

Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Hernani Mazier Junior

Modelagem dinâmica do processo de geração, armazenamento e distribuição de
vinhaça em uma unidade sucroenergética

UBERABA
2023

Hernani Mazier Junior

Modelagem dinâmica do processo de geração, armazenamento e distribuição de
vinhaça em uma unidade sucroenergética

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves.

UBERABA

2023

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do
Triângulo Mineiro**

M427m Mazier Junior, Hernani
Modelagem dinâmica do processo de geração, armazenamento
e distribuição de vinhaça em uma unidade sucroenergética / Hernani
Mazier Junior. -- 2023.
81 p. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica)
-- Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2023
Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

1. Matemática. 2. Métodos de simulação. 3. Software. I. Gonçalves,
Julio Cesar de Souza Inácio. II. Universidade Federal do Triângulo
Mineiro. III. Título.

CDU 51:004.4

HERNANI MAZIER JUNIOR

MODELAGEM DINÂMICA DO PROCESSO DE GERAÇÃO, ARMAZENAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE VINHAÇA EM UMA UNIDADE SUCROENERGÉTICA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 28 de julho de 2023

Banca Examinadora:

Dr. Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves – Orientador
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Vinicius Carvalho Rocha
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Renato Luvizoto Rodrigues de Souza
Universidade Federal de São Carlos



Documento assinado eletronicamente por **JULIO CESAR DE SOUZA INACIO GONCALVES, Professor do Magistério Superior**, em 01/08/2023, às 20:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **VINICIUS CARVALHO ROCHA, Professor do Magistério Superior**, em 02/08/2023, às 10:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Renato Luvizoto Rodrigues de Souza, Usuário Externo**, em 03/08/2023, às 09:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufmt.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1048341** e o código CRC **A6156D74**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me fornecer saúde e força; a todos os professores que contribuíram com minha vida acadêmica, principalmente ao meu orientador Julio e à minha orientadora da graduação Gabriela Azevedo Motta (*in memoriam*), servindo de exemplo; aos meus pais, irmãos, Amanda e seus familiares que contribuíram intensamente nesta jornada; à Usina Alta Mogiana, pela disponibilidade de tempo e recursos; à UFTM, que esteve à disposição, garantindo a estrutura necessária no processo de aprendizagem. Enfim, agradeço a todos que me apoiaram e estimularam nesta grande jornada.

“A inovação sempre significa um risco. Qualquer atividade econômica é de alto risco e não inovar é muito mais arriscado do que construir o futuro.”

Peter Drucker

RESUMO

O Brasil atualmente é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, sendo referência mundial com produção total de 628,1 milhões de toneladas por ano, contando com 418 unidades produtoras no país. Com a industrialização da cana-de-açúcar, ocorre a geração de subproduto vinhaça, para cada litro de etanol produzido, são gerados, simultaneamente, cerca de 15 litros de vinhaça. Portanto, devido à geração desse resíduo em larga escala, são necessários monitoramentos das etapas produtivas para atendimento da legislação ambiental vigente e balanço de produção adequado para a correta destinação da vinhaça para o canavial, a qual é utilizada como adubo. Diante disso, qualquer mudança no processo industrial pode alterar significativamente o volume de vinhaça gerado e, conseqüentemente, exceder a capacidade disponível dos tanques de armazenamento, transporte e aplicação no campo. Portanto, respeitar a capacidade dos tanques e visualizar a tendência de ocupação é essencial para manter a planta industrial em funcionamento e evitar possíveis acidentes ambientais. O objetivo deste trabalho foi analisar, por meio de estudo de caso, o comportamento da geração, armazenamento e distribuição de vinhaça, a partir de simulações baseadas na técnica de dinâmica de sistemas, utilizando o software Vensim PLE®. Para construção da metodologia, foi realizada uma revisão da literatura com estudos exploratórios juntamente com a coleta de dados do processo. Na sequência, foram realizadas análises do comportamento do sistema de acordo com a variação das variáveis-chave do processo, de acordo com seis cenários que ocorrem com frequência no processo produtivo, resultando na elaboração de oportunidades com uma solução ótima para que não ocorram acidentes ambientais ou a redução ou parada do processo contínuo de produção, além de mitigar a necessidade de grandes investimentos no processo de armazenamento e distribuição. Ou seja, com o aumento de 1 trator aplicador na frente 5, que é alimentada pelo tanque 3, e o aumento no bombeamento da adutora de 85 m³/h para 120 m³/h, foi possível balancear o processo de geração, armazenamento e distribuição de forma contínua, sem prejuízos ao processo produtivo, gerando um cenário ótimo.

Palavras-chave: Modelagem matemática. Dinâmica de sistemas. Software Vensim PLE®.

ABSTRACT

Brazil is currently one of the largest producers of sugarcane, being a world reference with a total production of 628.1 million tons per year, with 418 production units in the country. With the industrialization of sugarcane, a by-product of vinasse is generated. For each liter of ethanol produced, around 15 liters of vinasse are simultaneously generated. Therefore, due to the generation of this residue on a large scale, monitoring of the production stages is necessary to comply with current environmental legislation and an adequate production balance for the correct destination of the vinasse in the sugarcane field, which is used as fertilizer. Therefore, any change in the industrial process can significantly alter the volume of vinasse generated and, consequently, exceed the available capacity of storage, transport and field application tanks. Therefore, respecting the capacity of the tanks and visualizing the occupancy trend is essential to keep the industrial plant in operation and avoid possible environmental accidents. The objective of this work was to analyze, through a case study, the behavior of the generation, storage and distribution of vinasse, based on simulations based on the system dynamics technique, using the Vensim PLE® software. To build the methodology, a literature review was carried out with exploratory studies along with the collection of process data. Next, analyzes of the system's behavior were carried out according to the variation of the key variables of the process, according to six scenarios that frequently occur in the production process, resulting in the elaboration of opportunities with an optimal solution so that environmental accidents do not occur. or the reduction or stoppage of the continuous production process, in addition to mitigating the need for large investments in the storage and distribution process. That is, with the increase of 1 tractor applicator in front 5, which is fed by tank 3, and the increase in the pipeline pumping from 85 m³/h to 120 m³/h, it was possible to balance the generation, storage and distribution process continuously, without damage to the production process, generating an optimal scenario.

Keywords: Mathematical modeling. System dynamics. Vensim PLE® software.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produção e exportação de alimentos brasileiros.....	5
Figura 2 – Regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil	6
Figura 3 – Evolução da produtividade de cana-de-açúcar no Brasil	7
Figura 4 – Tipos de processos em operações.....	11
Figura 5 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola	15
Figura 6 – Esquema do sistema de colheita mecanizada	16
Figura 7 – Fluxograma das atividades industriais	17
Figura 8 – Exemplo de modelagem de dinâmica de sistemas	21
Figura 9 – Relação causal positiva.....	22
Figura 10 – Relação causal negativa	23
Figura 11 – Elementos de um modelo genérico de estoque e fluxo.....	23
Figura 12 – Ciclo de realimentação positivo.....	25
Figura 13 – Ciclo de realimentação negativo	25
Figura 14 – Exemplo de modelagem para previsão de desgaste em pavimentos	28
Figura 15 – Exemplo de modelagem do Sistema Nacional de Transplantes	30
Figura 16 – Exemplo de modelagem do sistema carcerário de Salvador	32
Figura 17 – Exemplo de modelagem do sistema de captação e armazenamento de água	34
Figura 18 – Procedimento metodológico	35
Figura 19 – Trator para aplicação de vinhaça localizada	39
Figura 20 – Trator aplicando vinhaça localizada	39
Figura 21 – Fluxograma do processo.....	42
Figura 22 – Representação no Vensim PLE® do processo de geração da vinhaça ..	45
Figura 23 – Representação no Vensim PLE® do processo de calibração do coeficiente de vazão.....	47
Figura 24 – Representação do processo de armazenamento da vinhaça	49
Figura 25 – Representação do processo de distribuição da vinhaça	51
Figura 26 – Vazão de vinhaça m ³ /h industrial	52
Figura 27 – Comparativo de vazão de entrada real x Vensim PLE®	53
Figura 28 – Vazão de vinhaça aplicada F3	53
Figura 29 – Comparativo de vazão aplicada real x Vensim PLE®	54

Figura 30 – Representação do processo com todas as variáveis que influenciam diretamente no processo produtivo.....	56
Figura 31 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 1	57
Figura 32 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 2	57
Figura 33 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 3	58
Figura 34 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 4	58
Figura 35 – <i>Loop</i> destacado na flecha vermelha com alterações no cenário 5	60
Figura 36 – Redução de moagem horária com processo contínuo	61
Figura 37 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 5.	61
Figura 38 – Cenário de solução ótima	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estimativa de produção brasileira de cana-de-açúcar 2022.....	8
Tabela 2 – Estimativa brasileira de produção de açúcar 2022.....	9
Tabela 3 – Estimativa brasileira de produção de etanol 2022.....	9
Tabela 10 – Cenários Vensim PLE®.....	36
Tabela 4 – Expectativa da produção de vinhaça anual.....	37
Tabela 5 – Estimativa da produção de vinhaça m ³ /h.....	37
Tabela 6 – Capacidade disponível tanques de vinhaça.....	38
Tabela 7 – Configuração de frentes de trabalho de vinhaça localizada.....	40
Tabela 8 – Dados médios industriais da geração de vinhaça.....	44
Tabela 9 – Dados de entrada vinhaça TQ1 e saída TQ2.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
2.3 JUSTIFICATIVA	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO	5
3.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO	10
3.2.1 Processo produtivo agrícola	12
3.2.2 Processo produtivo industrial	17
3.3 DINÂMICA DE SISTEMAS	20
3.3.1 Aplicações em dinâmica de sistemas	20
3.3.2 Relação causal	21
3.3.3 Estoque e fluxos	23
3.3.4 Ciclo de realimentação (feedback)	24
3.4 O SOFTWARE VENSIM PLE®	25
3.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE VENSIM PLE®	26
3.5.1 Um modelo de dinâmica de sistemas para previsão de desgaste em pavimentos rodoviários no Brasil	27
3.5.2 Modelagem do Sistema Nacional de Transplantes brasileiro	29
3.5.3 Superlotação carcerária em Salvador: simulação da ampliação do sistema carcerário por dinâmica de sistemas	31
3.5.4 Avaliação da capacidade de captação e armazenamento de água das chuvas no Alto Vale do Jequitinhonha	33
4 METODOLOGIA	35
4.1 LEVANTAMENTO E OBTENÇÃO DOS DADOS	37
4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO SOFTWARE VENSIM PLE®	43
4.2.1 Processo de geração de vinhaça no Vensim PLE®	43
4.2.2 Processo de armazenamento de vinhaça no Vensim PLE®	46
4.2.3 Processo de distribuição de vinhaça no Vensim PLE®	50
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO	52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
6 CONCLUSÃO	63
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, de acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), é um dos maiores produtores e referência mundial na produção de cana-de-açúcar, com a demanda expressiva por açúcar, etanol e bioenergia, o país conta com 418 unidades produtoras. Estima-se que a safra brasileira de 2022/2023 deverá atingir um montante de 637,1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e a produção de 33,17 bilhões de litros de etanol (CONAB, 2023).

Como consequência da industrialização da cana-de-açúcar, ocorre a geração de alguns subprodutos, dentre eles a vinhaça. Para cada litro de etanol produzido, são gerados, simultaneamente, aproximadamente 15 litros de vinhaça. Atualmente, 438,15 bilhões de litros desse efluente são gerados anualmente, os quais são utilizados na fertirrigação de canaviais, recebendo grande atenção devido às suas propriedades físico-químicas e por se tratar de um resíduo poluidor (LAIME *et al.*, 2011; ROCHA *et al.*, 2012).

O Código Penal Brasileiro veta a prática de descarte desse resíduo em leitos d'água. Especialmente, a Portaria n. 322, publicada em novembro de 1978, pelo Ministério do Interior, proíbe o lançamento direto e/ou indireto da vinhaça, em qualquer coleção hídrica, pelas destilarias. Essa portaria também obriga as indústrias sucroalcooleiras a apresentarem projetos para implementação de sistemas que utilizem de modo racional a vinhaça e as águas residuais geradas pela fabricação do etanol (GRANATO, 2003).

Devido à geração do resíduo em larga escala e a necessidade de controles ambientais eficazes, torna-se necessária uma gestão ativa de processos de toda a cadeia produtiva, a qual engloba uma grande quantidade de variáveis que influenciam todo o processo (demandas de produção, condições climáticas ou disponibilidade de equipamentos), desde a geração do resíduo, passando pelo armazenamento, até a correta distribuição nos canaviais.

A utilização de tanques para armazenar temporariamente a vinhaça, até a correta destinação no campo, contribui para a preservação do meio ambiente. Note-se que ao exceder a capacidade de armazenamento poderá ocorrer contaminação de rios, córregos e lençóis freáticos. Além disso, o fator de armazenamento é limitante da capacidade produtiva da fábrica, ou seja, para evitar exceder a capacidade de

armazenamento, há redução no processo de moagem e, em consequência, menor geração de vinhaça.

A técnica de dinâmica de sistemas tem sido aplicada em diferentes áreas do conhecimento a fim de produzir informações sobre o comportamento e, conseqüentemente, indicar ações de melhoria dos sistemas simulados.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo é elaborar um modelo para simular o processo de geração, armazenamento e distribuição de vinhaça baseando-se nas taxas de entrada, geração de vinhaça, e nas taxas de saída, fertirrigação de canaviais em uma unidade fabril para auxiliar o setor sucroenergético que atualmente possui gargalos no ciclo de produção. Vale observar que qualquer alteração das mais diversas variáveis no processo pode alterar significativamente o volume de vinhaça gerado, excedendo a capacidade disponível dos tanques de armazenamento, tornando obrigatório parar toda a cadeia de produção para evitar possíveis impactos ambientais.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Levantar dados referentes às características geométricas dos tanques de armazenamento, bem como dados relacionados à geração e à aplicação da vinhaça.
- b) Construir e implementar o modelo matemático no software Vensim PLE®.
- c) Simular o efeito de diferentes cenários de aplicação de vinhaça nos níveis dos tanques de armazenamento.
- d) Propor ações para melhorar o gerenciamento do processo de armazenamento de vinhaça.

2.3 JUSTIFICATIVA

Atualmente o mercado sucroenergético não utiliza ferramentas para simulação de processos produtivos agroindustriais de forma dinâmica para compreender a influência de cada variável em seu processo produtivo. Portanto, este projeto visa compreender e otimizar a gestão do processo de armazenamento e distribuição de vinhaça em uma unidade sucroenergética.

A gestão desse processo é primordial para manter a planta industrial em funcionamento, pois caso não haja escoamento desse subproduto, não há como armazená-lo.

Ao exceder a capacidade de armazenamento, há possibilidade de adversidades ambientais, como contaminação de rios e lençóis freáticos, prejudicando a fauna e a flora; portanto, gerir o processo evitará possíveis catástrofes ambientais.

Outra justificativa para o gerenciamento do processo é que ao exceder os limites de armazenamento, para mitigar os riscos citados, há necessidade de redução de moagem para se ter menor geração de vinhaça. Consequentemente, perde-se eficiência industrial devido à limitação de armazenamento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico compõe a contextualização do setor sucroenergético brasileiro juntamente com apresentação dos tipos de processos produtivos, detalhando os processos industriais e agrícolas para ambientação na temática e posterior detalhamento do uso da dinâmica de sistemas.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Segundo a CONAB, o Brasil possui grande relevância no setor sucroenergético mundial, exercendo papel estratégico, econômico e de liderança no segmento. Como maior produtor de cana-de-açúcar, tendo produzido cerca de 735 milhões de toneladas em 2021 (CONTINI; ARAGÃO; NAVARRO, 2022), seguido de outros países produtores, como Índia, China, Austrália e Tailândia, o Brasil também se destaca na utilização de políticas sustentáveis com uso de biocombustíveis (RODRIGUES; ROSS, 2020).

Devido ao grande volume de produtos agrícolas produzido, facilitado por fatores climáticos, bem como pela abundância de terras férteis, o Brasil está entre os principais produtores e exportadores não apenas de cana-de-açúcar, mas de outros alimentos (CNA, 2020), como apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Produção e exportação de alimentos brasileiros



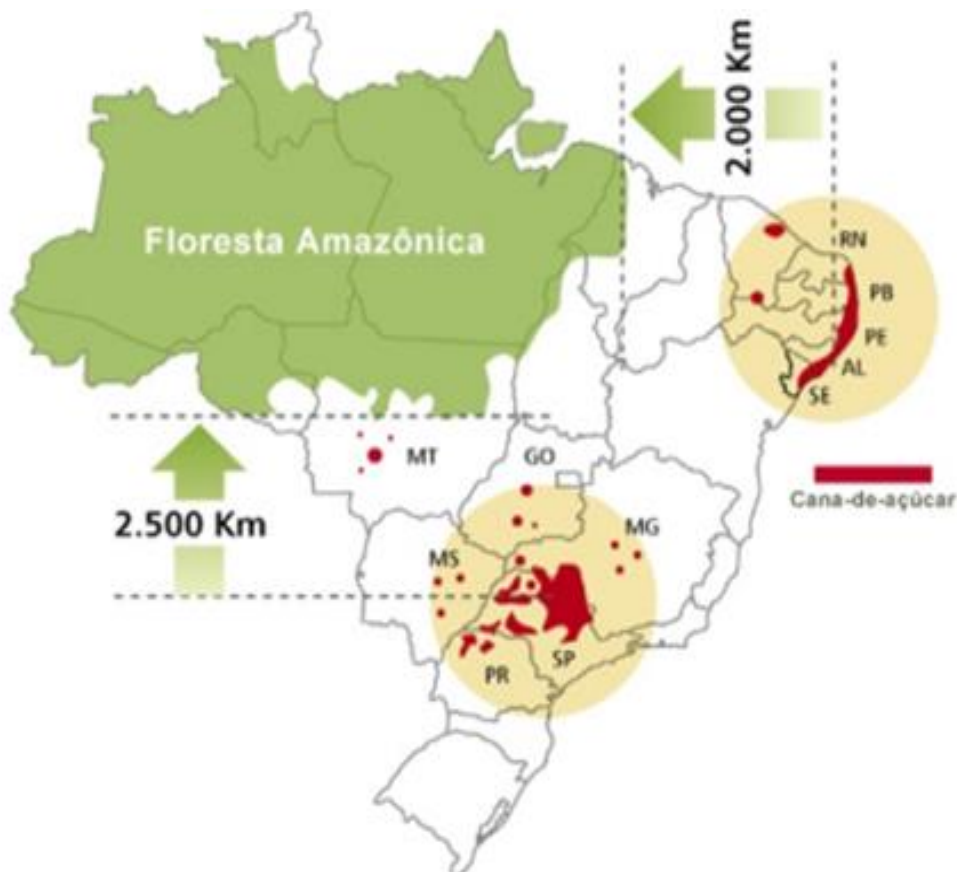
Fonte: CNA, 2020

Como observado na Figura 1, o Brasil é o principal país produtor e exportador de açúcar, café, suco de laranja e soja. Vale destacar que, de acordo com dados da Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), a produção de açúcar em 2020 foi a segunda maior do mundo, com um total de 29,5 milhões de toneladas; dessas, 19,6 milhões foram exportadas, garantindo ao Brasil o título de maior país exportador (CNA, 2020).

O setor sucroalcooleiro do Brasil possui certas características que o diferenciam dos demais países produtores. Enquanto no Brasil a maior parte das indústrias produz quantidade elevada da cana-de-açúcar que processam, os demais países produtores mantêm a atividade agrícola separada da produção industrial (RODRIGUES; ROSS, 2020). Esse modelo de organização está associado à dimensão territorial do país, à disponibilidade de terras aptas para o cultivo (NOVACANA, 2017).

Na Figura 2 é possível observar as principais regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil.

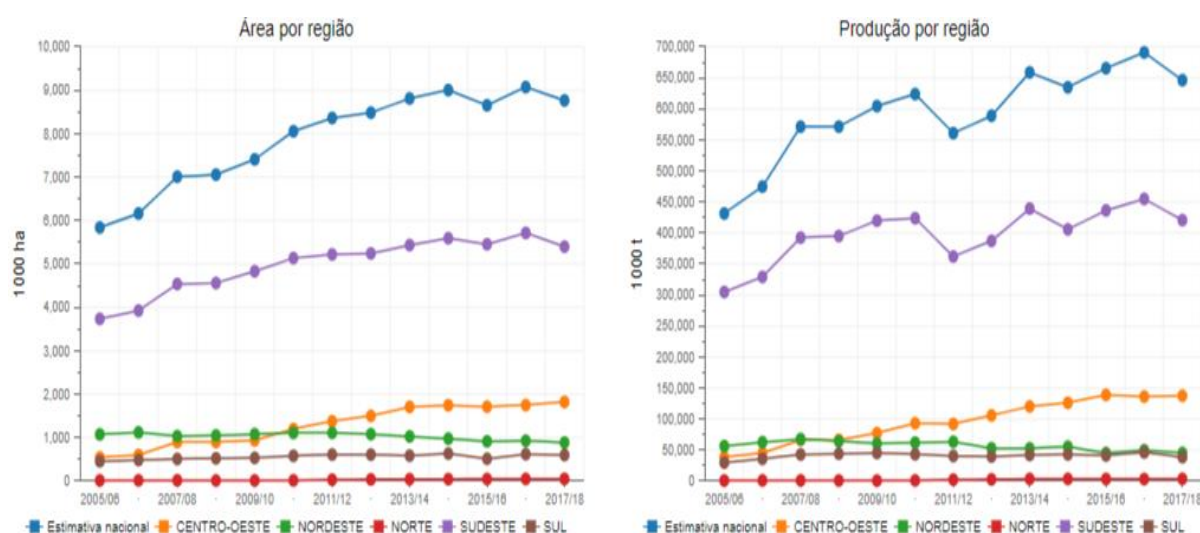
Figura 2 – Regiões produtoras de cana-de-açúcar no Brasil



De acordo com a Figura 2, as regiões sudeste e centro-oeste são as mais representativas no cultivo de cana-de-açúcar, com cerca de 87% da produção. Jank (2008) observa a tendência de expansão do cultivo de cana-de-açúcar para produção de etanol na região centro-sul, especialmente em áreas de pastagens degradadas ou com baixa produtividade.

A diversidade de produtos comerciais e dos resíduos sólidos advindos da moagem da cana-de-açúcar também é um diferencial. Dentre esses produtos destacam-se açúcar, etanol, aguardente, rapadura, produtos extraídos do caldo e cogeração de energia elétrica com a queima do bagaço (FURTADO; SCANDIFFIOB; CORTEZ, 2011). Na Figura 3 observa-se a evolução da produtividade de cana-de-açúcar por região brasileira.

Figura 3 – Evolução da produtividade de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: CONAB, 2017

Como pode ser observado, na Figura 3 há uma representação da produção de cana-de-açúcar por região, em hectare e em toneladas, e uma representação da estimativa nacional. Percebe-se que a região sudeste é a maior produtora de cana-de-açúcar, produzindo cerca de 425 milhões de toneladas no período 2017/2018, em aproximadamente 5 milhões de hectares, o que representa mais da metade da produção total de cana-de-açúcar do país, que foi de aproximadamente 650 milhões de toneladas, cultivadas em aproximadamente 9 milhões de hectares. Em seguida tem-se a região centro-oeste, com produção de aproximadamente 150 milhões de toneladas em 2 milhões de hectares no mesmo período (CONAB, 2017).

Com a elevação dos preços de produtos gerados a partir da cana-de-açúcar (açúcar, etanol e energia), o setor demonstra crescimento na safra 2021; entretanto, houve redução na área de cultivo em relação ao ano anterior devido à concorrência com outras culturas agrícolas, que também possuem destaque no aumento dos preços. Desse modo, a estimativa de área cultivada da cultura cana-de-açúcar na safra 2022/2023 é de aproximadamente 8,243 milhões de hectares, uma redução de apenas 4,3% em relação à safra anterior (RODRIGUES; ROSS, 2020).

Com a redução de área e de produtividade agrícola devido às oscilações climáticas e às baixas perspectivas pluviométricas para o período, estima-se que haverá uma redução de 1% de toda a produção nacional, favorecendo os preços de comercialização dos produtos no mercado interno e externo. Os dados de produção estão representados na Tabela 1 (BRASIL, 2022).

Tabela 1 – Estimativa de produção brasileira de cana-de-açúcar 2022

Região	Área (em mil ha)			Produção (em mil t.)		
	Safra 2021/22	Safra 2022/23	Var. %	Safra 2021/22	Safra 2022/23	Var. %
Norte	45	48	6,2%	3.857	4.236	9,8%
Nordeste	847	868	2,4%	49.811	54.107	8,6%
Centro-Oeste	1.806	1.784	-1,2%	127.163	129.974	2,2%
Sudeste	5.123	4.934	-3,7%	366.327	355.530	-2,9%
Sul	523	494	-5,6%	31.610	29.029	-8,2%
Brasil	8.345	8.128	-2,6%	578.768	572.875	-1,0%

Fonte: Adaptado de Brasil, 2022

De forma geral, houve uma redução na área da cultura de cana-de-açúcar em 4,3%, principalmente nas regiões sudeste e sul, pois essas regiões possuem forte produção de grãos.

Com base nas expectativas de mercado global, 44% da cana-de-açúcar devem ser destinados para produção de açúcar, representando 260 milhões de toneladas, e 56% para produção de etanol, representando 324 milhões de toneladas de cana (BRASIL, 2022). Em relação à produção por região, os dados são apresentados na Tabela 2 (BRASIL, 2022).

Tabela 2 – Estimativa brasileira de produção de açúcar 2022

Região	Cana-de-açúcar destinada ao açúcar (em mil t.)			Açúcar (em mil t.)			
	Safr 2021/22	Safr 2022/23	Var. %	Safr 2021/22	Safr 2022/23	Variação	
						Absoluta	Var. %
Norte	674	981	45,5%	66	97	31	46,5%
Nordeste	24.945	31.561	26,5%	2.828	3.077	250	8,8%
Centro-Oeste	30.688	33.551	9,3%	4.024	3.912	-112	-2,8%
Sudeste	186.515	195.261	4,7%	25.691	25.316	-375	-1,5%
Sul	17.633	15.763	-10,6%	2.327	1.491	-836	-35,9%
Brasil	260.455	277.117	6,4%	34.936	33.893	-1.043	-3,0%

Fonte: Adaptado de Brasil, 2022

Conforme dados apresentados pela CONAB (BRASIL, 2022), as chuvas abaixo do esperado e as geadas previstas para o ano influenciarão a produção de etanol, que deverá atingir 25,8 bilhões de litros na safra, apresentando uma redução de 13% em relação à safra anterior, conforme Tabela 3. Ainda, de acordo com os dados, os preços de etanol se manterão altos devido à baixa produção e à melhora da economia nacional com a recuperação dos efeitos da pandemia.

Tabela 3 – Estimativa brasileira de produção de etanol 2022

Região	Cana-de-açúcar destinada a produção de etanol (em mil t.)			Etanol (em mil l.)			
	Safr 2021/22	Safr 2022/23	Var. %	Safr 2021/22	Safr 2022/23	Variação	
						Absoluta	Var. %
Norte	3.181	3.243	1,9%	262.835	268.577	5.742	2,2%
Nordeste	26.117	21.232	-18,7%	1.877.191	2.073.078	195.877	10,4%
Centro-Oeste	100.683	96.132	-4,5%	8.236.479	8.547.676	311.197	3,8%
Sudeste	180.415	148.623	-17,6%	14.961.123	13.872.775	-1.088.348	-7,3%
Sul	14.329	13.266	-7,4%	1.064.599	1.065.734	1.135	0,1%
Brasil	324.725	282.496	-13,0%	26.402.227	25.827.840	-574.387	-2,2%

Fonte: Adaptado de Brasil, 2022

Nessa contextualização foi possível destacar a produção nacional e a geração de etanol para compreender os impactos e a dimensão do volume geral de vinhaça gerado pela produção de cana-de-açúcar no país. De acordo com Cinelli (2018), a produção média de vinhaça por litro de etanol produzido está entre 10 e 15 litros, representando um enorme volume do efluente.

3.2 PROCESSOS DE PRODUÇÃO

Nesta seção são descritos os processos de produção, desde o plantio da cana-de-açúcar até o processamento para geração de produtos e subprodutos, como a vinhaça, objeto de estudo desta pesquisa.

A gestão de processos vem se especializando e agregando cada vez mais qualidade e melhoria dos processos de produção, visando aumentar o padrão da eficiência e da eficácia. Segundo Harrington (1993, p. 10), “processo é qualquer atividade que recebe uma entrada (*input*), agrega-lhe valor e gera uma saída (*output*) para um cliente interno ou externo, fazendo uso dos recursos da organização para gerar resultados concretos”.

Segundo Ritzman e Krajewski (2004), processo é qualquer prática ou conjunto de atividades que parte de um ou mais materiais que se transformam e agregam valor, criando um ou mais produtos (ou serviços) para os clientes. São várias etapas para realizar essa transformação e o resultado é decorrente de uma sequência de operações.

Para Slack, Chambers e Jonston (2009), no arranjo de uma operação, observa-se o volume-variedade, que determina a abordagem geral para gerenciar os processos e, dessa maneira, são chamados tipos de processos. Segundo Gaither e Frazier (2001), a classificação dos sistemas de produção tem como base o conhecimento das suas características, bem como sua ligação com a complexidade das atividades de planejamento e controle desses sistemas.

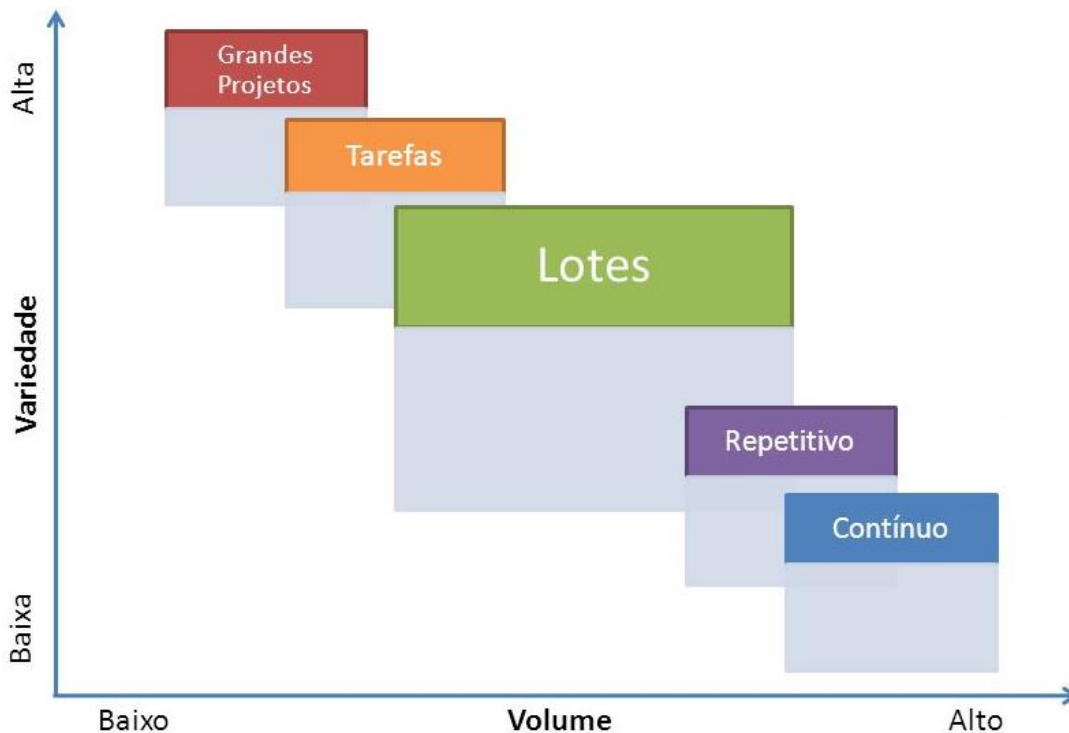
Os tipos de processos são classificados mediante a ordem de volume crescente e variedade decrescente, bem como nas operações de serviços (SLACK; CHAMBERS; JONSTON, 2009). A Figura 4 representa os processos de manufatura com a medida de ordem de volume *versus* variedade.

Segundo Slack, Chambers e Johnston (2009), o processo de projeto se caracteriza pelos produtos chamados customizados, ou seja, são itens em que o processo precisa atender a necessidade do cliente quanto à fabricação de um produto único. Na maioria das vezes, o tempo de fabricação do produto ou execução do serviço é relativamente longo e como esse é o espaço entre a conclusão de cada produto ou serviço, os projetos têm início, meio e fim bem definidos.

A ordem de grandeza segue o padrão: baixo volume e alta variedade, que são as características principais do processo de projeto. As atividades envolvidas na

execução do produto podem não ser bem definidas, o que possibilita que sejam modificadas durante o processo de produção. Exemplos de itens fabricados nesse tipo de processo são: aviões, navios, turbogeradores, entre outros (SLACK; CHAMBERS; JONSTON, 2009).

Figura 4 – Tipos de processos em operações



Fonte: Adaptado de Slack, Chambers e Johnston, 1997, p. 135

No processo de *jobbing* também há relação com variedade muito alta e baixos volumes. Mas o que o diferencia do projeto por produto é que os itens produzidos compartilham os recursos de operação com outros. Os recursos de produção fabricam todos os produtos e exigem o mesmo tipo de cuidado, sendo diferentes entre si pelas necessidades específicas de cada um. “Os processos de *jobbing* produzem mais itens e, usualmente, menores do que os processos de projeto, cujo grau de repetição é baixo.” (SLACK; CHAMBERS; JONSTON, 2009, p. 129). Exemplos de processos de *jobbing* são alfaiatarias, que trabalham por pedido, restauração de móveis e gráficas, que trabalham com customização. Esse tipo de processo tem uma demanda maior, contudo são menores do que os de projeto, e o grau de repetição é baixo. Grande parte das tarefas será, na maioria das vezes, única.

O processo em lotes ou bateladas, geralmente, se assemelha com os de *jobbing*, mas não tem o mesmo grau de variedade. Os volumes produzidos são em

maior quantidade pois “a diferença fundamental é que os volumes são maiores porque produtos ou serviços iguais ou similares são fornecidos repetidamente”. (RITZMAN; KRAJEWSKI, 2004, p. 33). Como afirma Moreira (1998), para a produção em lotes são necessários equipamentos distintos e mão de obra especializada, isso porque há grandes alterações nas calibrações, nos utensílios e nas peças.

Já o processo de produção em massa é caracterizado pelo alto volume de produtos, mas com pouca variedade. Esses processos são automatizados e produzem com elevado grau de padronização (MOREIRA, 1998).

O processo contínuo, na maioria das vezes, alto nível de capital investido e com fluxo muito previsível. Segundo Ritzman e Krajewski (2004, p. 33), “são o extremo da produção em grande volume e padronizada com fluxos de produção em massa, sendo que a operação ocorre vinte e quatro horas por dia, para maximizar a utilização e evitar interrupções onerosas”.

A mão de obra do processo contínuo é restrita às funções de monitoramento e controle dos equipamentos, que se dá através da análise de variáveis, como temperatura, pressão, níveis, fluxo, vazão, tensão, corrente, potência, velocidade, rotação, quantidades etc. A razão desse controle é de assegurar que as variáveis fiquem dentro dos parâmetros estabelecidos (TEIXEIRA, 1992).

Para Teixeira (1992), as atividades produtivas no processo contínuo são automatizadas, então, se espera que não haja interrupções no processo (exceto quando há manutenção periódica, paradas programadas e outras). A mão de obra se mostra importante quando há alguma anormalidade ou emergência no processo.

O processo produtivo sucroenergético é caracterizado como processo contínuo aliado à automatização, ou seja, as paradas só ocorrem caso haja necessidade de intervenções para manutenção, por chuva e, como foco deste projeto, se for necessário interromper o processo produtivo por falha no armazenamento de resíduos gerados de forma contínua.

Para analisar o processo de produção, este trabalho será dividido em duas fases fundamentais: agrícola e industrial.

3.2.1 Processo produtivo agrícola

Após a contextualização do setor sucroenergético e entendimento de processos produtivos, neste tópico serão apresentados os processos produtivos

agrícolas com objetivo de compreender as etapas que resultam na geração do subproduto final, a vinhaça.

O processo de produção agrícola é composto pela integração entre campo e indústria, visto que a cana-de-açúcar é a matéria-prima que contém os açúcares (sacarose, glicose e frutose) e a biomassa. A usina, por sua vez, é responsável por recuperar e cristalizar a sacarose para fabricação de açúcar e por fermentar e destilar os açúcares para a fabricação de etanol, seguida pela transformação da biomassa em geração de energia elétrica (FERNANDES, 2003).

A fase agrícola pode ser separada em três macroatividades: cultivo do canavial, tratamentos culturais e irrigação.

A cultura do canavial é composta por duas atividades: (a) preparo do solo e (b) sulcação, adubação e plantio. O preparo do solo é executado antes do início do plantio e objetiva anular os fatores físicos, químicos e biológicos que possam trazer algum malefício para a plantação.

São realizadas manobras para descompactar e sistematizar o solo e corrigidas algumas questões químicas do solo, aplicando herbicidas e fungicidas para controle de pragas (ervas daninhas, formigas e outros). Essa etapa visa trazer as condições necessárias para o crescimento da cana-de-açúcar. Na sequência do preparo do solo se executa a sulcação, a adubação e o plantio, processo no qual, respectivamente, abre-se o sulco, aduba-se e aplicam-se os resíduos industriais (torta de filtro e vinhaça), colocando os colmos de cana que darão origem ao canavial (FERNANDES, 2003).

Os tratamentos culturais também são compostos por duas atividades principais: (a) tratamentos culturais de cana planta (a cana que foi plantada e ainda não foi colhida) e (b) tratamentos culturais de socaria (cana oriunda da rebrota dos colmos remanescentes da cana planta após a colheita).

A distinção entre as duas atividades é o tempo do canavial, ou seja, no primeiro caso a atividade é executada na cana plantada há pouco tempo e que ainda não passou pelo processo de colheita, já a segunda, acontece na cana com tempo maior que dois anos.

A cana-de-açúcar quando plantada proporciona até cinco cortes ou cinco safras, sendo caracterizada como cultura semipermanente, que é a diferença principal entre essas duas etapas. Ao longo dos quatro anos seguintes ao plantio, o processo

de cana-soca, ela será tratada para que o desempenho produtivo seja garantido nas safras futuras (BELARDO; CASSIA; SILVA, 2015).

Outra distinção entre os processos é que nas atividades (b), na maioria das vezes, é feita adubagem e fertilização (com vinhaça), calagem, quando preciso, e aplicação de herbicidas e controle de pragas. Já a atividade (a) é formada pelo controle de ervas daninhas, uma vez que o solo já foi manejado há pouco tempo durante o processo de plantio (FERNANDES, 2003).

O processo de irrigação é realizado através da aplicação de água e vinhaça, cuja finalidade é equilibrar a falta hídrica nos meses de seca e elevar o rendimento agrícola (FERNANDES, 2003).

Após a formação do canavial, ocorre a colheita de cana-de-açúcar que, segundo Bofill *et al.* (1981), é uma atividade que inicia com o corte da cana-de-açúcar no campo, incluindo o transporte até a usina, e é finalizada com a moagem da matéria-prima na indústria.

Os sistemas de colheita de cana-de-açúcar podem ser divididos de acordo com a participação de máquinas no processo em três tipos: manual, semimecanizado e mecanizado (BELARDO; CASSIA; SILVA, 2015). A partir da década de 1970, foi introduzido no Brasil o conceito da colheita mecanizada de cana-de-açúcar através de equipamentos produzidos no próprio país com tecnologia advinda do exterior (RIPOLI; VILLANOVA, 1992).

Segundo Toigo e Casagrande (2009), a colheita mecanizada permite otimizar o transporte, reunindo atividades de colheita e transbordo. Os autores mostram que, por meio da mecanização, é possível favorecer muitas etapas do processo, uma vez que as colhedoras trazem eficiência e agilidade à colheita.

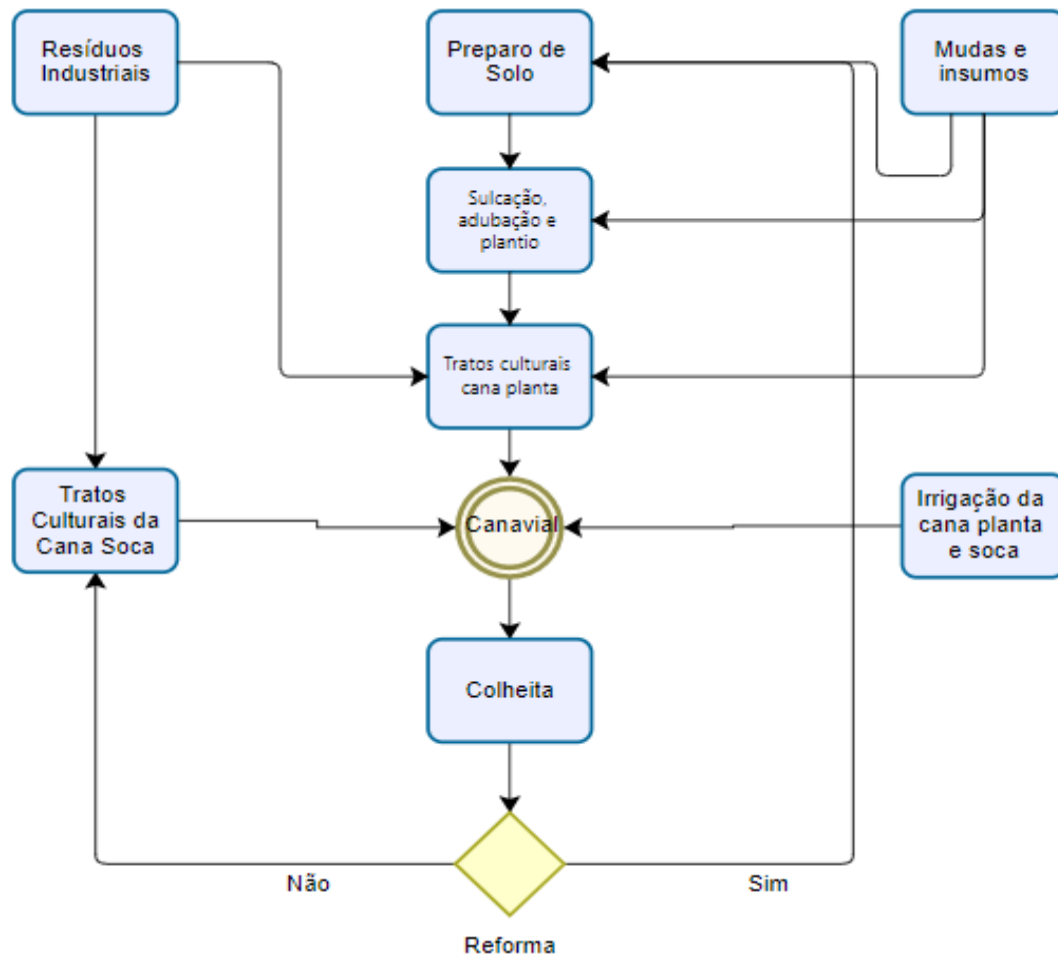
A Figura 5 apresenta o fluxograma do processo produtivo da cana (FERNANDES, 2003).

De acordo com Belardo, Cassia e Silva (2015), na colheita mecanizada, as máquinas utilizadas são as colhedoras autopropelidas, também conhecidas por combinadas ou cana picada, que realizam o corte, a limpeza parcial da cana-de-açúcar, o fracionamento dos colmos e o carregamento da cana-de-açúcar para os veículos que realizarão o transporte.

Vale observar que as máquinas de colheita de cana-de-açúcar estão cada vez mais eficientes, o que está aumentando a produtividade, juntamente com aspectos de tecnologia 4.0 e agricultura de precisão, que trabalham com dados cada vez mais

reais (SANTOS *et al.*, 2014). A Figura 6 apresenta o processo do sistema de colheita mecanizada da cana-de-açúcar.

Figura 5 – Fluxograma das atividades que compõem a etapa agrícola



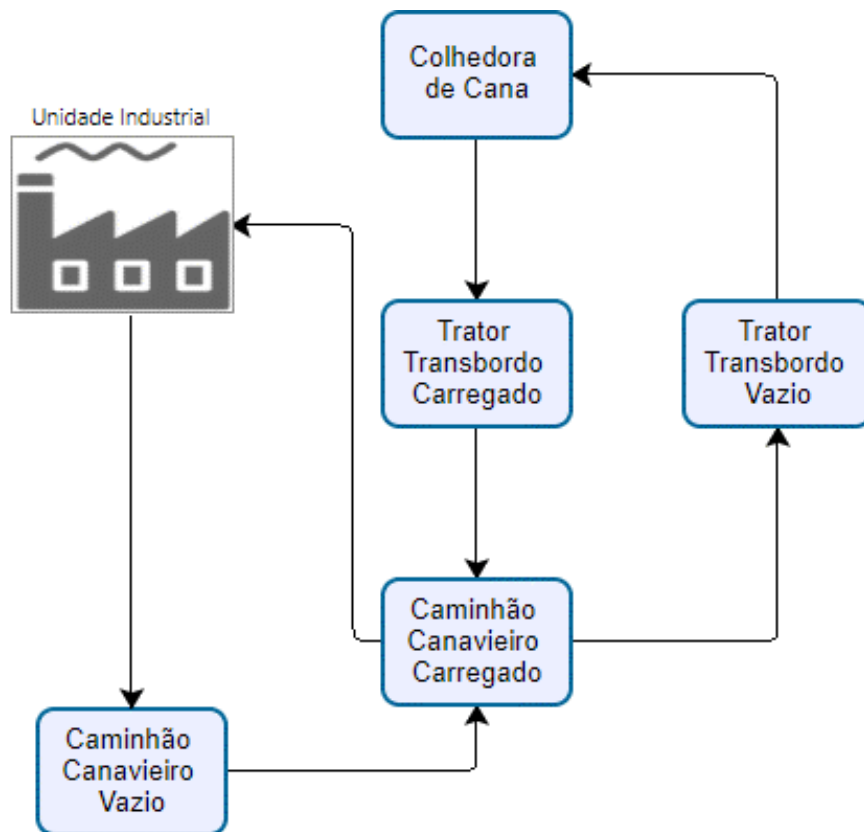
Fonte: Adaptado de Fernandes, 2003

No processo colheita, a colhedora realiza o corte, limpeza e fracionamento dos colmos, que são carregados no transbordo para o caminhão, até chegar à unidade industrial. Essa atividade de carregamento é composta por um trator e uma carreta. Assim que o trator atinge uma carga específica (transbordo cheio), ele se locomove para fora do talhão, transferindo o material colhido para o veículo que fará o transporte para a unidade industrial. O transbordo e o caminhão retornam aos pontos iniciais de carregamento, criando um ciclo que se repete ao longo da safra (BELARDO; CASSIA; SILVA, 2015).

O gerenciamento dos processos produtivos no setor sucroenergético é fundamental para a competitividade da empresa, pois, segundo Martins *et al.* (2005), auxilia diretamente na mensuração do resultado, tornando-se uma ferramenta

estratégica para o planejamento da empresa/usina. Silva, Alves e Costa (2011) apontam que um dos gargalos que os produtores rurais enfrentam diariamente nas propriedades é a falta de informações gerenciais para planejamento, análise do fluxo de caixa e custos de produção. Dessa forma, é necessário que os gestores tenham uma visão administrativa e financeira da atividade diária.

Figura 6 – Esquema do sistema de colheita mecanizada



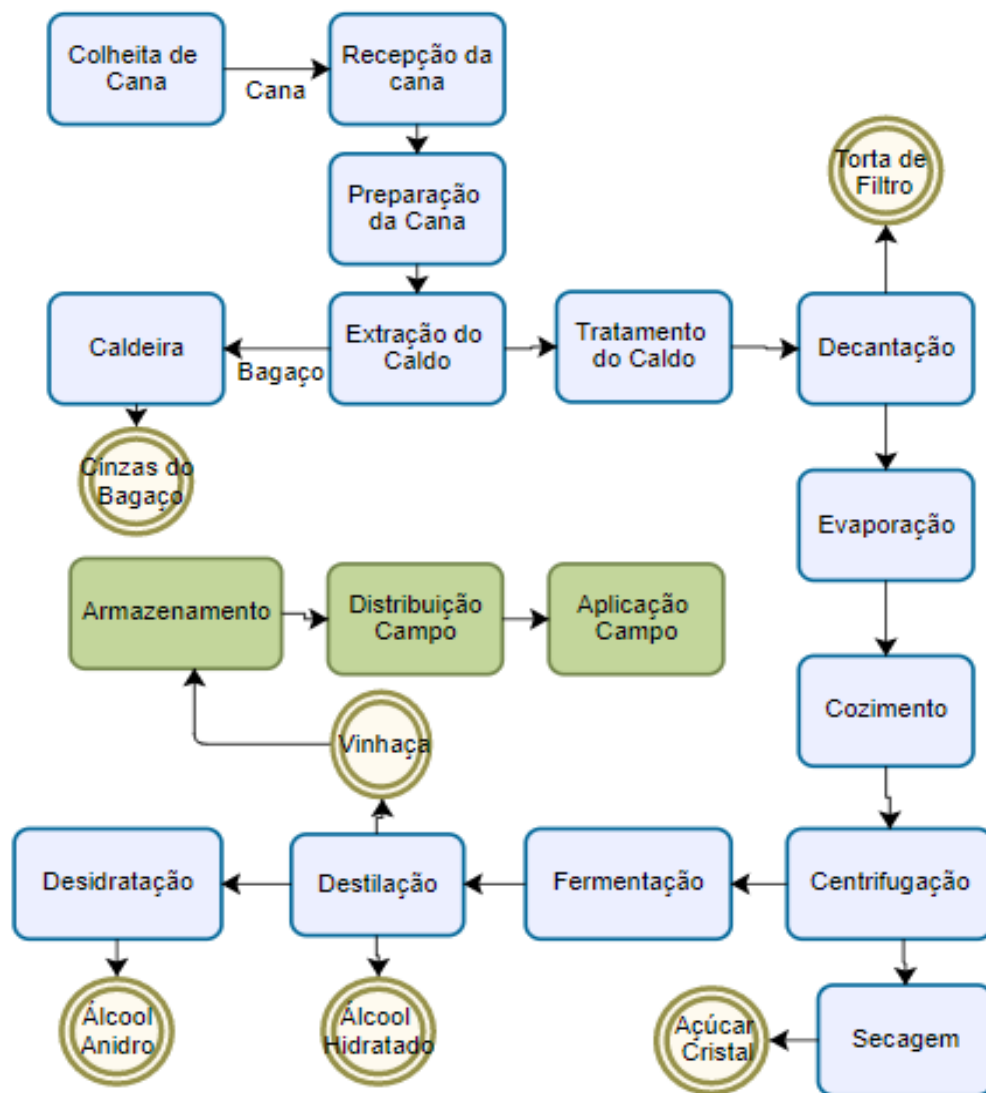
Fonte: Adaptado de Belardo, Cassia e Silva, 2015

Iannoni (2000) e Silva, Alves e Costa (2011) destacam que o planejamento das operações deve acontecer de forma coordenada e com visão sistêmica, pois interfere diretamente em todo processo, devido sua interação com os recursos envolvidos. Os autores mostram que o mundo dos negócios requer uma compreensão dos objetivos, das atividades e dos resultados das empresas, bem como das condições às quais o trabalho está suscetível e dos fatores que os influenciam.

3.2.2 Processo produtivo industrial

Após compreender como é o processo agrícola da cana-de açúcar, é importante entender também o processo de produção da usina, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Fluxograma das atividades industriais



Fonte: Adaptado de Fernandes, 2003

O processo na usina tem início com a pesagem e análise da cana assim que chega à indústria, e tem a finalidade de definir o valor pago ao fornecedor, que se dá pelo método do Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo (CONSECANA) (CONSECANA, 1999).

Em seguida, a cana segue para a mesa alimentadora e é submetida à lavagem de impurezas minerais e vegetais. Depois dessa etapa, a água utilizada é tratada e volta ao processo de limpeza, sendo que os resíduos removidos são enviados para uma área de decantação residual (HUGOT, 1977).

A cana segue para a esteira metálica que a direciona para os picadores e desfibradores. Nesta parte do processo, como o próprio nome diz, a cana é picada e desfibrada, e suas células ficam abertas, possibilitando maior extração de caldo (sacarose) nos processos seguintes (PAYNE, 1989).

Após o preparo da cana, ela é transportada via esteira de borracha na qual um eletroímã retira qualquer fragmento metálico residual. Começa, então, o processo de alimentação da moenda, por onde passa a cana desfibrada e todo seu caldo é retirado do bagaço. Nessa etapa, junto com o caldo passam pequenas quantidades de bagaço, que são retiradas pela peneira rotativa e devolvidas para moenda (PAYNE, 1989).

O bagaço oriundo desse processo é levado por uma esteira às caldeiras para a combustão e a produção do vapor. O bagaço sobressalente é levado para um pátio para a formação de “estoque” e volta à produção sempre que há algum problema de abastecimento ou quando o mix de produção de energia é aumentado. Ele também é utilizado para o *start up* da próxima safra, no qual não há necessidade de combustível para movimentar a planta (HUGOT, 1977).

O vapor gerado nesse processo alimenta as turbinas que, por sua vez, movimentam as máquinas (preparo e extração) e os turbogeradores que são responsáveis pela geração de energia elétrica usada na produção de açúcar e etanol. A produção excedente é revertida para a cogeração de energia junto à concessionária. Para o aquecimento da evaporação de caldo, fabricação de açúcar e destilaria de álcool, é utilizado o vapor do escape das turbinas (HUGOT, 1977).

O caldo extraído pelas moendas é destinado para a fabricação de açúcar e etanol, dependendo exclusivamente das capacidades fabris e do plano de produção de cana unidade. A quantidade de caldo destinada à produção de açúcar é aquecida e depois reage com o anidrido sulfuroso que é produzido em fornos pela queima do enxofre; em seguida, o caldo é misturado ao leite de cal até se equilibrar com o meio. A adição desses dois componentes tem a finalidade de reagir quimicamente para eliminar as impurezas presentes no processo. Logo após, o caldo é submetido à temperatura de aproximadamente 80°C pelo trocador de calor. Então, o caldo vai para o balão de *flash* e os vapores oclusos que foram produzidos no aquecimento são

excluídos; o caldo segue para os decantadores que o separam das impurezas (MEDEIROS, 2005 apud PAIVA, 2009).

O caldo oriundo dos decantadores é chamado de caldo clarificado, que é guiado para os pré-evaporadores que concentram e eliminam cerca de 30% de água; o processo de evaporação é realizado em até cinco etapas, em séries sequenciais e a partir desse processo se tem o xarope de Brix entre 53° e 66° (PAYNE, 1989).

Na produção do açúcar, o xarope entra nos cozedores e as sementes de açúcar são introduzidas e geram cristais do padrão comercial. O grão de cristal segue para o cristalizador, que é responsável por ajudar na finalização do grão. Na centrifugação, os grãos ainda estão com fragmentos de mel que são, então, separados. Em seguida, o açúcar é guiado para o secador e vai para o resfriador, onde se finaliza o processo de fabricação (HUGOT, 1977).

Para a fabricação de etanol, o mel final produzido pela fabricação de açúcar é direcionado à destilaria. A primeira etapa desse processo é a preparação do mosto, formado por caldo, xarope, mel final e água. Essa combinação é formulada mediante as políticas de produção de açúcar, álcool e melaço da empresa e são proporcionais para que haja a fermentação. O mosto produzido é levado às dornas de fermentação e misturado às leveduras (fermento). Essa mistura, passadas aproximadamente sete horas, se transforma em vinho levedado, que contém entre 6% e 10% de álcool e mais as leveduras usadas no processo. O vinho de levedado é direcionado às centrífugas que vão separar as leveduras do vinho (HUGOT, 1977).

O vinho segue para a destilaria, onde as colunas vão terminar o processo de separação. A primeira fabrica a cachaça, na sequência, a segunda recupera o álcool hidratado e na última etapa recupera o álcool hidratado. Durante o processo da destilaria, obtêm-se ainda o óleo fúsel e a vinhaça, sendo que o primeiro é vendido para as empresas farmacêuticas e a segunda é utilizada na fertilização da cana (PAYNE, 1989).

O processo contínuo é o realizado na indústria sucroenergética e, como descrito anteriormente, é voltado para a produção em grande escala, e todas as etapas devem ocorrer em sintonia. O processo contínuo, por ser automatizado na maioria das vezes, garante a qualidade dos produtos. O processo acontece de maneira ininterrupta e segue a mesma sequência de produção (TEIXEIRA, 1992).

3.3 DINÂMICA DE SISTEMAS

A expressão dinâmica de sistemas é utilizada em diversas áreas da ciência, tendo como exemplo o material de Ogata (1998), que exemplifica a modelagem e a resposta de sistemas dinâmicos físicos, dentre eles, sistemas elétricos, mecânicos, térmicos, hidráulicos e pneumáticos. Além disso, existem aplicações do conceito nas áreas de saúde e economia, que foram iniciadas pelo professor Jay W. Forrester, do Massachusetts Institute of Technology (MIT). Na década de 1950, ele mostrou interesse em estudar processos dinâmicos de negócios e seus impactos nas corporações (BASTOS, 2003).

A dinâmica de sistemas pode ser aplicada em diversas áreas para análise de sistemas dinâmicos, possibilitando a identificação de vários fenômenos inerentes às operações e oportunizando o balanceamento dos processos produtivos (STERMAN *et al.*, 2015).

Para simulação de dinâmica de sistemas, a principal regra é a estruturação do sistema, ou seja, dimensionar suas capacidades, regras de decisão, relações e restrições para representar o comportamento do estudo (BASTOS, 2003).

3.3.1 Aplicações em dinâmica de sistemas

Um exemplo desse comportamento em dinâmica de sistemas em gestão de estoques foi o caso da cadeia de suprimentos da General Electric, que exigiu a compreensão dos pontos de reposição, das taxas de saída de produtos e dos pontos ótimos de reposição, pois isso impactava significativamente em sua cadeia produtiva (FORRESTER, 1996 apud BASTOS, 2003).

Outro exemplo da aplicação de dinâmica de sistemas é para compreender o sentido da acumulação, isto é, qual o comportamento de sistemas em que ocorre acumulação de um determinado produto. Essa acumulação representada simplesmente por estoque é um problema crônico em qualquer ambiente empresarial, portanto, há grande oportunidade de atuação na gestão de operações em estoques (STERMAN, 2000; GRÖSSLE; THUN; MILLING, 2008).

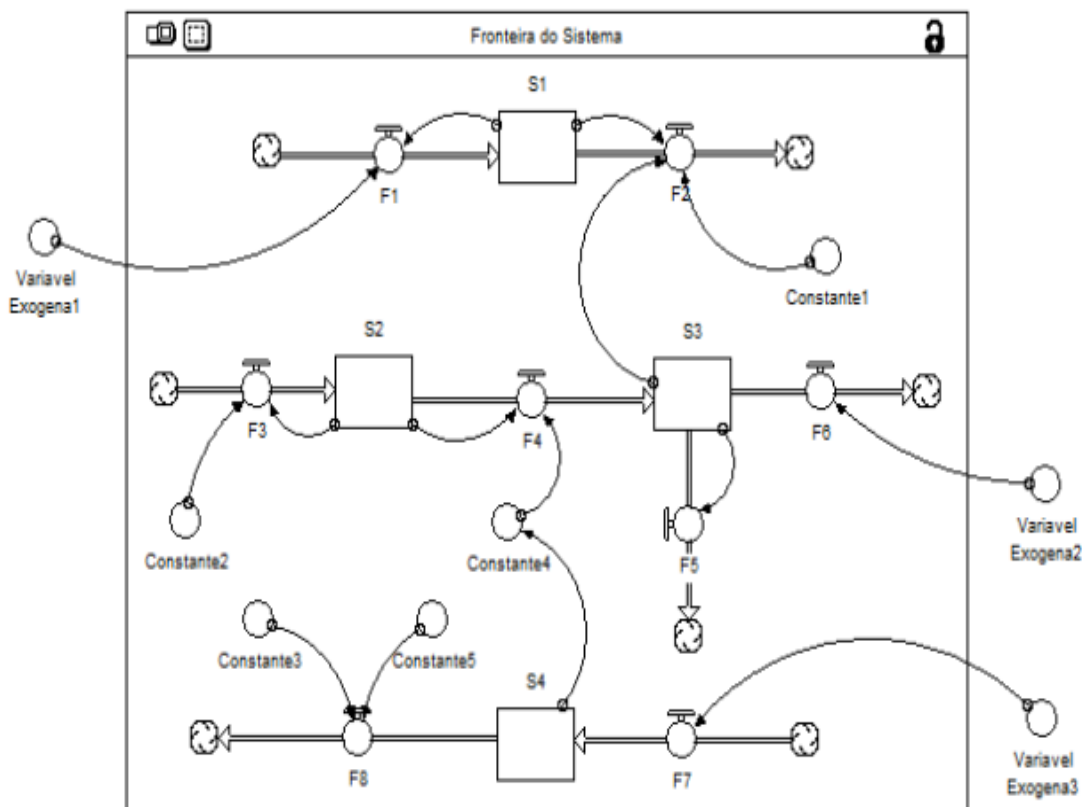
Dessa forma, os estoques representam o estado em um determinado tempo da simulação de acordo com as taxas de entradas, sendo possível analisar o comportamento com visão temporal para o estudo aplicado, pois eles são

“monitorados”, ou seja, qualquer alteração em alguma variável do processo expõe o comportamento não apenas do estoque, mas de toda a cadeia aplicada na modelagem (STERMAN, 2000; GRÖSSLE; THUN; MILLING, 2008).

Outros exemplos destacados da dinâmica de sistemas em gestão de operações são estudos de capacidade produtiva com objetivo principal de compreender quando e como ocorrem os gargalos de produção, sendo eles: tempo de processamento, *setup*, armazenamento, transporte e diversos outros problemas de gestão de operações (GADELHA, 2012).

Na Figura 8 é possível observar um exemplo de modelagem de dinâmica de sistemas. Os retângulos representam os estoques e os círculos são as variáveis do problema e suas devidas interações. As variáveis exógenas não são influenciadas e não sofrem efeitos das demais variáveis do processo.

Figura 8 – Exemplo de modelagem de dinâmica de sistemas



Fonte: Adaptado de Sterman, 2000

3.3.2 Relação causal

A dinâmica de sistemas possui técnicas e análise de variáveis em função do tempo a partir de interações, laços de retroalimentação e principalmente relações causais, que são utilizadas para reproduzir a interação entre duas variáveis, mostrando o efeito direto de uma sobre a outra. Essas relações causais são representadas por setas e sinais, que podem ser positivos ou negativos. Como efeito de uma relação causal positiva, se houver um aumento na causa, o efeito aumentará proporcionalmente (STERMAN, 2000).

A Figura 9 demonstra uma relação causal positiva, representada por uma seta e um sinal de adição.

Figura 9 – Relação causal positiva



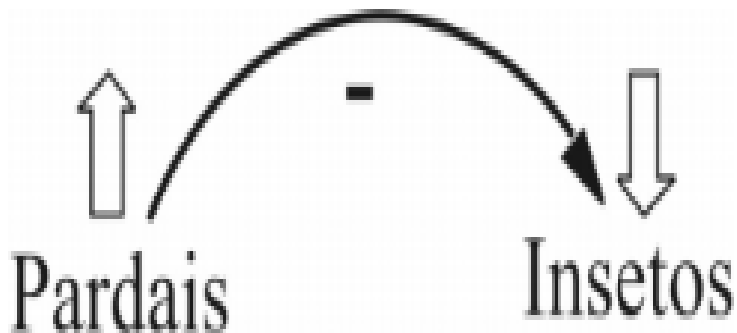
Fonte: Adaptado de Amaral, 2012

O exemplo demonstra que aumentar o número de 'sementes' geneticamente modificadas também aumentará o número de 'plantas' geneticamente modificadas.

Por outro lado, uma relação negativa expressa exatamente o oposto, ou seja, uma relação inversamente proporcional. Neles, um aumento na causa, motiva uma diminuição no efeito e vice-versa (AMARAL, 2012).

A Figura 10 mostra uma relação causal negativa, ou seja, é inversamente relacionada. Um aumento dos pardais geneticamente modificados pode reduzir a população de insetos, e uma diminuição na população de pardais pode aumentar a população de insetos.

Figura 10 – Relação causal negativa



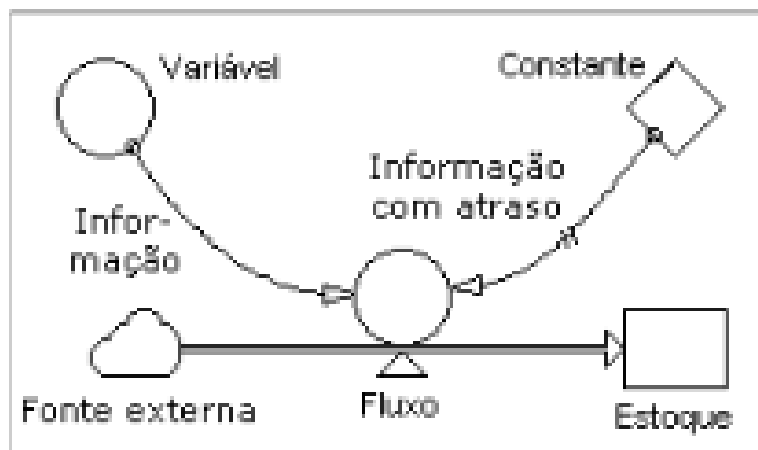
Fonte: Adaptado de Amaral, 2012

3.3.3 Estoque e fluxos

Com uso de diagramas de estoque e fluxo, os softwares de dinâmica de sistemas desenvolvem equações diferenciais que são resolvidas por métodos numéricos, gerando o comportamento dinâmico e não linear do sistema. Os estoques representam o estado do sistema em determinado momento e, por meio de acumulação, proveem aos sistemas inércia e memória, compreendendo novamente o comportamento da modelagem proposta (STERMAN, 2000).

A Figura 11 demonstra um modelo genérico, com elementos básicos para modelagem em dinâmica de sistemas, no qual as variáveis são ligadas diretamente no fluxo junto com possíveis constantes, sofrendo interferência de fontes externas e influência em acumulação (estoques).

Figura 11 – Elementos de um modelo genérico de estoque e fluxo



Fonte: Vilela, 2005

As variáveis representam parâmetros que podem ser utilizados na modelagem junto com constantes (números fixos), já os fluxos, representados por setas, demonstram a movimentação do processo, podendo ser controlados matematicamente com os parâmetros e constantes contidos.

Os estoques representam a acumulação de uma determinada variável, sendo influenciada em função do tempo. A variação de estoque é demonstrada pela equação:

$$\text{Estoque } (T + Dt) = \text{Estoque } (T) + \text{fluxo } (Dt) * Dt \quad (1)$$

O intervalo de tempo Dt é igual à primeira unidade de tempo, que pode ser qualquer unidade de medida (dias, horas, minutos e segundos). A unidade de tempo controla todo o processo de modelagem e simulação do modelo ao longo do tempo, ou seja, o sistema é exibido na tela do computador em unidades de dt , ou seja, tempo.

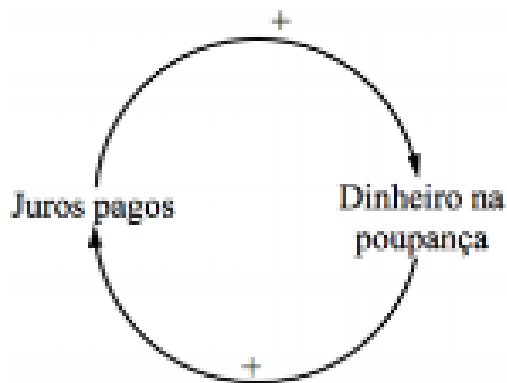
As informações, representadas por setas de traço único, servem para vincular elementos do sistema e suas relações diretas entre os elementos, e os recursos externos representam uma fonte que está fora, ou uma variável direta que está fora de interesse nas modelagens realizadas.

3.3.4 Ciclo de realimentação (*feedback*)

As relações causais, positivas ou negativas, podem interagir em realimentação (*feedback*), ou seja, a sua resultante pode influenciar em outra variável antecessora. Um ciclo positivo cria reforço, amplificação ou aceleração no efeito que ocorre no sistema, levando a um maior crescimento. Um ciclo vicioso cria uma tendência de estabilização, contração ou declínio do sistema. Todos os sistemas são constituídos por uma rede de *feedback* ou *loops* e seus pontos fortes são produtos de suas interações (CABRITA, 2016).

Sterman (2000) diz que as decisões mudam o ambiente, levam a novas decisões, mas também produzem resultados negativos, reações retardadas e mudanças nas intenções. Essas respostas, muitas vezes, podem levar a resultados inesperados. Um bom exemplo de realimentação é o dinheiro investido na poupança — sua resultante de valor inicial acrescido de juros altera o dinheiro na poupança, ocorrendo realimentação, conforme demonstrado na Figura 12.

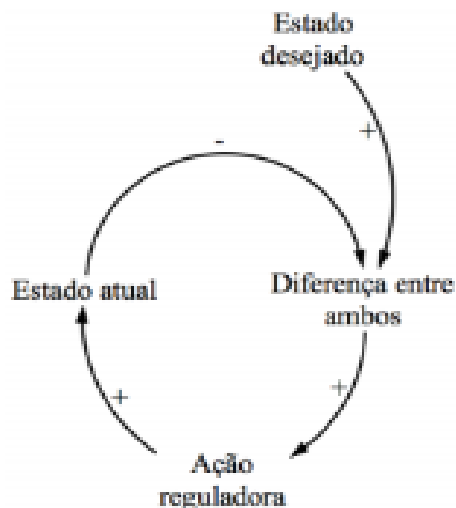
Figura 12 – Ciclo de realimentação positivo



Fonte: Adaptado de Amaral, 2012

A Figura 13 demonstra um exemplo típico de *feedback* negativo. O estado desejado é comparado ao estado atual, entretanto, quanto maior a diferença entre os estados, maior a ação regulatória, que estará mais próxima do estado desejado. Quanto menores as diferenças entre as regiões, menor a ação regulatória.

Figura 13 – Ciclo de realimentação negativo



Fonte: Adaptado de Amaral, 2012

3.4 O SOFTWARE VENSIM PLE®

Vensim PLE® é um software de modelagem visual para representação e análise de sistemas dinâmicos disponibilizado comercialmente a partir de 1991. Foi desenvolvido pela Ventana Systems Inc., empresa residente nos Estados Unidos

desde 1985, que contribui com técnicas de simulação e análise de dados em problemas de negócios, economia e engenharia, com decisões de risco e implantação de modelos robustos e abrangentes para controle estratégico das organizações (VENTANA SYSTEMS, 2023).

O software é distribuído gratuitamente no site do seu desenvolvedor e pode ser utilizado livremente para fins acadêmicos. Possui layout simplificado voltado à construção de modelos para simulação com uso de diagramas causais e de fluxo. Permite imputar equações e explorar as variáveis contidas no modelo que, após implementado, possibilita simular o comportamento dinâmico das situações representadas sob diferentes parâmetros.

O desenvolvimento da modelagem começa com a criação de um diagrama causal juntamente com a elaboração de diagramas de estoque e fluxo. Após essas etapas, são definidas e inseridas equações e parâmetros para concluir a construção do modelo (CHWIF; MEDINA, 2014).

3.5 EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO SOFTWARE VENSIM PLE®

O software Vensim PLE® é uma ferramenta de modelagem e simulação que pode ser aplicado em uma variedade de setores e cenários. Por exemplo, na área de gestão de negócios, o Vensim PLE® pode ser utilizado para modelar e prever o desempenho financeiro de uma empresa, permitindo que os gestores tomem decisões informadas sobre investimentos, estratégias de crescimento e otimização de recursos.

Além disso, o software também é utilizado em estudos de sustentabilidade e mudanças climáticas, permitindo a criação de modelos que ajudam a entender os impactos das ações humanas no meio ambiente e a desenvolver políticas e estratégias para mitigar esses efeitos. Em resumo, o Vensim PLE® oferece uma ampla gama de aplicações, fornecendo *insights* e auxiliando na tomada de decisões complexas em diversos campos.

3.5.1 Um modelo de dinâmica de sistemas para previsão de desgaste em pavimentos rodoviários no Brasil

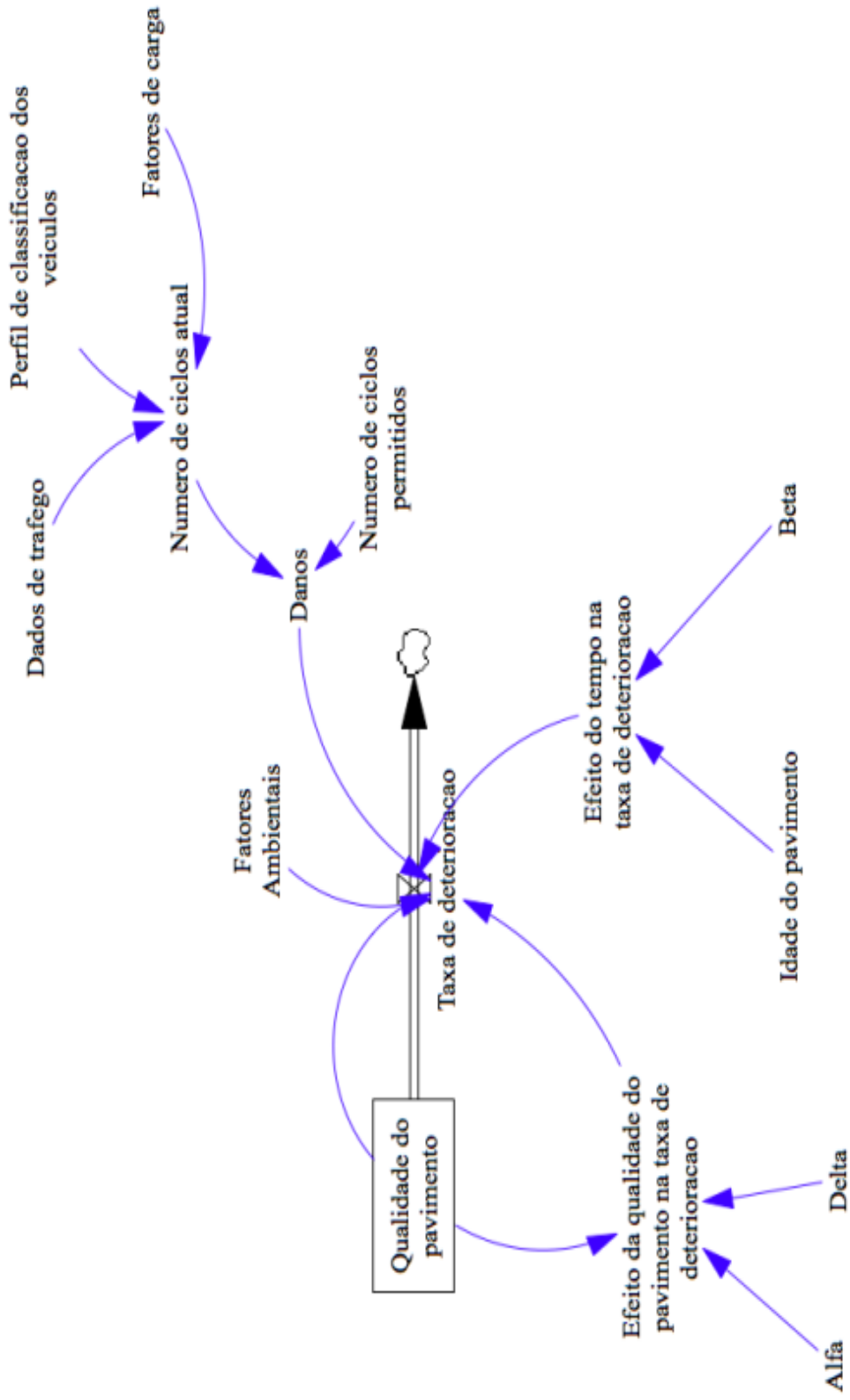
Rezende (2019) descreve um modelo de dinâmica de sistemas para previsão de desgaste em pavimentos rodoviários no Brasil. O trabalho apresentou a predominância desse modal de transporte, correspondendo a 60% de todo volume de matérias transportadas no país, exigindo manutenção constante devido ao fluxo de veículos. Embora o país tenha a quarta maior malha rodoviária do mundo, há diversas carências de novas ferramentas e inovações no processo de gestão, pois o desgaste que ocorre nas estruturas dos pavimentos é temporário e repetitivo, e esses fatores estão relacionados a variáveis como projeto deficiente, execução inadequada da obra, fatores de carga, clima, sobrecarga e desgaste natural dos materiais.

Considerando a necessidade de prever a durabilidade de pavimentos rodoviários, Rezende (2019) propôs, a partir da modelagem de sistemas, uma ferramenta para previsão no gerenciamento de manutenções em pavimentos. Foram realizados experimentos e simulações para poder apresentar previsibilidade ao longo de um período, apontando para o momento em que pode ocorrer o desgaste na superfície da estrada e o que pode estar relacionado à gravidade e às possíveis causas do defeito.

Para análise e abordagem estratégica da tomada de decisão, diversas opções de intervenção nos asfaltos precisam ser consideradas, como manutenção preventiva, manutenção corretiva e recuperação. Na Figura 14 observa-se o diagrama de fluxo para predição do desgaste do pavimento levando-se em conta cada tipo de intervenção.

O modelo proposto apresentou facilidade na avaliação econômica e previsibilidade de custos nas intervenções em estradas, portanto, a dinâmica de sistemas ofereceu apoio técnico na tomada de decisões e previsibilidade orçamentária nas manutenções de estradas.

Figura 14 – Exemplo de modelagem para previsão de desgaste em pavimentos



Fonte: Rezende, 2019

3.5.2 Proposta de modelagem do Sistema Nacional de Transplantes brasileiro com o uso da dinâmica de sistemas

Azevedo (2020) propôs a modelagem do Sistema Nacional de Transplantes (SNT). O estudo teve como objetivo identificar as principais variáveis que interferem no processo de transplante do SNT. Inicialmente foi conduzido pelo levantamento de informações do processo e posteriormente por modelagem no software Vensim PLE[®].

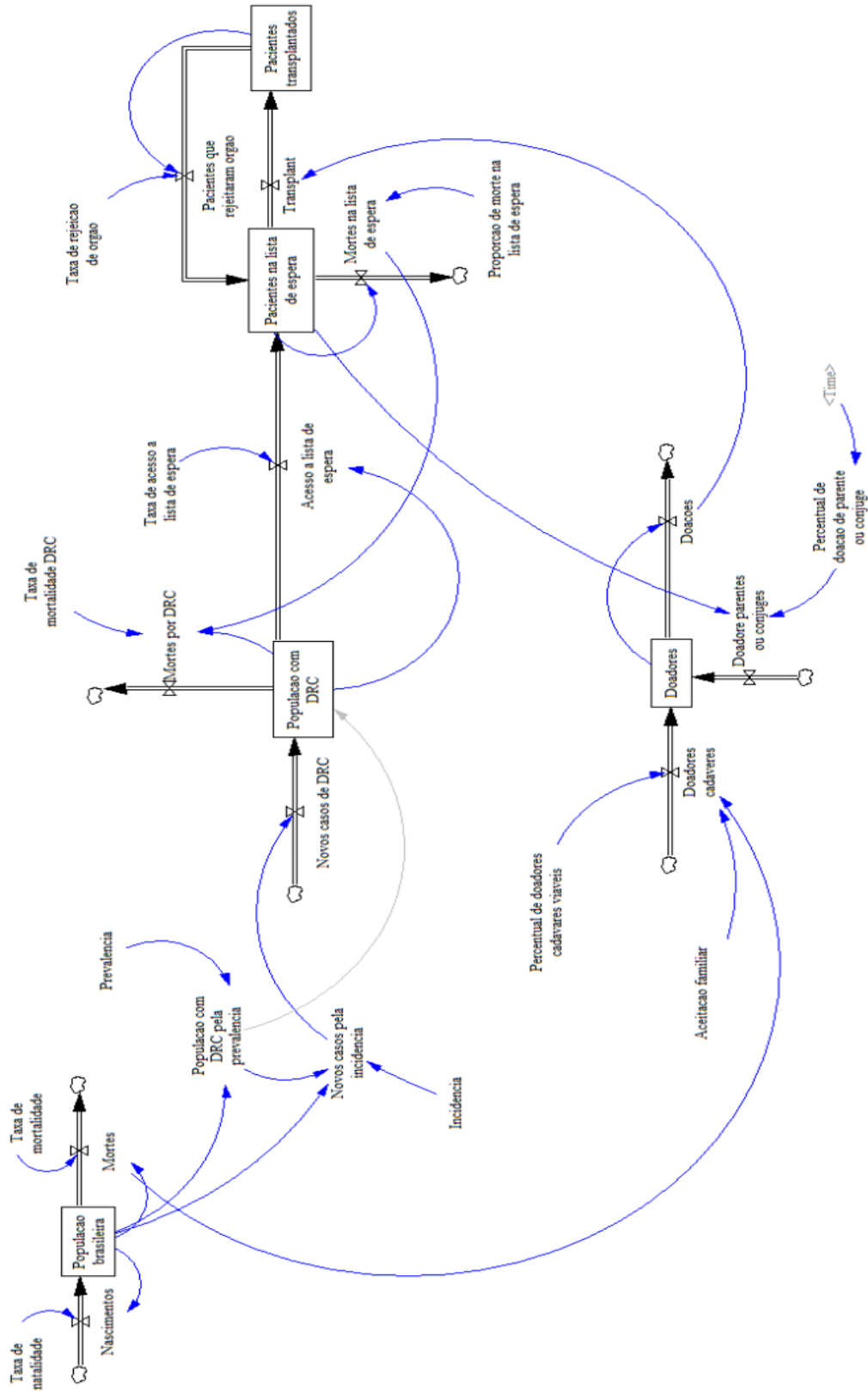
O autor destacou que o Brasil possui o segundo maior programa de transplante de órgãos e tecidos do mundo, em números absolutos. No entanto, esse fato não tem nada a ver com sua eficiência, mas com o tamanho continental do país. Ao comparar o número de transplantes por milhão de habitantes, o Brasil ocupa a 33ª posição em nível mundial. O número de pessoas esperando na fila para transplantes vem aumentando ao longo dos anos.

Uma compreensão adequada de como esse sistema funciona e de como ele responde a diferentes condições é fundamental para atingir o objetivo do projeto. O grande número de variáveis, agentes e condições possíveis, e as relações entre eles, aumentam muito a complexidade do sistema e o tornam igualmente difícil de entender. Mas, essas dificuldades podem ser minimizadas pela proposta de dinâmica de sistemas. Após coleta de dados e análise das possíveis aderências necessárias para a modelagem, foi proposto o modelo representado na Figura 15.

No projeto foi possível analisar as interações entre as variáveis e testar diferentes cenários, demonstrando um excelente recurso para apoio à tomada de decisões para elaboração de políticas que reduzam a fila de transplantes no país.

Apesar da modelagem não ser conclusiva, sugeriu-se diversas oportunidades e gargalos no SNT.

Figura 15 – Exemplo de modelagem do Sistema Nacional de Transplantes



3.5.3 Superlotação carcerária em Salvador: simulação da ampliação do sistema carcerário por dinâmica de sistemas

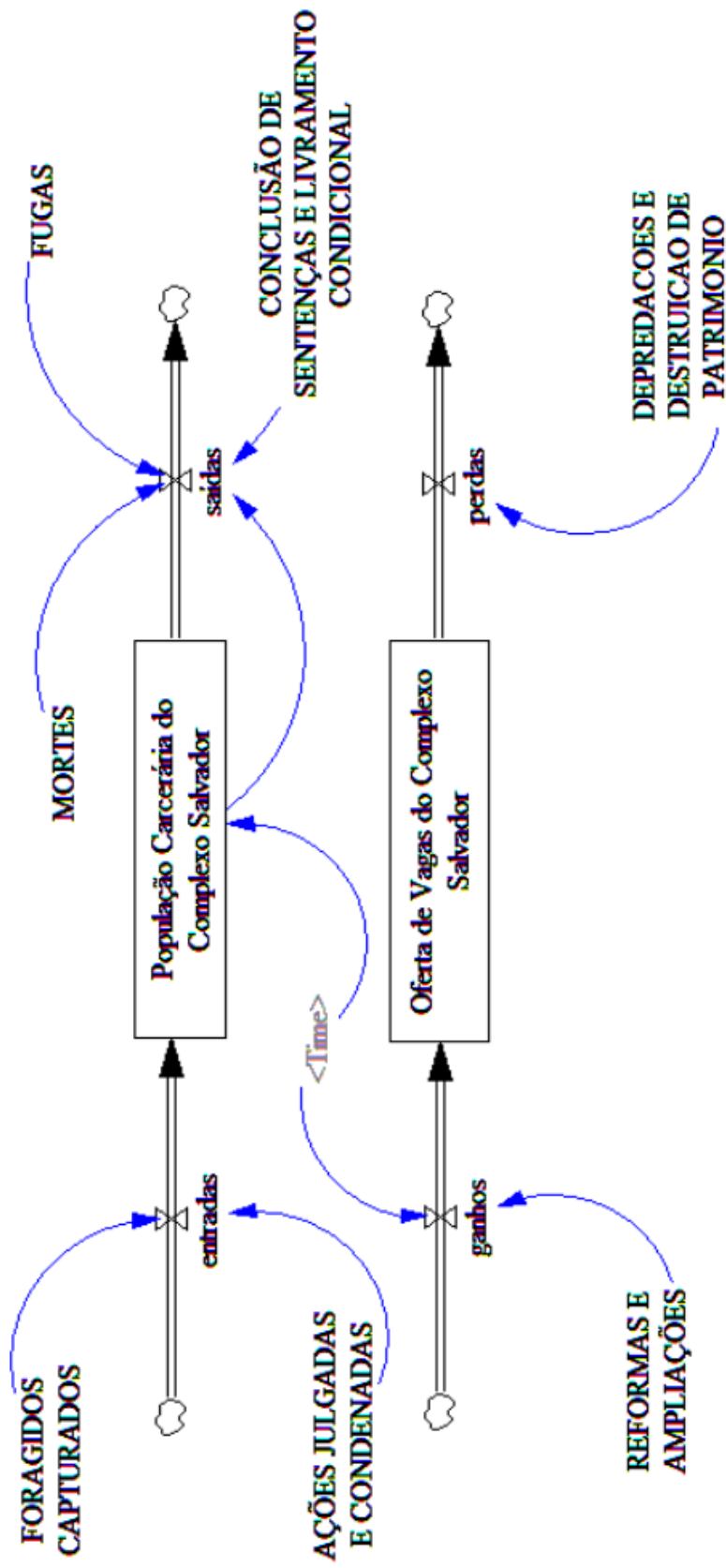
Oliveira, Santos e Souza (2021) simularam a ampliação do sistema carcerário. Diante dos problemas enfrentados pelo país e sua capital, este trabalho teve como objetivo investigar a estratégia do governo de oferecer mais espaço no sistema prisional soteropolitano por meio da construção de novos presídios para resolver definitivamente o problema da superlotação do Complexo Penal de Salvador.

No desenvolvimento do projeto foi utilizada uma abordagem dedutiva, com estudos descritivos e bibliográficos selecionados no momento da coleta de dados para aplicação em dinâmica de sistemas. No estudo foi proposto como o estoque (capacidade do sistema penitenciário) é afetado por entradas e saídas dos sistemas prisionais, tendo como objetivo compreender os problemas de capacidade Prisional conforme modelo dinâmico elaborado no Vensim PLE[®] (Figura 16).

Com base nas informações de novas entradas prisionais e saídas, foi possível concluir que a oferta de vagas não atende a demanda do sistema prisional, mesmo com aumento das penitenciárias, ou seja, após 14 meses da implantação dos novos sistemas prisionais, o problema de superlotação persistirá.

Portanto, devem ser elaboradas políticas públicas para redução da população e novos entrantes no sistema prisional.

Figura 16 – Exemplo de modelagem do sistema carcerário de Salvador



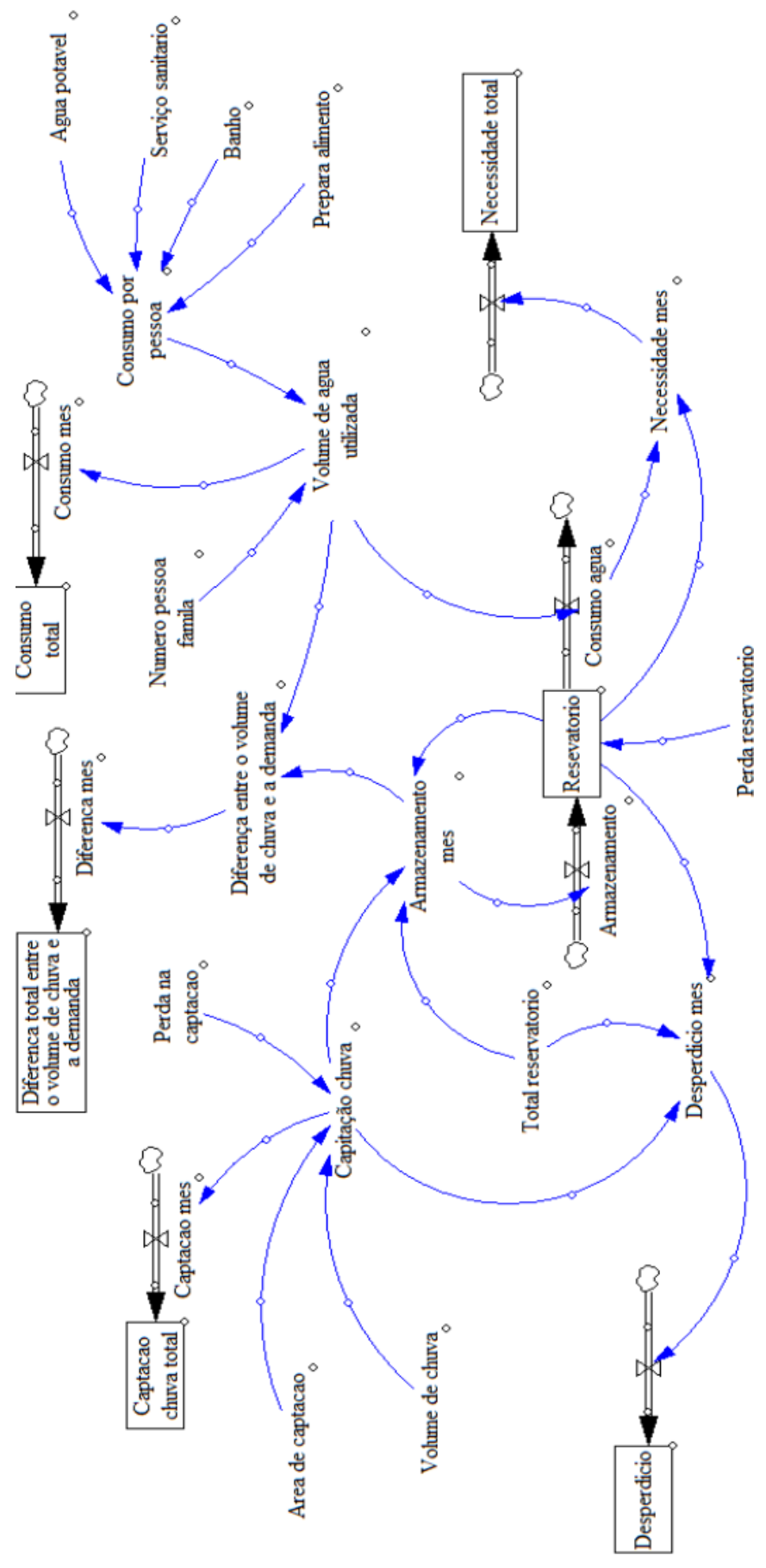
3.5.4 Avaliação da capacidade de captação e armazenamento de água das chuvas no Alto Vale do Jequitinhonha

Mota e Martins (2019), por meio de análise dos dados pluviométricos da região do Alto Vale do Jequitinhonha e da avaliação da expectativa de captação de água das chuvas e de demanda de consumo pela população, elaboraram modelagem no Vensim PLE® para simulações do sistema de coleta e armazenagem de água. Para o desenvolvimento da modelagem foram consideradas variáveis e relações causais inerentes ao sistema (Figura 17).

Os resultados obtidos permitem visualizar um modo de minimizar o problema de abastecimento de água potável para uso residencial na região do Alto Vale do Jequitinhonha com base em 3 cenários, permitindo redimensionar o sistema de captação e armazenamento de água das chuvas. Os resultados expressam que será necessária uma área de captação equivalente a 120 m² de julho a outubro para atender a demanda de abastecimento local.

Algumas melhorias em infraestrutura são possíveis, entretanto, a viabilidade técnica e econômica dessas inovações precisa ser cuidadosamente estudada. Assim, a simulação permitiu maior confiabilidade e melhor dimensionamento do processo.

Figura 17 – Exemplo de modelagem do sistema de captação e armazenamento de água



4 METODOLOGIA

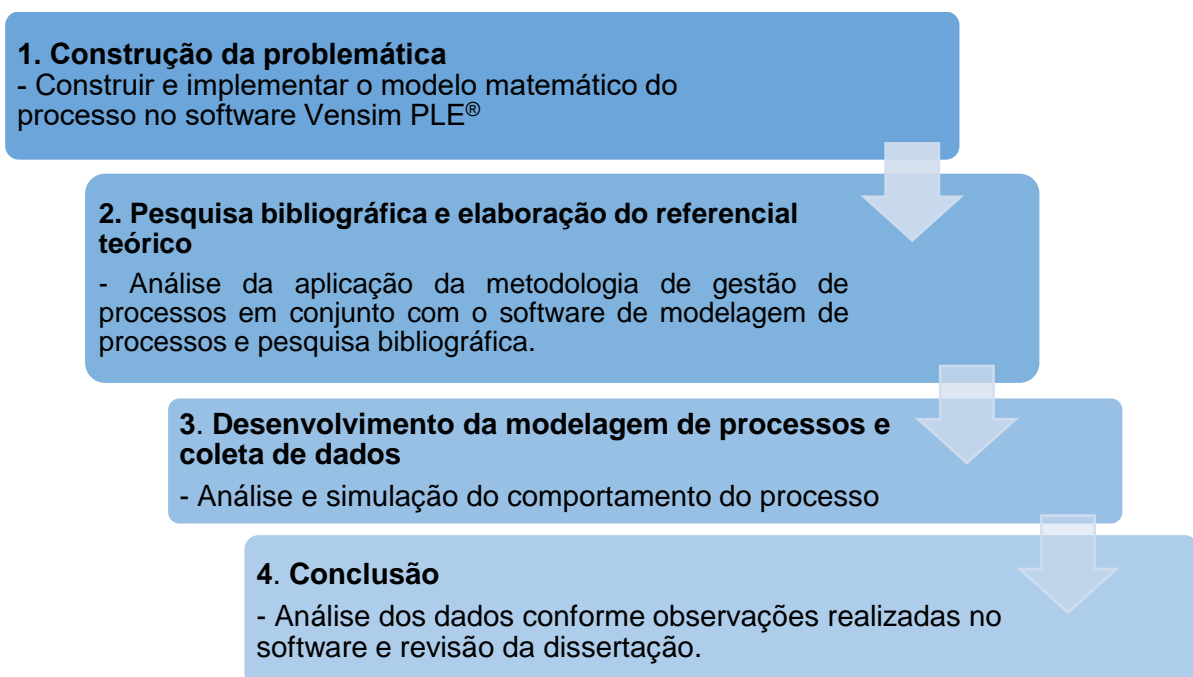
O presente projeto é de natureza aplicada com abordagens quantitativa e qualitativa, as quais foram combinadas. Quando as duas abordagens são usadas juntas trazem maior abrangência, contribuindo para a pesquisa na resolução dos objetivos propostos (MIGUEL, 2010). O método de pesquisa de modelagem neste projeto foi constituído em algumas partes e tem como objetivo a análise comparativa dos valores reais e simulados do processo produtivo.

Para realização deste projeto foi realizada uma revisão da literatura com estudos exploratórios em artigos científicos, coleta de dados do ambiente a ser simulado e, através desse conjunto de informações, foi elaborada a hipótese dinâmica.

Após esta etapa, foram propostos o desenvolvimento e a construção do modelo capaz de representar o processo de geração, armazenamento e distribuição de vinhaça no campo, para posterior implementação computacional e validação da solução através de simulações dinâmicas do processo no software Vensim PLE®.

A pesquisa possui fins metodológicos para aplicação da dinâmica de sistemas e como instrumento para coleta dos dados foi elaborado um procedimento metodológico envolvendo quatro etapas (Figura 18).

Figura 18 – Procedimento metodológico



A Figura 18 demonstra as quatro etapas para desenvolvimento da metodologia, iniciando com a estruturação da problemática, na qual destacamos a construção e implementação do modelo no software Vensim PLE®. Após a delimitação do estudo, foi realizada uma pesquisa bibliográfica e elaborado o referencial teórico para aplicar a modelagem em gestão de processos.

Na terceira etapa, foi desenvolvida a modelagem a partir dos projetos do processo e realizada a coleta de dados para análise e simulação do comportamento da atividade fabril; após delimitar as simulações, foi realizada a análise dos dados resultantes da solicitação.

Após as etapas essenciais da metodologia, foram realizadas análises do comportamento do sistema de acordo com a variação das variáveis-chave do processo para posteriormente concluir a dissertação.

Os dados utilizados na simulação foram fornecidos por uma usina de açúcar e etanol localizada no interior do estado de São Paulo, referência no processamento de cana e produção de açúcar, etanol e energia.

Após a conclusão e a validação do modelo, foram desenvolvidos 6 cenários prováveis, separados para melhor compreensão, conforme a Tabela 10, na qual se destaca principalmente o impacto dos equipamentos sobre a vazão de saída e menor demanda de armazenamento de vinhaça nos cenários 1, 2 e 3.

O cenário quatro demonstra o tempo máximo de enchimento dos tanques e o quinto apresenta um *loop*, que representa o processo em uma possível redução de moagem e, em consequência, menor volume de vinhaça produzido para não afetar os limites de armazenamento.

Tabela 4 – Cenários Vensim PLE®

Cenários	Descritivo	Quantidade de equipamentos					Total
		F1	F2	F3	F4	F5	
1	Processo em condições normais	2	3	2	2	3	12
2	Processo em condições com indisponibilidade mecânica de 2 tratores	2	2	2	2	2	10
3	Processo em condições com indisponibilidade mecânica de 4 tratores	1	1	2	2	2	8
4	Tempo máximo de enchimento dos tanques	2	3	2	2	3	12
5	Se o limite do TQ2 passar de 80%, redução de moagem 100 ton/h	2	3	2	2	3	12
6	Solução ótima	2	3	2	2	4	13

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

4.1 LEVANTAMENTO E OBTENÇÃO DOS DADOS

O projeto foi realizado durante 10 meses com levantamento de dados do período de abril de 2022 a janeiro de 2023, utilizando como fonte os dados de planejamento das variáveis que influenciam no processo de geração, armazenamento e distribuição de vinhaça. Na Tabela 4 pode-se destacar a capacidade de processamento de cana e geração de vinhaça em uma safra produtiva, sendo possível estimar a geração do resíduo por unidade de tempo e posterior simulação dinâmica de armazenamento.

Tabela 5 – Expectativa da produção de vinhaça anual

Item	Unidade	Dados
Moagem de cana	ton./safra	7.000.000
Mix de produção (etanol)	%	38,76
Produtividade de etanol prevista	l/t cana total	33,53
Produção de etanol	m ³ /safra	228.018
Relação vinhaça por litro de etanol	l/l	9,5
Produção total de vinhaça diluída	m ³ /safra	2.166.171

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

Para estimativa da produção horária de vinhaça são utilizadas as variáveis do processo conforme Tabela 5, contendo informações de tempo aproveitável, moagem, mix de produção e a quantidade de açúcar disponível na cana-de-açúcar, além do percentual de recuperação deste açúcar na fábrica.

Tabela 6 – Estimativa da produção de vinhaça m³/h

Dados industriais da geração de vinhaça	
Tempo aproveitável	95,40%
Moagem horária (ton./h)	1.360 ton./h
Mix da produção de etanol	38,76%
Açúcar total recuperável	13,19%
Eficiência de recuperação industrial do açúcar	93,31%
Volume de etanol 100% produzido	885 m ³ /h
Relação (l etanol 100%/l vinhaça)	9,50 l vinhaça/l etanol 100%
Volume de vinhaça produzida	350 m ³ /h

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

Os dados industriais de geração de vinhaça, que indicam o volume de vinhaça produzida por hora, com base na capacidade de processamento de 7 milhões de toneladas por ano e com um mix de produção de 38,76% para etanol, a unidade produtora tem uma capacidade anual de produção de 228.018 m³ de etanol e, conseqüentemente, geração de 350 m³/hora de vinhaça.

Após a geração do resíduo, é necessário armazená-lo temporariamente para posterior aplicação da vinhaça no campo, ou seja, distribuí-lo nas áreas de cana soca como fertilizante. Esse volume é armazenado em três tanques, expressos na Tabela 6 com suas devidas dimensões e volume de armazenamento.

Observa-se que há um grande volume gerado em relação à capacidade de armazenamento, possuindo aproximadamente 9 dias de capacidade. Portanto, a taxa de saída de vinhaça dos tanques para posterior aplicação no campo deve ser igual ou superior à taxa de entrada para que não ocorram paralizações industriais e/ou acidentes ambientais.

Tabela 7 – Capacidade disponível tanques de vinhaça

Tanque	Capacidade m ³	% sobre total
1	64.577	77,1%
2	15.535	18,5%
3	3.663	4,4%
Total	83.776	100,0%

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

Após armazenamento, o resíduo é coletado por caminhões e transportado até as áreas de aplicação. Para tanto, caminhões com carretas tanque, com capacidade total de 60 m³/viagem, são necessários para levar a vinhaça até o campo, atingindo uma taxa de vazão média de transporte relativa de 450 m³/hora. Após a chegada do caminhão no campo, um trator com conjunto aplicador de vinhaça realiza o carregamento (Figura 19).

Figura 19 – Trator para aplicação de vinhaça localizada



Fonte: Arquivos da empresa, 2022

Após o carregamento, a aplicação de vinhaça é realizada pelo trator com conjunto aplicador, que possui capacidade de carregamento de 22,5 m³ e vazão média de 26,8 m³/hora durante a aplicação (Figura 20).

Figura 20 – Trator aplicando vinhaça localizada



Fonte: Arquivos da empresa, 2022

Em relação à estrutura de aplicação, existem 5 frentes de trabalho com dois ou três tratores com conjunto aplicador. A aplicação localizada possui capacidade média de 390 m³/hora, conforme Tabela 7, que também expressa as 5 frentes de vinhaça localizada e os principais indicadores-chaves do processo que determinam o rendimento e a demanda de aplicação da vinhaça em m³/h.

Tabela 8 – Configuração de frentes de trabalho de vinhaça localizada

Parâmetro	F1	F2	F3	F4	F5
Eficiência operacional	82,66%	79,94%	79,40%	79,76%	74,70%
% aplicação	19,85%	19,62%	19,43%	19,12%	19,97%
Tempo efetivo	3,94 h/dia/trator	3,76 h/dia/trator	3,70 h/dia/trator	3,66 h/dia/trator	3,58 h/dia/trator
Velocidade média	7,0 km/h	7,0 km/h	7,0 km/h	7,0 km/h	7,0 km/h
Faixa aplicação	12,0 m	12,0 m	12,0 m	12,0 m	12,0 m
Dosagem aplicação	25,0 m ³ /ha	25,0 m ³ /ha	20,0 m ³ /ha	22,5 m ³ /ha	22,5 m ³ /ha
Rendimento médio	33,1 ha/dia/trator	31,6 ha/dia/trator	31,1 ha/dia/trator	30,7 ha/dia/trator	30,1 ha/dia/trator
Total equipamentos	2 tratores	3 tratores	2 tratores	2 tratores	3 tratores
Total vinhaça aplicado	69 m ³ /h	99 m ³ /h	65 m ³ /h	64 m ³ /h	94 m ³ /h
Ponto carreg.	TQ2	TQ2	TQ2	TQ2	TQ3

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

Depois de analisar processos, indicadores de produção, armazenamento e configurações dos aplicadores, foi possível construir os fluxos e a estocagem, conforme o fluxograma da Figura 21.

Após a geração da vinhaça na indústria, ocorre o transporte via canais até o primeiro tanque de armazenamento, denominado tanque 1, com função exclusiva de armazenamento, que possui maior capacidade entre os 3 tanques.

O tanque 1 é ligado ao tanque 2 via tubulação de fibra de vidro de 18” de diâmetro e comprimento de 89,5 m, com desnível de 7,05 m. Do tanque 2 saem as frentes de aplicação F1, F2, F3 e F4.

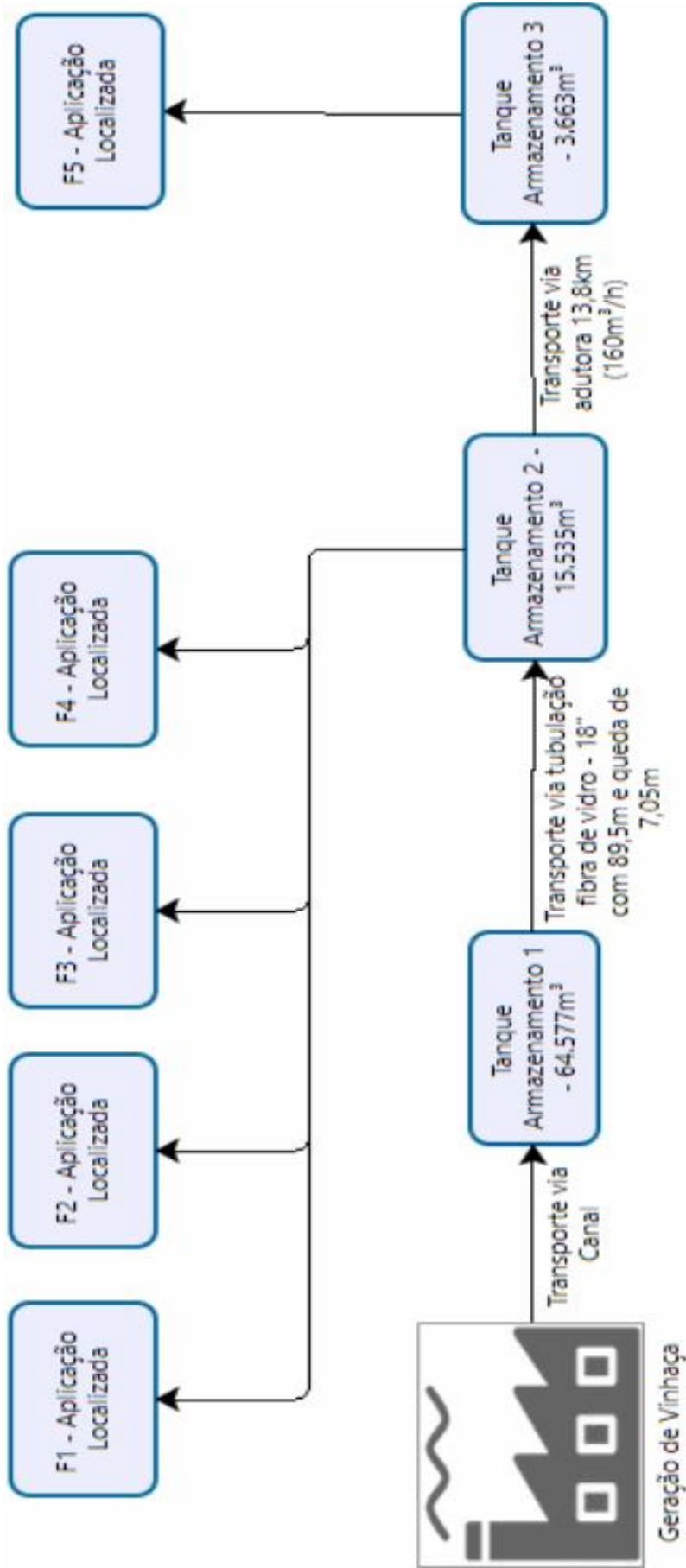
Além disso, o tanque 2 realiza a transferência de vinhaça via adutora bombeada com a capacidade de 160 m³/h em uma tubulação de 6” de diâmetro a uma distância de 13,8 quilômetros até o tanque 3 que, além de armazenar, distribui a vinhaça para a F5, para posterior aplicação no campo.

A demanda de vinhaça pelos tratores aplicadores é de produção contínua. Os caminhões realizam o carregamento nos tanques e abastecem as frentes de aplicação.

Com base nessas informações, foi possível obter a taxa de geração de vinhaça “input” e os dados de produção dinâmicos, volume de armazenamento de vinhaça, taxa de carregamento de vinhaça dos tanques e vazão de aplicação. Uma vez mapeada toda a cadeia de produção, é possível simular o comportamento do

armazenamento dos tanques de vinhaça e o comportamento dinâmico de todo o sistema, compreendendo suas capacidades e limitações.

Figura 21 – Fluxograma do processo



Fonte: Do autor, 2023

4.2 IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO NO SOFTWARE VENSIM PLE®

A partir da coleta de informações e dados de planejamento das variáveis do processo durante o estudo, foi possível elaborar a modelagem do processo, o qual é dividido em 3 partes: geração, armazenamento e aplicação de vinhaça.

4.2.1 Processo de geração de vinhaça no Vensim PLE®

O processo de geração da vinhaça a partir da produção de etanol foi elaborada a partir de 7 variáveis principais que compõem o processo:

1. moagem horária: variável representada por toneladas por hora de cana moída no processo industrial, ou seja, quanto maior esse volume, maior a geração de vinhaça na ponta final do processo produtivo;
2. RTC% (Recuperação Total Corrigida): medida utilizada na indústria da cana-de-açúcar para avaliar a eficiência de moagem e qualidade do processo produtivo, ou seja, é mensurada a quantidade de açúcar que entra no processo industrial e a quantidade total que a fábrica consegue processar;
3. tempo aproveitável %: tempo aproveitado do tempo total disponível em moagem, descontam-se paradas para manutenção e por indisponibilidade climática (chuva);
4. mix de produção etanol %: proporção que a planta industrial distribui entre seus produtos (etanol e açúcar), ou seja, qual percentual do processo produtivo é distribuído para cada produto;
5. ATR: (Açúcares Totais Recuperáveis): medida utilizada para avaliar a quantidade de açúcares que podem ser recuperados da cana-de-açúcar;
6. etanol 100%: quantidade de etanol na forma anidro que é gerada pelo processo industrial;
7. relação vinhaça/l etanol: medida utilizada para avaliar a quantidade de vinhaça que é gerada para cada litro de etanol 100%.

Os dados do processo de geração de vinhaça composto pelas variáveis descritas anteriormente estão representados pela média conforme Tabela 8.

Tabela 9 – Dados médios industriais da geração de vinhaça

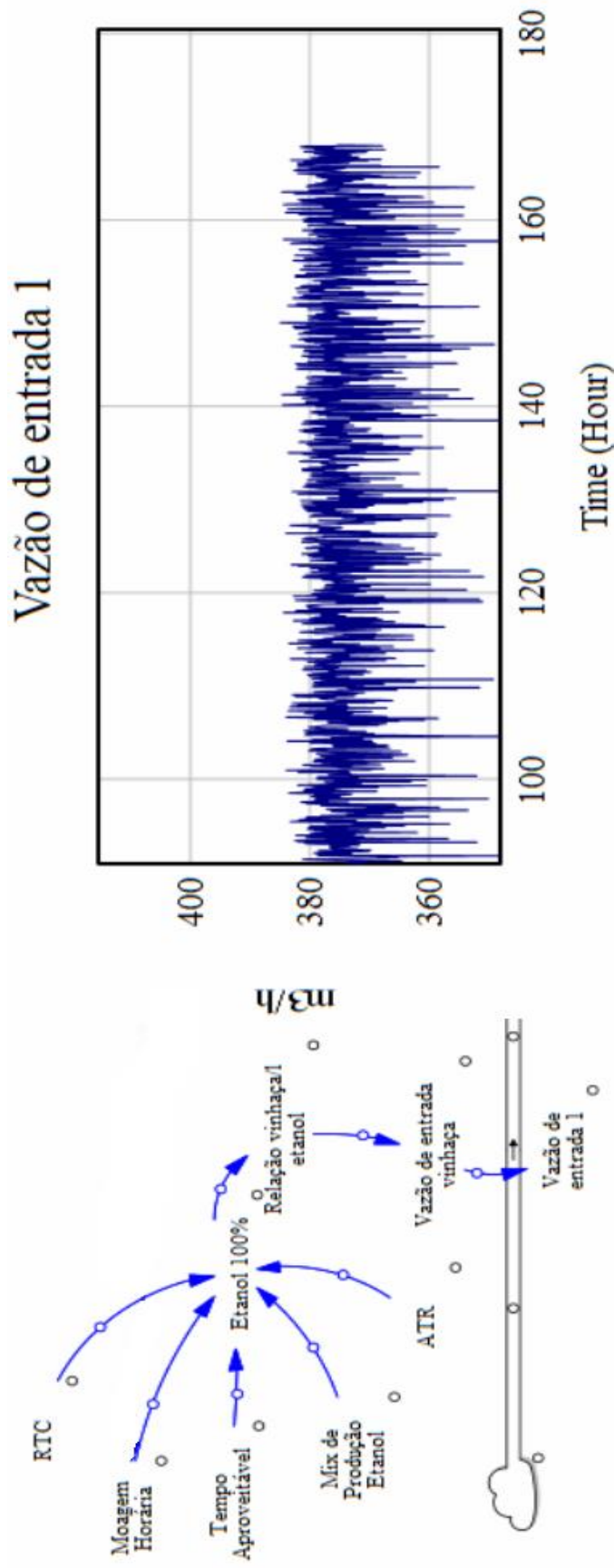
Dados industriais da geração de vinhaça	
Tempo aproveitável	95,40%
Moagem horária (ton./h)	1.360 ton./h
Mix da produção de etanol	41,00%
Açúcar total recuperável	13,19%
Eficiência de recuperação industrial do açúcar	93,31%
Volume de etanol 100% produzido	936 m ³ /h
Relação l etanol 100%/l vinhaça	9,58 l vinhaça/l etanol 100%
Volume de vinhaça produzida	374 m ³ /h

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

As variáveis foram coletadas no processo industrial e representadas pela função *random normal*, ou seja, distribuição normal aleatória. Cada variável foi analisada, estudando-se valor mínimo, máximo, média e desvio padrão para a representatividade fidedigna do processo (Figura 22). Observou-se a variação normal do processo de geração da vinhaça, com mínimas horárias de 348 m³/h e máximas de 385 m³/h.

Por meio do conhecimento da dinâmica de sistemas com softwares específicos, foi possível observar a oportunidade de preencher essa lacuna, facilitando a compreensão dos processos a partir da observação do comportamento dos sistemas e as interferências simuladas ao longo do tempo.

Figura 22 – Representação no Vensim PLE® do processo de geração da vinhaça



4.2.2 Processo de armazenamento de vinhaça no Vensim PLE®

A vinhaça, após ser gerada no processo industrial, é dirigida até o tanque 1, com capacidade total de 64.577 m³. Quando o tanque atinge 70% de sua capacidade, é aberta uma válvula localizada entre o tanque 1 e o 2 para enchimento do tanque 2.

Essa transferência ocorre via tubulação de fibra de vidro de 18" de diâmetro e aproximadamente 90 metros de comprimento. Para determinação da vazão de transporte do tanque 1 para o 2 foi necessário calcular, o coeficiente de vazão.

Para dimensionamento do volume transferido do tanque 1 para o 2, foram realizadas 12 medições da vazão volumétrica do fluido em um determinado intervalo de tempo, conforme Tabela 9. O coeficiente de vazão é definido como a razão entre a vazão volumétrica real do fluido e a vazão volumétrica teórica máxima que poderia ser obtida nas mesmas condições de operação.

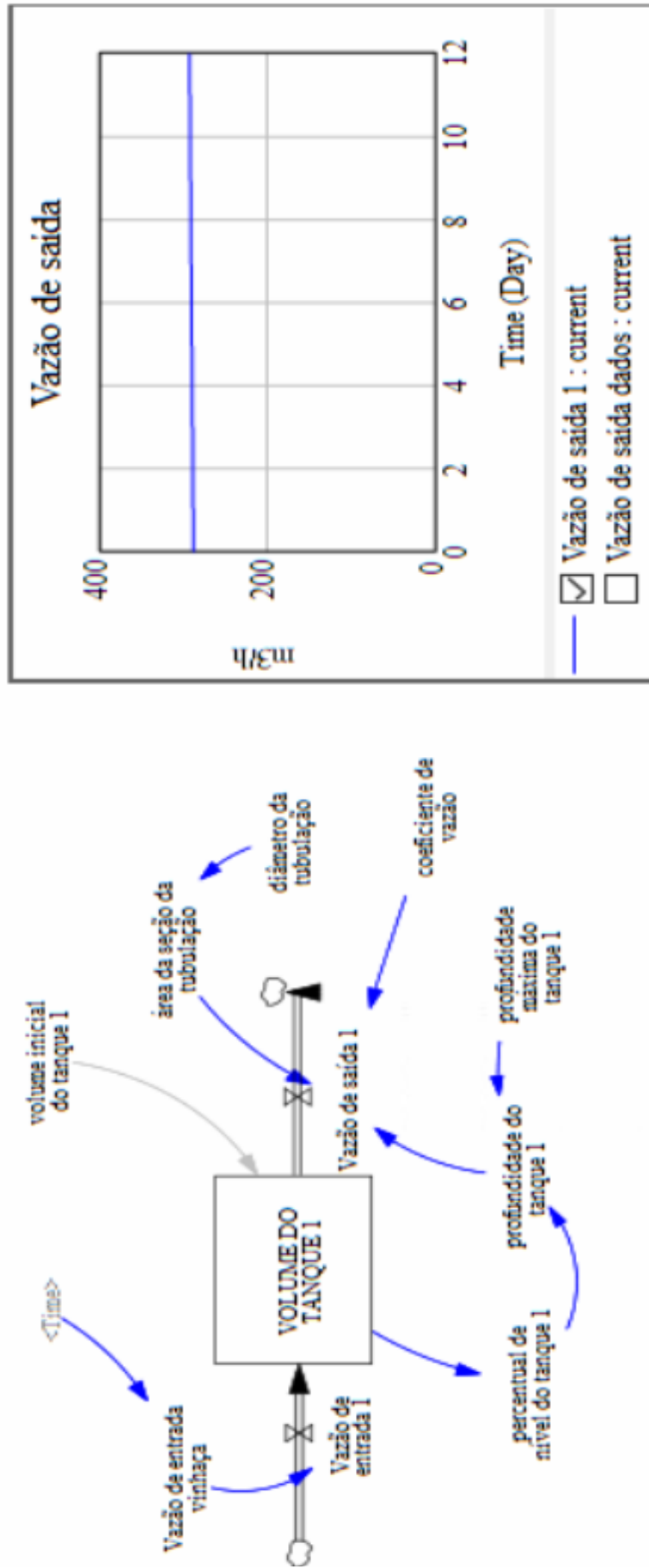
Tabela 10 – Dados de entrada vinhaça TQ1 e saída TQ2

Medições	Vazão de entrada (m ³ /h)	Vazão de saída (m ³ /h)
1	304,424	299,169
2	303,519	297,921
3	302,012	297,055
4	300,324	295,296
5	298,142	293,143
6	306,059	300,051
7	296,234	291,553
8	289,021	285,389
9	307,019	301,983
10	307,427	302,808
11	292,987	288,962
12	291,127	286,921

Fonte: Elaborada pelo autor, 2023

A partir das medições simultâneas da entrada de vinhaça no tanque 1 e entrada de vinhaça no tanque 2, apresentadas na Tabela 9, foi possível achar a vazão em m³ da transferência da vinhaça entre os tanques, representada na Figura 23.

Figura 23 – Representação no Vensim PLE® do processo de calibração do coeficiente de vazão



A partir dos dados de medição das vazões de saída e entrada, foi possível identificar a vazão do tanque 1 para o tanque 2 pela Equação 3:

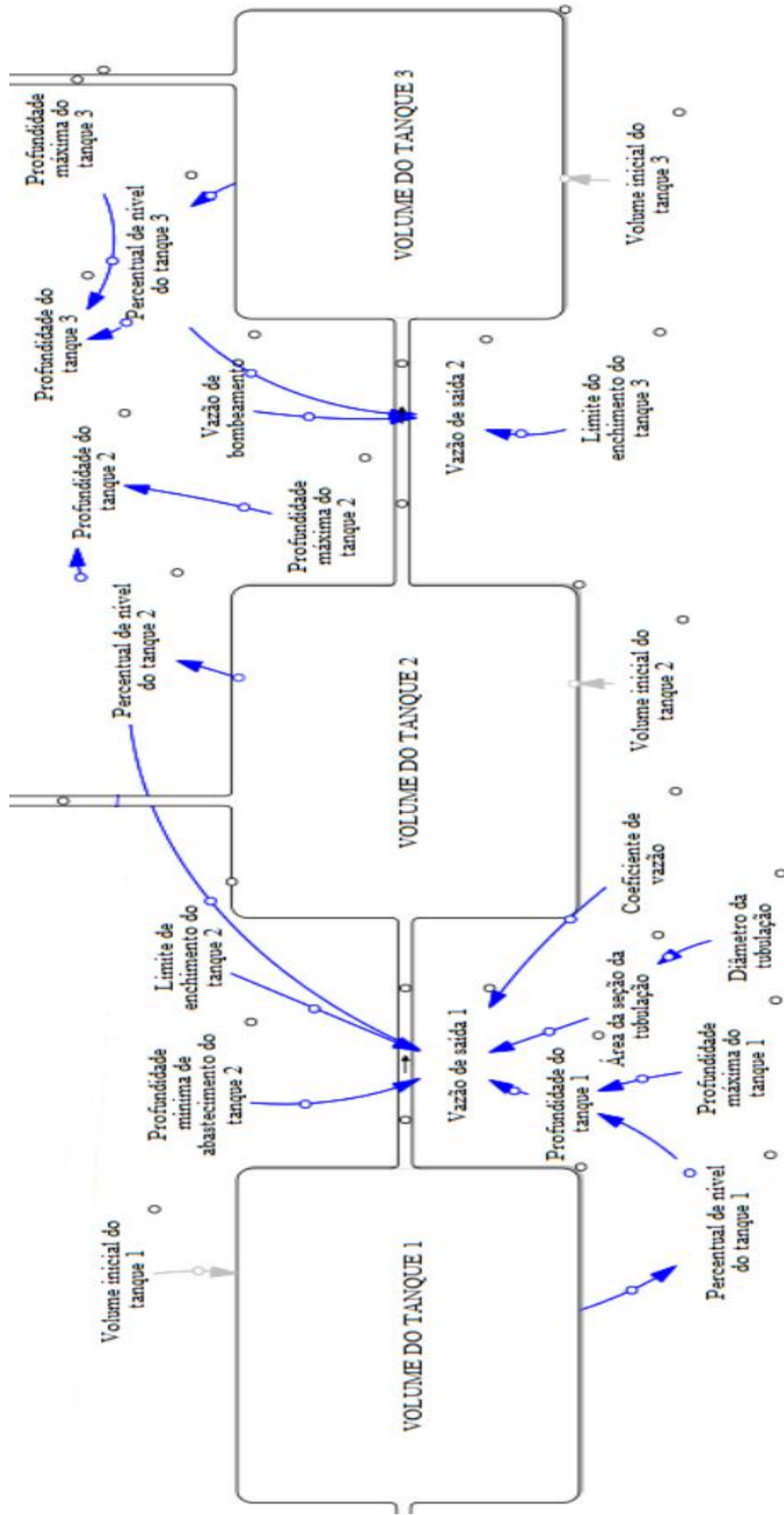
$$\begin{aligned} & \text{Vazão tanque 1 para tanque 2:} \\ & \text{Coeficiente de vazão } 0,068 \times \text{área da seção da tubulação} \quad (2) \\ & * \sqrt{2 \times 9,81 * \text{profundidade do tanque 1}} \end{aligned}$$

Após enchimento no limite de 70% da capacidade do tanque 2, há transferência via adutora (bombeamento), com capacidade de 160 m³/h em uma tubulação de 6" a uma distância de 13,8 quilômetros, até o tanque 3. A adutora é desligada caso seja atingida a capacidade de armazenamento de 95% ou 3.749 m³.

Após a medição do coeficiente de vazão e o dimensionamento da adutora, os tanques foram representados com as características de dimensão, vazão, percentuais de ativação de adutora e coeficientes de vazão.

O processo foi representado no Vensim PLE[®] conforme Figura 24.

Figura 24 – Representação do processo de armazenamento da vinhaça



Fonte: Do autor, 2023

4.2.3 Processo de distribuição de vinhaça no Vensim PLE®

Após a vinhaça ser produzida pelo processo industrial e direcionada para armazenamento temporário nos tanques 1, 2 e 3, é transferida via caminhão para as frentes de serviço. O tanque de armazenamento número 2 abastece 4 frentes (F1, F2, F3 e F4). O número 3 realiza o carregamento da F5.

Cada frente possui um número fixo de variáveis que influenciam no processo e diretamente na vazão de saída da vinhaça. O objetivo dessas variáveis é quantificar o volume (m^3/h) da capacidade de aplicação de cada frente.

A variável eficiência operacional é o aproveitamento em horas do dia do equipamento, ou seja, qual o percentual de trabalho dos tratores durante 24 horas.

Já a variável % tempo em aplicação é o percentual de tempo efetivo no qual o trator está aplicando a vinhaça. Essa variável é diferente em cada frente, pois em cada área de aplicação o trator precisa realizar uma quantidade distinta de manobras para despejar a vinhaça linha a linha.

A faixa de aplicação é a largura total da barra do implemento aplicador. Atualmente é utilizada uma barra de 12 metros que pode ser ajustada para aplicações em múltiplos de 3 metros, influenciando diretamente na capacidade de trabalho do equipamento.

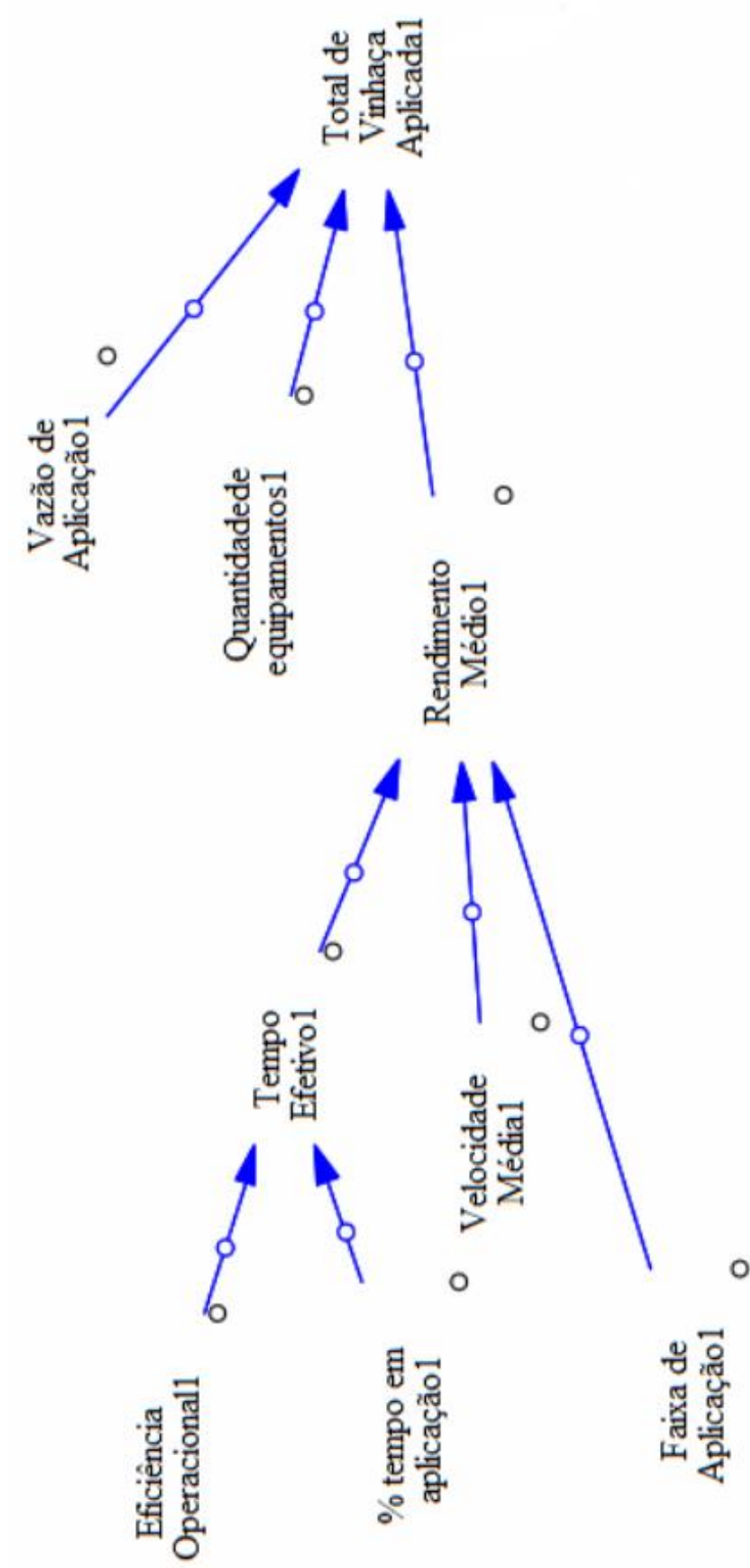
As variáveis de tempo em aplicação e eficiência operacional resultam no tempo efetivo, que é a quantidade de horas efetivas que cada equipamento consegue realizar.

A velocidade média de trabalho influencia diretamente na vazão final de cada equipamento, pois quanto maior a velocidade em operação, mais vazão conseguimos aplicar; entretanto, há limitações operacionais desses equipamentos devido ao tamanho da composição do trator e implemento.

As variáveis de faixa de aplicação e velocidade média estão diretamente ligadas ao rendimento médio, resultando na quantidade de hectares por hora que cada trator aplicador consegue cobrir.

As variáveis anteriormente citadas são multiplicadas pela quantidade de equipamentos disponíveis na frente e pela vazão de aplicação desses tratores, indicando o total de vinhaça aplicada em metros cúbicos em um determinado intervalo de tempo. Essas variáveis estão destacadas na Figura 25.

Figura 25 – Representação do processo de distribuição da vinhaça



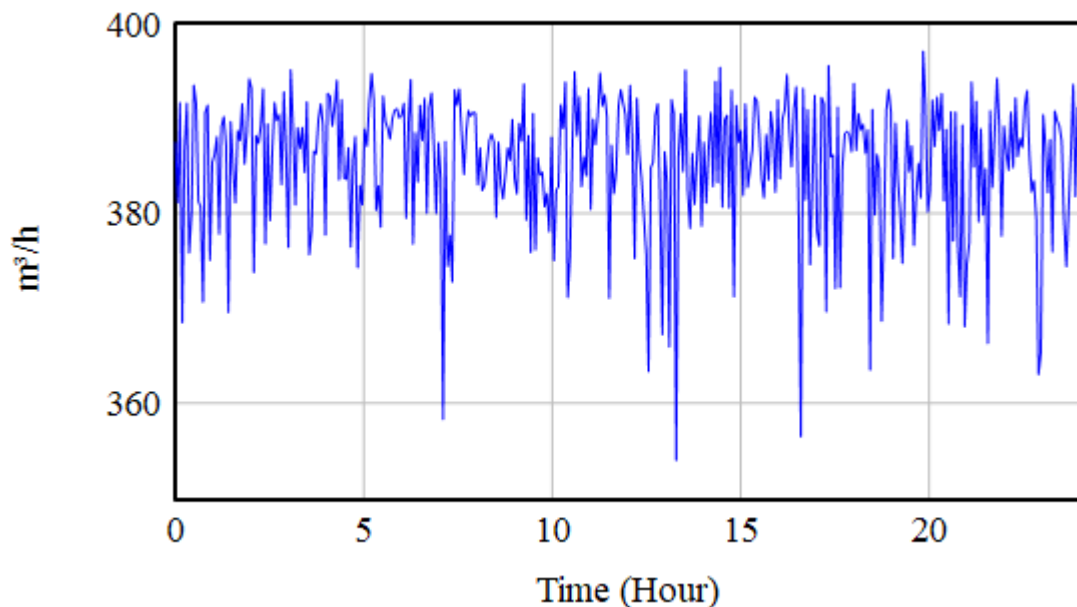
4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para validação do modelo, profissionais da área observaram o sistema e compararam os dados de geração de vinhaça e de aplicação pelos tratores aplicadores, permitindo uma representação fidedigna do processo.

A validação ocorreu em duas etapas durante o desenvolvimento do projeto. Na primeira fase, de validação do modelo conceitual, foram realizadas observações sobre o sistema e a comparação com os dados médios do processo de geração e distribuição da vinhaça. Em uma segunda etapa, os dados médios de aplicação gerados foram apresentados juntamente com o sistema. Assim, foi possível refinar e definir as variáveis importantes do processo.

Para a primeira validação e calibração da modelagem foi analisado se os dados de geração de vinhaça para entrada nos tanques estavam próximos aos dados em um determinado intervalo de tempo. A Figura 26 demonstra a geração de vinhaça em m^3/h em um intervalo de 24 horas.

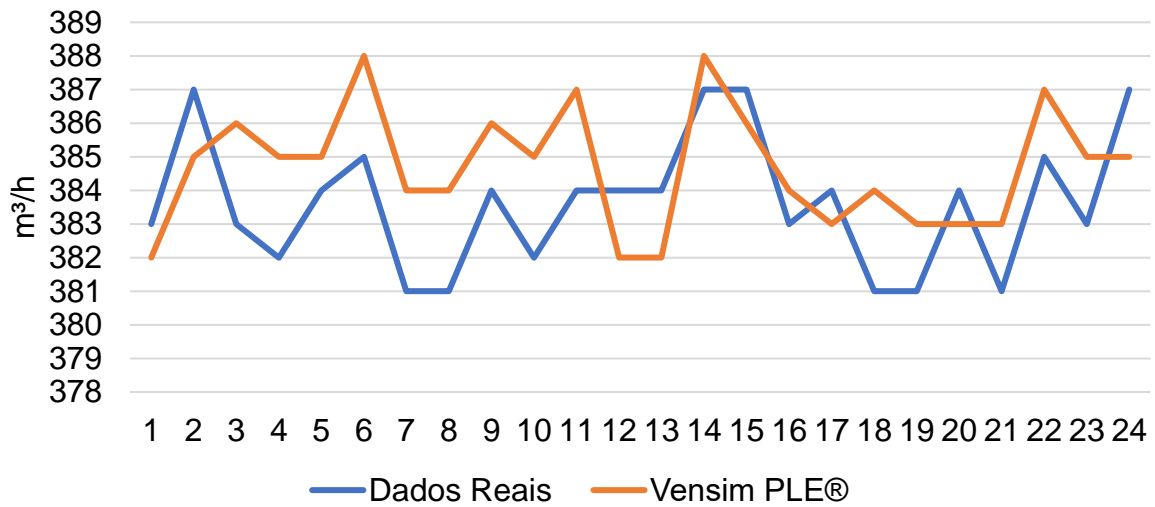
Figura 26 – Vazão de vinhaça m^3/h industrial



Fonte: Do autor, 2023

Os dados gerados pelo software e os dados reais de simulação foram comparados em um gráfico de linha (Figura 27), para analisar se a representação no Vensim PLE® estava próxima aos dados reais.

Figura 27 – Comparativo de vazão de entrada real x Vensim PLE®

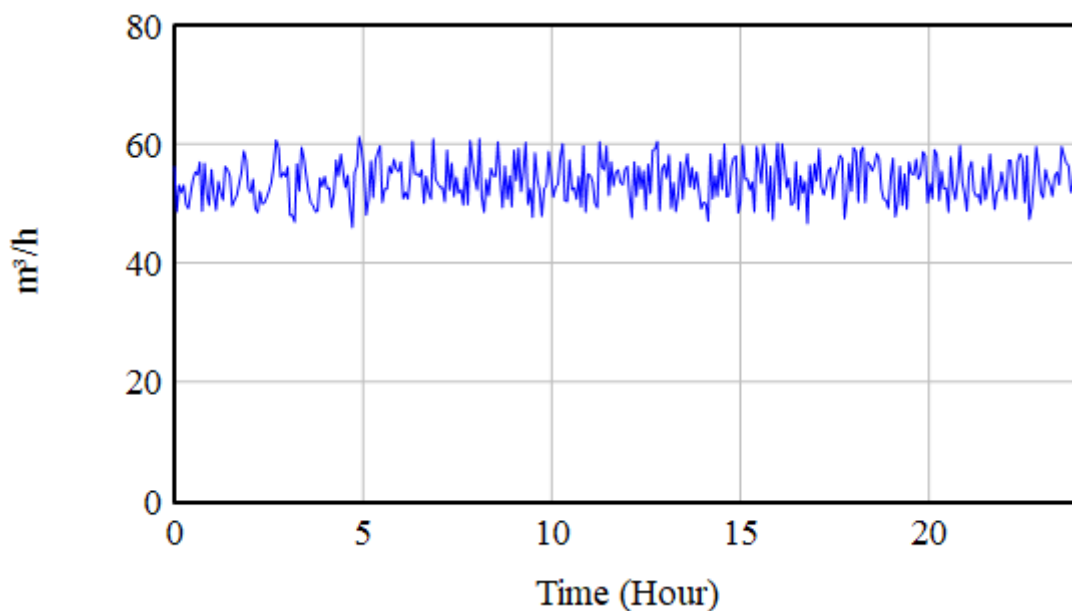


Fonte: Do autor, 2023

Os dados representados na Figura 27 foram similares aos dados reais de produção. A média de vinhaça apresentada pelo Vensim PLE® foi de 384,7 m³/h, enquanto os dados reais foram 383,6 m³/h.

Para a validação de vazão de saída das frentes, foi utilizada como parâmetro a F3. Durante 24 horas, foi simulada no software a vazão de saída que resultou um volume médio de 53,4 m³/h (Figura 28).

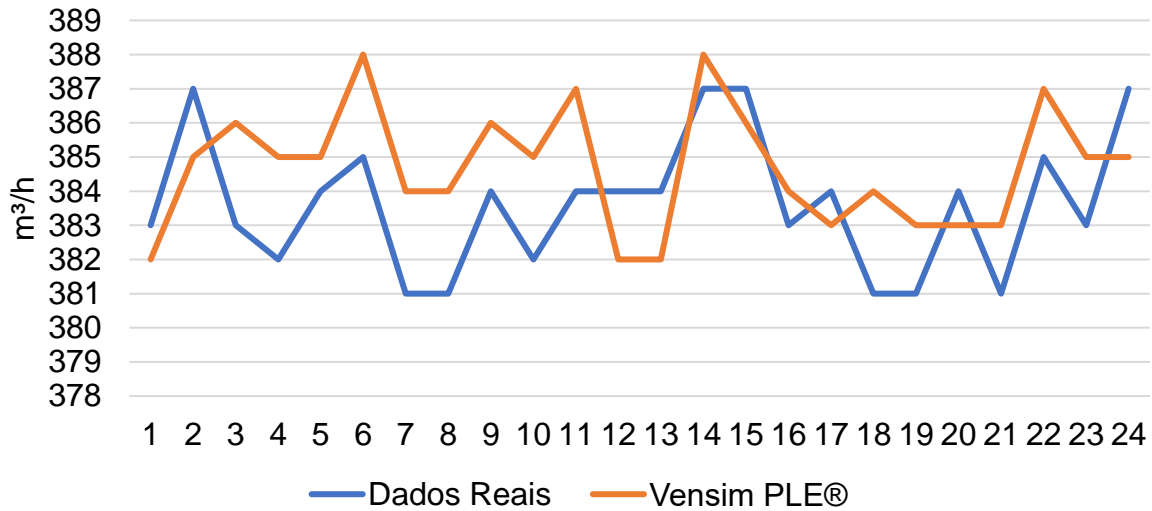
Figura 28 – Vazão de vinhaça aplicada F3



Fonte: Do autor, 2023

Após a geração de dados de 24 horas do processo no Vensim PLE®, foram registrados os dados de vazão real da F3, resultando em um valor médio de 52,8 m³/h, demonstrando que os números simulados e os reais do processo estão próximos e representam o processo produtivo (Figura 29).

Figura 29 – Comparativo de vazão aplicada real x Vensim PLE®



Fonte: Do autor, 2023

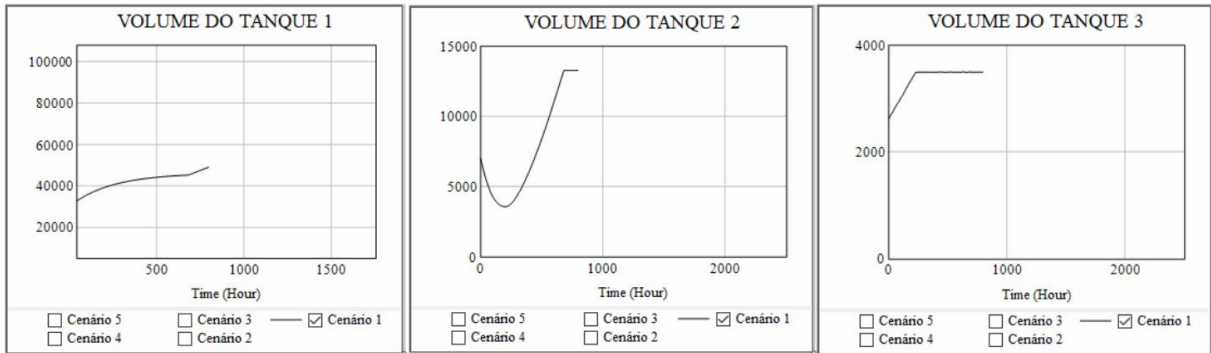
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a implementação do modelo de geração, armazenamento e distribuição de vinhaça, a Figura 30 representa todo processo produtivo com todas as variáveis que o influenciam diretamente, sendo que qualquer ajuste impacta no resultado do processo.

Com o modelo Vensim PLE® foi possível desenvolver o complexo processo de vinhaça de uma indústria sucoenergética. O software permitiu uma gama de opções na modelagem, incluindo a criação de modelos hierárquicos e *feedbacks* de múltiplos *loops*, possibilitando representar de maneira mais precisa a dinâmica complexa do sistema produtivo.

O primeiro cenário, destacado na Figura 31, demonstra em condições normais o volume crescente de armazenamento de vinhaça. Nota-se que não há vazão de saída suficiente para manter o processo de forma contínua. Com 667 horas do processo de moagem e geração de vinhaça, atinge-se o limite do tanque 2 e, conseqüentemente, há aumento exponencial do volume de vinhaça gerado para o tanque 1.

Figura 31 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 1

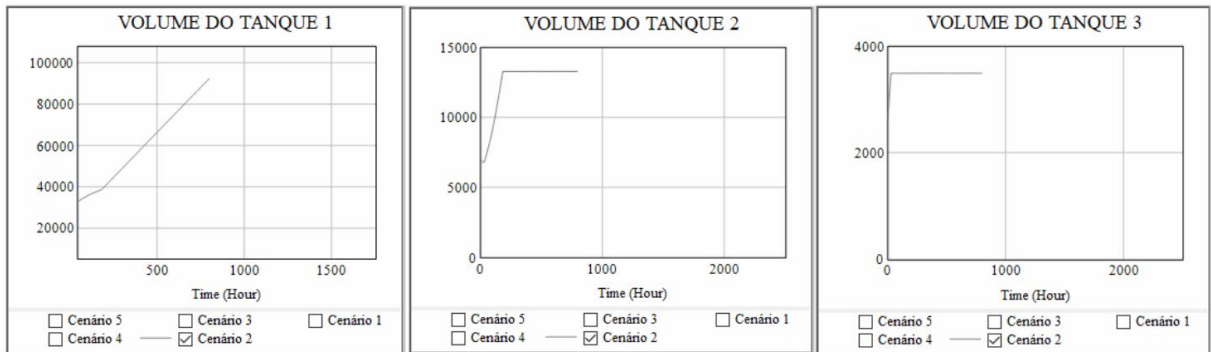


Fonte: Do autor, 2023

Já o segundo cenário (Figura 32) é representado por uma indisponibilidade mecânica de tratores aplicadores, ou seja, o processo de geração se dá em condições normais, entretanto, conta com apenas 10 tratores aplicadores de vinhaça.

Cenário 2: é representado pela maior indisponibilidade mecânica de tratores, ou seja, há redução da vazão de saída de 12 para 10 tratores, deixando a condição do processo mais justa. Assim, com apenas 167 horas do processo, há crescimento exponencial do nível dos tanques.

Figura 32 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 2



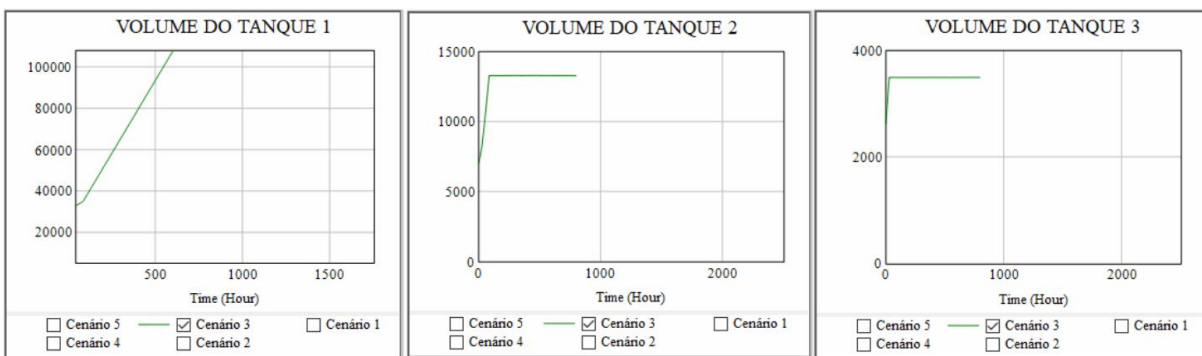
Fonte: Do autor, 2023

No terceiro cenário (Figura 33) foi ampliada a indisponibilidade mecânica de 4 tratores aplicadores, totalizando apenas 8, ou seja, 4 tratores estavam indisponíveis.

Cenário 3: é representado pela maior indisponibilidade mecânica de tratores, ou seja, redução da vazão de saída de 12 para 8 tratores, a condição do processo fica mais justa e com apenas 83 horas do processo verifica-se o crescimento exponencial do nível dos tanques.

Essa situação é crítica, pois com apenas 4 dias de moagem é necessária intervenção na indústria, parada de moagem ou redução da quantidade para diminuir os níveis de armazenamento de vinhaça.

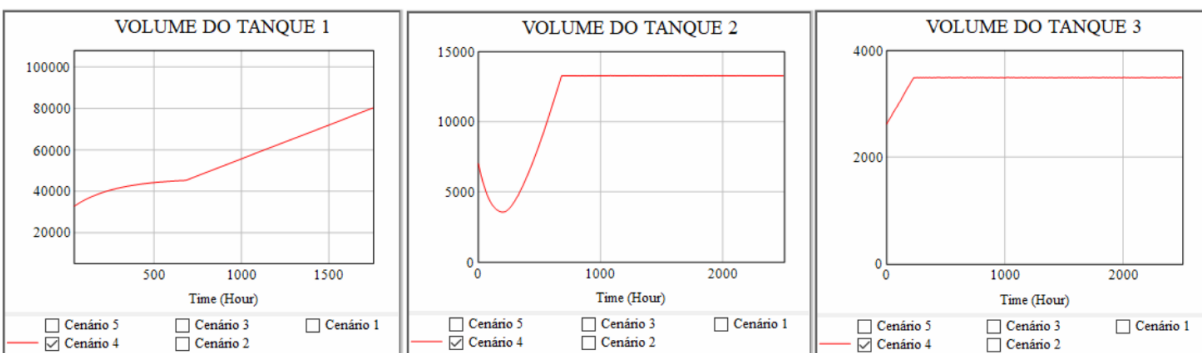
Figura 33 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 3



Fonte: Do autor, 2023

O quarto cenário foi representado para se identificar o limite máximo de moagem em condições normais para parada ou redução da moagem industrial. Concluiu-se que, em condições normais de funcionamento, a indústria tem potencial de armazenamento de até 1.267 horas de moagem, que equivalem a 52 dias (Figura 34).

Figura 34 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 4



Fonte: Do autor, 2023

A partir dos cenários 1, o qual apresentou vazão de distribuição inferior à vazão de geração, foi possível determinar um quarto cenário para analisar qual seria o tempo máximo de enchimento dos 3 tanques.

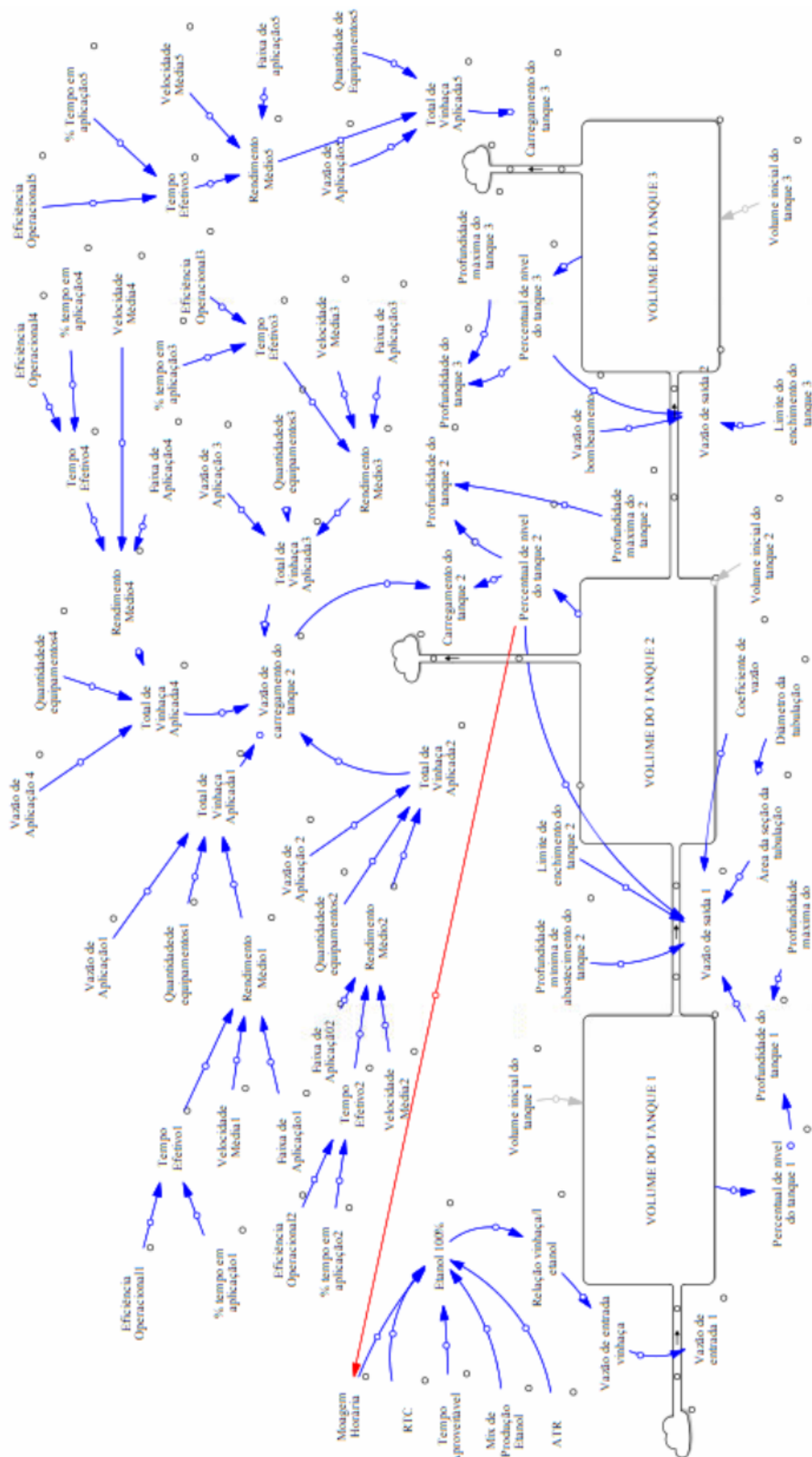
Na representação dos cenários 1, 2 e 3 foi possível destacar que, atualmente, não há capacidade de vazão de saída suficiente para manter a indústria em pleno funcionamento sem a necessidade de reduzir ou parar a moagem a fim de retornar aos níveis de segurança dos estoques.

O quinto cenário foi elaborado a partir das situações que ocorrem na planta industrial no caso de se atingir a capacidade dos tanques de vinhaça, ou seja, se isso ocorrer, há uma redução de moagem para se ter maior vazão em distribuição de vinhaça e menor geração e armazenamento. Portanto, foi criado um *loop* no processo para que essa redução seja feita de forma automática conforme a capacidade do tanque 2 (Figura 35).

Cenário 5: foi realizado um *loop* em que se reduziria a moagem automaticamente caso fosse atingida 85% da capacidade do tanque 2 atingir 85% a fim de manter o processo de forma contínua, sem riscos de transbordamento dos tanques e paradas industriais. Nessa condição, para o processo ficar contínuo, há redução de aproximadamente 200 ton./h a partir de 457 horas de moagem, conforme representado na Figura 36.

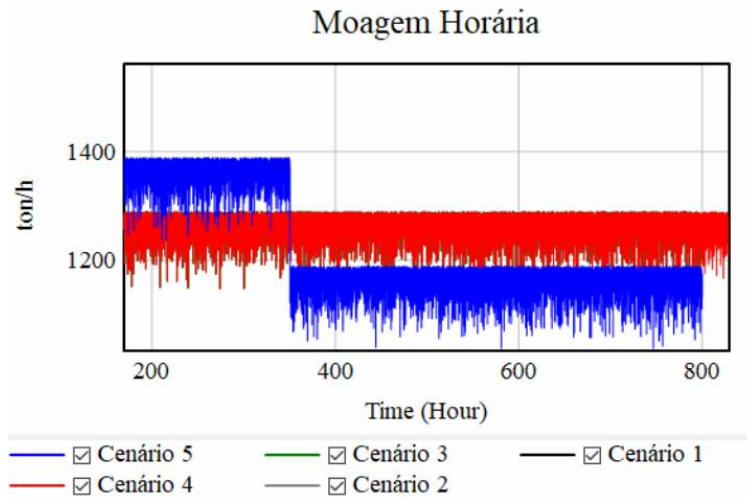
Apesar de corrigir o problema de vazão de saída, nessa condição ótima, a redução da moagem afeta diretamente o período de duração da safra: se considerarmos 200 dias de safra, há necessidade de aumentar 32 dias de safra, impactando diretamente nos custos de produção industrial. Esse aumento de 32 dias representa um custo diário de aproximadamente R\$ 910 mil

Figura 35 – Loop destacado na flecha vermelha com alterações no cenário 5



Fonte: Do autor, 2023

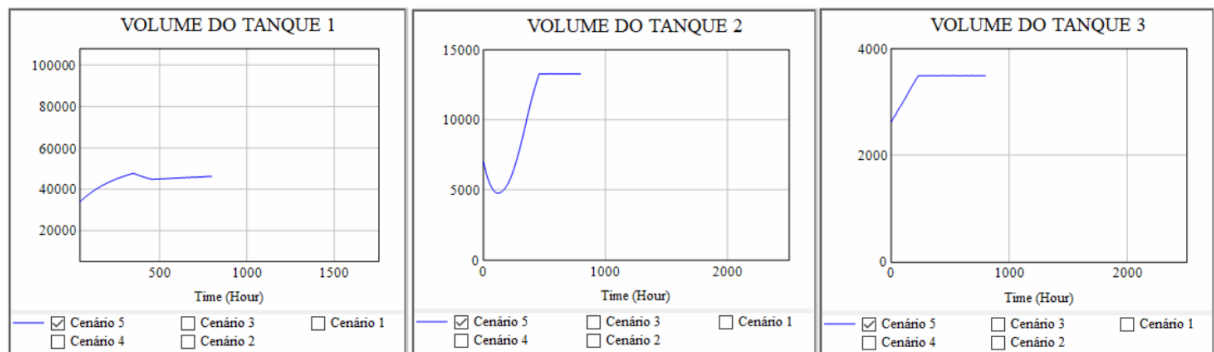
Figura 36 – Redução de moagem horária com processo contínuo



Fonte: Do autor, 2023

Apesar da redução considerável na moagem da cana-de-açúcar, a Figura 37 demonstra que o processo flui de forma contínua sem aumento no volume de armazenagem dos tanques.

Figura 37 – Comportamento do armazenamento de vinhaça no cenário 5.



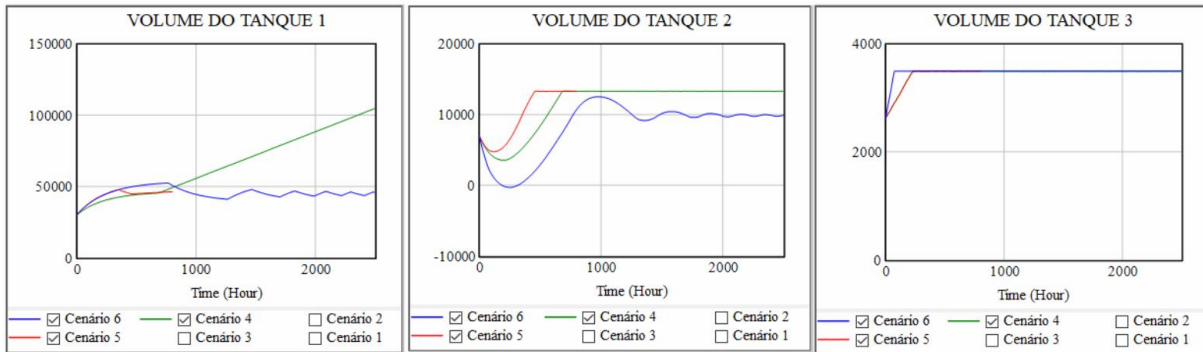
Fonte: Do autor, 2023

Após a elaboração de diversos cenários do processo produtivo, foi possível desenvolver uma solução ótima destacada no sexto cenário, para que não ocorra redução ou parada de moagens nem necessidade de grandes investimentos no processo de armazenagem e distribuição.

Com o aumento de 1 trator aplicador na frente 5, que é alimentada pelo tanque 3, e aumento no bombeamento da adutora de 85 m³/h para 120 m³/h, foi possível elaborar o processo de geração, armazenagem e distribuição de forma contínua,

sem prejuízos ao processo produtivo, gerando um cenário de solução ótima representado pela Figura 38.

Figura 38 – Cenário de solução ótima



Fonte: Do autor, 2023

6 CONCLUSÃO

O software Vensim PLE[®] ofereceu recursos para validar, testar e ajustar o modelo, garantindo que ele representasse o sistema real e demonstrando que a modelagem de processos pode ser uma ferramenta útil para auxiliar na tomada de decisão em uma organização.

Destacam-se os principais pontos:

- a) compreensão do processo – a modelagem auxiliou a entender como um processo funciona em detalhes, permitindo identificar etapas críticas, gargalos e áreas que precisam de melhorias, possibilitando a tomada de decisões acertadas sobre como otimizar o ciclo de produção da vinhaça;
- b) análise de cenários – uma vez que um modelo é desenvolvido, diferentes cenários podem ser testados e simulados para avaliar o impacto de mudanças no processo. Por exemplo, a simulação pode ajudar a identificar o impacto de uma alteração em termos de tempo, custo, recursos e qualidade. Isso permite que as decisões sejam tomadas com maior assertividade;
- c) identificação de oportunidades de automação – a modelagem de processos também pode ajudar a identificar etapas que podem ser automatizadas ou simplificadas por meio de tecnologia. Isso pode melhorar a eficiência e a eficácia do processo, bem como sua qualidade, além de reduzir custos;
- d) padronização do processo – a modelagem pode auxiliar a padronizar os processos destacados, garantindo que todos trabalhem de acordo com as mesmas regras e padrões.

Em resumo, a modelagem contribuiu na tomada de decisão, pois fornece uma compreensão mais clara do processo, permite a análise de cenários, identifica oportunidades de automação e padronização com solução ótima para definição de investimentos.

Ao término deste projeto, conclui-se que houve o balanceamento de produção eficaz entre geração, armazenamento e distribuição no campo de vinhaça com aumento de 1 trator aplicador na frente 5 e aumento do bombeamento da adutora de 85m³/h para 120m³/h. Essa mudança eliminou a necessidade de redução de moagem ou exceções do limite da capacidade de armazenagem.

Essa problemática não é exclusiva do local estudado, já que atualmente o Brasil é um dos maiores produtores de cana-de-açúcar, e estima-se que 438,15 bilhões de litros de vinhaça são gerados anualmente em 418 unidades produtoras do país.

Portanto, devido à geração desse resíduo em larga escala e aos problemas descritos acima, são necessários controles ambientais eficazes e a correta destinação do resíduo, com uma gestão eficaz para otimizar processos e atender a legislação ambiental vigente.

Com o método inicialmente proposto, através do conhecimento teórico adquirido em dinâmica de sistemas com o software Vensim PLE[®], foi possível analisar o comportamento de variáveis em simulações dinâmicas, das quais surgiram oportunidades de balanceamento dos processos produtivos, sendo os principais: tempo de processamento, armazenamento, transporte e diversos outros problemas de gestão de operações.

Destaca-se o caráter inovador da pesquisa por reunir tecnologia e ferramentas de consolidadas práticas gerenciais em gestão de processos. Além disso, ressalta-se a importância da modelagem de sistemas em softwares específicos, pois atualmente o tema é pouco divulgado e utilizado em empresas. Desse modo, este estudo poderá contribuir significativamente, também, para o aprimoramento da ciência na temática relacionada aos sistemas de medição de desempenho.

Conclui-se que com a modelagem proposta foi possível atingir os objetivos inicialmente propostos com o modelo matemático e a simulação dos efeitos de diferentes configurações no processo produtivo e, ainda, propor ações para melhorar o gerenciamento do ciclo de produção, gerando economia em escala com direcionamento em investimentos eficazes para garantir mais eficiência ao processo.

REFERÊNCIAS

AMARAL, J. A. A. do. **Desvendando Sistemas** [Unveiling Systems]. São Paulo: Arantes, 2012.

AZEVEDO, M. P. **Proposta de modelagem do sistema nacional de transplantes (SNT) brasileiro com o uso da dinâmica de sistemas**. 2020. 79 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2020.

BASTOS, A. A. P. **A Dinâmica de Sistemas e a compreensão de estruturas de negócios**. 2003. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BELARDO, G. C.; CASSIA, M. T.; SILVA, R. P. **Processos Agrícolas e Mecanização da Cana de Açúcar**. Jaboticabal: SBEA, 2015.

BERNARDO, G. O.; SANTOS, J. R. T.; MIRANDA, C. G. M. Aplicação da dinâmica de sistemas na gestão de processos de construção civil – utilização do software Vensim. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 7, p. 7886-7902, 2019.

BOFILL, A. *et al.* Application of mathematical methods to the management of sugarcane enterprises. *In: WORKING CONFERENCE ON FOOD PRODUCTION AND AGRICULTURAL ENGINEERING*, 5., 1981, Havana. **Proceedings [...]**, Havana, Cuba: IFIP, 1981. p. 175-190. (Computer Applications in Food Production and Agricultural Engineering).

CABRITA, F. A. A. S. **Proposta de abordagem para modelação de negócios baseada na Dinâmica de Sistemas e Business Model Canvas**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências Econômicas) – Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologia, Lisboa, 2016.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 4. ed. São Paulo: Elsevier Brasil, 2014. 320 p.

CINELLI, Bernardo. Nova tecnologia propõe ganho de rendimento na produção de etanol e menor geração da vinhaça. **FGV Energia Caderno Opinião**, jan. 2018.

CNA. **Panorama do Agro**. 2020. Brasília, DF: CNA, 2020. Disponível em: <https://www.cnabrazil.org.br/cna/panorama-do-agro>. Acesso em: 3 abr. 2023.

CONTINI, E.; ARAGÃO, A. A.; NAVARRO, Z. (Org.). **Trajectoria do agro: desempenho recente do agro nacional – a cana de açúcar**. Brasília, DF: Embrapa, [2022]. (Visão de Futuro). Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao-de->

futuro/trajetoria-do-agro/desempenho-recente-do-agro/cana-de-acucar. Acesso em: 3 abr. 2023.

BRASIL. Ministério da Economia. Levantamento de Safras – Conab. Brasília, DF: Ministério da Economia, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/fazenda/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/conjuntura-economica/agricola/2022/2022-07-07_levantamento-de-safras_conab.pdf. Acesso em: 3 abr. 2023.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, v. 11 – Safra 2023/24, n. 1, Primeiro levantamento, abr. 2023. 55p. ISSN 2318-7921.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**. Brasília, DF, v. 4 – Safra 2017/18, n. 1, Primeiro levantamento, abr. 2017. 57p. ISSN 2318-7921.

CONSECANA. Manual de Instruções. 1. ed. Piracicaba: CONSECANA-SP, 1999. 92 p.

FERNANDES, A. A. **Cálculos na agroindústria de cana-de-açúcar**. Piracicaba: EME: STAB, 2003.

FURTADO, A. T.; SCANDIFFIOB, M. I. G.; CORTEZ, L. B. The Brazilian sugarcane innovation system. **Energy Policy**, v. 39, n. 1, p. 156-166, 2011.

GADELHA, C. A. G. **A dinâmica do sistema produtivo da saúde: inovação e complexo econômico-industrial**. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2012.

GAITHER, N.; FRAZIER, G. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Pioneira, 2001.

GRANATO, E. F. **Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça**. 2003. 124 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Bauru, 2003.

GRÖSSLE, A.; THUN, J. H.; MILLING, P. M. System dynamics as a structural theory in operations management. **Production and operations management**, v. 17, n. 3, p. 373-384, 2008. ISSN 1937-5956.

HARRINGTON, J. **Aperfeiçoando processos empresariais**. São Paulo: Makron Books, 1993.

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. V I e II. São Paulo: Mestre Jou, 1977.

IANNONI, A. P. **Análise do sistema logístico de descarga de cana-de-açúcar: um estudo de caso em uma grande usina na região de Ribeirão Preto**. 2000. 159 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2000.

JANK, M. S. **Sustentabilidade do complexo sucroenergético brasileiro**. Belo Horizonte: União da Indústria da Cana-de-açúcar, 2008.

LAIME, E. M. O. *et al.* Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, Chapadinha, v. 5, n. 3, p. 16-29, 2011.

MARTINS, R. S. *et al.* Decisões estratégicas na logística do agronegócio: compensação de custos transporte-armazenagem para a soja no estado do Paraná. **Revista de Administração Contemporânea**, Curitiba, v. 9, n.1, jan./mar. 2005.

MIGUEL, P. A. C. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

MOREIRA, A. D. **Administração da produção e operações**. 3. ed. São Paulo: Pioneira, 1998.

MOTA, H. da S.; MARTINS, J. H. Avaliação da capacidade de captação e armazenamento de água das chuvas no alto vale do Jequitinhonha: uma proposta para mitigação do efeito da escassez de água na região. **Humanidades & Tecnologia em Revista (FINOM)**, v. 13, n. 18, jan./dez. 2019. ISSN: 1809-1628.

NOVACANA. **Conab divulga dados finais de 2016/17 e 1º levantamento da safra 2017/18 de cana-de-açúcar**. Curitiba: NovaCana, 2017. Disponível em: <https://www.novacana.com/n/cana/safra/conab-dados-finais-2016-17-levantamento-safra-2017-18-cana-de-acucar-180417/>. Acesso em: 20 mar. 2023.

OGATA, K. **System Dynamics**. 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

OLIVEIRA, A. U. F. de; SANTOS, L. F.; SOUZA, F. G. S. de. Superlotação carcerária em Salvador: simulação da ampliação do sistema carcerário por dinâmica de sistemas. **Revista PMBA em foco: Ciência Policial e Cidadania**, Salvador v. 1, n. 1, p. 23-31, out./dez. 2021.

PAIVA, R. F. O. de. **Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta**. 2009. 243 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3337/2552.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 3 abr. 2023.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Nobel: STAB, 1989.

REZENDE, R. D. Um modelo de dinâmica de sistemas para previsão de desgaste em pavimentos rodoviários no Brasil. **Revista Cereus**, v. 11, n. 3. 2019.

RIPOLI, T. C. C.; VILLANOVA, N. A. Colheita mecanizada de cana-de-açúcar: novos desafios. **Revista STAB**, Piracicaba, v. 11, n. 1, p. 28-31, set./out. 1992.

RITZMAN, L. P.; KRAJEWSKI, L. J. **Administração da produção e operações**. São Paulo: Prentice Hall, 2004.

ROCHA, M. H. *et al.* Resíduos da produção de biocombustíveis: vinhaça e glicerina. *In*: LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. **Biocombustíveis**: volume 2. Rio de Janeiro: Interciência, 2012. p. 691-809.

RODRIGUES, Gelze Serrat de Souza Campos; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil [recurso eletrônico] : **perspectivas geográfica, histórica e ambiental**. Uberlândia: EDUFU, 2020. DOI <http://doi.org/10.14393/EDUFU/978-65-86084-00-9>.

SANTOS, N. B. *et al.* Simulação da eficiência de campo da colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **Energia na Agricultura**, v. 29, n. 1, p. 9-13, 2014.

SILVA, J. E. A. R.; ALVES, M. R. P.; COSTA, M. A. B. da; Planejamento de turnos de trabalho: uma abordagem no setor sucroalcooleiro com uso de simulação discreta. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 18, n. 1, 2011.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; JOHNSTON, R. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

STERMAN, J. D. **Business dynamics**: systems thinking and modeling for a complex world. Boston: Mc Graw Hill Higher Education, 2000.

STERMAN, J. *et al.* System dynamics perspectives and modeling opportunities for research in operations management. **Journal of Operations Management**, v. 39, p. 40, 2015.

TEIXEIRA, L. C. F. Difusão da tecnologia de base microeletrônica na indústria de processo contínuo. **Rev. adm. empres.**, São Paulo, v. 32, n. 5, p. 16-26, dez. 1992.

TOIGO, R. J.; CASAGRANDE, M. V. Colheita mecânica da cana-de-açúcar: alguns parâmetros. **Nucleus**, v. 6, n. 1, abr. 2009.

VENTANA SYSTEMS. **Vensim Simulation Software**. Harvard, MA: Ventana Systems, c2016. Disponível em: <https://www.ventanasystems.com/software/>. Acesso em: 30 abr. 2023.

VILELA, P. **Introdução à dinâmica de sistemas**. Juiz de Fora: UFJF, 2005.
Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/instituto-federal-de-educacao-ciencia-e-tecnologia-sao-paulo/controle-de-sistemas-dinamicos/ds-parte-1-annotacoes-sobre-a-aula/15125197>. Acesso em: 3 abr. 2023.