

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

FACULDADE DE ENGENHARIA

TAMIRES LUIZA SOARES

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMO APOIO AO PLANEJAMENTO
OPERACIONAL DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA**

Dourados – MS

2021

TAMIRES LUIZA SOARES

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMO APOIO AO PLANEJAMENTO
OPERACIONAL DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA**

Trabalho apresentado a Universidade Federal da Grande Dourados como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Me. Vinícius Carrijo dos Santos

Dourados – MS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S676m Soares, Tamires Luiza
Modelagem e simulação como apoio ao planejamento operacional de uma usina sucroenergética
[recurso eletrônico] / Tamires Luiza Soares. -- 2021.
Arquivo em formato pdf.

Orientador: Vinícius Carrijo dos Santos.
TCC (Graduação em Engenharia de Produção)-Universidade Federal da Grande Dourados,
2021.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Cana-de-açúcar. 2. Simulação. 3. Modelo. 4. Controle.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

TAMIRES LUIZA SOARES

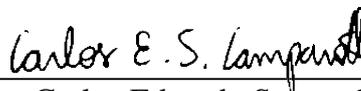
**MODELAGEM E SIMULAÇÃO COMO APOIO AO PLANEJAMENTO
OPERACIONAL DE UMA USINA SUCROENERGÉTICA**

Trabalho apresentado a Universidade Federal da Grande Dourados como parte das exigências para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Vinícius Carrijo dos Santos



Prof. Dr. Carlos Eduardo Soares Camparotti



Prof. Dr. Mariana Lara Menegazzo

Dourados, 07 de junho de 2021.

Dedico este trabalho à Deus, por ter iluminado e abençoado toda a minha trajetória. Dedico à minha família e meus amigos, por todo apoio e incentivo, vocês foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

RESUMO

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Contudo, o setor sucroenergético está sujeito a algumas inconstâncias que podem atrapalhar o planejamento operacional, como o clima, que pode afetar a qualidade e a produtividade da cana, e a cotação do mercado sobre os seus produtos, que provoca uma variação no *mix* produtivo. O presente estudo busca auxiliar a desenvolver o controle operacional de uma usina sucroenergética, por meio da modelagem e simulação dos processos produtivos. A usina sul-mato-grossense estudada não possui um departamento de planejamento e controle da produção que atue formalmente, dificultando a tomada de decisões por parte dos funcionários, por isto este trabalho apresenta um modelo de simulação para auxiliar no planejamento operacional. Para isto foram mapeados os processos produtivos do açúcar cristal e do etanol hidratado e coletado dados referentes aos boletins de produção da safra 2020/2021 e safra 2021/2022. O modelo foi desenvolvido em planilhas eletrônicas do Microsoft Excel®, no qual foram simulados 33 dias de produção com períodos de 24 horas de produção, posteriormente estes valores simulados foram comparados com a quantidade real da usina. A simulação apresentou erro médio percentual de 0,22% para o açúcar e 0,57% para o etanol, também foi verificado o 4.MAD (Desvio Médio Absoluto), que demonstrou que os erros foram aceitáveis, logo o modelo foi validado. Fica então evidente, o potencial que a ferramenta de controle operacional possui para trazer melhorias nos processos sucroenergéticos, reduzir perdas e torná-los mais eficientes.

Palavras-chaves: Cana-de-açúcar; Simulação; Modelo; Controle.

ABSTRACT

Brazil is the largest producer of sugarcane in the world. However, the sugar-energy sector is subject to certain inconsistencies that can hinder operational planning, such as the weather, which can affect the quality and productivity of sugarcane, and the market price of its products, which causes a variation in the productive mix. This study seeks to help develop the operational control of a sugar-energy plant, through the modeling and simulation of the production processes. The studied Sul-Mato Grosso plant does not have a production planning and control department that acts formally, making it difficult for employees to make decisions, so this work presents a simulation model to assist in operational planning. For this purpose, the production processes of crystal sugar and hydrated ethanol were mapped, and data related to the production bulletins for the 2020/2021 and 2021/2022 harvests were collected. The model was developed in Microsoft Excel® spreadsheets, in which 33 days of production were simulated with periods of 24 hours of production, afterwards these simulated values were compared with the actual quantity of the plant. The simulation of average percentage error of 0.22% for sugar and 0.57% for ethanol, the 4.MAD (Mean Absolute Deviation) was also verified, which corrects the errors were acceptable, so the model was validated. The potential that the operational control tool has to improve sugar-energy processes, reduce losses and make them more efficient becomes evident.

Keywords: Sugarcane; Simulation; Model; Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As três fases do PCP	17
Figura 2 - Estrutura do Projeto de Produção	17
Figura 3 - Fases do Planejamento da Produção	18
Figura 4 - Etapas do Controle da Produção	18
Figura 5 - Etapas para estudar um sistema	21
Figura 6 - Etapas para montagem do modelo de simulação	24
Figura 7 - Fluxograma dos processos produtivos para obtenção de açúcar e etanol....	36
Figura 8 – Aba Inicial	40
Figura 9 – Aba Entrada de dados.....	41
Figura 10 – Aba Modelo.....	42
Figura 11 – Aba Modelo.....	43
Figura 12 – Aba Cálculo do Balança de Massa	44
Figura 13 – Aba Variação Açúcar	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis do processo de simulação	37
Tabela 2 - Dados de entrada simulados	46
Tabela 3 - Valores da simulação e as quantidades reais para o açúcar.....	48
Tabela 4 - Valores da simulação e as quantidades reais para o etanol	49
Tabela 5 - Perdas de Pol e ART.....	52
Tabela 6 - Impacto financeiro das perdas	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	13
1.2. JUSTIFICATIVA	13
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. Objetivo geral	14
1.3.2. Objetivos específicos	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1. PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO	16
2.1.1. Fases do Planejamento e Controle da Produção	16
2.1.1.1. Projeto de Produção	17
2.1.1.2. Planejamento da Produção	18
2.1.1.3. Controle da Produção	18
2.2. MODELAGEM	19
2.2.1. Conceito de modelagem	19
2.2.2. Tipos de modelos	19
2.3. SIMULAÇÃO	21
2.3.1. Conceito de simulação	21
2.3.2. Tipos de modelos	22
2.3.3. Estrutura para montagem da simulação	23
2.4. ESTUDOS CORRELATOS EM USINAS SUCROENERGÉTICAS	26
2.4.1. O Planejamento e Controle da Produção nas Usinas sucroenergéticas	26
2.4.2. A simulação nas usinas sucroenergéticas	27
2.4.3. Análise dos estudos	28
3. METODOLOGIA	30
3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PESQUISA	30

3.2.	ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	30
4.	EMPRESA ESTUDADA	32
4.1.	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DO AÇÚCAR	32
4.1.1.	Recepção e extração da cana-de-açúcar	32
4.1.2.	Tratamento do caldo	33
4.1.3.	Evaporação e cristalização do açúcar	33
4.1.4.	Centrifugação, secagem e envase	33
4.2.	DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO ETANOL	34
4.2.1.	Fermentação	34
4.2.2.	Centrifugação e destilação	34
4.3.	DADOS DE ENTRADA E VARIÁVEIS DO PROCESSO.....	37
4.4.	CONSTRUÇÃO DO MODELO	38
4.5.	CONTRUÇÃO DA PLANILHA ELETRÔNICA	40
4.6.	SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE DADOS	45
4.7.	PERDAS DO PROCESSO.....	52
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
	REFERÊNCIAS	55

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar chegou ao Brasil no ano 1532, trazida pelos portugueses no período de colonização. Desde então o setor sucroenergético passou por várias fases, como a criação do primeiro carro flex por Henry Ford em 1908, que poderia utilizar gasolina, querosene ou etanol e o decreto brasileiro 19.717 em 1931 estabelecendo a adição de 5% de etanol anidro na gasolina. Entre outros acontecimentos, pode-se destacar a criação do Programa Brasileiro de Álcool (PROALCOOL) em 1975 e o início da venda da bioeletricidade em 1987 (UNICA, 2020).

O PROALCOOL tinha como principal objetivo estimular a produção de álcool/etanol oriundo de fontes renováveis, através da ampliação da oferta de matérias-primas, instalação de novas destilarias, e modernização das unidades existentes.

O programa contribuiu para que o Brasil se tornasse um dos grandes líderes em exportação de etanol e açúcar. Segundo o CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento (2020) o país faturou R\$ 5,8 bilhões na safra de 2019/2020 com a exportação de açúcar, e US\$ 983,52 milhões com a exportação de etanol, o que demonstra a grande importância do cultivo da cana-de-açúcar para o agronegócio brasileiro.

O setor sucroenergético possui algumas características específicas, como o fato de ser um sistema contínuo, uma vez que opera em ritmo acelerado, por um longo tempo e sem interrupção. Este tipo de sistema é marcado pela produção em grandes quantidades, com uso de máquinas especializadas e de alta tecnologia (CHIAVENATO, 2008).

Como a produção ocorre de forma contínua e dependente, quando ocorre um imprevisto, como a falta de matéria-prima (cana-de-açúcar) ou a quebra de um equipamento, a produção é interrompida, o que prejudica o atendimento das demandas e provoca danos para a empresa. Logo se faz necessário ter um bom planejamento e controle da produção (PCP), visto que ele ajusta o sistema para atender as necessidades do setor de vendas, através da integração de todos os setores da instituição (LINKE et al., 2013).

A simulação e modelagem são importantes técnicas utilizadas no PCP, pois ajudam a visualizar diferentes cenários na empresa, como possíveis mudanças no sistema. Segundo Barros e Souza (2018), o mapeamento de processos, em conjunto com a modelagem e a simulação auxiliam a empresa a encontrar os pontos positivos e negativos, assim como:

complexidade na operação, reduzir custos e gargalos, falhas nos processos, retrabalho, além de ser uma ótima maneira de compreender melhor os processos e aumentar a performance da empresa.

Logo este estudo tem como finalidade realizar um estudo no PCP de uma usina sucroenergética, por meio da modelagem e simulação a fim de melhorar o controle operacional da empresa.

1.1. CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Por ser um sistema contínuo, a empresa pesquisada opera com um pequeno *mix* de produtos, produzindo em grande escala. Além disso, o *mix* de produção não é constante e pode variar de acordo com a valorização do mercado sucroenergético. Enquanto que a quantidade fabricada pode variar caso ocorra alguma eventualidade, tal como as variações climáticas, que dificultam a chegada da cana na usina. Essas variações afetam todo o sistema produtivo e dificultam o planejamento e controle da produção da usina.

Por meio da modelagem e da simulação é possível visualizar e antecipar prováveis problemas. Também é possível determinar qual a decisão ótima a ser tomada no *mix* de produção, o que auxilia no planejamento e controle da produção.

Portanto é oportuno realizar uma pesquisa em todos os processos produtivos da usina sucroenergética, tendo em vista que ela possui problemas que afetam o setor de vendas e consequentemente o lucro da empresa.

1.2. JUSTIFICATIVA

De acordo com Carvalho e Santoro (2008), a definição do *mix* de produção é uma das grandes dificuldades do PCP numa usina de açúcar e etanol. As recorrentes mudanças nos preços de etanol e açúcar atrapalham o planejamento e controle de produção nas usinas sucroenergéticas, acarretando decisões equivocadas, que destoam dos valores esperados das vendas dos produtos.

Outro problema é o fator climático, pois segundo o CONAB (2020) houve uma queda de 6% na produtividade da cana na safra 2019/2020 no Mato Grosso do Sul, estado onde a empresa estudada está localizada. Isto ocorreu devido à estiagem e a geada que deixaram a cana-de-açúcar inviável e afetaram o rendimento das lavouras. Com a realização do trabalho,

as decisões de suprimento e produção serão mais assertivas, propiciando a competitividade da empresa em momentos críticos como esse.

Por possuir várias unidades espalhadas pelo Brasil, a usina analisada realiza o planejamento e controle da produção apenas na unidade sede da empresa e então distribui as demandas e as metas que devem ser alcançadas para as demais unidades. Esta dependência prejudica o processo de controle de produção, pois quando ocorre algum problema que atrapalha a fabricação dos produtos, os funcionários devem pensar rapidamente e solucionar o problema, sem ter um departamento de PCP formal atuante. No entanto, nem sempre a decisão escolhida é a melhor alternativa. Por isso é pertinente um estudo nesta área, para construir um modelo de simulação capaz de utilizar a previsão de demanda e realizar o controle dos processos produtivos na empresa em longo (plano de safra), médio (plano trimestral) e curto prazo (semanal/quinzenal).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo geral

O presente trabalho visa auxiliar desenvolver o controle operacional de uma usina sucroenergética, através da modelagem e simulação dos processos produtivos.

1.3.2. Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral o trabalho deve alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Coletar os dados de todo o funcionamento do sistema produtivo por meio de entrevista, questionários e dados históricos;
- Modelar os processos;
- Elaborar um modelo do sistema via planilhas eletrônicas em Microsoft Excel ®;
- Analisar as relações entre as variáveis;
- Realizar a simulação;
- Validar o modelo;
- Implementar o modelo de simulação;

- Avaliar os resultados obtidos.

1.4. ESTRUTURA

Logo após a introdução o presente trabalho está organizado em quatro capítulos. A revisão bibliográfica localizada no capítulo 2 apresenta os conceitos de planejamento e controle da produção, modelagem e simulação, bem como os estudos correlatos nesta área. Posteriormente o capítulo 3 engloba todos os procedimentos e métodos realizados nesta pesquisa. O capítulo 4 contém as características da empresa estudada, a simulação dos cenários e os resultados alcançados. Por fim, o capítulo 5 é composto pela conclusão do estudo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentado o referencial teórico dos conteúdos utilizados para realizar a pesquisa.

2.1. PLANEJAMENTO E CONTROLE DA PRODUÇÃO

O planejamento tem como finalidade definir de forma antecipada quais serão os objetivos da empresa e como eles serão atingidos. Enquanto o controle é a parte administrativa responsável por medir e corrigir o desempenho, tendo a função de averiguar se tudo está ocorrendo conforme o planejamento (CHIAVENATO, 2008).

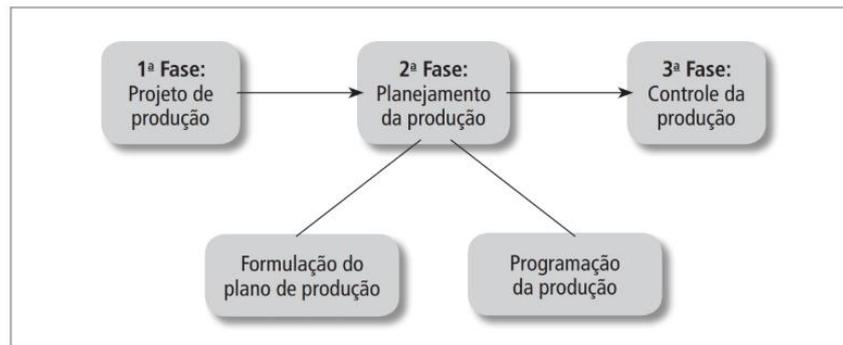
Para Lobo e Silva (2014) um sistema de planejamento e controle da produção concede informações sobre o fluxo de material, equipamentos e pessoas, sincronizando as atividades externas e internas com a dos parceiros, sem deixar de considerar as necessidades dos clientes.

Logo o Planejamento e Controle da Produção (PCP) tem como principal função gerenciar os sistemas produtivos, pois “[...] o PCP é responsável pela coordenação e aplicação dos recursos produtivos de forma a atender da melhor maneira possível aos planos estabelecidos nos níveis estratégico, tático e operacional” (TUBINO, 2017, p.3). No nível estratégico os responsáveis são os grandes executivos da empresa, com planos em longo prazo. No nível tático os responsáveis são os gerentes, com planos em médio prazo, e no nível operacional os supervisores ou gerentes de vendas são encarregados dos planos no curto prazo (BATEMAN; SNELL, 1998).

2.1.1. Fases do Planejamento e Controle da Produção

Segundo Chiavenato (2008), o PCP pode ser dividido em três fases: Projeto de Produção, Planejamento da Produção (PP) e Controle da Produção (CP), como ilustra a Figura 1.

Figura 1 - As três fases do PCP



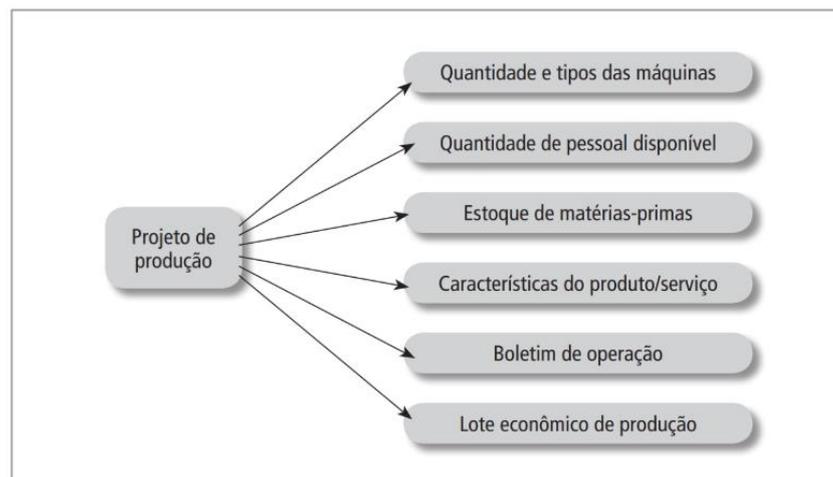
Fonte: CHIAVENATO, 2008.

Desta forma, o PCP se inicia com o projeto de produção, passa para a fase do planejamento da produção, onde é definido como ocorrerá todo o processo e se encerra no controle da produção.

2.1.1.1. Projeto de Produção

Segundo o mesmo autor nesta primeira fase será definido o funcionamento do sistema produtivo e suas dimensões, tais como quantidade e características de máquinas e equipamentos, volume de estoque, características do produto, métodos e procedimentos, entre outros. A fase pode ser simplificada na Figura 2.

Figura 2 - Estrutura do Projeto de Produção



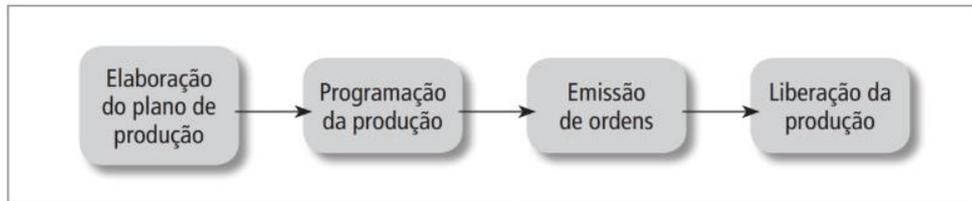
Fonte: CHIAVENATO, 2008.

Logo, nesta fase são definidos todos os aspectos necessários, tais como máquinas, mão de obra, entre outros, designando suas características e respectivas quantidades.

2.1.1.2. Planejamento da Produção

Nesta fase será determinado o que será produzido, considerando a capacidade produtiva e a previsão de vendas que deve ser cumprida. Logo o Planejamento da Produção (PP) deve integrar da melhor forma possível as máquinas, pessoas, materiais, matérias-primas e processos produtivos, a chamada programação da produção, além disso, deve envolver todos os níveis hierárquicos da empresa para agirem de forma conjunta, de acordo com os objetivos pré-estabelecidos no plano de produção (CHIAVENATO, 2008; LOBO; SILVA, 2014). Como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Fases do Planejamento da Produção



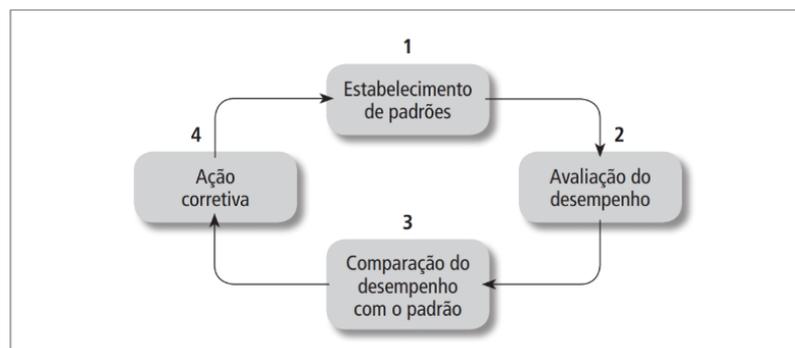
Fonte: CHIAVENATO, 2008.

Assim, nesta fase de planejamento será definido a quantidade que será produzida, por meio do plano e da programação da produção, e então os produtos são liberados para serem fabricados.

2.1.1.3. Controle da Produção

A última fase consiste em avaliar e acompanhar os procedimentos produtivos, comparar com o que foi programado, indicar possíveis falhas e desvios, elaborar relatórios e informar os outros setores sobre as tarefas produtivas (CHIAVENATO, 2008). Esta fase pode ser representada na Figura 4.

Figura 4 - Etapas do Controle da Produção



Fonte: CHIAVENATO, 2008.

Ainda de acordo com o mesmo autor, o Controle da Produção busca acompanhar e monitorar diversos pontos essenciais do processo produtivo, tais como: previsão de vendas e suas possíveis variações, planejamento da capacidade de produção, plano de produção, compras, almoxarifado, programação da produção, entres outros.

2.2. MODELAGEM

O processo de tomada de decisão, principalmente na área de planejamento e controle da produção, é um procedimento extremamente complexo, por isso necessita-se de algumas ferramentas que ajudam a indicar o melhor caminho a ser tomado, uma delas é a modelagem, que auxilia na visualização do sistema produtivo como um todo.

2.2.1. Conceito de modelagem

“De modo geral, pode-se dizer que o processo de modelagem consiste em um conjunto de procedimentos adotados para construir um esquema que represente o problema” (LONGARAY, p.34, 2013).

Tal esquema é chamado de modelo, que, para o mesmo autor pode ser interpretado como a representação matemática, simbólica ou descritiva, de fatores subjetivos, ou diversos eventos físicos, considerados fundamentais em determinada situação.

Conforme Banks et al. (2004), o modelo pode ser definido como uma representação de um sistema, com a finalidade de estudá-lo. Neste modelo são ilustrados componentes do sistema, sendo que na maioria dos estudos é preciso considerar apenas os componentes que afetam o problema que está sendo analisado. Apesar disso, o modelo deve ser detalhado o suficiente para fornecer soluções válidas. Então, ele seria a simplificação do sistema.

Além disso, utilizar o modelo no processo de tomada de decisão é fundamental, pois segundo Law e Kelton (1991), utilizar o sistema real acarretaria altos custos ou em problemas para o funcionamento do mesmo.

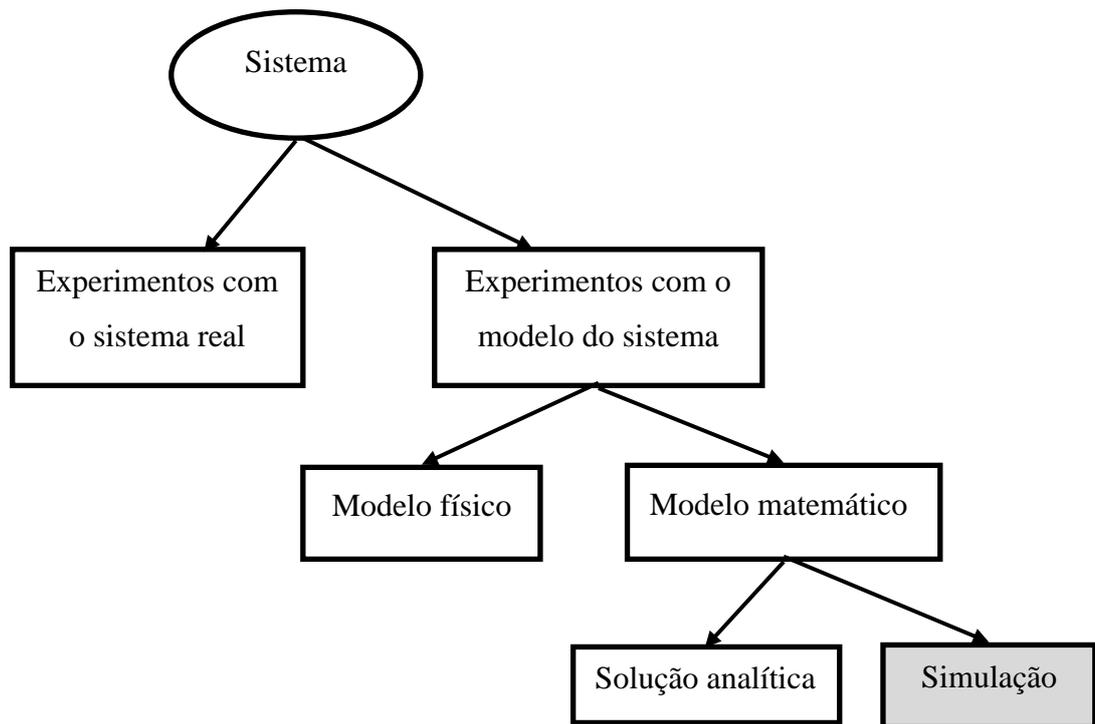
2.2.2. Tipos de modelos

Os modelos podem ser classificados segundo seus objetivos. Para Andrade (2015) os modelos podem ser classificados da seguinte maneira:

- a. Modelos conceituais: estes modelos associam de forma sequencial e lógica as informações e as fases do processo de decisão, de modo que o desenvolvimento aconteça de maneira controlada e de acordo com os objetivos estabelecidos.
- b. Modelos heurísticos: são empregues quando a utilização de equações matemáticas é inviável devido à complexidade do problema. Esses modelos sustentam-se em regras intuitivas que indicam uma solução mais aperfeiçoada, como por exemplo, os modelos baseados na “inteligência artificial”.
- c. Modelos simbólicos ou matemáticos: dependem da premissa de que podem ser quantificadas todas as variáveis e informações importantes do problema de tomada de decisão. Então se utiliza símbolos matemáticos para ilustrá-las, e funções matemáticas para caracterizar as ligações entre elas e o funcionamento do sistema. Estes por sua vez podem ser modelos de otimização ou modelos simulação.

Enquanto para Law e Kelton (1991), existem dois tipos de modelos, os modelos físicos e os modelos matemáticos, como ilustra a Figura 5. Os modelos físicos foram criados para estudar os sistemas de engenharia ou sistemas de gestão, no entanto, a maioria dos modelos criados com essa finalidade são os matemáticos, pois representam o sistema em termos lógicos e quantitativos, que são manipulados e alterados para analisar como o modelo reage ou reagiria.

Figura 5 - Etapas para estudar um sistema



Fonte: Adaptado de Law e Kelton, 1991.

A figura acima demonstra o desdobramento de um modelo simbólico ou matemático, uma vez que utiliza variáveis quantitativas e equações matemáticas para analisar suas relações, resultando em uma solução analítica ou em um modelo de simulação que utiliza variáveis aleatórias.

2.3. SIMULAÇÃO

A simulação é muito utilizada para visualizar e prever algumas situações nas indústrias, auxiliando no melhoramento dos processos produtivos.

2.3.1. Conceito de simulação

A palavra simular tem sua origem em 1940 com Von Neumann, que usou a expressão análise de Monte Carlo para chamar uma técnica matemática utilizada para solucionar problemas de física nuclear, pois uma solução experimental seria muito custosa ou uma abordagem analítica seria muito complexa. A simulação é primordialmente uma técnica que abrange a criação de um modelo de uma situação real para sua posterior experimentação (LOESCH; HEIN, 2009).

Segundo Banks et al. (2004) simulação é a reprodução de um processo ou de um sistema real ao longo do tempo. Sendo feita de forma manual ou computacional, a simulação envolve a criação de uma história fictícia de um sistema e o monitoramento dessa história para entender suas características operacionais.

Para o autor o comportamento de um sistema que avança ao longo do tempo é estudado por meio do desenvolvimento de um modelo de simulação. Tal modelo geralmente é formado por um conjunto de suposições relativas à operação do sistema. Essas suposições são apresentadas em relações matemáticas, simbólicas e lógicas entre as entidades ou objetos importantes do sistema. Após ser desenvolvido e validado, o modelo pode ser utilizado para investigar uma gama de perguntas “e se” determinada situação acontecesse. Assim, seria possível prever o desempenho do sistema, simulando as possíveis mudanças.

Desta forma, a simulação calcula o movimento e interação dos componentes de sistemas complexos, prevendo seu desempenho por meio da avaliação do fluxo de peças através das máquinas e postos de trabalhos, investigando os conflitos de procura por recursos limitados, podem-se analisar layouts, equipamentos e procedimentos de operação (ESTEVEES, 2009).

2.3.2. Tipos de modelos

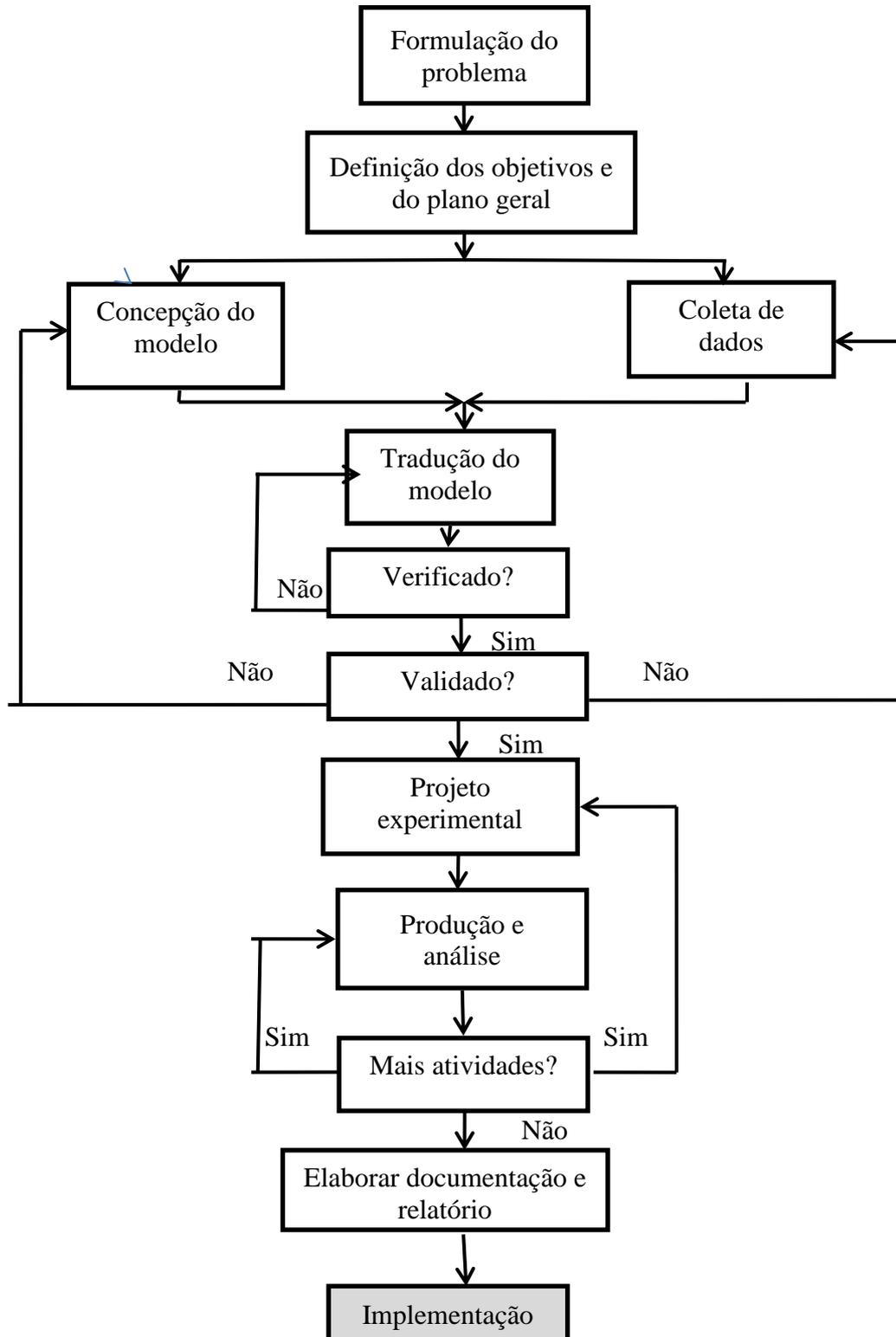
Os tipos de modelos de simulação podem ser divididos em três categorias, as quais podem ser caracterizadas da seguinte maneira, segundo Santos (1999):

- Estatísticos ou Dinâmicos: o modelo de simulação estático é um modelo cuja passagem do tempo é insignificante. Enquanto os modelos de simulação dinâmicos representam sistemas nos quais os resultados variam com a passagem do tempo.
- Determinístico ou Estocástico: nos modelos determinísticos não existem variáveis aleatórias, desta forma para um grupo de entrada de dados tem-se um único grupo de resultados na saída. Por outro lado, o modelo estocástico de simulação tem em sua entrada uma ou mais variáveis aleatória.
- Discreto ou Contínuos: na simulação discreta as mudanças no estado do sistema ocorrem de forma aleatória em alguns pontos do tempo. Já no modelo contínuo as mudanças do sistema acontecem constantemente.

2.3.3. Estrutura para montagem da simulação

Conforme Banks et al. (2004) para a montagem de um modelo de simulação são necessárias doze etapas conforme a Figura 6. Estudos semelhantes também são vistos nos trabalhos de Law e Kelton (1991). Abaixo segue uma breve descrição de tais etapas segundo Banks et al. (2004).

Figura 6 - Etapas para montagem do modelo de simulação



Fonte: Adaptado de Banks et al., 2004.

1. *Formulação do problema:* O início de qualquer estudo é a definição do problema. Independentemente se esta definição for feita por um analista ou por um gestor, é fundamental que todos entendam o problema e concordem. Há casos em que o problema deve ser remodelado na medida em que o modelo é desenvolvido.
2. *Definição dos objetivos e do plano geral do projeto:* Os objetivos indicam as perguntas que serão respondidas pela simulação, enquanto que o plano geral do projeto deve conter alternativas a serem consideradas e um método para avaliar a eficácia de tais alternativas.
3. *Concepção do modelo:* A arte da modelagem é melhorada pela capacidade de retirar apenas os recursos fundamentais de um problema, selecionar e transformar suposições que caracterizam o sistema e, logo após melhorar e elaborar o modelo até conseguir uma boa aproximação. Dessa forma, é melhor começar com um modelo simples e construí-lo aos poucos até se tornar complexo.
4. *Coleta de dados:* A coleta de dados deve ser constante, pois conforme o modelo se torna mais complexo os dados necessários podem mudar. Essa etapa ocupa uma grande parcela de tempo, por isso deve ser feita no início do processo.
5. *Tradução do modelo:* A maioria dos sistemas reais possuem modelos que precisam de uma grande quantidade de informações a serem armazenadas e computadas, então o modelo deve ser inserido em um programa de computador, apesar disso, em muitos casos se utilizam pouca ou quase nenhuma codificação.
6. *Verificado?:* O programa de computador deve ser verificado. Nos modelos complexos é quase impossível traduzir um modelo com sucesso total sem corrigir erros, se os dados de entrada e a estrutura do modelo estiverem corretos o modelo está verificado.
7. *Validado?:* A validação é feita por meio da comparação entre o modelo e o comportamento real do sistema, analisar as diferenças e ideias entre os dois para melhorar o modelo. Este processo é repetido até que o modelo seja aceito.
8. *Projeto experimental:* As alternativas a serem simuladas devem ser determinadas. Na maioria das vezes essa decisão é feita com base nas funções executadas. Para cada projeto de sistema simulado é preciso decidir quando iniciar a simulação, sua duração e o número de replicações a serem feitas em cada atividade.

9. *Produção e análise*: A execução das atividades e posteriormente sua análise são utilizadas para empregar medidas de desempenho para os projetos de sistemas que estão sendo simulados.
10. *Mais atividades?*: Dada a análise do que foi feito, o analista determina se serão necessárias atividades adicionais e como elas devem ser feitas.
11. *Elaborar documentação e relatório*: É necessário fazer a documentação e relatórios sobre o programa para facilitar a compreensão de seu funcionamento, para criar confiança em quem for usar o programa, bem como nos gestores que podem utilizar para tomar decisões.
12. *Implementação*: Para se atingir uma boa implementação é fundamental o envolvimento do usuário em todo o processo, e da execução bem sucedida de todas as etapas anteriores.

2.4. ESTUDOS CORRELATOS EM USINAS SUCROENERGÉTICAS

Segundo o Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (2020), o Brasil possui atualmente 386 usinas em todo o seu território, sendo o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. As usinas e os produtores envolvidos nas atividades de produção de cana, açúcar, etanol e bioeletricidade geram uma receita bruta superior a US\$ 100 bilhões por safra (NOVACANA, 2015).

Além disso, de acordo com o Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA (2018), o setor é responsável por cerca de 800.000 empregos formais, o que mostra a importância do setor sucroenergético para economia do país. Neste tópico serão abordados alguns trabalhos nas áreas de Planejamento e Controle da Produção e simulação, aplicados neste setor. Os termos utilizados para a primeira pesquisa foram planejamento, controle e usinas sucroenergéticas, já para segunda foi simulação de processos e usinas sucroenergéticas.

2.4.1. O Planejamento e Controle da Produção nas Usinas sucroenergéticas

Fernandes (2009) estudou o funcionamento do Planejamento e controle da Produção em usinas, para compreender o processo produtivo do etanol e do açúcar. O autor demonstrou as ferramentas de PCP mais utilizadas no setor e os sistemas de controle empregados.

Paiva (2009), em sua tese de doutorado apresentou modelos de programação matemática para o planejamento agregado nos níveis hierárquicos estratégico e tático de usinas cooperadas.

Para isso ele criou um modelo determinístico de otimização por meio da modelagem algébrica e do *solver*, para representar as decisões envolvidas no planejamento de uma cooperativa e suas usinas, bem como as incertezas no processo de tomada de decisão.

Em um estudo similar Lazzarini (2012) observou o planejamento agregado de uma usina sucroenergética por meio da aplicação de um modelo de otimização e da ferramenta Matlab, com o objetivo de maximizar a produção e qualidade, e minimizar os custos e os tempos. Foram aplicados três cenários: Planejamento agregado da produção de uma usina real; Planejamento agregado da produção para o estudo de implantação de uma usina, onde a matriz de produção é definida pelo usuário do modelo; Planejamento agregado da produção, onde a matriz de produção é escolhida pelo modelo de otimização.

Marchi (2019) em sua dissertação de mestrado criou um modelo matemático capaz de estipular a quantidade que será produzida de açúcar e etanol de uma usina. Para tal finalidade o autor utilizou os dados de uma usina real, considerando o tempo de cem dias produtivos. Esse estudo proporcionou equações multiplicadas que podem auxiliar no PCP, pois podem ser programadas no Excel fornecendo a previsão de demanda diária.

2.4.2. A simulação nas usinas sucroenergéticas

Murta (2013) analisou o funcionamento da geração de energia em uma usina sucroenergética através da simulação de diferentes cenários. Nestes cenários o autor investigou o desempenho da usina quando a mesma utilizava apenas bagaço de cana para geração de energia, e como seria se adicionasse uma biomassa junto com o bagaço. Para isso foi desenvolvida uma planilha no Excel, que possibilitou não só estudar o funcionamento deste processo produtivo, como também estimar os custos de produção e a lucratividade.

Silva (2006) apresentou uma simulação no *software* Arena do sistema de abastecimento de uma usina da região de Ribeirão Preto. Foram examinadas as atividades de corte, carregamento e transporte em diferentes horários, com o objetivo de determinar qual seria o sistema de turnos ideal, considerando que o tempo de utilização dos equipamentos não podia ultrapassar a margem de dez horas por turno e que a usina não poderia ficar desabastecida.

Rangel et al. (2008) demonstrou um estudo parecido onde simulou no *software* Arena as mesmas atividades de corte, carregamento e transporte, em uma usina localizada no Rio de

Janeiro, com a finalidade de avaliar o impacto do frete nos custos operacionais de tais atividades.

Souza, Oliveira e Alves (2019) criaram um modelo de simulação para estipular a quantidade de vinhaça (resíduo gerado no processo produtivo das usinas) e assim estimar a quantidade diária que poderia ser produzida de biogás, caso a usina implantasse tal sistema. Então, com os *softwares* Aspen Plus e MAPLE, simularam a produção do etanol hidratado de uma usina do Norte do Paraná no tempo de operação de 24 horas, onde foi possível observar o grande potencial energético que a vinhaça possui.

2.4.3. Análise dos estudos

Pode se observar que os estudos pesquisados possuem objetivos similares, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Resumo dos estudos pesquisados

Autor	Objetivos	Resultados
Silvânio Márcio Fernandes.	Caracterizar quais são as funções do Planejamento e Controle da Produção dentro de uma usina, considerando os conceitos utilizados pela Engenharia de Produção.	Como resultado obteve-se as principais características das usinas: capacidade; tecnologia; recursos humanos; classificação do sistema produtivo; questões ambientais e sociais.
Rafael Piatti Oiticica de Paiva.	Elaborar e aplicar modelos de planejamento agregado de safra para uma cooperativa e para uma usina, levando em consideração as incertezas nos parâmetros de entrada.	Com os dois modelos criados foi possível determinar a quantidade e o mix de produção das usinas, a política de estoque e a política de atendimento a demanda. Além de determinar qual seria a moagem semanal

Continua...

Conclusão...

Autor	Objetivos	Resultados
Camilla Miguel Carrara Lazzarini.	Auxiliar no dimensionamento das frotas e no planejamento agregado da produção, visando maximizar a produção e a qualidade e minimizar os custos e tempos.	Foram criados dois modelos matemáticos, que possibilitaram definir a quantidade e o tipo dos veículos que atuarão na frente de corte, a quantidade de cana colhida e moída semanalmente.
Leandro Anselmo Santos Marchi.	Modelar o processo produtivo do açúcar e etanol e identificar erros e propor medidas para correção.	Foi desenvolvido um modelo matemático com equações múltiplas, capaz de estipular a produção de açúcar e etanol.
Ignacio Moura Murta.	Simular o funcionamento de uma usina ao utilizar um conjunto de biomassas para a geração de energia.	Obteve-se como resultado um modelo de simulação criado no Excel, que calculou a energia fabricada a partir da biomassa e analisou os custos e lucros gerados.
João Eduardo Azevedo Ramos da Silva.	Determinar a política de turnos para a frota das máquinas e dos veículos, por meio da análise das operações de corte, carregamento e transporte (CCT) da cana-de-açúcar.	O resultado foi um modelo simulação realizado no software Arena, que possibilitou identificar os fatores que influenciam nas operações do CCT, bem como determinou qual seria o turno de trabalho ideal.
João José de Assis Rangel et al.	Analisar a relação do custo do frete no CTT de acordo com a distância do fornecedor de cana-de-açúcar até a usina.	Como resultado obteve-se um modelo de simulação que permitiu visualizar a mudança no impacto do custo de frete, conforme a distância entre os fornecedores de cana e a usina se alterava.
Luana Pereira de Souza, Lígia Gomes Oliveira e Helton Jose Alves.	Determinar a quantidade de vinhaça gerada no processo de fabricação do etanol hidratado e estipular a produção de biogás.	O resultado foi um modelo de simulação que calculou a quantidade de vinhaça e um modelo que estipulou a quantidade de biogás que poderia ser gerada.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Todas as obras apresentadas irão auxiliar neste estudo, entretanto, a obra de Paiva e a obra de Marchi possuem maiores semelhanças com o presente trabalho, pois ambas abordaram questões relacionadas ao PCP, como o atendimento a demanda e o cálculo da quantidade de produtos fabricados.

3. METODOLOGIA

3.1. CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE PESQUISA

Pesquisa descritiva tem como finalidade descrever os elementos de uma população ou fenômeno, além de verificar se existem relações entre variáveis. Enquanto que a pesquisa exploratória foca em explicar, desenvolver e alterar ideias, para caracterizar problemas de forma mais explícita ou hipóteses a serem testadas (GIL, 2019).

Portanto, no que se refere aos objetivos, este estudo é definido como exploratório e descritivo, tendo em vista que busca se aprofundar nos aspectos do setor sucroenergético e posteriormente caracterizar e modelar os processos produtivos do mesmo, além de criar situações e hipóteses.

Para abordagem dos dados utiliza-se a abordagem quali-quantitativa, pois de acordo com Almeida, Francesconi e Fernandes (2019), é utilizada quando o pesquisador precisa conhecer sobre o tema, através dos resultados oriundos da pesquisa qualitativa, e então depois analisa as características de uma determinada amostra de pessoas ou entidades que possuem alguma conexão com o problema, por meio da pesquisa quantitativa.

Quanto aos métodos adotados na pesquisa, utiliza-se a modelagem e simulação, que conforme Martins, Mello e Turrioni (2014), permite compreender minuciosamente o funcionamento do sistema, testar possíveis mudanças antes de implantá-las, conquistar melhorias para o sistema, além de conseguir informações sem perturbar o sistema atual.

3.2. ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para o desenvolvimento da pesquisa foram empregues etapas, que se assemelham as de Banks et. Al (2004) apresentadas no capítulo 2:

- Definição do problema: O problema tratado neste estudo é a dificuldade em aplicar os conceitos e técnicas do planejamento e controle da produção em usinas sucroenergéticas, e será proposto a modelagem e simulação do processo de Produção de uma usina sucroenergética para mitigação deste problema.

- Definição dos objetivos: O objetivo é utilizar a modelagem e simulação para auxiliar neste processo, para isto tomou-se como base um estudo de caso em uma usina sucroenergética localizada no estado do Mato Grosso do Sul.
- Coleta de dados: Para a pesquisa, inicialmente foram feitas entrevistas abertas para alguns funcionários, a fim de modelar os processos produtivos do etanol e do açúcar. Depois, foram coletados dados dos processos por meio de boletins de análise e boletins de produção, gerados pelos laboratórios da usina, todos referentes às safras 2020/2021 e 2021/2022.
- Aplicação dos dados e criação do modelo: Os dados qualitativos, ou seja, provenientes das entrevistas e do questionário, serviram como base para a construção do modelo, que foi criado por meio da ferramenta Microsoft Excel®.
- Validação do modelo: Após criação do modelo, foi analisada a veracidade do mesmo, através da aplicação e análise de forma quantitativa dos dados oriundos dos boletins fornecidos pela empresa.
- Simulação e análise: Depois do modelo ser validado, foram feitas as simulações dos períodos e posteriormente a análise de seus impactos na empresa.

4. EMPRESA ESTUDADA

A empresa possui mais de cinco unidades espalhadas pelo Brasil, no entanto a unidade estudada está localizada no estado do Mato Grosso do Sul. Recentemente a usina foi vendida para um grupo maior e está passando por um processo de mudança na sua estrutura.

Dentre os diversos produtos que produz, o etanol e o açúcar foram os analisados nesta pesquisa. Tais produtos são fabricados de forma contínua, 24 horas por dia, divididos em três turnos de 8 horas. A safra dura oito meses, iniciando em abril e terminando em novembro.

Este capítulo apresenta a caracterização e modelagem dos processos produtivos do açúcar e do etanol, representados na figura 7 e posteriormente os resultados da simulação.

4.1. DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO DO AÇÚCAR

4.1.1. Recepção e extração da cana-de-açúcar

A cana chega a usina já picada e é transportada em caminhões, que ao chegarem passam por uma balança para cálculo da quantidade de cana-de-açúcar recebida. Em seguida é retirada uma amostra da cana por meio de uma sonda oblíqua. O material é enviado para o laboratório de PCTS (Pagamento de Cana por Teor de Sacarose), que analisa suas principais características: impurezas minerais, pol, brix, umidade, teor de fibras, AR (Açúcares Redutores) e ART (Açúcares Redutores Totais). Posteriormente os caminhões são descarregados na mesa alimentadora por meio do tombamento lateral. Segundo Ripoli e Ripoli (2004) a cana deve possuir $POL > 14$; pureza ($pol/brix > 85\%$); $ART > 15\%$; $AR < 0,8\%$ e teor de fibras entre 11 e 13%.

A cana-de-açúcar passa por uma limpeza a seco e é encaminhada para as moendas. Na primeira moenda acontece a maior parte da extração caldo, já na segunda moenda é adicionado água entre os dois últimos ternos para aumentar a extração da sacarose, desta forma o caldo diluído que sai do último terno volta para o penúltimo e assim consecutivamente até o segundo terno. Neste processo ocorre a separação do caldo extraído e do bagaço que é enviado para as caldeiras onde ocorre a produção de vapor e energia elétrica.

De acordo com NOVACANA (2021), o bagaço oriundo da extração deve possuir cerca de 50% de umidade, 4% de brix e 46% de fibra, características importantes para o processo de geração de energia.

4.1.2. Tratamento do caldo

O caldo que saí das moendas passa por um peneiramento para retirar as impurezas grosseiras. Em seguida passa por um pré-aquecimento em trocadores de calor e segue para a etapa de sulfitação, que ocorre através do SO₂ (gás sulfuroso) em uma coluna de absorção, com o objetivo de reduzir o pH para um valor entre 4 e 4,5 e diminuir a viscosidade do caldo, facilitando na coagulação de coloides, além de facilitar nos processos de evaporação e cozimento. Logo após o caldo recebe o leite de cal para eliminar os corantes presentes e neutralizar os ácidos orgânicos.

O caldo caleado é então aquecido, passa pelo tanque de flash para retirar os gases dissolvidos e segue para os decantadores, onde recebe um polímero que serve como um agente floculante para precipitar as impurezas. Dentro do decantador, as substâncias se separam por diferença de densidade, então o material que possui menor densidade fica por cima, denominado de caldo clarificado, o qual é enviado para um tanque. E o lodo, ou seja, o material que se depositou no fundo é encaminhado para o filtro rotativo á vácuo, para recuperar o açúcar que ficou no lodo. Este procedimento resulta na torta, que é utilizada para adubo das plantações.

4.1.3. Evaporação e cristalização do açúcar

Inicialmente é feita uma pré-evaporação, o caldo clarificado vindo do decantador é aquecido nos pré-evaporadores e segue para os evaporadores de múltiplo efeito onde o caldo é concentrado até atingir aproximadamente 65° Brix, tornando-se o xarope.

O xarope passa por cozedores com o objetivo de cristalizá-lo. Este procedimento é feito com duas massas: a massa 1 é misturada com o magma (mistura de açúcar 2 e caldo clarificado) e então cozida, transformando o xarope em cristais de sacarose. Em seguida a massa cozida passa por cristalizadores, equipados com agitadores que evitam a formação de blocos.

4.1.4. Centrifugação, secagem e envase

A massa segue para as centrífugas automáticas, onde a massa 1 é lavada com água para retirar o mel pobre e logo após com vapor para extrair o mel rico. O mel pobre é misturado com a semente, tornando-se a massa 2, que passa pelos mesmos processos da massa 1, com exceção da centrifugação, que ocorre em centrífugas contínuas capazes de separar os cristais de açúcar, o magma e o melaço/mel final que é utilizado na produção de etanol. Enquanto o mel rico volta para o processo do primeiro cozimento.

O açúcar é secado com a finalidade de reduzir a umidade e assim evitar o empedramento e escurecimento, logo após é embalado por meio de balanças e esteiras.

4.2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO ETANOL

Para fabricar o etanol, a cana-de-açúcar passa pelos mesmos processos de recepção, extração e tratamento do caldo. No entanto nesta última etapa o que difere é o procedimento de sulfitação, então ele é peneirado, pré-aquecido e segue diretamente para a adição do leite de cal (mistura obtida pelo aquecimento da cal (CaO) e da água) e demais etapas que serão descritas nos próximos tópicos.

4.2.1. Fermentação

Antes de iniciar a fermentação o caldo deve ser resfriado em trocadores de calor, então o caldo resfriado é diluído com melaço e/ou água para corrigir a concentração de açúcares. Esse caldo pronto para a fermentação é chamado de mosto. Logo após é feita a preparação do agente fermentativo, a chamada levedura, que será reutilizada proveniente do processo de cristalização. Ela passará por um tratamento, que consiste na adição de água e adição de ácido sulfúrico para diminuir o pH até atingir um valor entre 2 e 3, evitando contaminações. Em seguida o fermento tratado é agitado por horas e só depois então é encaminhado para as dornas de fermentação junto com o mosto, onde lá permanece por 12 horas, resultando no vinho com concentração entre 7° a 10°GL.

Durante a fermentação as leveduras transformam os açúcares redutores (D-glucose) em gás carbônico e etanol, este procedimento possui rendimento teórico de 0,511 gramas de etanol, $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2 + \text{energia ATP}$ (LOPES; GABRIEL; BORGES, 2011).

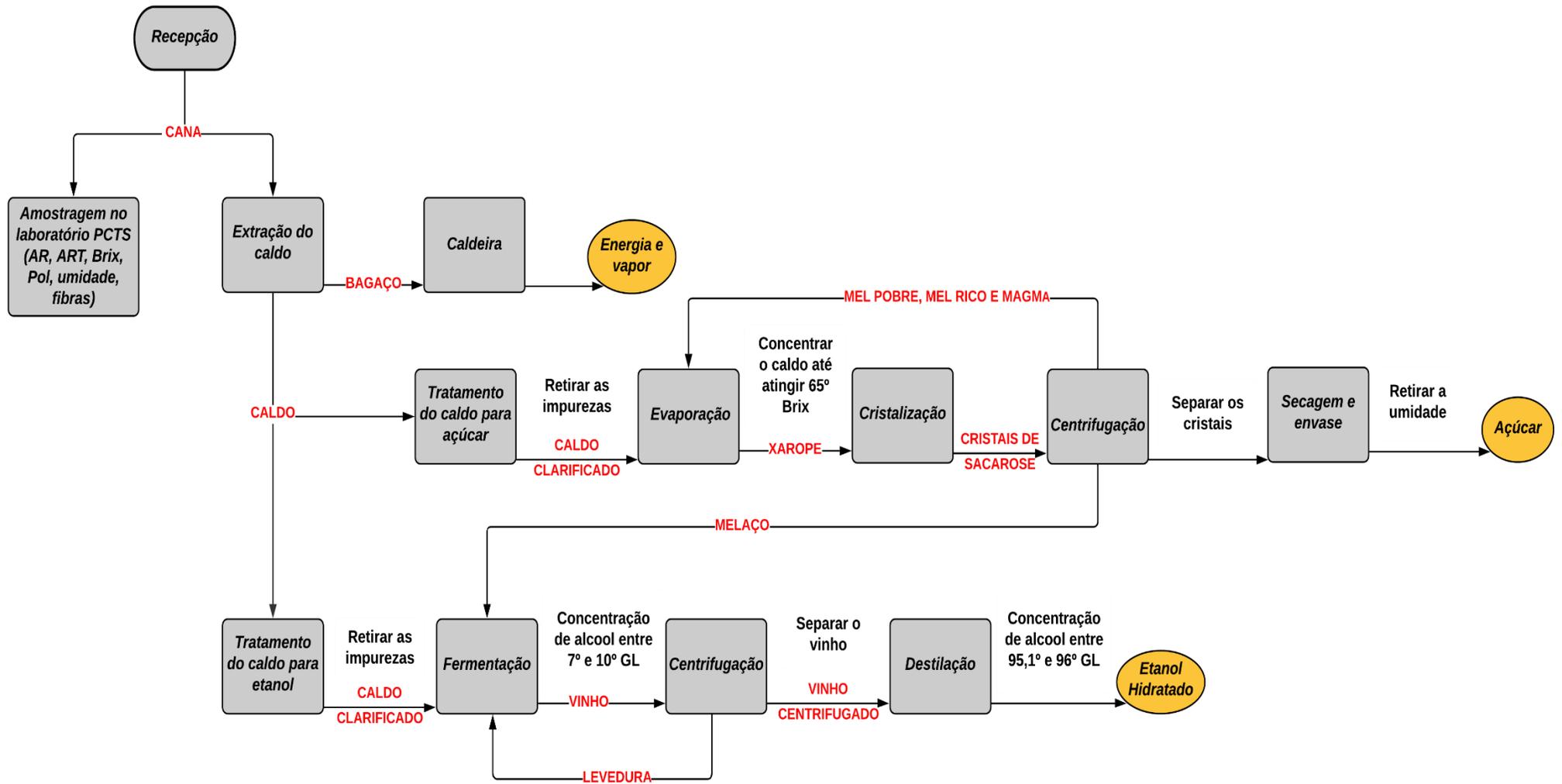
4.2.2. Centrifugação e destilação

O vinho é centrifugado separando o leite de levedura que é enviado para tratamento e posteriormente volta para a fermentação. Enquanto o vinho centrifugado segue para a dorna volante, um reservatório de vinho responsável por alimentar a destilaria.

Em seguida ocorre a destilação, este processo acontece nas colunas de destilação, que tem como função concentrar o álcool. Este procedimento é realizado em três colunas de destilação, na coluna A ocorre a concentração inicial que resulta em vapores ricos em álcool no topo, e vinhaça na base. Esses vapores que saem da coluna vão para a coluna B, onde acontece

a desgaseificação final e destilação primária. E posteriormente são enviados para coluna C para a retificação final, separando os produtos secundários oriundos da fermentação, como o óleo fusel, que fica na base da coluna, e o etanol hidratado com teor de 95,1 e 96°GL que fica no topo da coluna. O óleo fusel é enviado para a coluna D para ser lavado e depois armazenado.

Figura 7 - Fluxograma dos processos produtivos para obtenção de açúcar e etanol



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.3. DADOS DE ENTRADA E VARIÁVEIS DO PROCESSO

Inicialmente foi determinado quais seriam as entradas de dados, são elas: Quantidade de cana moída para açúcar e para etanol (toneladas), Brix da cana, Pol, AR, ART e a pureza do mel final, todos representados em percentagem. Estes dados foram retirados dos boletins de produção que são elaborados pelo laboratório de PCTS, e para determinar a quantidade que elas representam estas percentagens (exceto a pureza do mel final), foram multiplicadas pelo peso da cana moída em toneladas

Logo após foram determinadas as variáveis dos processos, o Brix e o ART do mel final foram retirados do boletim de análises de controle químico, e as demais variáveis foram retiradas dos boletins de produção e obtidas pela média dos 33 dias produtivos analisados. Estas variáveis não se alteraram durante as simulações.

Como foram utilizadas as médias das variáveis do processo, para avaliar a dispersão destes dados foram calculados os desvios padrões e coeficientes de variação, demonstrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis do processo de simulação

Variáveis	Média das percentagens	Desvio padrão	Coefficiente de Variação
Embebição (litros por ton. de cana)	27,02%	1,24%	4,59%
Fibra do bagaço	48,48%	1,25%	2,58%
Pol Bagaço	2,05%	0,35%	17,23%
Brix Bagaço	3,17%	0,13%	4,02%
ART bagaço	2,76%	0,33%	12,01%
Quantidade de torta produzida por ton. de cana	2,73%	0,52%	18,90%
Pol na torta	1,24%	0,38%	30,70%
ART na torta	1,47%	0,41%	28,12%
Quantidade de mel final produzido por ton. de cana	3,25%	1,72%	52,93%
Rendimento Destilaria	90,18%	2,04%	2,26%
Eficiência Moenda Extração Pol	97,36%	0,17%	0,17%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pode-se observar na Tabela 1 que a quantidade de mel final produzido foi a variável que apresentou um maior coeficiente de variação. Isto ocorre, pois esta variável depende do *mix* produtivo, logo, quanto maior for a quantidade de cana moída para açúcar, maior será a quantidade de mel gerada.

4.4. CONSTRUÇÃO DO MODELO

Para estimar a quantidade de açúcar cristal e de etanol hidratado produzidos, inicialmente foram determinadas as quantidades em peso das variáveis de entrada e das variáveis do processo, estas foram calculadas por diversas equações que estão representadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Equações para cálculo do peso das variáveis

Variáveis	Equações	Número
Variáveis de entrada		
Brix da cana (toneladas)	$Brix\ bruto = Percentagem * Peso\ da\ cana\ moída$	1
Pol da cana (toneladas)	$Pol\ bruto = Percentagem * Peso\ da\ cana\ moída$	2
Fibra da cana (toneladas)	$Fibra\ bruta = Percentagem * Peso\ da\ cana\ moída$	3
ART (toneladas)	$ART\ bruto = Percentagem * Peso\ da\ cana\ moída$	4
Variáveis do processo		
Embebição (litros)	$Embebição = Percentagem * Peso\ da\ cana\ moída$	5
Pol do Bagaço (toneladas)	$Pol\ bagaço = Percentagem * Peso\ do\ bagaço$	6
Brix do Bagaço (toneladas)	$Brix\ bagaço = Percentagem * Peso\ do\ bagaço$	7
ART do bagaço (toneladas)	$ART\ bagaço = Percentagem * Peso\ do\ bagaço$	8
Quantidade de torta produzida (toneladas)	$Peso\ da\ torta = Percentagem * Peso\ de\ cana\ moída$	9
Pol da torta (toneladas)	$Pol\ torta = Percentagem * Peso\ da\ torta$	10
ART da torta (toneladas)	$ART\ torta = Percentagem * Peso\ da\ torta$	11
Quantidade de mel final produzido (toneladas)	$Peso\ mel\ final = Percentagem * Peso\ da\ cana\ moída$	12
Brix do mel final (toneladas)	$Brix\ mel\ final = Percentagem * Peso\ do\ mel\ final$	13
ART mel final (toneladas)	$ART\ mel\ final = Percentagem * Peso\ do\ mel\ final$	14

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Santos Neto, 2010.

Após cálculo da quantidade em peso das variáveis de entrada e variáveis do processo, foi realizado o cálculo do balanço de massa por meio da subtração entre os valores em peso das variáveis de entrada (obtidos nas equações 1, 2 e 4) e os valores em peso das variáveis do processo, (obtidos nas equações 6, 7, 8, 10, 11) para determinar quanto entrou de Pol, Brix e ART, e quanto saiu após as perdas ocasionadas durante o processamento da cana.

-Açúcar Cristal: para o processo do açúcar foi calculado o quanto de xarope foi produzido, para isto foram retirados do base no boletim de análises o valor de Brix, sendo 25% para os pré- evaporadores e 61% de Brix para o xarope, desta forma foi possível estimar o peso do caldo pré- evaporado e do xarope, através das equações 26 e 27 respectivamente.

Com os valores de Brix encontrados, foram calculados o pol do caldo pré- evaporado e o pol do xarope por meio da equação 16, para então descobrir o quanto de sacarose sobrou no xarope (equação 28). Então foi obtida a recuperação teórica do açúcar (equação 29), vale ressaltar que a pureza do açúcar (99,7%) também foi retirada do boletim de análises, com o valor da recuperação foi calculada a quantidade de açúcar fabricado em toneladas, através da equação 30, sugerida por Lopes (2013).

-Etanol Hidratado: no processo de fabricação de etanol inicialmente foram calculados os dados referentes ao mosto, sua quantidade em peso (equação 31), seu Brix (equação 32) e seu ART (equação 33). O peso encontrado de ART foi então substituído na equação 34, que é sugerida por Lopes, Gabriel e Borges (2011) para calcular a quantidade de etanol produzido. O valor de 0,63 representa o quanto de etanol hidratado pode ser gerado por quilo de açúcares redutores totais, encontrado por meio da sua densidade (0,811 g/cm³) e do valor teórico de fermentação (0,5114 g de etanol). Todas estas equações estão ilustradas no Quadro 3.

Quadro 3 – Equações do balanço de massa

Equações	Número
$Peso\ do\ bagaço\ (ton.) = (Peso\ da\ cana * Percentagem\ fibra\ da\ cana) / Percentagem\ fibra\ do\ bagaço$	15
$Pureza\ (%) = Percentagem\ de\ pol / Percentagem\ de\ Brix$	16
$Peso\ do\ caldo\ misto\ (ton.) = Embebição + Peso\ da\ cana - Peso\ do\ bagaço$	17
$Pol\ CM\ (ton.) = (Pol\ Bruto * Eficiência\ Moenda\ Extração\ Pol) - Pol\ bagaço$	18
$Brix\ CM\ (ton.) = Brix\ Bruto - Brix\ bagaço$	19
$ART\ CM\ (ton.) = ART\ Bruto - ART\ bagaço$	20
$Peso\ da\ torta\ (ton.) = Percentagem * Peso\ da\ cana$	21
$Peso\ do\ caldo\ clarificado = Peso\ do\ caldo\ misto - Peso\ da\ torta$	22

Continua...

Conclusão...

Equações	Número
$Pol\ CC\ (ton.) = Pol\ CM - Pol\ da\ torta$	23
$ART\ CC\ (ton.) = ART\ CM - ART\ da\ torta$	24
$Brix\ CC = Brix\ CM$	25
$Peso\ do\ caldo\ pré\ evaporado\ (ton.) = Brix\ do\ caldo\ CC / Brix\ dos\ evaporadores$	26
$Peso\ do\ xarope\ (ton.) = Brix\ do\ caldo\ CC / Percentagem\ brix\ xarope$	27
$Sacarose\ no\ xarope\ (ton.) = Peso\ do\ Xarope * Percentagem\ pol\ do\ xarope$	28
$Recuperação\ teórica\ açúcar\ (%) = [A * (C - M) / C * (A - M)] * 100$	29
$Açúcar\ produzido\ (ton.) = (Recuperação\ teórica * sacarose\ no\ xarope)$	30
$Peso\ do\ mosto\ (ton.) = Peso\ do\ caldo\ clarificado + Peso\ mel\ final$	31
$Brix\ mosto\ (ton.) = Brix\ CC + Brix\ mel\ final$	32
$ART\ mosto\ (ton.) = ART\ CC + ART\ mel\ final$	33
$Etanol\ produzido\ (litros) = 0,63 * Rendimento\ destilaria * Peso\ do\ mosto * ART\ mosto$	34
Onde: CM = Caldo Misto; CC = Caldo Clarificado; ton. = toneladas; A = pureza do açúcar em %; C = pureza do xarope em %; M = pureza do mel final ou melaço em %.	

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Santos Neto, 2010.

4.5. CONTRUÇÃO DA PLANILHA ELETRÔNICA

A planilha eletrônica foi construída no *software* Excel, na aba inicial consta o nome do modelo e o autor, como ilustra a Figura 8.

Figura 8 – Aba Inicial



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Ao clicar em iniciar a planilha o usuário é direcionado para a aba “Entrada de dados”, lá irá preencher os dados das variáveis de entrada e em seguida clicar no botão “Salvar”, representado na Figura 9.

Figura 9 – Aba Entrada de dados

Código da simulação	<input type="text"/>	Data	<input type="text"/>	
Fibra da cana	<input type="text"/>	Cana moída p/ açúcar	<input type="text"/>	<input type="button" value="SALVAR"/>
Brix da cana	<input type="text"/>	Cana moída p/ álcool	<input type="text"/>	
Pol	<input type="text"/>	AR	<input type="text"/>	<input type="button" value="LIMPAR"/>
Pureza do mel final	<input type="text"/>	ART	<input type="text"/>	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Também é possível ir de uma aba para outra de maneira instantânea, clicando nas setas, além de apagar os dados escritos por meio do botão “Limpar”.

Ao clicar no botão “Salvar” automaticamente os dados de entrada serão transferidos para a aba “Modelo”, ilustrado na Figura 10 e Figura 11, que apresenta como o exemplo os dados do dia 12/09/2020 que serão apresentados na Tabela 2.

Figura 10 – Aba Modelo

	Entrada de dados	
	Código simulação	1
	Data	12/09/2020
	Fibra da cana	12,64%
	Brix da cana	15,97%
	Pol da cana	14,02%
	Cana moída para açúcar (ton/dia)	11.197,82
	Cana moída para etanol (ton/dia)	7.115,39
	AR	0,53%
	ART	15,29%
	Pureza mel final	60,54%
	Váriáveis do processo	
Embebição (% sobre a cana)	27,02%	
Fibra do bagaço	48,48%	
Pol do Bagaço	2,05%	
Brix do Bagaço	3,17%	
ART do bagaço	2,76%	
Quantidade de torta produzida por ton de cana	2,73%	
Pol da torta	1,24%	
ART da torta	1,47%	
Quantidade de mel final produzido por ton de cana	3,25%	
Brix do mel final	81,70%	
ART mel final	69,02%	
Rendimento Destilaria	90,18%	
Eficiência Moenda Extração Pol	97,36%	
Recuperação teórica açúcar		
	76,18%	
Resultado da simulação do Açúcar		
Pureza fixa do açúcar	99,70%	
Açúcar Ton	1115,92	
Açúcar Kg	1115924,51	
Scs	22.318,49	
Valor teórico de transformação		
I/Kg ART	0,63	
Rendimento da destilaria	90,18%	
Resultado da simulação do etanol		
etanol litros	788.770,64	
etanol m ³	788,77	



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Figura 11 – Aba Modelo

AÇÚCAR			ETANOL		
Entrada de cana	11.197,82	Ton/dia	Entrada de cana	7.115,39	Ton/dia
Fibra	12,64%		Fibra	12,64%	
Brix	15,97%		Brix	15,97%	
Pol	14,02%		Pol	14,02%	
Pureza	87,79%		Pureza	87,79%	
Embebição	27,02%	3.025,45 litros	AR	0,53%	
			ART	15,29%	
			Embebição	27,02%	1.922,45 litros
Bagaço	2.919,53	Ton/dia	Bagaço	1855,14	Ton/dia
Fibra	48,48%		Fibra	48,48%	
Brix	3,17%		Brix	3,17%	
Pol	2,05%		Pureza	64,61%	
Pureza	64,61%		Pol	2,05%	
			ART	2,76%	
Caldo misto (CM)	11.303,74	Ton/dia	Caldo misto (CM)	7.182,69	Ton/dia
Brix	15,00%		Brix	15,0%	
Pol	12,99%		Pol	13,0%	
Pureza	86,61%		Pureza	86,6%	
			ART CM	14,4%	
Torta	305,36	Ton	Torta	194,03	Ton
Pol	1,24%		Pol	1,24%	
			ART	1,47%	
Decantação	11.303,74	Ton	Decantação	7182,69	Ton
Caldo Clarificado (CC)	10.998,38	Ton	Caldo Clarificado (CC)	6988,66	Ton
Brix	15,42%		Brix	15,42%	
Pol	13,32%		Pol	13,32%	
Pureza	86,39%		Pureza	86,39%	
			ART CC	14,79%	
Caldo pré evaporado	6.782,97	Ton	mosto	7352,83	ton
Brix	25,00%		mosto	7352828,82	kg
Pol	21,60%		brix	17,65%	
Pureza	86,39%		ART	18,88%	
Xarope	2.779,91	Ton			
Brix	61,00%				
Pol	52,70%				
Pureza	86,39%				
Sacarose no Xarope	1.464,91	Ton			
Mel final	364,17	Ton			
Brix	60,54%				
Pol	37,95%				
Pureza	62,69%				
ART	97,36%				

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na Figura 11 é possível observar que esta aba possui diversos campos a serem preenchidos, tanto no açúcar (quadro azul) como no etanol (quadro laranja), no entanto este preenchimento também ocorre de maneira automática, basta clicar no botão “Simular”, como mostra a Figura 10. Desta forma todo o balanço de massa é calculado aba “Cálculo Balanço de massa” (Figura 12) e os valores são preenchidos na aba “Modelo”.

Figura 12 – Aba Cálculo do Balança de Massa

Balança de massa - açúcar		Balanço de massa - etanol	
Fibra Bruta ton	1.415,40	Fibra Bruta ton	899,39
Brix bruto ton	1.788,29	Brix bruto ton	1.136,33
Pol bruto ton	1.569,93	ART bruto ton	1.087,94
Pol bagaço ton	59,80	Pol bruto ton	997,58
Brix bagaço ton	92,55	Pol bagaço ton	38,00
Eficiência Moenda Extração Pol	97,36%	Brix bagaço ton	58,81
Brix CM	1.695,74	ART bagaço	51,28
Pol CM	1.468,69	Eficiência Moenda Extração Pol	97,36%
Torta peso cana	2,73%	Brix CM	1.077,52
Pol torta ton	3,78	Pol CM	933,24
		ART CM	1.036,66
		Torta peso cana	2,73%
Brix CC ton	1.695,74	Pol torta ton	2,40
Pol CC ton	1.464,91	ART torta ton	2,86
		Brix CC ton	1.077,52
Brix do evaporadores	1.695,74	Pol CC ton	930,84
Pol os evaporadores	1.464,91	ART CC ton	1.033,80
		Brix mel final	220,47
		ART do mel final	354,55
		Brix mosto	1.297,99
		ART mosto	1.388,35

pre ev		
1.695,74	25%	
x	100%	
6782,97		

Ev		
1.695,74	61%	
x	100%	
2779,91		

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Além disso, o botão “Simular” preenche as tabelas na aba “Variação Açúcar” e “Variação Etanol” com os respectivos valores simulados em sacas (scs) para açúcar e em l (litros) para etanol, onde ocorre o cálculo do erro percentual do período, como mostra a Figura 13.

Figura 13– Aba Variação Açúcar

Data	Quantidade simulada (Scs)	Quantidade real (Scs)	Erro percentual
12/09/2020	22.318,49	21.168,00	5,44%

Data	Quantidade simulada (Scs)	Quantidade real (Scs)	Erro percentual
12/09/2020	22.318,49	21.168,00	5,44%
14/09/2020	18.330,31	20.016,00	-8,42%
15/09/2020	14.546,52	14.736,00	-1,29%
17/09/2020	18.733,64	18.888,00	-0,82%
18/09/2020	17.445,96	18.336,00	-4,85%
19/09/2020	16.844,09	19.176,00	-12,16%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

4.6. SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DE DADOS

Ao todo foram simulados 33 dias, sendo 7 dias referentes a safra 2020/2021 e os demais da safra 2021/2022. Todos os dados de entrada foram retirados dos boletins de produção que são produzidos diariamente pela usina.

Inicialmente eram 37 dias, no entanto, os dias 13, 14, 17 e 25/04/2021 foram desconsiderados devido a discrepâncias nos boletins, como entrada de cana zerada para açúcar, mas a presença de sacas produzidas. Isto pode ser explicado pelo uso de cana que estava estocada e que não foi colocada como entrada de cana naquele dia.

Tabela 2 - Dados de entrada simulados

Código da simulação	Data	Fibra da cana %	Brix da cana %	Pol da cana %	Cana moída para açúcar (ton./dia)	Cana moída para etanol (ton./dia)	AR %	ART %	Pureza mel final %
1	12/09/2020	12,64	15,97	14,02	11.197,82	7.115,39	0,53	15,29	60,54
2	14/09/2020	12,62	16,19	14,16	9.384,16	8.616,00	0,54	15,45	62,00
3	15/09/2020	12,64	15,76	13,67	7.869,03	9.156,11	0,56	14,95	61,78
4	17/09/2020	12,16	15,87	13,71	10.168,17	8.057,61	0,57	15,00	61,50
5	18/09/2020	12,78	16,55	14,28	9.168,59	7.710,08	0,57	15,60	61,82
6	19/09/2020	12,69	16,80	14,49	8.876,72	7.349,05	0,57	15,82	62,75
7	21/09/2020	12,68	16,33	14,09	2.273,75	4.294,37	0,54	15,37	62,69
8	01/04/2021	11,25	14,01	11,86	5.234,58	11.652,67	0,63	13,11	66,36
9	02/04/2021	10,96	14,15	11,94	7.182,94	11.142,44	0,64	13,21	58,44
10	03/04/2021	11,01	14,17	11,94	7.154,24	10.949,08	0,65	13,22	60,80
11	04/04/2021	11,41	14,12	11,83	6.405,12	11.674,58	0,66	13,11	62,90
12	05/04/2021	11,56	14,62	12,36	7.394,72	10.088,02	0,63	13,64	58,24
13	06/04/2021	11,39	14,81	12,60	10.738,74	7.495,30	0,62	13,88	61,89
14	07/04/2021	11,63	14,59	12,35	12.040,92	5.683,76	0,63	13,63	66,19
15	08/04/2021	11,57	14,78	12,49	9.560,58	8.332,16	0,63	13,78	59,43
16	09/04/2021	11,45	14,70	12,52	9.685,60	7.278,12	0,61	13,79	62,48
17	10/04/2021	11,79	14,21	11,77	10.216,79	6.939,13	0,68	13,07	59,95
18	11/04/2021	11,65	14,36	12,15	10.553,71	6.938,23	0,63	13,42	61,51
19	12/04/2021	12,18	14,25	12,03	10.290,98	4.423,92	0,63	13,29	60,15
20	15/04/2021	12,12	14,46	12,31	9.605,05	5.945,21	0,61	13,57	57,12
21	16/04/2021	11,86	14,26	12,15	7.141,31	7.498,95	0,61	13,40	60,45
22	18/04/2021	12,14	15,49	13,39	0,00	5.653,60	0,57	14,67	0,00
23	19/04/2021	11,94	14,95	12,92	8.033,78	8.080,38	0,57	14,17	62,91
24	20/04/2021	12,14	14,48	12,34	8.657,08	8.994,94	0,61	13,60	63,60
25	21/04/2021	11,78	14,32	12,15	5.315,73	12.889,47	0,62	13,41	61,38
26	22/04/2021	11,75	14,47	12,22	2.332,89	15.009,39	0,63	13,50	62,18
27	23/04/2021	11,66	14,11	11,85	915,35	16.870,59	0,65	13,12	59,29

Continua...

Conclusão...

Código da simulação	Data	Fibra da cana %	Brix da cana %	Pol da cana %	Cana moída para açúcar (ton./dia)	Cana moída para etanol (ton./dia)	AR %	ART %	Pureza mel final %
28	24/04/2021	11,78	14,32	12,05	0,00	16.524,80	0,64	13,33	0,00
29	26/04/2021	12,39	14,27	12,06	0,00	4.465,12	0,62	13,32	0,00
30	27/04/2021	11,92	14,12	11,99	10.477,51	6.861,75	0,62	13,24	63,33
31	28/04/2021	11,81	14,47	12,43	4.488,36	13.731,10	0,59	13,68	60,54
32	29/04/2021	11,69	14,48	12,38	5.867,49	12.131,63	0,60	13,63	61,07
33	30/04/2021	11,61	14,54	12,29	11.012,10	7.214,88	0,63	13,57	62,39

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Pode-se observar na Tabela 2 que alguns dias não houve cana moída para açúcar, estes dias foram desconsiderados, logo foram simulados 30 dias para o açúcar.

Tabela 3 - Valores da simulação e as quantidades reais para o açúcar

Código da simulação	Data	Quantidade simulada (Scs)	Quantidade real (Scs)	Erro percentual %
1	12/09/2020	22.318,49	21.168,00	5,44
2	14/09/2020	18.330,31	20.016,00	-8,42
3	15/09/2020	14.546,52	14.736,00	-1,29
4	17/09/2020	18.733,64	18.888,00	-0,82
5	18/09/2020	17.445,96	18.336,00	-4,85
6	19/09/2020	16.844,09	19.176,00	-12,16
7	21/09/2020	4.203,20	8.712,00	-51,75
8	01/04/2021	6.978,30	4.632,00	50,65
9	02/04/2021	11.377,57	10.680,00	6,53
10	03/04/2021	10.811,95	9.096,00	18,86
11	04/04/2021	8.987,84	10.512,00	-14,50
12	05/04/2021	12.223,96	12.528,00	-2,43
13	06/04/2021	17.258,72	15.840,00	8,96
14	07/04/2021	16.802,50	14.784,00	13,65
15	08/04/2021	15.639,13	15.624,00	0,10
16	09/04/2021	15.334,36	16.584,00	-7,54
17	10/04/2021	14.712,68	11.880,00	23,84
18	11/04/2021	16.195,23	17.808,00	-9,06
19	12/04/2021	15.937,64	17.592,00	-9,40
20	15/04/2021	16.338,36	12.408,00	31,68
21	16/04/2021	11.402,95	16.128,00	-29,30
23	19/04/2021	13.615,16	9.448,00	44,11
24	20/04/2021	13.212,93	13.896,00	-4,92
25	21/04/2021	8.245,65	10.056,00	-18,00
26	22/04/2021	3.530,41	5.016,00	-29,62
27	23/04/2021	1.398,85	3.522,00	-60,28
30	27/04/2021	15.438,19	15.288,00	0,98
31	28/04/2021	7.488,34	5.112,00	46,49
32	29/04/2021	9.538,61	8.976,00	6,27
33	30/04/2021	16.734,57	14.760,00	13,38
Total		391.626,11	393.202,00	-0,40%
			Erro médio	0,22%
			Soma dos erros	6,60%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Os erros percentuais negativos representam que o valor simulado foi menor que o valor real, enquanto os valores positivos representam que o valor real simulado foi maior que o valor

real. Logo, eles representam o quanto os dados simulados variaram em relação as quantidades reais, estes erros foram calculados pela equação 34.

$$\text{Erro Percentual} = [(Quantidade simulada - Quantidade real) / Quantidade real] * 100 \quad (34)$$

Tabela 4 - Valores da simulação e as quantidades reais para o etanol

Código da simulação	Data	Quantidade simulada (l)	Quantidade real (l)	Erro percentual %
1	12/09/2020	788.770,64	763.840,00	3,26
2	14/09/2020	887.900,57	716.325,00	23,95
3	15/09/2020	879.654,29	787.793,00	11,66
4	17/09/2020	836.001,17	906.395,00	-7,77
5	18/09/2020	814.585,47	714.975,00	13,93
6	19/09/2020	788.314,37	1.002.015,00	-21,33
7	21/09/2020	397.274,99	549.010,00	-27,64
8	01/04/2021	916.953,33	812.005,00	12,92
9	02/04/2021	923.351,72	883.098,00	4,56
10	03/04/2021	909.499,06	835.713,00	8,83
11	04/04/2021	938.951,67	788.205,00	19,13
12	05/04/2021	874.695,01	764.080,00	14,48
13	06/04/2021	754.864,61	788.618,00	-4,28
14	07/04/2021	634.019,51	788.040,00	-19,54
15	08/04/2021	791.164,83	859.320,00	-7,93
16	09/04/2021	715.781,92	763.520,00	-6,25
17	10/04/2021	670.964,42	763.920,00	-12,17
18	11/04/2021	691.073,09	788.123,00	-12,31
19	12/04/2021	500.683,11	548.895,00	-8,78
20	15/04/2021	606.432,31	525.140,00	15,48
21	16/04/2021	668.833,56	811.325,00	-17,56
22	18/04/2021	447.675,64	262.928,00	70,27
23	19/04/2021	761.924,75	715.500,00	6,49
24	20/04/2021	813.305,35	968.066,00	-15,99
25	21/04/2021	1.025.498,83	1.050.060,00	-2,34
26	22/04/2021	1.132.598,03	1.145.280,00	-1,11
27	23/04/2021	1.206.409,26	1.150.875,00	4,83
28	24/04/2021	1.184.626,59	1.167.915,00	1,43
29	26/04/2021	318.958,60	242.697,00	31,42
30	27/04/2021	676.560,06	834.313,00	-18,91
31	28/04/2021	1.092.262,24	1.049.620,00	4,06
32	29/04/2021	996.268,88	1.167.793,00	-14,69
33	30/04/2021	725.546,46	1.025.335,00	-29,24
Total		26.371.404,33	26.940.737,00	-2,11%
			Erro médio	0,57%
			Soma dos erros	18,86%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Na Tabela 3 e 4 nota-se que alguns dias possuem erros elevados, estes dias foram dias chuvosos ou que tiveram uma parada na operação industrial por conta de problemas nos equipamentos. Para melhor visualizar as variações dos períodos foram feitos os gráficos 1 e 2.

Ao analisar os erros médios, a simulação do açúcar apresentou um valor baixo, em média o modelo produziu 0,22 % a mais do que o previsto. Enquanto o etanol produziu 0,57% a menos do que o esperado no período analisado. Avaliando todo período analisado, os erros diários positivos anulam os erros negativos como de costume, uma política de controle de estoque adequado suaviza essas oscilações.

O mesmo ocorre ao calcular o erro referente ao valor total da simulação, ou seja, o valor final após simular todos os períodos, o valor do açúcar simulado foi de 0,40% a menos do que o valor real total, enquanto o etanol simulado foi de 2,11 % a menos do que o valor real total.

Uma medida de previsão frequentemente utilizada para analisar um modelo de previsão é o 4.MAD, que segundo Meireles (2013) pode ser calculado pelo módulo do somatório dos erros como mostra a equação 35 e 36.

$$\text{Erro} = \text{Quantidade simulada} - \text{Quantidade real} \quad (35)$$

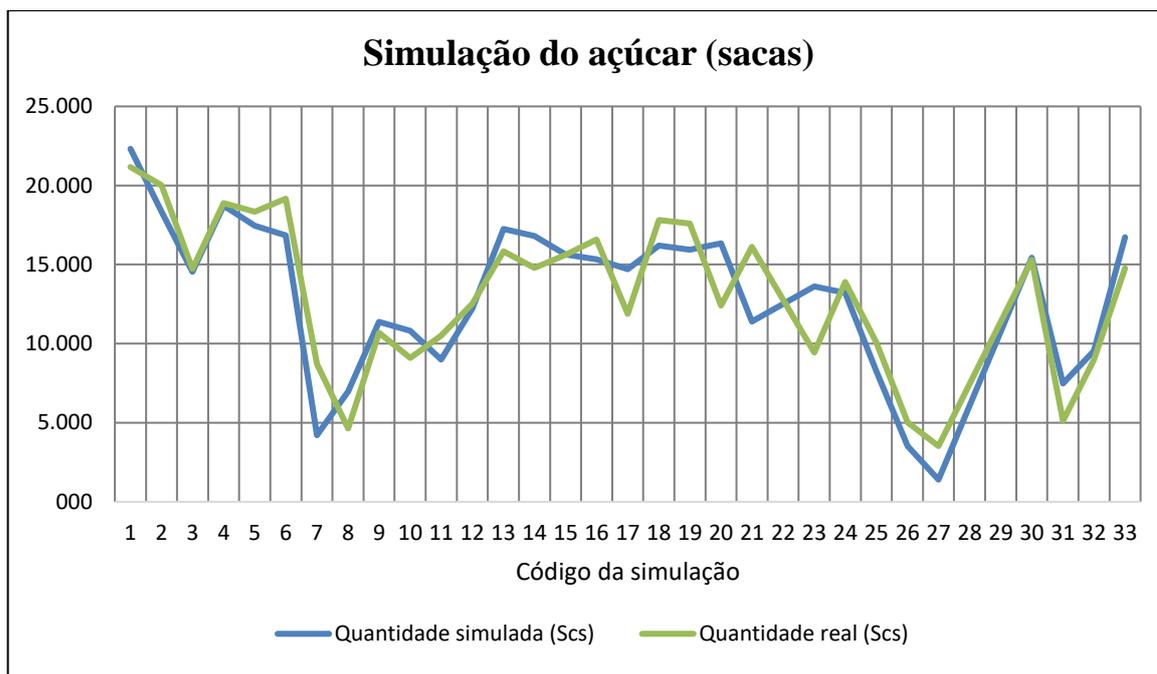
$$\text{MAD} = \Sigma |\text{Erro}| / n \quad (36)$$

Segundo o autor, a multiplicação 4.MAD deve ser menor ou igual ao erro acumulado, $|\Sigma \text{Erro}| \leq 4.MAD$, para que os erros sejam considerados aceitáveis.

Substituindo os valores reais e os previstos nas equações 35 e 36 temos que $|\Sigma \text{Erro}|$ do açúcar foi de 1.575,89, enquanto o 4.MAD foi 6.971,87. Já para o etanol, o $|\Sigma \text{Erro}|$ foi de 569.332,66, enquanto o 4.MAD foi 13.252.867,84. Logo pode-se considerar que o modelo foi validado.

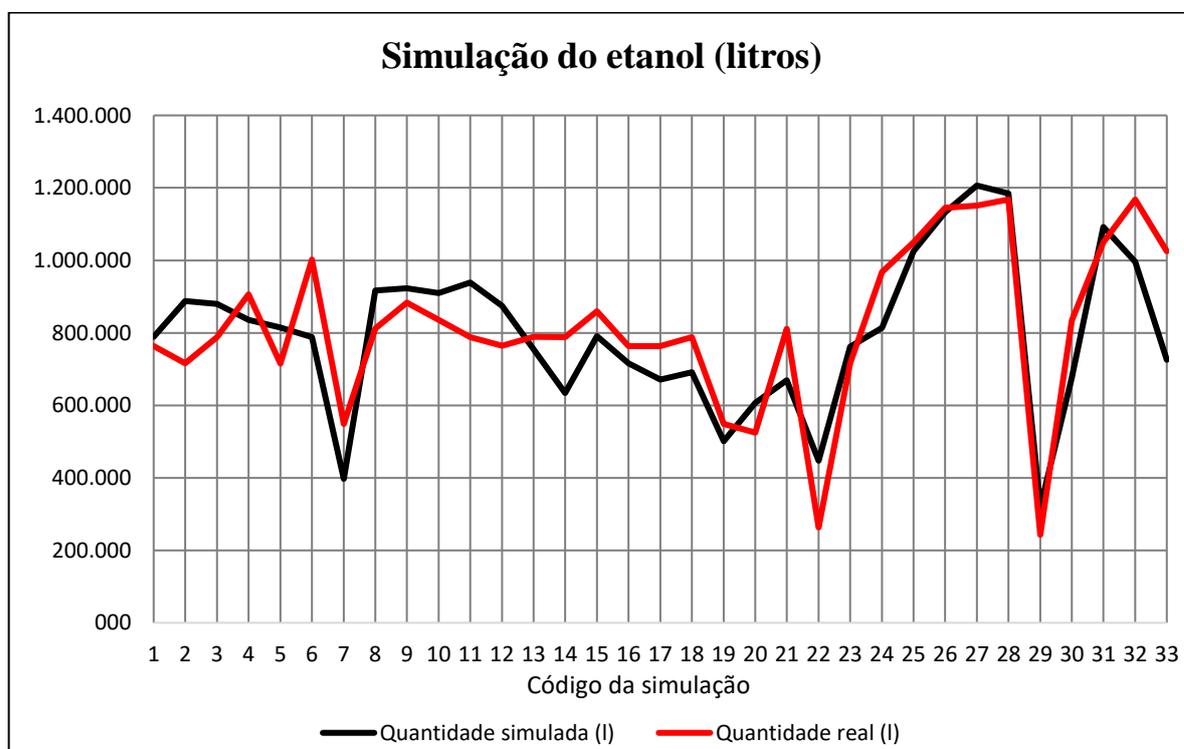
Para melhor visualização das variações durante os períodos, foram elaborados os gráficos 1 e 2, representados logo abaixo.

Gráfico 1: Variação entre os valores simulados e os valores reais em sacas de açúcar



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Gráfico 2: Variação entre os valores simulados e os valores reais em litros de etanol



Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Outro ponto relevante a ser avaliado é a produtividade por tonelada de cana, sabendo-se que a cana moída total para o açúcar foi de 239.243,81 toneladas e que a quantidade de açúcar

simulado foi de 391.626,11 sacas, o que resulta em uma produtividade de aproximadamente 1,64 sacas/tonelada de cana. Da mesma forma para o etanol, considerando a quantidade de 296.767,83 toneladas de cana moída total e a quantidade de 26.371.404,33 litros, obtendo uma produtividade de 88,86 litros/toneladas de cana.

4.7. PERDAS DO PROCESSO

Como visto no modelo e nas equações 30 e 34, o valor de açúcar depende diretamente do pol recuperado, enquanto o etanol depende do ART recuperado, por isso é pertinente visualizar o quanto as perdas representam em relação a quantidade que entrou, como ilustra a Tabela 5.

Tabela 5 - Perdas de Pol e ART

	Toneladas	Porcentagem %
pol entrada	30.348,09	100,00
pol perdido na extração moenda	801,19	2,64
pol perdido bagaço	1.202,56	3,96
pol perdido torta	80,70	0,27
pol perdido total	2.084,45	6,87
pol recuperado	28.263,64	93,13
ART entrada	40.962,98	100,00
ART perdido bagaço	2.001,27	4,89
ART perdido torta	119,23	0,29
ART perdido total	2.120,50	5,18
ART recuperado	38.842,48	94,82

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021

Segundo Payne (1989), as perdas aceitáveis de pol no bagaço e na torta não devem ultrapassar respectivamente os valores de 1,4% e 1%, enquanto que a perda de ART no bagaço fica em torno de 3% e 4%. De acordo com Ribeiro, Blummer e Horii (1999) a perda de ART na torta deve ser em torno de 0,2%. Logo, pode-se concluir que com exceção da perda de pol na torta ocorrida durante o tratamento do caldo, os períodos apresentam perdas maiores do que as recomendáveis, o que pode explicar o porquê dos valores previstos (tanto para açúcar, quanto para etanol) serem menores que os valores reais, ao final da simulação.

Sabendo o quanto de pol (sacarose) foi recuperado e a quantidade de ART recuperado, é possível saber a produtividade referente ao pol e o ART, como foram 391.626,11 sacas simuladas e 28.263,64 toneladas de sacarose recuperada, temos aproximadamente 13,86 sacas/tonelada de sacarose. Do mesmo modo, como foram 38.842,48 toneladas de ART

recuperados e 26.371.404,33 litros de etanol simulados, temos 678,93 litros/tonelada de ART. Com estes valores é possível visualizar o quanto foi perdido em sacas de açúcar e litros de etanol e assim ver a quantia em R\$ perdida.

De acordo com o CEPEA/Esalq – SP, o preço da saca de 50 kg em 18/05/2021 foi de R\$ 115 e que a cotação do litro do etanol hidratado foi de R\$ 3,0488.

Tabela 6 - Impacto financeiro das perdas

	Toneladas	Produtividade	Quantidade perdida	Preço	R\$ perdido
Pol perdido total	2.084,45	13,86	28.890,48 (sacas)	115 R\$/saca	R\$ 3.322.404,88
ART perdido total	2.120,50	678,93	1.439.670,50 (litro)	3,0488 R\$/litro	R\$ 4.389.267,43

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

Nota-se que os períodos simulados apresentam um valor consideravelmente elevado de dinheiro perdido. Estas perdas ocorrerem durante o processamento da cana e influenciam na quantidade a ser produzida de açúcar e etanol. A modelagem e a simulação auxiliam no acompanhamento da produção da usina, facilitando o gerenciamento das metas por meio da visualização de diferentes cenários. Respondendo perguntas como “se minha meta mensal for X sacas de açúcar e Y litros de etanol, quantas toneladas de cana deverão ser processadas por dia para atingir minha meta?”. Ou até mesmo “se chover por X dias e não houver produção, o quanto deverá ser fabricado nos próximos dias para compensar o tempo perdido e assim atingir minha meta?”.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor sucroenergético é responsável por produzir *commodities*, dentre elas o açúcar e o etanol. Por isto, o preço de seus produtos é estabelecido conforme a cotação do mercado, fazendo com que o *mix* de produção se altere. Outro problema é o fator climático, que pode influenciar na quantidade produzida e nas características da cana. O modelo de simulação desenvolvido neste trabalho revelou ser uma ferramenta eficaz para auxiliar a lidar com estes imprevistos de forma mais assertiva, contribuindo para o controle operacional. Uma vez que ao final da simulação o modelo apresentou erros percentuais pequenos (-0,40% para o açúcar cristal e -2,11% para o etanol), além de ser validado pela medida de previsão do erro médio absoluto (4.MAD).

A ferramenta foi construída através das variáveis do processo de uma usina sul mato-grossense. Estas variáveis podem ser alteradas pelo usuário, que pode simular diferentes cenários. Permitindo avaliar qual seria o impacto na quantidade produzida, colaborando no gerenciamento das perdas, que ao todo geraram uma perda de R\$ 7.711.672,31 de lucro.

O modelo revelou-se ser um ótimo aliado nas tomadas de decisões operacionais, auxiliando no planejamento a curto prazo, mas que também pode ser aplicado a médio prazo, para plano trimestrais e/ou para longo prazo, para o plano safra. Além disso, o modelo auxilia no controle das metas a serem atingidas, pois permite prever a quantidade produzida.

Fica como sugestão para trabalhos futuros, expandir o modelo para simular a quantidade de energia gerada, por meio dos dados fornecidos neste estudo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Martinho I. R. de; FRANSCECONI, Milton; FERNANDES, Priscila Pereira. **Manual para Desenvolvimento de Pesquisa Operacional**. São Paulo: Atlas, 2019.

ANDRADE, Eduardo L. de. **Introdução à Pesquisa Operacional: método e modelos para análise de decisões**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

BANKS, Jerry *et al.* **Discrete-Event System Simulation**. 4. ed. [S. L.]: Prentice Hall, 2004. 528 p. Disponível em: <<https://vulms.vu.edu.pk/Courses/CS620/Downloads/Discrete%20Event%20System%20Simulatio%20-%20Jerry%20Banks.pdf>>. Acesso em: 20 jun. 2020.

BARROS, Gabriel A. A.; SOUZA, José A. S. Simulação de um Processo de Produção para uma Linha de Produção de Blocos Vazados em uma Indústria de Cerâmica Vermelha com Auxílio da Ferramenta Arena. *Cerâmica Industrial: A Revista do Técnico Cerâmico Brasileiro*, Belém, v. 23, p. 25-33, out. 2018. Disponível em: <<https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/10.4322/cerind.2018.001/pdf/ci-23-4-25.pdf>>. Acesso em: 20 set. 2020.

BATEMAN, Thomas S.; SNELL, Scott A. **Administração: construindo vantagem competitiva**. São Paulo: Atlas, 1998.

CARVALHO, Marcelo D; SANTORO, Miguel C. Planejamento e Controle Da Produção Vinculados Às Variações de Preços De Açúcar e Álcool no Mercado Futuro Utilizando Programação Matemática. In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Atlas, 2008. p. 2-14. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_tn_sto_069_490_10998.pdf>. Acesso em: 06 ago. 2020.

CHIAVENATO, Idalberto. **Planejamento e controle da produção**. 2. ed. Barueri: Manole, 2008

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (Brasil). **Monitoramento agrícola – Cana-de-açúcar**. 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/monitoramento-agricola>>. Acesso em: 02 jun. 2020.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (Brasil). **CEPEA**. Disponível em: <<https://www.cepea.esalq.usp.br/br/>>. Acesso em: 19 maio 2021.

ESTEVES, Joaquim G. S. **Simulação de sistemas de produção industriais**. 2009. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/59757/1/000134578.pdf>>. Acesso em: 08 jul. 2020.

GIL, Antonio C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Operacional**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

FERNANDES, Silvânio M. **Planejamento e controle da produção em usina sucroalcooleira**. 2009. 168 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção,

Universidade Paulista, São Paulo, 2009. Disponível em:<<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp085727.pdf>>. Acesso em: 22 jul. 2020.

LAW, Averill M.; KELTON, W. David. Basic Simulation Modeling. In: _____. **SIMULATION MODELING AND ANALYSIS**. 2. ed. Singapoure: McGraw·Hill, 1991. p. 1-130. Disponível em:<<https://fac.ksu.edu.sa/sites/default/files/index.pdf>>. Acesso em: 06 jul. 2020.

LAZZARINI, Camila M. C. **Modelagem e otimização da produção em usinas de açúcar e álcool**. 2012. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012. Disponível em:<<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14719/1/Camilla%20Miguel.pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2020.

LINKE, Paula P. *et al.* A importância do planejamento e controle de produção para as indústrias de confecções da cidade de Maringá-PR: a perspectiva dos gestores de produção. **Gestão Industrial**, Ponta Grossa, v. 9, n. 2, p. 307-324, 2013. Disponível em:<<https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/1021>>. Acesso em: 18 jul. 2020.

LOBO, Renato N.; SILVA, Damião L. da. **Planejamento e Controle da Produção**. São Paulo: Érica, 2014.

LOESCH, Cláudio; HEIN, Nelson. **Pesquisa operacional: fundamentos e modelos**. São Paulo: Saraiva, 2009. 244 p.

LONGARAY, André A. **Introdução à Pesquisa Operacional**. São Paulo: Saraiva, 2013.

LOPES, Cláudio H. (org.). **Tecnologia de Produção de Açúcar de Cana**. São Carlos: UAB-UFSCar, 2013.

LOPES, Cláudio H; GABRIEL, Afra V. M. D; BORGES, Maria T. M. R. **Produção de etanol a partir da cana-de-açúcar: tecnologia de produção de etanol**. São Carlos: UAB-UFSCar, 2011. Disponível em:<http://livresaber.sead.ufscar.br:8080/jspui/bitstream/123456789/2669/1/TS_Claudio_ProducaoEtanol.pdf>. Acesso em: 02 mar. 2021.

MARCHI, Leandro A. S. **Modelagem e simulação do processo de produção de açúcar e etanol**. 2019. 62 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências Ambientais, Universidade Brasil, Fernandópolis, 2019. Disponível em:<https://universidadebrasil.edu.br/portal/_biblioteca/uploads/20200313212038.pdf>. Acesso em: 04 jul. 2020.

MARTINS, Roberto A.; MELLO, Carlos H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia para Elaboração de Monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2014.

MEIRELES, Gustavo. **Planejamento e Controle da Produção I**. 2013. Disponível em:<<http://professor.pucgoias.edu.br/sitedocente/admin/arquivosUpload/10107/material/Aula%203%20-%20Previs%C3%A3o%20de%20Demanda%20novo.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2021.

MURTA, Ignacio M. **Análise de uma usina sucroalcooleira alimentada por uma mistura de biomassas**. 2013. 60 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade

Federal do Rio Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em:<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007802.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2020.

NOVACANA. **Um negócio de US\$ 107 bilhões:** panorama do PIB da cadeia sucroenergética. panorama do PIB da cadeia sucroenergética. 2015. Disponível em:<<https://www.novacana.com/n/industria/usinas/negocio-us-100-bilhoes-panorama-pib-cadeia-sucroenergetica-031115>>. Acesso em: 05 jul. 2020.

NOVACANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas.** 2021. Disponível em:<<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>>. Acesso em: 18 fev. 2021.

PAIVA, Rafael P. O. de. **Modelagem do planejamento agregado da produção em usinas cooperadas do setor sucroenergético utilizando programação matemática e otimização robusta.** 2009. 241 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, 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: 02 ago. 2020.

PAYNE, John. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana.** São Paulo: Nobel/Stab,1989.

RANGEL, João J. A. *et al.* Simulação computacional para análise do frete no transporte de cana-de-açúcar – um estudo de caso no estado do Rio de Janeiro. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, [S. L.], v. 3, n. 3, p. 250-261, dez. 2008. Disponível em:<<https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/SGV3N3A6/63>>. Acesso em: 13 ago. 2020.

RIBEIRO, Carlos A. F.; BLUMER, Solange A. G.; HORII, Jorge. Tecnologia do Álcool. In: _____. **Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira.** Piracicaba: Usp, 1999. p. 32. Disponível em:<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2214646/mod_resource/content/1/Apostila%20de%20C3%A1lcool.pdf>. Acesso em: 19 maio 2021.

RIPOLI, Tomaz C. C.; RIPOLI, Marco L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar:** colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros & Marques, 2004.

SANTOS NETO, João B. S. dos. **Modelagem e simulação para o controle do processo produtivo do açúcar cristal na Usina de açúcar e álcool Alto Alegre S/A - Unidade Junqueira.** 2010. 61 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Agroindustrial, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Estadual do Paraná, Campo Mourão, 2010.

SANTOS, Mauricio P. dos. **Introdução à Simulação Discreta.** [S. L.]: [S.N], 1999. Disponível em:<<http://mpsantos.com.br/simul.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2020.

SILVA, João E. A. R. da. **Desenvolvimento de um modelo de simulação para auxiliar o gerenciamento de sistemas de corte, carregamento e transporte de cana-de-açúcar.** 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006. Disponível em:<<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/3478/DissJEARS.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

SOUZA, Luana P. de; OLIVEIRA, Lúgia G.; ALVES, Helton J. Modelagem e simulação da produção de biogás a partir da vinhaça em uma usina sucroenergética. In: congresso sul-americano de resíduos sólidos e sustentabilidade, 2., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: [S.N], 2019. p. 1-7. Disponível em:<<https://www.ibeas.org.br/conresol/conresol2019/V-041.pdf>>. Acesso em: 30 jun. 2020.

TUBINO, Dalvio F. **Planejamento e controle da produção**: teoria e prática. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

UNICA (Brasil). **Histórico do setor**. 2020. Disponível em:< <https://unica.com.br/>>. Acesso em: 26 maio 2020.