em relação ao compartimento de carga, o que sujeita o veículo a enfrentar filas para efetuar a descarga de seu compartimento de carga diretamente no ponto. Dessa forma, o aproveitamento da composição diminui em relação ao aproveitamento do rodotrem, cuja independência em relação ao conjunto de semi-reboques permite realizar o bate e volta e evitar as filas para descarga. Essa estratégia de bate e volta é utilizada por todos os rodotrens na simulação.

Esse comportamento foi observado de forma similar por Faria et al. (2019). No estudo, foi constatado um maior aproveitamento dos veículos na adoção do bate e volta *versus* a

descarga direta na moenda, sem desengate, para um sistema com somente rodotrens. Faria et al. (2019) também identificam a melhora no tempo gasto pelos rodotrens na usina, justificando que o sistema com bate e volta previne que o rodotrem desperdice o tempo com pesagens, sondagens e filas para a transferência da cana para a moenda.

Como frotas com proporção de rodotrem igual ou abaixo de 60% não atingiram uma performance satisfatória, foram avaliados novos cenários, considerando um aumento no número de treminhões por rodotrem substituído. Dessa forma, a Tabela 5 e 6 resumem, respectivamente, os resultados obtidos nos casos: S4 –Dois pontos de descarga com regra de atendimento compartilhada, com nova taxa de substituição de 2:3 e; S5 – Dois pontos de descarga dedicados, com nova taxa de substituição de 2:3.

Tabela 5. Resultados dos cenários S4

Mix frota (% rodo)*	Utilização moenda	Carga máxima em estoque	Carga média em estoque	Cana entregue	Tempo médio na usina	Risco de desabastecimento
100%	100,00%	1334	750	14999	19,0	1,5%
80%	99,97%	1276	821	14996	23,5	0,1%
60%	100,00%	1334	916	14999	30,7	0,0%
40%	99,99%	1334	979	14998	35,4	0,1%
20%	99,97%	638	368	14994	33,1	0,4%
0%	99,42%	290	61	14912	20,6	11,2%

*Percentuais relativos ao cenário inicial

Fonte: Elaboração própria

Tabela 6. Resultados dos cenários S5

Mix frota (% rodo)*	Utilização moenda	Carga máxima em estoque	Carga média em estoque	Cana entregue	Tempo médio na usina	Risco de desabastecimento
100%	100,00%	1334	750	14999	19,0	1,5%
80%	99,72%	1334	871	14958	27,6	0,0%
60%	99,98%	1334	918	14998	30,6	0,0%
40%	94,06%	1044	590	14110	58,2	0,0%
20%	79,42%	1450	1000	11913	111,6	0,0%
0%	99,42%	290	61	14912	20,6	11,2%

*Percentuais relativos ao cenário inicial

Fonte: Elaboração própria

Novamente, ressalta-se que nos casos em que a frota é homogênea, ambos os pontos permaneceram dedicados ao mesmo tipo de composição rodoviária. Com o aumento no

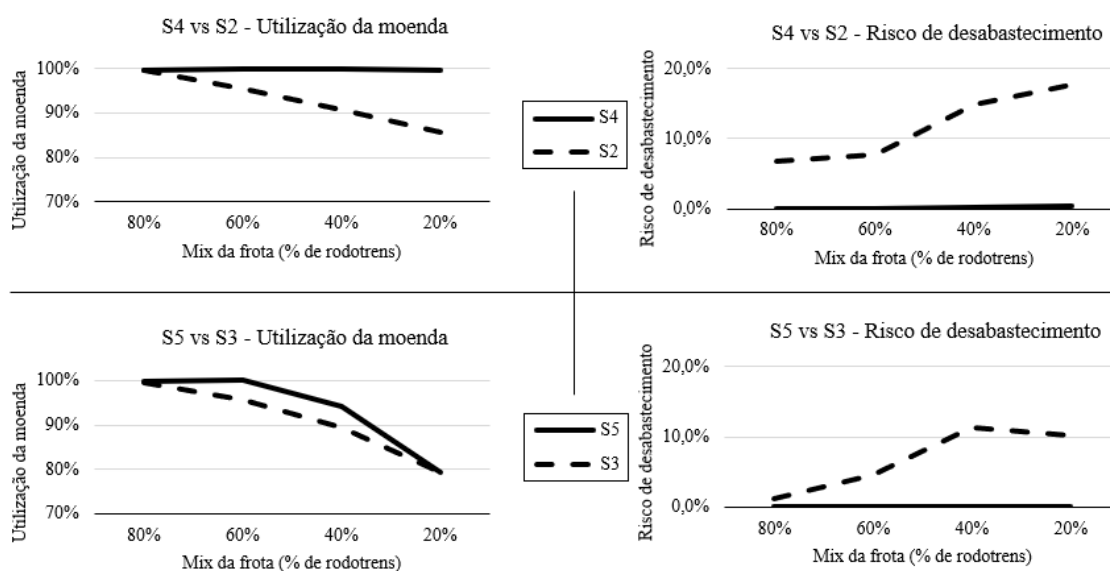
número de treminhões substituídos por cada rodotrem, é possível observar uma melhora significativa nos indicadores de maneira geral.

Os estoques máximos e médios, em sua maioria, obtiveram valores maiores, o que corrobora para o menor risco de desabastecimento apontado nos resultados. Ainda, o volume de cana entregue diariamente permaneceu próximo do consumo nominal da usina para S4 e para S5, nas proporções de 100%, 80% e 60% de rodotrens. Assim, a cana entregue reforça o baixo risco de parada da usina verificado na utilização da moenda.

O indicador que foi exceção das melhorias averiguadas foi o de tempo de permanência na usina. Como houve um aumento no número de treminhões e, conseqüentemente, da frota de um modo geral, a formação de filas por competição pelos pontos de descarga também tende a aumentar. Para S5, esse tempo teve um aumento mais crítico, principalmente para o mix de 20% rodotrem e 80% treminhão, em que a permanência na usina chegou a quase duas horas. É possível, então, verificar que a regra de pontos dedicados tende a sobrecarregar um dos pontos de descarga à medida que se aumenta a quantidade dos treminhões.

Para facilitar as comparações entre os cenários com um maior número de treminhões nos casos S4 e S5 e os cenários anteriores nos casos S2 e S3, foi elaborada a Figura 13.

Figura 13. Comparação dos cenários S2, S3, S4 e S5



Fonte: Elaboração própria

Nas comparações foram consideradas apenas as variações de mix entre 80% e 20%. Ao observar a utilização da moenda, os cenários no sistema com regra compartilhada apresentaram a melhor performance. Para as proporções de rodotrens de 40% e 20%, a possibilidade de utilizar ambos os pontos de descarga (S4) permitiu que o ritmo das transferências de carga dos treminhões pudesse acompanhar o consumo nominal da moenda.

Quanto ao risco de desabastecimento, ambas as políticas de atendimento dos pontos apresentaram resultados similares e satisfatórios. Dessa forma, para o mix de 40% e de 20% de rodotrens, os cenários considerados gerenciáveis foram os do caso S4, enquanto para o mix de 60%, S4 e S5 são viáveis e apresentam desempenho similar.

Para o caso de 0% rodotrens e 100% treminhões, contudo, não foi encontrado um cenário com o risco de desabastecimento satisfatório (menor que 2%). Para esse caso, como não há rodotrens, não é realizada a reposição dos conjuntos semi-reboques carregados mantidos em reserva. Portanto, o estoque consiste apenas na presença de treminhões na usina para efetuar a transferência de carga.

Desse modo, para os cenários com uma taxa de substituição de rodotrem/treminhão de 1:1, foram avaliados como gerenciáveis os cenários com mix de 100% de rodotrens e, com mix de 80%, apenas o cenário com dois pontos de descarga dedicados. Ao aumentar o número de treminhões substituídos por rodotrem, além dos cenários com 80% de rodotrens para S4 e S5, foram considerados adequados os cenários com mix de 40% e 20% de rodotrens, utilizando o caso S4, e com mix de 60% utilizando os casos S5 ou S4. Já para uma frota homogênea de treminhões, nenhum cenário foi considerado adequado.

Operar com apenas um ponto de descarga é mais interessante para a usina, considerando a economia com a instalação de um segundo ponto e operar com menos veículos também traz vantagens com os custos. Assim, o cenário avaliado como melhor foi o de um ponto de descarga com frota composta apenas por rodotrens.

6. Considerações finais

O presente estudo avaliou um sistema de recepção de cana-de-açúcar com frota mista, formada por rodotrens e treminhões. Foram ponderados os cenários com diferentes proporções do mix de frota, políticas de descarga e quantidades de pontos de descarga, analisando os impactos de cada alternativa através de um conjunto de medidas de desempenho.

Além de reforçar os desafios encontrados em se trabalhar com frotas mistas reportados na literatura, foi possível identificar as alternativas que se mostraram viáveis. Assim, foram selecionados como adequados os cenários com a) a frota composta apenas de 32 rodotrens em qualquer política de descarga e quantidade de pontos; b) com composição de frota de 80% rodotrens, 26 rodotrens e 6 treminhões, com dois pontos dedicados; c) com composição de frota de 60% rodotrens e um maior número de treminhões, 19 rodotrens e 20 treminhões, para qualquer política de descarga e dois pontos; d) com composição de frota de 40% rodotrens e um maior número de treminhões, 13 rodotrens e 29 treminhões, para dois pontos com regra compartilhada; e e) com composição de frota de 20% rodotrens e um maior número de treminhões, 6 rodotrens e 39 treminhões, para dois pontos com regra compartilhada.

Já para uma frota constituída apenas por treminhões, não foi encontrado um cenário adequado. Uma possível solução para o caso seria possuir um terceiro ponto de descarga com um estoque de segurança dedicado, o que pode ser verificado em estudos futuros. Assim, o ponto seria abastecido somente nos momentos em que os outros dois pontos de descarga da usina não estão sendo abastecidos. Dentre todos os cenários, a melhor alternativa avaliada foi a de 100% rodotrens com apenas um ponto de descarga.

A presente pesquisa constitui mais um exemplo de contribuição à literatura que utiliza a simulação discreta na área de logística, aplicada ao setor sucroalcooleiro, neste caso específico, para avaliar opções de uma frota mista e as particularidades decorrentes no sistema de entrega de cana para moagem. O estudo tem, ainda, potenciais aplicações práticas, uma vez que é retratado um sistema produtivo que busca emular a situação real das empresas sucroalcooleiras no Brasil.

Quanto às limitações do trabalho, reconhece-se que para aprimorar a aderência do modelo aos sistemas reais, poderia ser realizado um maior detalhamento das operações no campo, com a incorporação de novas fontes de variabilidade como riscos de chuvas, paradas por quebras de equipamentos, manutenções preventivas, trocas de turno e abastecimentos de combustível, o que pode aprimorar o modelo desenvolvido.

O sistema estudado considerou a transferência da carga do treminhão diretamente no ponto de descarga, contudo o veículo é capaz de desvincular os dois últimos compartimentos de carga da unidade tratora, de maneira a poder executar um bate e volta adaptado. Nesse caso, o treminhão descarregaria diretamente no ponto apenas a carga

relativa ao compartimento fixo à unidade tratora (caminhão plataforma), com prioridade frente às demais composições, o que talvez trouxesse uma melhoria no aproveitamento do veículo. Para trabalhos futuros, seria interessante avaliar para cada mix de rodotrem e treminhão os efeitos da adoção da estratégia de bate e volta em uma frota mista. Outra perspectiva interessante para estudos futuros é a análise ambiental do sistema, de modo a avaliar os diferentes cenários com foco nos impactos ambientais gerados.

Referências

Ballou, R. H. (2006). *Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial* (5 ed.). Porto Alegre: Bookman.

Banks, J., Carson, J. S., Nelson, B. L., & Nicol, D. M. (2010). *Discrete-Event System Simulation* (5 ed.). New Jersey: Pearson Education.

Bocanegra-Herrera, C. C., & Vidal, C.J. (2016). Development of a simulation model as a decision support system for sugarcane supply. *DYNA*, 83 (198), 180-186. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v83n198.52719>.

Brasil. Conselho Nacional de Trânsito. *Resolução 872*. Set. 2021. Recuperado em 3 de novembro de 2021, de <https://www.in.gov.br/em/web/dou/-/26perações-contran-n-872-de-13-de-setembro-de-2021-345770900>.

Brasil. Departamento Nacional de Trânsito. *Portaria 86*. Dez. 2006. Recuperado em 2 de fevereiro de 2021, de <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/26peração-denatran/portarias-2006-denatran>.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Exportações Brasileiras Anuais de Açúcar*, 2021. Recuperado em 2 de fevereiro de 2021, de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/26peração-comercio-exterior-brasileiro>.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Exportações Brasileiras Anuais de Etanol*, 2021. Recuperado em 2 de fevereiro de 2021, de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/etanol-comercio-exterior-brasileiro>.

Brasil. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Produção Brasileira de Cana-de-açúcar, Açúcar e Etanol*, 2021. Recuperado em 2 de fevereiro de 2021, de <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/26peração>.

Brasil. Ministério da Infraestrutura. *Peso Máximo por Veículo (QFV)*, 2012. Recuperado em 10 de fevereiro de 2021, de <https://www.gov.br/dnit/pt-br/rodovias/27perações-rodoviarias/pesagem>.

Dominico-Díaz, L., & Daquinta-Gradaille, L. A. (2019). Evaluation of Operation Indicators in Sugarcane Discharge Process. *Revista Ciências Técnicas Agropecuarias*, 28(1), 1-8. <http://opn.to/a/LicLz>.

Faria, D. A. F., Frazão, M. L. S., Viera, J. G. V., Silva, J. E. A. R., & Lemos P. H. (2019). A combination of discrete event simulation and multi-criteria analysis to configure sugarcane drop and hook delivery systems. *Engenharia Agrícola*. 39(2), 248-256. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v39n2p248-256/2019>.

Françoso, R. F., Bigaton, A., Silva, H. J. T., & Marques, P. V. (2017). Relação do custo de transporte da cana-de-açúcar em função da distância. *Revista iPecege*, 3(1), 100-105. <https://doi.org/10.22167/r.ipecege.2017.1.100>.

Freitas Filho, P. J. (2008). *Introdução à Modelagem e Simulação de Sistemas: Com Aplicações em Arena* (2. Ed.). Florianópolis: Visual Books.

Gil, A. C. (2002). *Como elaborar projetos de pesquisa* (4. Ed.). São Paulo: Atlas.

Giunta, M., & Silva, J. E. A. R. (2019). Dinâmica de estoque de cana sobre rodas em usinas sucroalcooleiras: trade off entre volume estocado versus o risco de desabastecimento. In *Anais do XXXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção* (pp. 1-13). Santos.

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*. 9(2), 107-128. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2002000200002>.

Kusoncum, C., Sethanan, K., Putri, E. P., & Neungmacha, W. (2018). Simulation-based approaches for processes improvement of a sugar mill yard management system: A case study of the sugar industry in the central region of Thailand. *Engineering and Applied Science Research*. 45(4), 320-331. <https://doi.org/10.14456/easr.2018.44>.

Lamsal, K., Jones, P. C., & Thomas, B. W. (2016). Sugarcane Harvest Logistics in Brazil. *Transportation Science*. 51(2), 771–789. <https://doi.org/10.1287/trsc.2015.0650>.

Lozano-Moreno, J. A., & Maréchal, F. (2019). Biomass logistics and environmental impact modelling for sugar-ethanol production. *Journal of Cleaner Production*, 210, 317-324. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.310>.

Morales-Chávez, M. M., Soto-Mejía, J. A., & Sarache, W. (2016). A mixed-integer linear programming model for harvesting, loading and transporting sugarcane: a case study in Peru. *DYNA*, 83(195), 173-179. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n195.49490>.

Prado, D. S. (2004). *Usando o Arena em simulação* (2. Ed.). Belo Horizonte: INDG.

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* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.

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*. 18(1), 73-90. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2011000100006>.

Sudtachat, K. (2018). Transportation and Production Lot-size for Sugarcane under Uncertainty of Machine Capacity. In: *MATEC Web of Conferences*. (pp. 1-6). <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816702007>.

Turrioni, J. B., & Mello, C. H. P. (2012). *Metodologia de pesquisa em engenharia de produção* [Apostila do programa de pós-graduação em engenharia de produção no curso de especialização em qualidade e produtividade]. UNIFEI.

APÊNDICE A – Dados operacionais utilizados no modelo

Dados	Valor/Distribuição estatística
Percurso da usina para o campo (min)	26,4
Percurso do campo para a usina (min)	33,0
Permanência do treminhão no campo (min)	TRIA (40.4,45.2,53.4)
Tempo de descarga do treminhão (min)	NORM (7.36, 1.03)
Tempo de descarga do rodotrem (min)	(2/3)*NORM (7.36, 1.03)
Pequenos deslocamentos dentro da usina (min)	TRIA (0.5,1,1.5)
Pesagem da carga bruta e tara dos veículos (min)	NORM (1.07,0.137)
Sondagem (min)	TRIA (2,4.21,6.2)
Desengate dos veículos e tratores (min)	NORM (1.5,0.5)
Engate dos veículos e tratores (min)	NORM (0.5,0.01)
Duração do abastecimento dos veículos (min)	TRIA (20,30,40)
Intervalo entre abastecimentos (min)	TRIA (1200,1440,1680)
Duração da lubrificação dos veículos (min)	TRIA (540,600,660)
Intervalo entre lubrificações (min)	TRIA (8640,10080,11520)
Manutenção dos veículos na oficina (min)	TRIA (1080,1440,1800)
Intervalo entre as manutenções na oficina (min)	TRIA (41760,43200,44640)
Manutenção dos veículos no campo (min)	15 + GAMM (46.2,1.14)
Intervalo entre as manutenções no campo (min)	720 + WEIB (29400,1.23)

Fonte: Adaptado de Silva (2006)

APÊNDICE B – Parâmetros adotados no modelo

Parâmetro	Valor
Quantidade de tratores	3
Carga do rodotrem	58t
Carga do treminhão	48t
Volume inicial de conjuntos semi-reboques	12
Volume inicial de veículos no sistema	32
Duração das refeições	1h

Fonte: Elaboração própria