

Universidade Brasil  
Campus de Fernandópolis

LEANDRO ANSELMO SANTOS MARCHI

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
AÇÚCAR E ETANOL

MODELING AND SIMULATION OF THE SUGAR AND ETHANOL PRODUCTION  
PROCESS

Fernandópolis  
2019

LEANDRO ANSELMO SANTOS MARCHI

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E  
ETANOL

Orientador: Prof<sup>o</sup>. Dr. Cleber Fernando Menegasso Mansano

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Fernandópolis - SP

2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

M265m Marchi, Leandro Anselmo Santos.  
Modelagem e Simulação do Processo de Produção de Açúcar e Etanol/Leandro Anselmo Santos Marchi.  
São Paulo – SP: [s.n.], 2019.  
62 p.: il.; 29,5cm.

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, como complementação dos créditos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Cleber Fernando Menegasso Mansano.

1.Otimização de Processo. 2.Rendimento e Eficácia.  
3.Identificar Falhas. I. Título.

CDD 664.122

### Termo de Autorização

#### Para Publicação de Dissertações e Teses no Formato Eletrônico na Página WWW do Respetivo Programa da Universidade Brasil e no Banco de Teses da CAPES

Na qualidade de titular(es) dos direitos de autor da publicação, e de acordo com a Portaria CAPES no. 13, de 15 de fevereiro de 2006, autorizo(amos) a Universidade Brasil a disponibilizar através do site <http://www.universidadebrasil.edu.br>, na página do respectivo Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu*, bem como no Banco de Dissertações e Teses da CAPES, através do site <http://bancodeteses.capes.gov.br>, a versão digital do texto integral da Dissertação/Tese abaixo citada, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira.

A utilização do conteúdo deste texto, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, fica condicionada à citação da fonte.

Título do Trabalho: "MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL"

Autor(es):

Discente: Leandro Anselmo Santos Marchi

Assinatura: 

Orientador: Cleber Fernando Menegasso Mansano

Assinatura: 

Data: 19/dezembro/2019



TERMO DE APROVAÇÃO

LEANDRO ANSELMO SANTOS MARCHI

**“MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE  
AÇÚCAR E ETANOL”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade Brasil, pela seguinte banca examinadora:



Cleber Fernando Menegasso Mansano

Prof(a). Dr(a) Cleber Fernando Menegasso Mansano (Presidente)



Luiz Sergio Vanzela


Prof(a). Dr(a) Luiz Sergio Vanzela (Universidade Brasil)



Carlos Alessandro Chioderoli

Prof(a). Dr(a) Carlos Alessandro Chioderoli (UFTM)

Fernandópolis, 19 de dezembro de 2019.



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, por ter me dado força e luz. À minha família por ter me incentivado e por estarem sempre ao meu lado. Aos amigos que de uma forma direta auxiliou-me na realização deste trabalho, e aos professores com o compartilhamento de seus conhecimentos específicos, a Universidade Brasil pela concessão da bolsa de estudo a nível de mestrado, a Usina Alcoeste Bioenergia Ltda pela concessão dos dados de pesquisa e em especial ao Orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Cleber Fernando Menegasso Mansano por ter disponibilizado seu tempo, sua atenção e dedicação.

Dedico esse trabalho para toda minha família!

# MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE AÇÚCAR E ETANOL

## RESUMO

Objetivou-se com esse estudo determinar um modelo matemático simples e que seja eficaz em determinar um procedimento da produção diária de etanol e açúcar de uma usina sucroenergética. Os dados utilizados para o estudo foram coletados diariamente durante dois períodos de cem dias de produção da usina: quantidade de cana-de-açúcar moída, fibra bruta, água e produção de álcool e açúcar. Essas variáveis foram utilizadas como input no modelo, para estimação da produção de etanol e açúcar. Foram feitas simulações para associar os dados do processo de produção (quantidade de cana-de-açúcar, fibra e água) com os dados produtivos (etanol e açúcar). Para a regressão linear múltipla utilizada,  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \epsilon$ , onde: Y é o componente (Produção de etanol (ALC) e Produção de açúcar (ATR));  $\beta_0$  é o intercepto;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , são coeficientes de regressão;  $X_1$  e  $X_2$  são variáveis de entrada (g);  $\ln$  é o log natural e  $\epsilon$  é o termo de erro. De acordo com as equações geradas, observa-se ótimas correlações para estimação da produção de etanol e açúcar durante o período produtivo ( $P < 0,0001$ ). O modelo criado para simular foi baseado em dados simples de input sendo acessível e simplificada para qualquer usina, sendo facilmente programável no software Excel, fornecendo uma previsão de produção diária, auxiliando as usinas a identificar possíveis problemas no processo de produção. Com este estudo foi possível comprovar a efetividade das equações múltiplas para prever a produção de açúcar e álcool dentro de uma usina sucroenergética.

**Palavras-chave:** Otimização de processo. Rendimento e eficácia. Identificar falhas.



# MODELING AND SIMULATION OF THE SUGAR AND ETHANOL PRODUCTION PROCESS

## ABSTRACT

The study was conducted to determine a simple mathematical model that is effective in determining a procedure for the daily ethanol and sugar production from a sugar energy plant. The data used for the study were collected daily during two 100-day periods of plant production: amount of ground sugarcane, raw fiber, water and ethanol and sugar production. These variables were used as input to the model to estimate ethanol and sugar production. Simulations were made to associate the production process data (amount of sugarcane, fiber and water) with the production data (ethanol and sugar). For the multiple linear regression used,  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \epsilon$ , where: Y is the component (Ethanol Production (ALC) and Sugar Production (ATR));  $\beta_0$  is the intercept;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  are regression coefficients; X1 and X2 are input variables (g); ln is the natural log and  $\epsilon$  is the error term. According to the generated equations, there are excellent correlations for estimating ethanol and sugar production during the production period ( $P < 0.0001$ ). The model created to simulate was based on simple input data being accessible and simplified for any plant, being easily programmable in Excel software, providing a daily production forecast, helping mills to identify potential problems in the production process. With this study it was possible to prove the effectiveness of multiple equations to predict sugar and ethanol production within a sucroenergetic mill.

**Key words:** Process optimization. Yield and effectiveness. Identify failures.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Amostragem da cana para avaliação da qualidade.....	22
Figura 2: Lavagem da cana picada.....	24
Figura 3: Esquema ilustrativo do preparo de cana.....	25
Figura 4: Esquema ilustrativo do conjunto de moagem.....	27
Figura 5: Temperat.. da água de embebição.....	29
Figura 6: Esteira de bagaço do último jogo de moenda.....	30
Figura 7: Esquema dos componentes básicos de uma moenda.....	31
Figura 8: Rolo lótus.....	31
Figura 9: Esquema do processo de produção de açúcar.....	36
Figura 10: Relação entre resíduo da predição (ei) e valores preditos pelas equações lineares múltiplas para ALC (Etanol) durante 100 dias de produção para o ano de 2018 (A) e 2019 (B).....	44
Figura 11: Relação entre resíduo da predição (ei) e valores preditos pelas equações lineares múltiplas para ATR (Açúcar) durante 100 dias de produção para o ano de 2018 (A) e 2019 (B).....	45
Figura 12: Produção de litros de etanol estimado pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2018.....	47
Figura 13: Produção de litros de etanol estimado pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2019.....	47
Figura 14: Produção de toneladas de açúcar estimada pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2018.....	48
Figura 15: Produção de toneladas de açúcar estimada pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2019.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Modificações da composição cana-de-açúcar em função tempo estocagem.....	21
Tabela 2: Comparativo de fibra e pol entre camisa convencional (c.c.), e perfurada (c.p.).....	32
Tabela 3: Valores observados na usina durante o processo de funcionamento utilizados para os inputs no modelo (PT, FB e HO), valores de produção observados após o processamento da cana de açúcar (ACL e ATR) e valores estimados pelas equações lineares múltiplas (ACL-2019 e ATR 2019).....	46
Tabela 4: Valores observados na usina durante o processo de funcionamento, relacionando a quantidade de água de embebição e a fibra na safra de 2019.....	49

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ALC	Etanol
AIC	Critério de Akaike
ART	Açúcares redutores totais
ATR	Açúcares totais recuperáveis (Açúcar)
b0, b1	Estimativas dos parâmetros
BIC	Critério de informação Bayesiano
Brix	Sólidos solúveis contidos no caldo
$\beta$	Coeficiente de regressão
c.c	Camisa convencional
c.p	Camisa perfurada
DMA	Desvio médio absoluto dos resíduos
ei	Erro da regressão dos resíduos sobre os valores previstos
e_i	Valor residual para toda observação i
$\epsilon$	Termo de erro
exp	Exponencial
FB	Fibra
HO	Água para embebição
Kg	Kilograma
L	Litro
Ln	Logaritmo natural
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
MN	Valor médio para todos os valores previstos
MNi	Valor previsto para todo i
NI	Número de iterações
rpm	Rotação por minuto
P	Período produtivo
PCTS	Pagamento da cana pelo teor de sacarose
pH	Potencial hidrogeniônico
Pol	Peso de sacarose aparente
PROC REG	Procedimento para análise de regressão linear
PT	Quantidade de cana-de-açúcar

QME	Quadrado médio do erro
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R^2_{aj}$	Coefficiente de determinação ajustado
S	Enxofre
SAS	Statistical Analysis System (Sistema de Análise Estatística)
TCD	Quantidade em tonelada de cana moída por dia
ton	Tonelada
VHP	Very high polarization
X1 e X2	Variáveis de entrada
Y	Componente estimado
%	Porcentagem

## TERMINOLOGIA

A terminologia adotada pela indústria canvieira nem sempre é a mesma em todas as empresas e regiões do país. Ainda, uma série de fluxos materiais recebe nomes não usuais na literatura acadêmica, porém sem similar adequada. Portanto, a seguir serão listados os termos utilizados nessa tese para nomear alguns dos fluxos materiais relacionados a usinas (FERNANDES, 2003).

**Açúcar** – Produto da indústria açucareira, sólido cristalino, orgânico, composto por cristais de sacarose envolvidos, ou não, por uma película de alta ou baixa pureza.

**Açúcares da cana-de-açúcar** – Caldo da cana que contém composição de sacarose, glicose e frutose.

**Açúcares redutores** – É o termo empregado para designar os açúcares (glicose e frutose), denominados e interpretados como açúcar invertido.

**Açúcares redutores totais (ART)** – Representa todos os açúcares da cana de açúcar na forma de (glicose/frutose), ou açúcares invertidos.

**Bagaço** – Resíduo fibroso resultante da extração do caldo de cana.

**Bagacilho** - Resíduo fibroso resultante da extração do caldo de cana com dimensões menores obtidos pelo processo de peneiração.

**Brix** – Sólidos solúveis contidos em uma solução pura de sacarose, ou seja, mede teor de sacarose.

**Calagem ou caleação** – Etapa do processo de clarificação do caldo no qual a leite de cal é misturada ao caldo para neutralizar a solução.

**Caldo clarificado** - Caldo misto após o processo de clarificação.

**Caldo filtrado** - Caldo obtido nos filtros como resultados da filtração do lodo.

**Caldo misto** – Caldo obtido no processo de extração das moendas e enviado para fabricação.

**Centrífuga** – Equipamento usado para separar o açúcar do licor mãe.

**Embebição** - Água aplicada ao bagaço durante o processo de extração.

**Extração** - Percentagem de sacarose extraída da cana.

**Fibra** – É a matéria insolúvel em água contida na cana. A fibra da cana-de-açúcar é formada principalmente de celulose.

**Floculante** – São polímeros de alto peso molecular, solúveis em água, adicionado nos decantadores para sedimentação das impurezas e clarificação do caldo.

**Leite-de-cal** - É uma mistura de suspensão grossa e de solução coloidal de hidróxido de cálcio utilizada para neutralizar o caldo.

**Lodo** – Fração densa obtida da sedimentação do decantador, constituído de material insolúvel.

**Magma** – Mistura de cristais de açúcar oriundo da centrifugação da massa cozida com xarope, para ser utilizado como pé-de-cozimento.

**Massa cozida** - Produto resultante da concentração do xarope ou mel constituído de cristais de açúcar e licor mãe.

**Mel** – Solução resultante da centrifugação da massa cozida.

**Mel final ou melaço** – Mel obtido da massa cozida final (baixo grau).

**Pol** – É a percentagem aparente de sacarose contida no caldo da cana.

**Pureza** – É a percentagem de sacarose contida nos sólidos de uma solução sacarina.

**Sacarose** – É o principal parâmetro de qualidade da cana-de-açúcar, é açúcar cristalizável no processo de fabricação.

**Torta** - Resíduo obtido da filtração do lodo dos decantadores.

**Xarope** – É o caldo concentrado produzido pelos evaporadores de caldo.

# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	17
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	19
2.1 Históricos do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil.....	19
2.2 Aspectos relativos à cultura da cana-de-açúcar.....	19
2.3 Análise da matéria-prima.....	21
2.3.1 Armazenamento de cana-de-açúcar.....	23
2.3.2 Preparo de cana-de-açúcar.....	23
2.3.3 Extração por moendas.....	26
2.3.4 Rolo lótus .....	31
2.3.5 Perdas no setor de moagem.....	32
2.4 Produção de açúcar. ....	33
2.4.1 Tratamento de caldo.....	33
2.5 Produção de Etanol.....	36
2.6 Modelagem matemática aplicada ao processo de cana-de-açúcar.....	37
3 OBJETIVOS .....	39
3.1 Geral.....	39
3.2 Específicos .....	39
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	40
4.1 Desenvolvimento de modelo.....	41
5 RESULTADO E DISCUSSÃO.....	43
6 CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXO A.....	55
ANEXO B.....	59



# 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a produção de cana-de-açúcar cresceu no país consideravelmente, destacando-se entre as potências mundiais na área. Esta produção em larga escala destaca um grande interesse em otimizar os processos de produção de açúcar, garantindo um melhor rendimento industrial, ou seja, a análise de forma clara de todas as etapas que envolve a fabricação do açúcar no país.

A matéria-prima mais importante para indústria sucroenergética brasileira é a cana-de-açúcar. Isso demonstra a importância neste setor agroindustrial que se justifica a necessidade de incrementar o conhecimento, contribuindo com as informações importantes aos processos de produção de açúcar e etanol de qualidade, evitando qualquer tipo de risco ao processo (GROFF, 2010).

Na maioria das usinas sucroenergéticas o processo de fabricação de açúcar é tradicional, e o normal é processar a cana-de-açúcar sem que haja uma preocupação acentuada nas perdas de açúcar que ocorrem no processo de produção (PARKASH, 2015). As perdas no processo além de afetarem o rendimento, diminuem a margem de lucro das empresas, causando prejuízos a sustentabilidade do sistema. Para a diminuição das perdas de açúcar no processo, o ideal seria um monitoramento contínuo em todas as etapas que possam apresentar problemas de eficiência (equipamento com falha ou erro na operação) (OLIVEIRA et al., 2019).

O etanol é uma alternativa ecológica para diminuição no uso do petróleo como combustível, reduzindo emissões de gases de efeito estufa (CIHAK, 2016; RUHUL et al., 2013). Segundo Guevara et al. (2017) o etanol em 2010 substituiu mais da metade do uso da gasolina, fruto da introdução dos veículos flex-fuel em 2003, o que demonstra sua importância na economia. O etanol é produzido por fermentação direta de açúcares fermentáveis (cana de açúcar e milho) ou por hidrólise química e enzimática de amido, fermentados por microrganismos para produzir etanol (ARDILA et al., 2014).

A moagem da cana é basicamente um exercício de separação de materiais, num conceito simples, a cana constitui-se em uma fração sólida, a fibra, e outra líquida o caldo. Estes devem ser separados para a produção do açúcar (HUGOT, 1986).

Para que ocorra uma melhor extração do caldo da cana de açúcar, a etapa de preparo consiste, em picar e desintegrar a cana, rompendo as células que contém o caldo rico em açúcares. Essa etapa tem que ser bem executada para facilitar a extração de caldo pela moagem, aumentando a capacidade dos equipamentos de extração e produzindo um bagaço de melhor aceitação a embebição (MARFANTE, 1993).

As atividades sucroenergéticas normalmente consideram a solução necessária para se adequar a um ou outro indicador de desempenho, e não estendem a análise para implicações em outros processos (HERRERA et al., 2016). Seguindo, essa necessidade a indústria sucroenergética tem procurado, cada vez mais, por simuladores de processos comerciais com o objetivo de fornecer respostas rápidas aos principais desafios que envolvem a produção de açúcar e etanol, visando o projeto e instalação rápida de novas unidades industriais e otimização e expansão das plantas existentes (JORGE et al., 2015).

A produção de açúcar e etanol pode ser amplamente aumentada se o processo é atualizado. A simulação destes processos pode ser realizada de forma a aumentar a produção e minimizar os custos, por simulação baseada em computador, procedimento muito utilizado atualmente para diferentes propósitos da engenharia química. O trabalho de simulação é feito para otimizar diferentes parâmetro de processo para obter o máximo de produtos (RUHUL et al., 2013).

Com as simulações da produção, pode ser elaborado um plano de ação para cada parte do processo, visando a melhoria de equipamento ou até mesmo treinamento de pessoas para uma melhor operação (RODMAN et al., 2016). Uma vez corrigida a redução ou perda de açúcar ou etanol no processo, a sustentabilidade da produção será alcançada. Neste contexto, a aplicabilidade de um procedimento de modelagem matemática simples, capaz de determinar a produção diária de uma usina sucroenergética, adequada a seus próprios padrões de processamento, possibilitará a identificação de diferentes erros e acertos no processo de produção de açúcar e etanol.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Históricos do cultivo da cana-de-açúcar no Brasil**

A cana-de-açúcar surgiu no Brasil em meados do século XVI da necessidade de se colonizar e explorar as riquezas deste território que no momento não tinha pertinência para a econômica de Portugal. Muitos foram os motivos para a escolha da cultura da cana-de-açúcar no Brasil, dentre eles, a terra de massapê, que é o solo ideal para esta cultura, além do bom preço no mercado da Europa, que estava aumentando o seu consumo, transformando-se em uma base forte para a economia da colonização portuguesa no Brasil entre os séculos XVI e XVII (MATTOS, 1942).

As primeiras mudas foram trazidas da Ilha da Madeira, em Portugal, no século XVI por Martim Afonso de Souza, responsável pela instalação do primeiro engenho brasileiro em São Vicente no ano de 1532. Em seguida, muitos outros plantios se proliferaram pela costa brasileira, sobretudo no litoral dos estados do Pernambuco e Bahia – os quais absorveram a maior parte da produção açucareira da colônia. A maior contribuição dos engenhos, contudo, foi o escoamento da produção, agilizando a chegada do produto aos mercados consumidores. Alguns engenhos evoluíram e transformaram-se futuramente em usinas de cana (MATTOS, 1942).

Os ciclos iniciais de expansão da cultura de cana-de-açúcar deixaram de herança, o avanço da fronteira agrícola sobre áreas naturais - principalmente no bioma Mata Atlântica. Práticas agrícolas arcaicas que resultaram na contaminação e mau uso das águas e solos e ainda a consolidação de relações de trabalho que em muito seguiram as tradições e injustiças do período colonial (RODRIGUES; ORTIZ, 2006).

### **2.2 Aspectos relativos à cultura da cana-de-açúcar**

A composição da cana depende de inúmeros fatores, tais como: a idade, variedade, manejo, ambiente de produção e fito sanidade.

A cana-de-açúcar é uma planta cujo teor de sacarose e biomassa varia de acordo com o período do ano em que é colhida, alterando a logística da entrada na

usina de açúcar. Sendo, uma cultura sazonal, variam com a época de colheita o teor de fibra, teor de sacarose, pureza, sólidos dissolvidos, quantidade de água (REIN, 2013).

A composição da cana limpa comparada com cana a diferentes tratamentos na colheita é afetada pela quantidade de pontas e folhas. A presença de pontas e folhas reduz a pureza do caldo. As folhas aumentam o teor de fibra em até 47% e o teor de cinzas em até 62%. As pontas têm efeito de menor relevância, aumentando a fibra em menor proporção, mas aumenta a cinza em até 36% (PAYNE, 1989).

As pontas do colmo limpo não afetam constantemente o teor de fibra, mas reduz a pureza do caldo. Já as folhas aumentam o teor de fibra, reduzindo a pureza do caldo na mesma proporção que as pontas. A presença de pontas e folhas reduz a pureza do caldo de cana em de até cinco vezes (HUGOT, 1986).

A cana é melhorada geneticamente visando um alto rendimento por hectare e um alto teor de sacarose, os tipos de solo, duração de período de crescimento, tipos do sistema de colheita é significativa entre as variedades, que adequa às condições da cultura. Entretanto a dureza da cana e quantidade de fibra varia de uma variedade para outra, e que podem dificultar a saída de caldo das células da cana-de-açúcar, afetando a extração (REIN, 2013).

A cana cultivada sob irrigação e fornecimento de água, apresenta pequenas alterações em sua composição. A estação chuvosa é o fator que determina a época de safra, pois as chuvas ocasionam queda da qualidade e aumento da matéria (terra, palha). A composição da cana depende dos fatores climáticos, que define o teor de sacarose, pureza do caldo e o teor de açúcar invertido para melhores recuperações de sacarose (REIN, 2013).

O estoque deve ser mantido para controle de tempo entre o corte e a moagem. O método de estocagem de cana envolve dupla manipulação e custos adicionais, sendo que o sistema mais empregado é o de rodas, em veículos ou reboques no pátio da usina e descarregados, em função da demanda (REIN, 2013).

Na Tabela 1, são apresentados dados das modificações que ocorrem na composição da cana-de-açúcar em função do tempo de estocagem.

**Tabela 1:** Modificações na composição cana-de-açúcar em função do tempo de estocagem.

<b>Tempo de estocagem</b>	<b>Brix (%)</b>	<b>Sacarose (%)</b>	<b>Açúcares redutores</b>	<b>Pureza (%)</b>	<b>Acidez sulfúrica (g/L)</b>
Normal	15,45	14,0	0,123	88,88	0,49
3 dias	17,30	14,8	0,194	88,54	0,49
6 dias	17,42	14,1	0,318	80,94	0,735
9 dias	17,90	13,9	0,542	77,65	0,784
12 dias	17,93	13,5	0,580	75,29	0,882

**Fonte:** Foreign Agricultural Service/United States Department of Agriculture (2014).

Os veículos rodoviários transportadores de cana são pesados na entrada e na saída da usina (tara) para obter o peso real da cana recebida com objetivo de determinar a quantidade de cana que entra na indústria para que se tenham os seguintes controles:

- Agrícola;
- Pagamento do transporte;
- Pagamento da matéria-prima
- Controle Industrial.

A pesagem dos veículos que transportam a cana é realizada em balança rodoviária tipo plataforma. As balanças possuem células de carga onde os dados registrados eletronicamente e enviados para o setor agrícola, gerencia industrial e administração da usina.

É importante ressaltar que o açúcar é produzido no campo e a função da usina é somente extraí-lo e cristalizá-lo com a máxima eficiência.

### **2.3 Análise da matéria-prima**

Após a pesagem, a cana deve ser analisada pelo laboratório de pagamento de cana por teor de sacarose (PCTS), que é o setor responsável pela coleta e análise da cana. Essas operações são fundamentais para a determinação da quantidade e da qualidade da cana recebida. Os registros coletados são essenciais para calcular a eficiência dos processos industriais e agrícolas e também quantificar o valor a ser pago pela cana-de-açúcar que entrou na indústria.

As amostras de cana são coletas diretamente do veículo que está transportando a matéria-prima, sendo efetuadas diretamente por amostrador vertical (Figura 1). O controle feito no PCTS irá determinar a porcentagem em peso de sacarose aparente (Pol), a porcentagem em peso de sólidos solúveis contidos no caldo (Brix), a porcentagem de fibra da cana, a porcentagem de impurezas vegetais e minerais, teor de açúcares totais recuperáveis (ATR) e açúcares redutores totais (ART).



**Figura 1:** Amostragem da cana para avaliação da qualidade  
**Fonte:** Rossetto (2016).

A fibra na cana é uma mistura complexa de celulose, hemicelulose e lignina e origina-se das paredes celulares, feixes vasculares e da casca da cana. A quantidade de fibra no colmo pode variar dependendo de seu comprimento e diâmetro. A celulose é um polímero de alta massa molecular composta por unidades de glicose. A hemicelulose é composta de unidades de xilose com pequenas quantidades de arabinose. A lignina é uma substância complexa composta de compostos aromáticos fenólicos, que fornece rigidez ou dureza na fibra da cana (REIN, 2013).

Normalmente a cana entra nos depósitos da usina onde é descarregada por meio de pontes rolantes ou por guinchos “hillos”. Também, pode-se descarregar cana inteira, ou picada, diretamente sobre mesas alimentadoras (sua função é interligar a descarga ou estocagem de cana com o condutor principal - esteira de cana), pátios (área delimitada na qual a cana é descarregada e empilhada) ou barracões (GLORIA et al.,1965).

Nesta etapa do processamento da cana-de-açúcar, ocorre perda durante o momento do descarregamento na mesa alimentadora, onde a cana que cai no chão é esmagada no trânsito de caminhões.

Após esta etapa, a cana é transportada para a esteira principal, passando para as próximas etapas de processamento.

### **2.3.1 Armazenamento de cana-de-açúcar**

Perdas de açúcar neste setor ocorrem por estocagem prolongada, esmagamento de colmos por caminhões, garras, carregadeiras etc. (falhas operacionais), remonte de pilhas ou ainda mau gerenciamento da cana estocada. O período de estocagem no pátio não deveria ser superior a 8 horas. A determinação da ordem de grandeza destas perdas é muito difícil já que depende de vários fatores, porém, em alguns casos pode chegar a 0,3 % (MEDEIROS et al., 2003).

Também é frequente a queda de cana no momento em que o hillo (guindaste) está descarregando na mesa alimentadora, pois a cana esmagada pelo próximo caminhão que se aproxima para descarga. Dependendo dos cuidados do pessoal envolvido, esta perda pode ser elevada. Em algumas ocasiões, uma usina com uma moagem de 9.600 TCD (quantidade em tonelada de cana moída por dia) pode chegar a remover e descartar até 96 TCD (sem condições de ser retornada à mesa alimentadora). Isto pode resultar em perda de até 1,0 %. Como estratégia muitas usinas não utilizam pátio de cana para evitar a inversão da sacarose (RODELLA et al., 1989).

### **2.3.2 Preparo de cana-de-açúcar**

A lavagem de cana-de-açúcar deve ser realizada com água  $\text{pH} \geq 8,5$  e visa eliminar a maior quantidade possível de matérias estranhas, terra, detritos provenientes da lavoura, entre outras, evitando-se assim o desgaste por abrasão das esteiras, moenda, bombas e demais equipamentos.

O índice tolerável de matéria estranha na cana é de 3%, mas para cada 1% de matéria estranha que entra na usina se perde 1,5 kg de açúcar por tonelada de cana (FERNANDES, 2003).

Na figura 2 é demonstrado o processo de lavagem da cana picada, em que as perdas são mais elevadas, podendo atingir em mais que o dobro da perda nesse processo em relação ao de cana inteira.



**Figura 2:** Lavagem da cana picada  
**Fonte:** próprio autor.

As perdas de açúcar na lavagem da cana também são bem conhecidas apesar de nem sempre serem totalmente quantificadas, e aumentam de acordo com os seguintes fatores:

- Mais danificada estiver o colmo;
- Maior o volume de água utilizado;
- Maior superfície exposta ao contato com água (lavar cana picada é não é indicado);
- Maior o tempo de contato cana/água;

A lavagem da cana na esteira aumenta a perda por lavagem, pois aumenta a remoção do açúcar aderente às taliscas. Tem sido crescente a tendência das usinas na direção de interromper a etapa de lavagem de cana em virtude dos vários problemas como perdas de açúcar, altos custos envolvidos na instalação e operação do sistema de controle de poluição etc. Dependendo da instalação de alimentação das moendas, pode ocorrer queda de colmos (inteira ou não) embaixo das mesas alimentadoras em maior ou menor quantidade. Na maioria das vezes para a recuperação desses colmos se utiliza o próprio fluxo da água de lavagem, resultando em mais perdas. Acrescenta-se ainda que, enquanto estes colmos estão embaixo das mesas, nas esteiras e taliscas, um processo microbiológico de degradação de açúcar está ocorrendo (ALBUQUERQUE, 2009).



O desfibrador tem como objetivo desintegrar os colmos, preparando-os para uma melhor absorção da água de embebição, e conseqüentemente, uma extração de melhor rendimento. Nesse processo, são utilizadas facas rotativas que possibilitam a preparação da cana-de-açúcar, mediante o quebramento da estrutura dura e ruptura das células para moagem (MARFANTE, 1993).

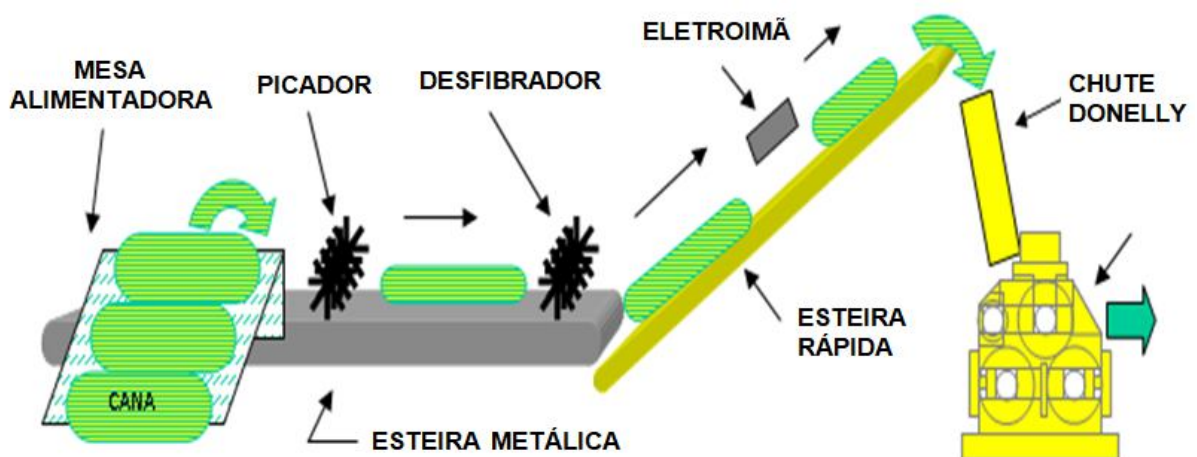
Assim, pode-se dizer que o preparo de cana tem por objetivos:

- a) Promover o rompimento da estrutura do colmo transformando-o num material homogêneo e de fibras longas;
- b) Romper as células de modo a facilitar a extração do caldo nelas contido;
- c) Aumentar a densidade da cana;
- d) Melhorar a eficiência de embebição.

O índice de preparo define o resultado do preparo da cana, este para ser convencional deve estar  $\geq 89\%$  de células abertas (REIN, 2013).

A cana desfibrada é conduzida pela esteira de borracha até as unidades de moagem. Esta esteira é de borracha por que possui um eletroímã para eliminação das partes metálicas, para não danificar os rolos esmagadores (FERNANDES, 2003).

O preparo de cana define a extração e o trabalho das moendas, sendo a recepção da cana, picador desfibrador até o primeiro terno de moenda (Figura 3).



**Figura 3:** Esquema ilustrativo do preparo de cana  
**Fonte:** Canha (2009).

A limpeza da cana constitui a operação da fábrica mais difícil de controlar. O maior problema consiste em manter um colchão de cana fino e contínuo, quando se consegue isto, é assegurada uma boa limpeza.

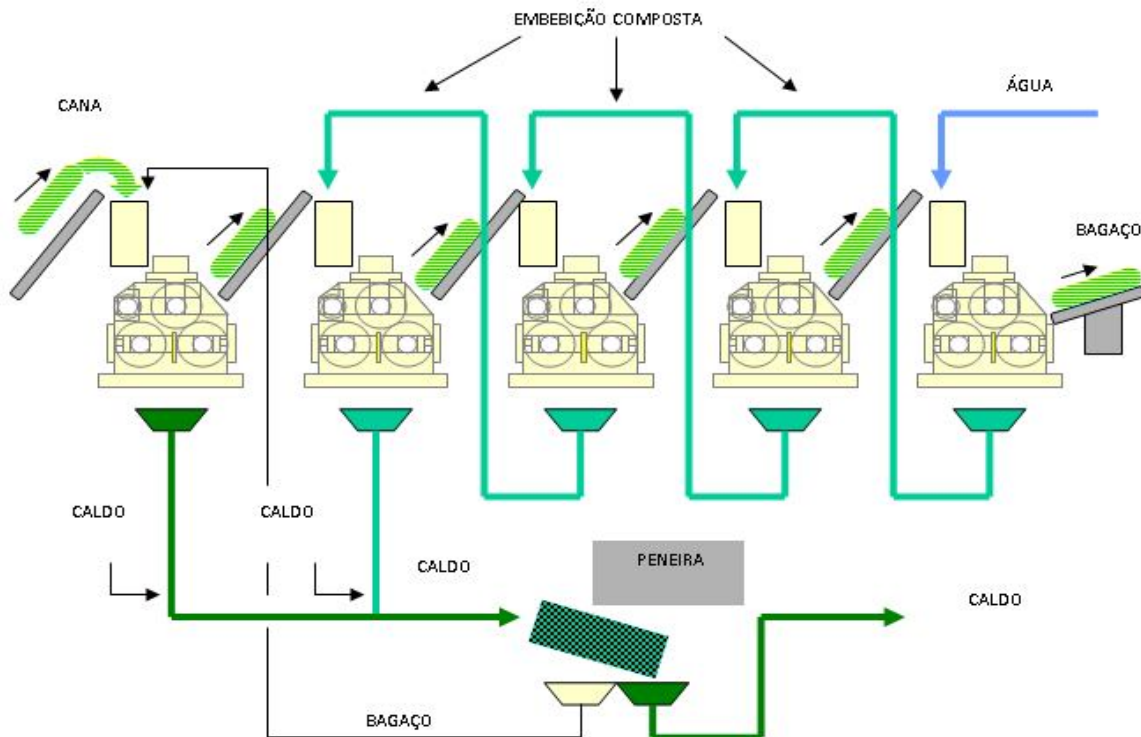
As perdas na limpeza da cana podem ser classificadas em duas categorias: mecânicas, pela presença de pedras e material fibroso, e perda de açúcar, pela lavagem do caldo.

As perdas mecânicas podem ser mantidas num nível de 1%, ou menos, pelo uso de recuperador de cana e pela operação e manutenção adequadas dos equipamentos.

A perda de caldo (pol) depende dos danos causados à cana na colheita, carregamento transporte e limpeza. Um colmo danificado ou mal cortado agudamente pode ser lavado por completo com perdas desprezíveis de pol. Um colmo mal cortado, onde fica parte do colmo junto com a raiz da cana, perde (pol) proporcionalmente à extensão do dano (ALBUQUERQUE, 2009).

### **2.3.3 Extração por moendas**

Nas moendas, a cana é esmagada sob altas pressões entre sucessivos pares de rolos, projetados para extrair o máximo de caldo da fibra insolúvel denominada bagaço. A extração é definida como porcentagem de sacarose da cana removida no caldo bruto. O caldo extraído no primeiro estágio de moagem é de maior pureza do que seguintes estágios. Dispondo de um bom preparo de cana é possível extrair 60 a 70% da sacarose em um terno convencional de moenda. Para extrair mais sacarose nos estágios subsequentes é adicionada água de embebição na camada do bagaço (Figura 4), neste processo são realizadas medições de porcentagem de sacarose (pol), perda na moagem e extração absoluta para mensurar o desempenho da moenda (REIN, 2013).



**Figura 4:** Esquema ilustrativo do conjunto de moagem  
**Fonte:** Martinez (2016).

A moagem da cana é basicamente um exercício de separação de materiais. No conceito simples, a cana constitui-se em uma fração sólida (fibra), e outra líquida (caldo), que devem ser separados para a então produção do açúcar (HUGOT 1986).

A extração do caldo deve ser a maior possível, sendo que moendas possuem uma média de extração de 96% e difusores uma média de 98%.

Tratando-se da separação entre o caldo e a fibra na cana de açúcar, pelo processo de moagem, o caldo é expelido da fibra por aplicações sucessivas de pressão à medida que a cana passa entre os pares de rolos da moenda.

Na prática, a seção de moagem é projetada para uma capacidade nominal a uma recuperação nominal de caldo. Os resultados reais obtido dependem de como a moenda é regulada, operada e mantida.

Uma usina que extrai o caldo utilizando jogos de moenda por compressão deve-se extrair no primeiro jogo de moenda em média 50 - 74% do caldo, que nesse ponto, passa-se a se chamar caldo bruto.

Após cada jogo de moenda, o bagaço recebe constantemente água para penetrar na fibra e facilitar a extração da sacarose ainda existente nas células da cana. Este caldo, após as embebições é denominado de caldo misto.

Segundo Payne (1989), somente pela pressão é impossível expelir mais que 90% do caldo contido nas fibras, pois, a certo ponto, as partes sólidas e líquidas coalescem essencialmente numa só quantidade de massa expelida. Portanto para se recuperar maior volume de caldo, torna-se necessário adicionar água. A água mistura-se com o caldo e certa porcentagem é diluída e expelida no próximo par de rolos. Pela repetição deste processo é possível recuperar substancialmente todo o caldo. Esse processo é denominado de embebição.

Assim, embebição é a técnica de adicionar água ao bagaço para diluir seu caldo remanescente, aumentando a extração de sacarose. A embebição pode ser simples, composta ou com recirculação. A eficiência aumenta da primeira para a última, porém, a mais utilizada é a composta, já que a terceira pode causar sérios problemas de alimentação nas moendas. Esse processo consiste em adicionar água entre os dois últimos ternos e fazer retornar o caldo extraído deste último para o anterior e assim sucessivamente até o segundo terno (HUGOT 1986).

- Embebição simples: quando se usa água quente ou fria, aproveitando-se neste último caso as águas condensadas dos evaporadores ou dos aquecedores.
- Embebição composta: usa o caldo misto do terceiro e o quarto jogo de moenda, na saída do primeiro e do segundo jogo, colocando água somente no último jogo.

Qualquer que seja o tipo de embebição, deve-se ter o cuidado de evitar a formação de infecções microbianas, tal qual o *Leuconostoc mesenteroides* e *Leuconostoc destrictum*, formadores de dextrana (principal causa de inversão, que transforma a sacarose numa substância gelatinosa, dextrana, vulgarmente chamada de canjica, e cujo processo de formação é acompanhado da formação de ácidos acéticos e lácticos) (MARFANTE, 1993).

A razão entre o volume de líquido extraído e a massa de sólidos da matéria-prima tem sido relatada como um fator de grande influência nas extrações (WANG, 2013). Razões elevadas, geralmente, facilitam a extração, pois aumentam a solubilidade dos constituintes da planta. Por outro lado, o extrato obtido será mais diluído, o que torna o processo de concentração e secagem mais caro. Além disso, altos volumes de solvente favorecem a extração de todos os constituintes da planta, e não somente dos de interesse, o que pode originar um extrato menos concentrado.

O ideal é estabelecer o menor volume de solvente capaz de extrair os constituintes de interesse, do modo mais seletivo possível.

A temperatura também altera o equilíbrio da extração. Temperaturas mais altas sempre favorecem a solubilização dos constituintes. Contudo, há que se avaliar se a temperatura também não está aumentando a solubilização dos constituintes indesejados, e se os compostos de interesse não se degradam a temperaturas elevadas (HUGOT, 1986).

A água de embebição tem que ser incluída a uma temperatura de 50 a 65°C, evitando temperatura acima do valor estipulado. Mantendo a água de embebição dentro desse limite estipulado a fibra torna-se plástica e assim é mais facilmente comprimida, possibilitando maior extração de caldo. Em temperaturas, mais elevadas, acima do recomendado, a fibra tornar-se escorregadia e, assim, não consegue aderência suficiente para entrar entre os rolos de moenda ocasionando falha no fluxo de cana no processo. Desta forma, a água de embebição deve estar na faixa de temperatura recomendada (Figura 5).



**Figura 5:** Temperatura da água de embebição  
**Fonte:** próprio autor.

Normalmente em se tratando apenas da fabricação de açúcar os caldos de todos os ternos da moenda são misturados e constituem o denominado caldo misto. Este, porém será enviado para o tratamento de caldo. Com este sistema, consegue-se extração de 94 a 97% e umidade final do bagaço de aproximadamente 50%.

O bagaço sairá do último jogo de moenda (Figura 6) com o mínimo possível de sacarose e com um teor de umidade em torno de 48 a 51%, sendo então encaminhado, por esteiras, para as caldeiras onde servirá de combustível (HUGOT, 1986).



**Figura 6:** Esteira de bagaço do último jogo de moenda  
**Fonte:** próprio autor.

Os números básicos no controle de uma moenda são os de pol, da umidade e fibra do no bagaço final. A rigor, eles fornecem apenas o resultado global, tornando-se importante, também conhecer o desempenho dos ternos individuais, o que requer análise do bagaço de cada terno (REN, 2013).

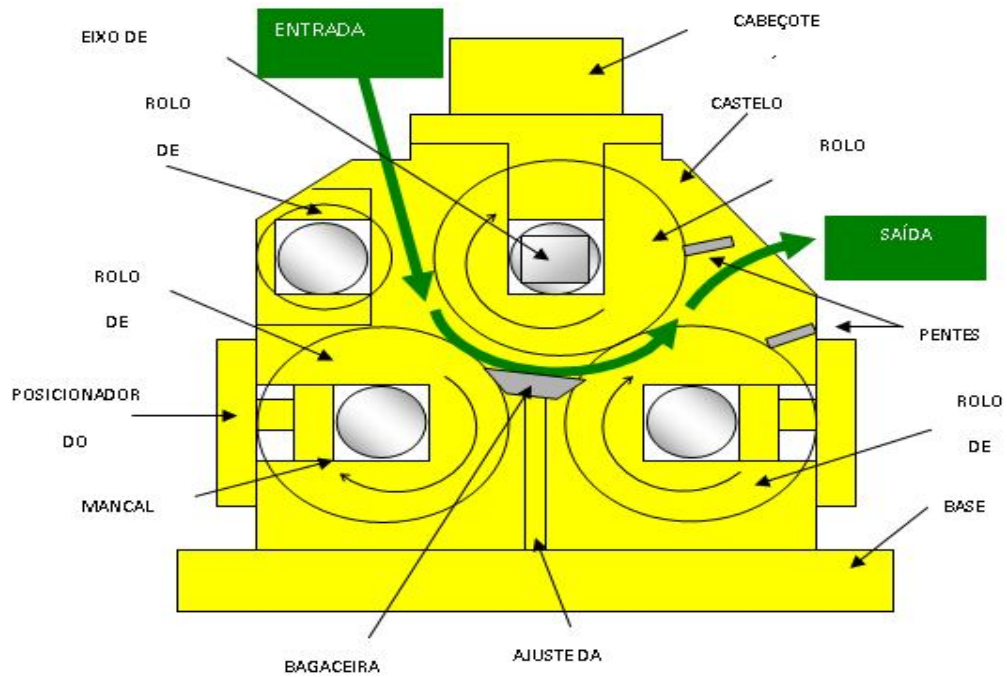
Como o valor convencional de extração incorpora a qualidade da cana no julgamento da eficiência de extração, é viável analisar a pol do bagaço residual (<1,80%) e sua umidade (< 52%) que são resultados ideais para o processamento de uma moenda (HUGOT, 1986).

Na Figura 7, são demonstrados os principais componentes de um terno de moenda e o caminho de entrada e saída da cana do terno de moenda.

- Equação de base da extração

$$\text{Cana} + \text{água de embebição} = \text{Caldo extraído} + \text{Bagaço}$$





**Figura 7:** Esquema dos componentes básicos de uma moenda  
**Fonte:** Martinez (2016).

### 2.3.4 Rolo lótus

O rolo lótus fornece um ponto de drenagem alternativo no rolo superior. Ele consiste de uma camisa de aço fundido tendo uma série de furos de drenagem em cada friso sendo espaçados a intervalos regulares ao redor da circunferência (Figura 8). Estes furos drenam em canais axiais ao longo da largura do rolo, sem contato com a cana que está sendo moída, drenando do seu lado externo (REIN, 2013).



**Figura 8:** Rolo lótus  
**Fonte:** Bononi (2018).

Utilizando o rolo com a camisa perfurada, a indústria melhora a extração, com resultados melhores, que vão mudar conforme a capacidade de cada equipamento de moenda. Mais um motivo importante para instalação do rolo de camisa perfurada é que diminui a umidade do bagaço da cana, pois, o caldo extraído não tem contato com o bagaço no momento da prensagem (CHERUBIN, 2018). A diferença dessa extração é possível ser verificado na Tabela 2.

**Tabela 2:** Comparativo de fibra e pol entre camisa convencional (c.c.), e perfurada (c.p.)

CANA	BAGAÇO	C.C.	C.P.
Fibra % Cana	Fibra % Bagaço:	45,76	46,91
	Pol % Bagaço:	2,02	2,00
Pol % Cana	Umidade % Bag:	51,35	49,00
	Extração % Pol:	95,81	95,95
	Extração	96,00	96,13

**Fonte:** Cherubin (2018).

Com menos umidade o bagaço melhora na eficiência da caldeira no processo de queima para a geração de energia, levando à maior taxa de cogeração. A usina ganha também na operação, por não precisar instalar equipamentos para retirada de caldo da moenda, pois, a drenagem é executada pelo rolo de camisa perfurada, diminuindo custo em manutenção e operação.

### 2.3.5 Perdas no setor de moagem

Segundo Payne (1989), a partir do preparo de cana, desde o momento em que pedaços de cana são lançados fora da esteira e mesmo que sejam posteriormente devolvidos a ela, pode-se afirmar que uma perda de açúcar está ocorrendo. A correta limpeza de uma moenda pode reduzir sensivelmente as perdas ocasionadas por atividade. Essas perdas da ordem de 0,2 %. Caldo escorrendo para fora do coletor, respingos de caldo, quedas de bagaço, caldo estagnado etc., são perdas visíveis, porém, de difícil quantificação. Normalmente estas perdas são da ordem de 0,10 %. Porém, alguns estudos indicam que estas perdas podem chegar até 1 %. Nas ocasiões em que se procura fechar um balanço de pol a partir do peso de caldo



misto estas perdas não são identificadas e coloca inclusive em dúvida, a precisão do sistema PCTS (SILVA, 1978).

## **2.4 Produção de açúcar**

O processo de produção de açúcar consiste basicamente em separar a água da sacarose presentes no caldo. Para isso, faz-se uso de evaporadores de múltiplos-efeitos, tachos de cozimento (cozedores) e centrífugas. Nos evaporadores, o caldo é concentrado até 60-75% de sólidos utilizando vapor de escape no primeiro efeito. Em seguida, o xarope (caldo concentrado) é enviado para os cozedores, onde os cristais de açúcar são formados dentro de soluções supersaturadas, devido à evaporação da água. Os cristais são separados da solução por de centrífugas mecânicas.

### **2.4.1 Tratamento de caldo**

Para obter melhores eficiências no tratamento de caldo é necessário extração de cana sadias, controle automático de pH, alcalinização adequada, vazão estável do caldo, um eficiente processo de decantação, filtração de lodo e uso correto de insumos de clarificação. Esses estágios visam eliminação de não-açúcares e colóides, caldo com baixa turbidez, cor de caldo desejada, melhor taxa de sedimentação, baixo teor de cálcio no caldo clarificado e pH adequado para evitar inversão da sacarose (MARFANTE, 1993).

O caldo é geralmente aquecido em dois ou mais estágios, fazendo uso de vapor de pressão dos evaporadores. O aquecimento do caldo é realizado em trocadores casco-tubo ou aquecedores tubulares (REIN, 2013). O aquecimento do caldo é relacionado com as velocidades de reações químicas com o agente alcalinizante que solidifica e flocula as impurezas insolúveis e reduz a viscosidade do caldo (ALBUQUERQUE, 2009).

A calagem é utilizada para neutralização da acidez do caldo, que conforme varia conforme o método e temperatura para dosagem, visam à redução da cor e turbidez do caldo clarificado. O método de clarificação por alcalinização é barato e eficiente, utilizando-se o hidróxido de cálcio que está na forma de leite-de-cal. O processo consiste de uma mistura de óxido de cálcio e água. O procedimento mais

usado é a caleação intermediária, onde o controle de pH é ajustado em torno de 0,2 a 0,3 unidades acima da neutralização. Nas instalações de caleação intermediária, o tanque existente opera entre o primeiro e o segundo estágio de aquecimento projetado para controlar tempo de resistência do caldo (REIN, 2013).

O pH final do caldo clarificado para os evaporadores é importante pois propõe que quando é necessário produzir açúcar bruto de boa qualidade, o pH deve ser mantido com pH de 7,0 para minimizar perdas de sacarose por inversão. Os caldos alcalinos tornam o cozimento e a cristalização mais lenta (HUGOT, 1986).

Após o tratamento químico-físico, o caldo precisa ser decantado para separar o caldo clarificado do precipitado, em decantadores contínuos que são denominados, multi-bandejas que possuem um tempo de residência de 3 a 5 horas e do tipo rápido de 1 a 1,5 horas (REIN, 2013).

O decantador do tipo rápido é o mais utilizado nas indústrias açucareiras, devido ao desenvolvimento e aplicações de flocculantes para controlar e acelerar a coagulação e sedimentação do lodo. A boa operação dos decantadores tipo rápido requer sistemas confiáveis de preparo de leite-de-cal, preparo de flocculante, regularidade do fluxo de caldo, controle de pH e temperatura de flash do caldo (REIN, 2013).

Os decantadores são instalados com um tanque flash onde o caldo entra numa temperatura constante de 105 a 110°C com finalidade de eliminar o ar dissolvido no caldo ou preso ao bagacilho (ALBUQUERQUE, 2009).

O lodo sedimentado no decantador, que contém de 5 a 10% de sólidos insolúveis, é encaminhado para setor de filtração para remoção dos sólidos denominado torta e caldo filtrado. O lodo antes de ser bombeado para filtração, passa pela mistura de bagacilho no tanque pulmão como auxiliar de filtração, com pH desejável a mistura de lodo/bagacilho de 7,5 a 8,0. A torta removida na filtração é direcionada para adubação das lavouras e o caldo filtrado que possui cerca de 5% de açúcar é enviado para os tanques intermediários (ALBUQUERQUE, 2009).

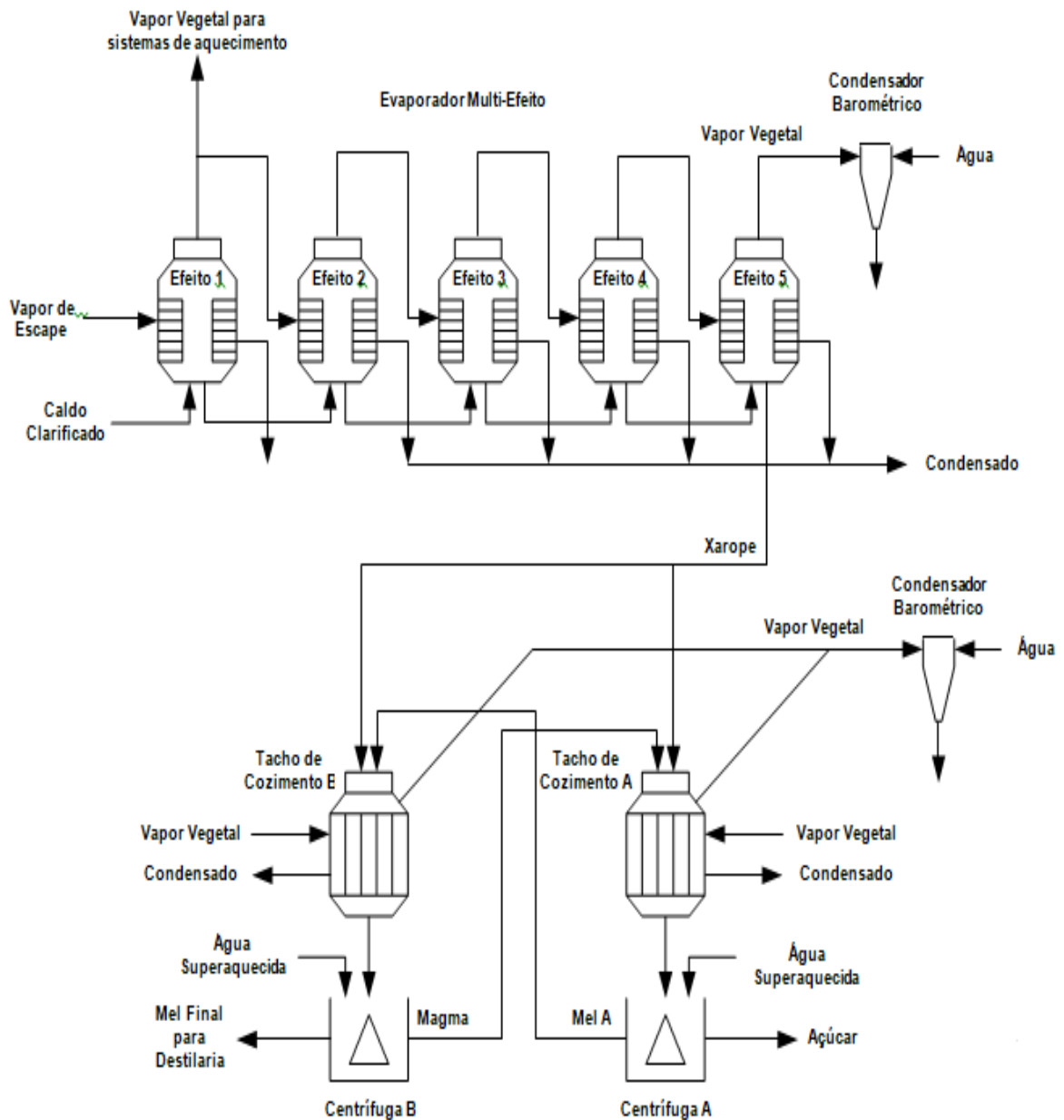
A operação unitária da evaporação é eliminar água contida no caldo clarificado ou adicionada ao processo. Atualmente, a maioria das usinas possui instalações com quádruplo ou quádruplo efeito. Quando evapora o caldo clarificado para remoção de água, realiza a geração de vapor, que são utilizadas em etapas do processo de fabricação do açúcar. A geração de vapor do primeiro efeito fornece

vapor vegetal para os respectivos efeitos, aquecimento do caldo e operação dos tachos de cozimento (ALBUQUERQUE, 2009).

Na etapa de evaporação do caldo ocorre uma perda de açúcares indeterminada, devido à decomposição da sacarose á altas temperaturas. As perdas que podem ser quantificadas estão relacionadas ao multijato, que é um equipamento utilizado para promover a formação de auto vácuo nos evaporadores, formação esta necessária para realizar a evaporação em temperaturas mais baixas.

Esses equipamentos utilizam injeção de água para formação do auto vácuo, e ela acaba por arrastar alguma quantidade de açúcar nesse processo.

As etapas de evaporação fornecem água condensada para alimentação das caldeiras, para embebição na moenda, operação de tachos de cozimentos, centrifugação de açúcar e lavagem de torta. A alta eficiência numa evaporação depende de sangrias de todos os efeitos para aquecimento do caldo, recuperação do flash dos condensados, instalação de trocadores de calor regenerativos. A concentração do caldo deve ter brix na faixa de 65 a 70% (ALBUQUERQUE, 2009). Na Figura 9, é verificado o esquema do processo de produção do açúcar a partir da evaporação até a obtenção do açúcar pronto.



**Figura 9:** Esquema do processo de produção de açúcar  
**Fonte:** próprio autor.

## 2.5 Produção de etanol

A etapa de produção de etanol é dividida em duas operações: fermentação (conversão dos açúcares em etanol) e a destilação. No modelo desenvolvido, essas operações foram modeladas a partir de parâmetros operacionais típicos: (1) Eficiência de fermentação: 90% e (2) Eficiência de destilação: 99,5%

Com relação à conversão dos açúcares, pouco pode-se fazer para redução da geração de entropia, pois se trata de uma reação química inevitável para o

processo. Porém, a busca de melhor eficiência do processo de fermentação pode reduzir a formação de sub-produtos indesejáveis, como aldeídos.

O aumento do teor alcoólico do vinho ao final da fermentação reduziria a carga térmica nas colunas de destilação. Tal aumento requer o desenvolvimento de leveduras capazes de sobreviver em condições de elevado teor alcoólico (ARDILA et al., 2014).

O processo de destilação é basicamente um processo de separação do etanol misturado com a água. No Brasil, são comumente utilizadas duas colunas:

- Coluna A; produto principal é a flegma (vapor em equilíbrio termodinâmico com o vinho) com aproximadamente 50% Vol. de etanol. O produto de topo dessa coluna é o álcool de segunda e o produto de fundo é chamado de vinhaça;
- Coluna B; produto final é o etanol hidratado. O produto de fundo dessa coluna é a flegmaça. Há também a extração de óleo fúsel, composto por produtos secundários da fermentação.

A obtenção do etanol anidro é por sistemas de desidratação regenerativos como por exemplo:

- ciclo hexano,
- monoetilenoglicol
- peneiras moleculares

## **2.6 Modelagem matemática aplicada ao processo de cana-de-açúcar**

A modelagem matemática aplicada ao processo de industrialização da cana-de-açúcar tem inúmeras vantagens, como a adequação de parâmetros, manipular e testar variáveis de processo, obtendo resultados mais rápidos e representativos. Fenômenos e variáveis do problema são descritos por elementos idealizados que representam as características essenciais da situação real, por meio de uma expressão matemática.

A simulação é uma técnica na qual resolve-se muitas questões matemáticas utilizando diferentes modelos e pacotes de software, sobretudo tem muitas vantagens em relação à economia de custos e tempo, em relação a realização de

um grande experimento em laboratório ou utilizando qualquer planta piloto (PRASAD, 2007).

O sistema de controle monitora os demais elementos do sistema de produção. Trata-se de um conjunto de atividades que visam assegurar que o que foi programado seja cumprido, que padrões sejam obedecidos, que a qualidade desejada seja obtida e que os recursos sejam utilizados de forma eficaz (ARDILA et al., 2014).

Por meio de ferramentas de simulação é possível verificar os pontos de conflitos e potenciais de falhas no processo, estabelecendo controles adequados que evitem tais falhas e mantendo o desempenho do processo. A análise de sistemas de grandes dimensões normalmente é uma operação custosa (HERRERA et al., 2016). Reduções são transformações aplicadas ao modelo de um sistema com o objetivo de simplificá-lo e ainda preservar as propriedades do sistema a ser analisado (CIHAK, 2016). A otimização de processos utilizando modelagem faz com que eles sejam simplificados, reduzindo o número de passos e tornando-os mais rápidos e eficientes.

Pelos resultados da simulação observa-se que a estrutura proposta é capaz de lidar com as não linearidades do processo, é capaz de maximizar o lucro econômico e é computacionalmente vantajosa, pois resolve vários problemas (JORGE et al., 2015). Quanto à estabilidade, cada subintegração vertical é comprovadamente estável e, como a estratégia consiste em uma combinação linear dessas sequências de cálculo, espera-se que a estrutura adaptativa seja estável (OLIVEIRA et al., 2019). Modelar um sistema pela dinâmica do sistema é interativo e é um processo contínuo de formular hipóteses, testar e revisar modelos mentais formais. O desenvolvimento de modelos e o uso de ferramentas computacionais e comerciais específicos, o software permitirá avaliar os impactos das novas tecnologias na cadeia produtiva brasileira de bioetanol no conceito de sustentabilidade (CIHAK, 2016).

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 Geral**

Objetivou-se com este estudo modelar o processo de fabricação do açúcar e etanol, com a determinação e utilização de um modelo matemático, diminuindo desta forma, perdas durante o processo de extração desses produtos.

#### **3.2 Específicos**

Desenvolver um modelo matemático que seja capaz de identificar e corrigir erros durante o processo de produção.

Identificar os pontos de maior perda de açúcar e etanol, corrigindo valores de injeção de água, em função de parâmetros prévios, como quantidade de cana e fibra bruta.

Por meio de análises de parâmetros, verificar pontos com falhas e propor as possíveis medidas para correção, promovendo assim a otimização do processo de fabricação do açúcar e etanol.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de produção foram coletados na Usina Alcoeste Bioenergia Ltda localizada na região Noroeste do Estado de São Paulo, o clima da região é tropical, durante 100 dias no período de maio a julho do ano de 2018 (anexo A) e 2019 (Anexo B). As variáveis utilizadas para o estudo foram: quantidade de cana-de-açúcar moída (PT), fibra bruta da cana-de-açúcar (FB) e quantidade de água injetada no sistema produtivo (HO). Essas três variáveis foram utilizadas como input no modelo, para estimação da produção de etanol total e açúcar, de acordo com os dados dos “anexos A e B”.

As amostras foram coletadas na Usina produtora de açúcar e etanol, onde foram analisados água utilizada no processo de embebição da cana-de-açúcar. Os métodos utilizados para análises quantitativas e qualitativas das amostras, foram realizadas na própria usina e no laboratório da Universidade, através dos aparelhos analíticos: sacarímetro para identificar a quantidade de sacarose na amostra, refratômetro para determinar os sólidos solúveis em uma amostra em solução e espectrofotômetro.

Os designs contaram com replicatas das amostras, para estimar o erro experimental e o desvio padrão relativo elevado, pois, nesse caso, os efeitos podem se confundir com os erros. A aleatoriedade da variação das respostas das replicatas, durante o tempo, também indicará a estabilidade do processo. Após avaliar a estabilidade do processo foi aplicado os modelos de previsão.

A adequação dos modelos foi realizada pela análise das diferenças entre os resultados experimentais e os preditos, ou seja, dos resíduos. Os resíduos não são explicados pelo modelo, e, por serem uma forma de erro, devem seguir a distribuição normal, com média zero. Devem, ainda, distribuírem-se de forma aleatória em relação à ordem em que os experimentos foram realizados, à magnitude da resposta predita, e à configuração das variáveis independentes envolvidas na predição. Gráficos da distribuição dos resíduos são ferramentas importantes na avaliação da adequação dos modelos de previsão.

Os avaliadores da qualidade de ajuste utilizados foram: coeficiente de determinação ( $R^2$ ); coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ); quadrado médio do erro (QME); valor do critério de Akaike (AIC); valor do critério de informação



Bayesiano (BIC); número de iterações (NI); desvio médio absoluto dos resíduos (DMA); interpretação biológica dos parâmetros; dispersão dos resíduos estimados pelos modelos e a distribuição dos resíduos studentizado (MANSANO et al., 2012).

#### 4.1 Desenvolvimento do modelo

As variáveis utilizadas no modelo foram transformadas em Ln (logaritmo natural) antes da análise de regressão. Foram realizadas simulações para associar os dados do processo de produção (quantidade de cana-de-açúcar, fibra e água) com os dados produtivos após o processo (etanol e açúcar) obtidos pela produção diária. Utilizou-se a ferramenta PROC REG do software SAS (SAS Institute, Cary, NC, EUA) versão 9.4. Equações lineares múltiplas foram geradas para ajustar a relação entre lnY, componente de produção e lnX, componente produtivo pela usina.

As equações lineares múltiplas utilizadas apresentam três variáveis de entrada para obter uma melhor correlação para produção de etanol total de açúcar, conforme a regressão linear múltipla:

Equação Geral:  $\ln Y = \beta_0 + \beta_1 \ln X_1 + \beta_2 \ln X_2 + \epsilon$ ,

Em que: Y é o componente estimado (produção total de etanol - ALC ou açúcar - ATR);  $\beta_0$  é o intercepto;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , são coeficientes de regressão; X1 e X2 são variáveis de entrada (g); ln é o log natural e  $\epsilon$  é o termo de erro.

Os resultados do processo de produção obtidos na usina foram comparados com os dados produtivos após o processo, seguindo o procedimento proposto por Theil (1966). Nesse procedimento o melhor modelo foi selecionado pelos critérios de informação de Akaike (AIC), quadrado médio do erro de predição (QMEP) e pelo R<sup>2</sup> ajustado. Após o QMEP foi decomposto em erro de tendência central (ETC), erro devido à regressão (ER) e erro devido aos desvios (ED), os quais foram expressos em porcentagem (BENCHAAR et al., 1998).

Os modelos selecionados foram submetidos à análise de resíduos conforme descrito por ST-Pierre (2003). Os resíduos (observado - predito) foram plotados em função dos valores previstos de acordo com o seguinte modelo:

$$e_i = b_0 + b_1 (M_{Ni} - MN) + e_i$$

Em que  $e_i$  é o valor residual para toda observação  $i$ ;  $b_0$ ,  $b_1$  são as estimativas dos parâmetros;  $M_{Ni}$  é o valor previsto para todo  $i$ ;  $MN$  é valor médio para todos os valores previstos;  $e_i$  é o erro da regressão dos resíduos sobre os valores previstos. A regra de decisão baseia-se no pressuposto que: o modelo para ser imparcial a correlação aproxima-se de 1, quando  $R^2_{ajust}$  aproxima-se de 0, ou seja, os resíduos não estão correlacionados com as previsões, e a inclinação ( $b_1$ ) do  $e_i$  em função de  $M_{Ni}$  é zero se o modelo for imparcial.

## 5 RESULTADO E DISCUSSÃO

Com base nos dados do processo de produção, quantidade de cana-de-açúcar (PT), fibra (FB) e quantidade de água (HO) em relação aos dados produtivos obtidos (etanol e açúcar), foi possível calcular equações lineares múltiplas de simulação para produção de etanol (ALC) e para produção de açúcar (ATR) para os anos de 2018 e 2019 a partir de 100 dias de coleta de dados. Foram geradas as seguintes equações de regressão lineares múltiplas para calcular a produção diária de etanol e açúcar estimados da seguinte forma para a Usina Alcoeste:

$$\text{ALC-2018} = \exp(0,59278 \cdot \ln PT - 0,66067 \cdot \ln FB + 0,31865 \cdot \ln HO);$$

(AIC: -275,49; QMEP: 0,252; R<sup>2</sup>: 0,99)

$$\text{ATR-2018} = \exp(0,06726 \cdot \ln PT + 0,96946 \cdot \ln FB + 0,18953 \cdot \ln HO);$$

(AIC: -491,69; QMEP: 0,086; R<sup>2</sup>: 0,99)

$$\text{ALC-2019} = \exp(0,52559 \cdot \ln PT - 1,43682 \cdot \ln FB + 1,06904 \cdot \ln HO);$$

(AIC: -172,3; QMEP: 0,408; R<sup>2</sup>: 0,99)

$$\text{ATR-2019} = \exp(-0,028392 \cdot \ln PT + 1,4860 \cdot \ln FB + 0,19381 \cdot \ln HO);$$

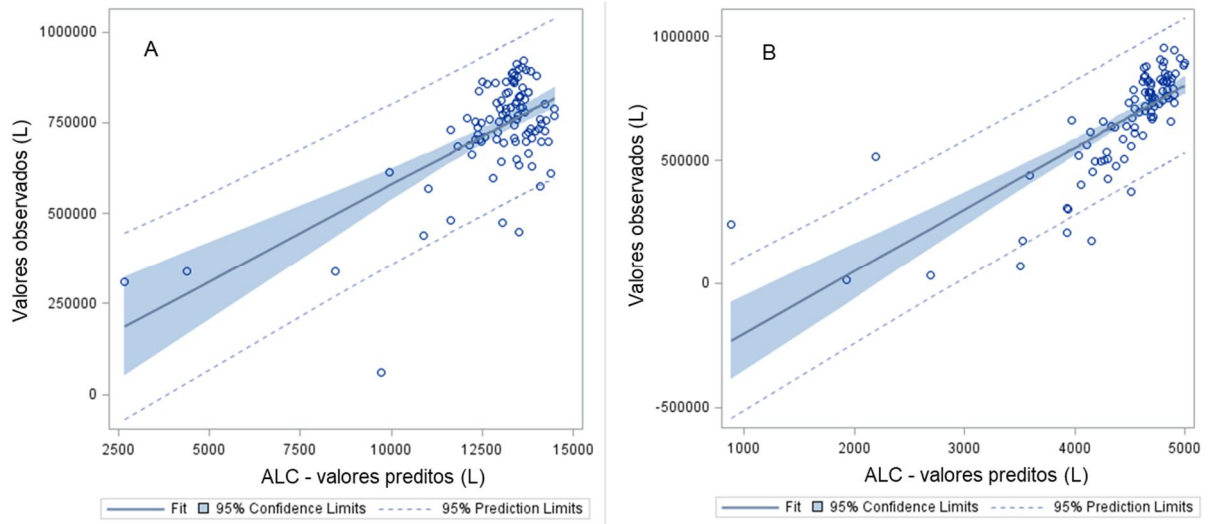
(AIC: -522,73; QMEP: 0,068; R<sup>2</sup>: 0,99)

Em que: ALC - Produção de etanol (L/dia) e ATR para produção de açúcar (Kg/ton). As variáveis PT - quantidade de cana-de-açúcar (ton/dia); FB – fibra bruta da cana-de-açúcar (%) e HO – água (m<sup>3</sup>/dia) utilizada para o processo.

Para avaliação das equações lineares múltiplas foi realizado a análise da composição do desvio que permite a seguinte interpretação: desvio (ei) = escala da diferença (b0) + viés da predição (b1) + precisão (1-R<sup>2</sup>). Analisando a composição dos desvios para as equações selecionadas obtivemos para ALC-2018 (10915 lt = 24,98% + 0,48% + 99,96%); ATR-2018 (1,20 t = 0,32% + 1,61% + 99,97%); ALC-2019 (13748 lt = 3,03% + 1,82% + 99,99%); ATR-2019 (0,85 t = 0,14% + 0,69% + 99,98%) é possível observar que as equações tem uma precisão diferente para cada tipo de produção e ano.

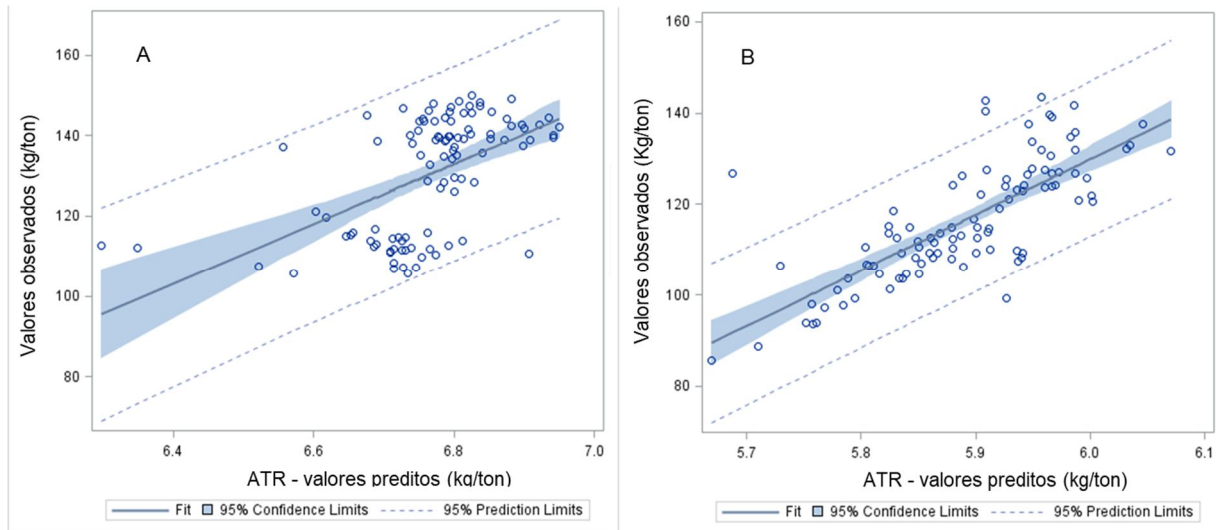
A equação ALC-2019 apresenta o maior viés na predição em relação as outras equações tendo uma tendência em aumentar o erro de predição, já a equação ALC-2018 apresenta a maior escala de diferença estimando desta forma valores superiores aos encontrados, sobretudo estas duas equações foram capazes de predizer a quantidade de etanol produzido. Na Figura 10, pode ser observado a

distribuição do erro das equações múltiplas de estimação de etanol e escala de predição, nos anos de 2018 (A) e 2019 (B) onde a equação ALC-2018 tem tendência a superestimação.



**Figura 10:** Relação entre resíduo da predição ( $e_i$ ) e valores preditos pelas equações lineares múltiplas para ALC (Etanol) durante 100 dias de produção para o ano de 2018 (A) e 2019 (B).

As equações estimadas para ATR-2018 e 2019 apresenta o menor viés na predição em relação as equações para ACL, tendo uma tendência em aumentar o erro de predição. A equação ATR-2018 apresenta a maior escala de diferença estimando desta forma valores superiores a equação ATR-2019, sobretudo estas duas equações foram capazes de predizer a quantidade de açúcar produzida de acordo com fatores estabelecidos (quantidade de cana-de-açúcar, porcentagem de fibra e água injetada). Na Figura 11, pode ser observado a distribuição do erro das equações múltiplas de estimação para produção de açúcar e escala de predição, nos anos de 2018 (A) e 2019 (B).



**Figura 11:** Relação entre resíduo da predição ( $e_i$ ) e valores preditos pelas equações lineares múltiplas para ATR (Açúcar) durante 100 dias de produção para o ano de 2018 (A) e 2019 (B).

Nas figuras 10 e 11 pode-se observar valores plotados apresentando linearidade, demonstrando a efetividade das equações de correção geradas para correção de valores obtidos na usina.

A fim de avaliar a precisão das correções pelas equações geradas, os valores estimados pelas equações foram plotados aos gráficos de regressão linear simples pelos valores observados durante o processo de produção da usina. Na Tabela 3 são apresentados dez exemplos de valores observados e estimados pelas equações geradas com os dados da produção de 2019.

Ainda na Tabela 3, pode-se verificar que os valores estimados para ALC e ATR não são exatamente iguais aos observados, indicando que o processo pode ser melhorado a partir de um ponto ideal estimado pelas equações, uma vez que a mesma padroniza o processo, indicando proporções ideais entre quantidade de cana, porcentagem de fibra e água injetada no sistema. Analisando a quantidade ideal de água em função da quantidade de cana-de-açúcar e fibra, observa-se que em vários dados analisados a quantidade de água foi superior indicando que a mesma foi desperdiçada ou interferiu no processo de extração do caldo. Sugere-se que as equações geradas podem corrigir em tempo real a produção de uma usina.

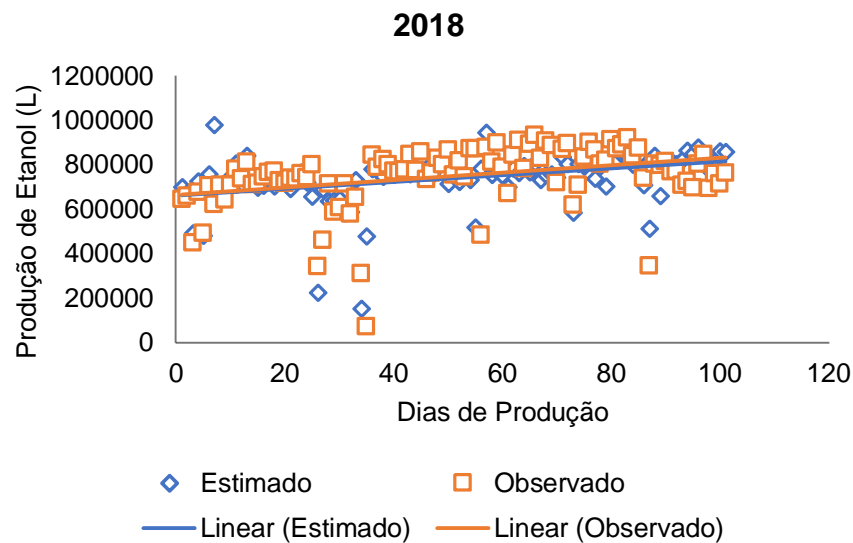
**Tabela 3:** Valores observados na usina durante o processo de funcionamento utilizados para os inputs no modelo (PT, FB e HO), valores de produção observados após o processamento da cana-de-açúcar (ALC e ATR) e valores estimados pelas equações lineares múltiplas (ALC-2019 e ATR-2019).

Observações	Input do Modelo			Valores observados		Valores estimados		
	PT	FB	HO	ALC	ATR	ALC-2019	ATR-2019	HO-2019
	(ton)	(%)	(m <sup>3</sup> )	(L)	(kg/ton)	(L)	(kg/ton)	(m <sup>3</sup> )
1	9.032,600	12.36	3721	791475	145.69	801770	131.00	767.7
2	10.375,180	12.01	3391	821994	118.53	813748	122.80	1.3
3	10.238,180	12.10	3367	764028	120.66	793413	124.05	19.5
4	10.188,260	12.31	3420	765103	114.27	785051	127.67	88.8
5	10.477,620	12.00	3395	770700	115.23	819973	122.65	30.7
6	8.120,820	12.08	2655	538405	115.04	546189	118.96	0.2
7	9.556,840	12.36	3833	826394	130.07	852503	131.55	708.3
8	9.952,340	12.36	3254	731528	113.5	731005	127.29	0.0
9	9.782,340	12.34	3271	757778	115.82	730159	127.18	72.6
10	9.531,920	12.94	4004	823152	143.52	835119	142.03	887.5

Produção de álcool (ALC) e para produção de açúcar (ATR). As variáveis PT - quantidade de cana-de-açúcar; FB – fibra bruta da cana-de-açúcar e HO – água utilizada para o processo. Valores em vermelho – água injetada a mais no processo; Valores em azul – água que faltou no processo; Valores em verde – quantidade ideal de água. Erro de 500 litros foi adotado como ideal.

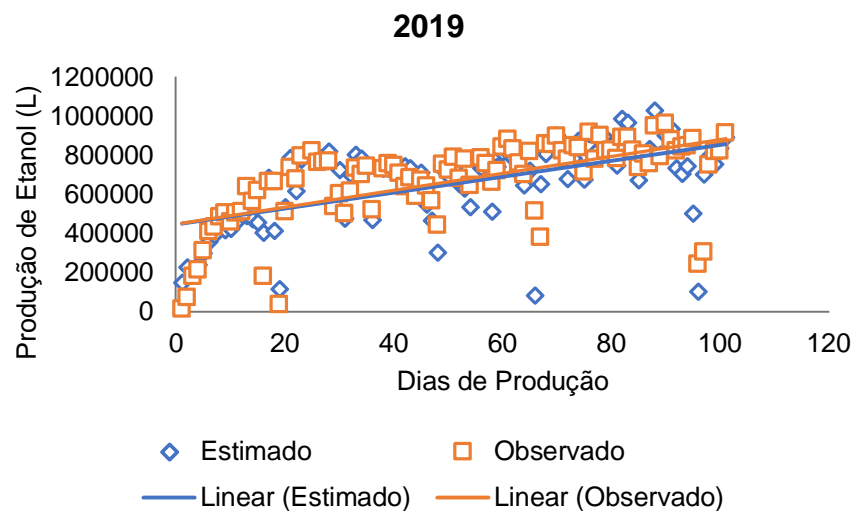
Nas figuras 12 e 13 pode-se observar valores plotados apresentando linearidade, demonstrando a efetividade das equações de correção geradas para correção de valores observados diariamente para a produção de etanol (ALC).

De acordo com as equações geradas, observa-se a melhor correlação para estimação da produção de açúcar (Figuras 14 e 15) durante um período de 100 dias de safra sendo necessário somente a quantidade (ton) de entrada da cana-de-açúcar (PT) e fibra bruta (FB). A produção de etanol pode ser estimada de uma forma segura, no entanto o desvio esperado é maior devido o volume produzido. Por outro lado, os pontos discrepantes observados (Figuras 12 e 13) são ocasionados principalmente pela quantidade de erros na injeção da quantidade de água, interferindo diretamente na produção da usina. Mesmo assim foi possível estimar a quantidade de água utilizada para embebição da cana-de-açúcar, para estabelecer a produção diária de etanol da usina, por meio das equações múltiplas.



**Figura 12:** Produção de litros de etanol estimado pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2018.

**Fonte:** próprio autor.

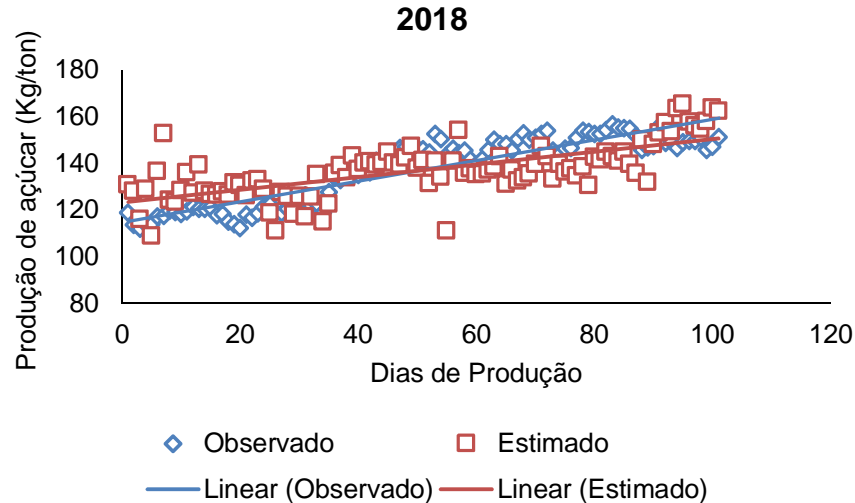


**Figura 13:** Produção de litros de etanol estimado pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2019.

**Fonte:** próprio autor.

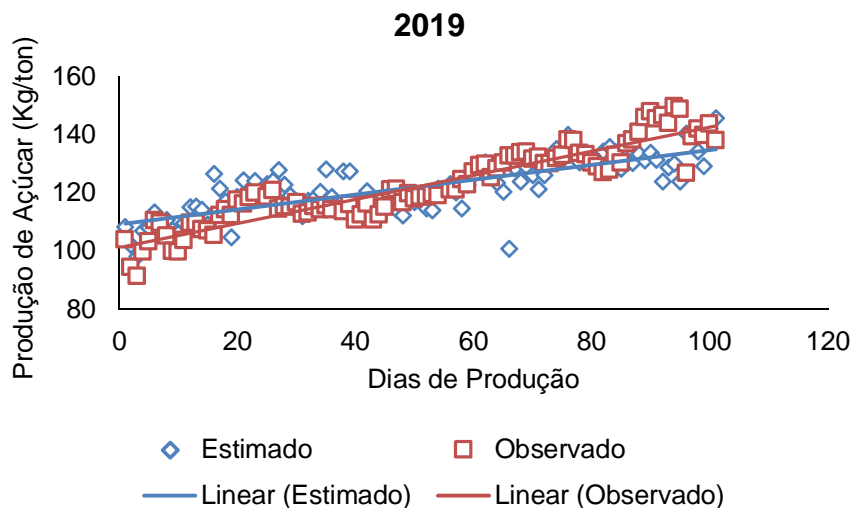
Para a produção de açúcar encontrou-se um leve desvio na estimaco (Figura 13) comportamento diferente do observado para a produo de etanol, sendo sinal que alguns dos *inputs* do modelo (PT, FB e HO) pode apresentar grandes oscilaes. Nesse caso, indcio de oscilaes na quantidade da água que  responsável pelo melhor rendimento durante o processo de lixivao da fibra e

extração do caldo. Sendo assim para a estimação da melhor performance para a extração da cana é necessário utilizar todos os *inputs* nos modelos para ATR (açúcar), desta forma corrigir em tempo real a quantidade de água.



**Figura 14:** Produção de toneladas de açúcar estimada pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2018.

**Fonte:** próprio autor



**Figura 15:** Produção de toneladas de açúcar estimada pelas equações lineares múltiplas geradas diretamente pelos valores de quantidade de cana-de-açúcar, fibra e quantidade de água utilizados no processo, durante 100 dias de produção no ano de 2019.

**Fonte:** próprio autor

Desta forma, entende que a quantidade ideal de água é de extrema importância para o sistema produtivo. A usina extrai o caldo utilizando jogos de moenda por compressão, que no primeiro jogo de moenda extrai em média 50 - 74% do caldo da cana, que, nesse ponto, passa-se a ser denominado caldo bruto



(NOVACANA, 2019). Após cada jogo de moenda, o bagaço recebe constantemente água (embebição) para penetrar na fibra e facilitar a extração da sacarose ainda existente nas células da cana. Este caldo, após as embebições é denominado de caldo misto (MACHADO, 2012). O caldo primário é mais rico em ART que o secundário, melhor para a fabricação do açúcar, uma vez que, para sua fabricação, é necessário promover a concentração desse ART ao longo das fases seguintes (DAL BEM, 2006).

Segundo Payne (1989) somente pela pressão é impossível expelir mais que 90% do caldo contido nas fibras, pois, a certo ponto, as partes sólidas e líquidas coalescem essencialmente numa só quantidade de massa expelida. Portanto para se recuperar maior volume de caldo, torna-se necessário adicionar água. A água mistura-se com o caldo e certa porcentagem deste, diluída, é expelida no próximo par de rolos. Pela repetição deste processo é possível recuperar substancialmente todo o caldo. Esse processo é chamado de embebição (HUGOT, 1986).

Na Tabela 4 pode-se observar a quantidade de água utilizada no processo de extração relacionando com a porcentagem de fibra e quantidade de cana processada em um dia de produção.

**Tabela 4:** Valores observados na usina durante o processo de funcionamento, relacionando a quantidade de água de embebição e a fibra na safra de 2019.

Moagem Dia (Kg)	ATR (Kg/ton)	Extração (%)	Fibra (%)	Embebição m <sup>3</sup>	Embebição (%) cana	Embebição (%) Fibra
10188260	114,27	95,27	12,31	3420	33,6	272,7
10238180	120,66	95,25	12,10	3367	32,9	271,8
9071730	112,94	95,95	11,76	3065	33,8	287,3
9952340	113,50	95,13	12,36	3254	32,7	264,5
9447920	112,34	95,75	11,44	2993	31,7	276,9
9062940	116,11	95,67	11,87	3282	36,2	305,1
9739320	110,51	95,61	11,74	3081	31,6	269,5
8682120	112,33	95,40	11,63	2682	30,9	265,6
9649140	118,42	95,22	11,75	2774	28,7	244,7
9561780	119,39	95,45	11,74	2689	28,1	239,5

Valores em vermelho – água injetada em excesso no processo em relação a fibra; Valores em azul – água injeta no processo próximo a média; Valores em verde – quantidade água um pouco acima da média de 250% de água em relação a fibra.

Apesar da fibra do bagaço ser capaz de absorver cerca de 650% de líquido do seu peso, não é vantajoso usar água de embebição no último terno para trazer o

conteúdo de líquido a este ponto, tornando a injeção de água no momento ideal de extrema importância. A cerca de 250% de água na fibra o efeito na extração se estabiliza de tal modo que as necessidades de vapor e capacidade de evaporação sugerem poucas vantagens de se usar valores mais altos de água (ROSÁRIO, 2013). Finalizando, o bagaço sairá do último jogo de moenda com o mínimo possível de sacarose, e com um teor de umidade em torno de 48 a 51%, sendo então encaminhado, por esteiras, para as caldeiras onde servirá de combustível (HUGOT, 1986).

A ideia de melhoria contínua está relacionada à capacidade de resolução de problemas por meio de pequenos passos, alta frequência e ciclos curtos de mudança (MANHANI et al., 2014). Esses ciclos de mudança são causados pela alternância de momentos de ruptura e de controle do desempenho dos processos.

Alguns autores já estudaram esse complexo processo de extração e com a utilização de modelos matemáticos indicaram algumas melhoras para o processo de recuperação e fermentação de açúcar e etanol para hidrolisados de bagaço de cana (ANDRADE et al., 2012; KUMAR et al., 2015), biomassa lenhosa (WANG; LIU, 2014) e farelo de soja (LUJÁN-RHENALS et al., 2015) utilizados como matéria-prima.

Com a modelagem pode-se ter uma melhor estimativa dos resultados diários, mensais e da safra inteira, diminuindo perdas por falhas operacionais ou de equipamentos atuando com baixa eficiência, resultando em maiores rendimentos, tanto em eficiência de processo e como economicamente viável.

## 6 CONCLUSÃO

Conclui-se que foi possível desenvolver um modelo matemático para determinar os procedimentos de uma usina sucroenergética, através de equações múltiplas:

$$\text{ALC-2018}=\exp(0.59278*\ln\text{PT}-0,66067*\ln\text{FB}+0,31865*\ln\text{HO});$$

$$\text{ATR2018}=\exp(0,06726*\ln\text{PT}+0,96946*\ln\text{FB}+0,18953*\ln\text{HO});$$

$$\text{ALC-2019}=\exp(0,52559*\ln\text{PT}-1,43682*\ln\text{FB}+1,06904*\ln\text{HO});$$

$$\text{ATR-2019}=\exp(-0,028392*\ln\text{PT}+1,4860*\ln\text{FB}+0,19381*\ln\text{HO});$$

Baseado em dados simples de *input* sendo acessível e simplificada para qualquer usina, sendo facilmente programável no Excel, fornecendo uma previsão de produção diária, auxiliando as usinas a identificar possíveis problemas no processo de produção. Esse foi um primeiro estudo comprovou a efetividade das equações múltiplas, depois da coleta de dados de aproximadamente cem dias de produção na Usina obteve-se um modelo rústico e mecanicista que descreve e estima a produção de uma usina sucroenergética.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de fabricação do açúcar**. Recife: Editora Universitária UFPE, p. 275 2009.
- ANDRADE, R. R. et al. Kinetics of ethanol production from sugarcane bagasse enzymatic hydrolysate concentrated with molasses under cell recycle. **Bioresource Technology**, v.130, p. 351-359, 2013.
- ARDILA, Y. C. et al. Simulation of ethanol production via fermentation of the synthesis gas using aspen plus. **Chemical Engineering Transactions**. v. 37, n. 1, p. 637-642, 2014.
- BENCHAAR, C. et al. Prediction of methane production from dairy cows using existing mechanistic models and regression equations. **Journal of Animal Science**, v.76, p. 617-627, 1998.
- BONONI. **Camisa alta drenagem**. 2018. Disponível em: <<http://www.bononiequipamentos.com.br/conteudo/camisa-alta-drenagem.html>>. Acessado em: 20 ago. 2019.
- CANHA, M. A. **Rendimento da fermentação na indústria sucroalcooleira. Dissertação**, Universidade Estadual do Maringá. Paraná, 2009.
- CHERUBIN, N. **Tecnologia Industrial – Camisas perfuradas em moendas**. 2018 Disponível em: <<https://revistarpanews.com.br/tecnologia-industrial-camisas-perfura-das-em-moendas-compensa/>>. Acessado em: 18 ago. 2019.
- CIHAK, M. Modeling and simulation of bioethanol production in Aspen Plus. **Technical Report**. p. 1-12, 2016.
- DAL BEM, A. J.; KOIKE, G. H. A. Modelagem e simulação para o processo industrial de fabricação de açúcar e álcool. **Minerva**. v. 3, n. 1, p. 33-46, 2006.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana de Açúcar**. Piracicaba: Stab e Editora EME, 2ª Ed., p. 240, 2003.
- GLORIA, N.; CATANI, T.; MATUO. Determinação de cálcio e magnésio em plantas, pelo método do EDTA. **Anais da ESALQ**. v. 22, p. 153-171,1965.
- GROFF, A. M. **Fatores de Produção Agropecuária: Apostila, transparências e notas de aulas**. Campo Mourão: PP, Departamento de Engenharia de Produção, FECILCAM, 2010.
- GUEVARA, A. J. H. et al. Evaluation of sustainability of brazilian ethanol production: a model in system dynamics. **Brazilian Business Review**, p. 435-447, 2017.

HERRERA, W. E. et al. Modeling and control of a continuous ethanol fermentation using a mixture of enzymatic hydrolysate and molasses from sugarcane. **Chemical Engineering Transactions**, v. 50, n. 1, p. 169-174, 2016.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, 1986.

JORGE, L. M. M. et al. Simulation and analysis of an industrial column system of bioethanol distillation heated by vapor direct injection. **Engevista**, v. 17, n. 2, p. 254-265, 2015.

KUMAR, S. et al. Continuous ethanol production from sugarcane bagasse hydrolysate at high temperature with cell recycle and in-situ recovery of ethanol. **Chemical Engineering Science**, v.138, p. 524-530, 2015.

LUJÁN-RHENALS, D. E. et al. Fermentation of soybean meal hydrolyzates with *saccharomyces cerevisiae* and *zymomonas mobilis* for ethanol production. **Journal of Food Science**, v. 80, p. 1512-1518, 2015.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da fabricação do açúcar**. Goiás: IFG-Inhumas. 2012. 56 p.

MANHANI, T. M.; CAMPOS, M. V. M.; DONATI, F. P. Sacarose, suas propriedades e os novos edulcorantes. **Revista Uniara**, v.17, n.1, p. 113-125, 2014.

MANSANO, C.F.M., et al. Non-linear growth models for bullfrog tadpoles. **Ciências e Agrotecnologia**, Lavras, v.36, n.4, p. 454-462 Jul./Aug., 2012.

MARFANTE, L. J., **Tecnologia da fabricação do álcool e açúcar**. 1. ed. São Paulo: Ícone, 1993. 147 p.

MARTINEZ, C. O. **Extração e tratamento de caldo**. Apostila. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 2016.

MATTOS, A. R. **Álcool: alcoometria, estereometria e análise**. Rio de Janeiro: Brasil Açucareiro, 1936.

MEDEIROS, S.C.L.; RIBEIRO, S.R.; CONEGLIAN, C.M.R. Impactos da agroindústria canavieira sobre o meio ambiente. In: **Fórum de estudos contábeis**, 3, Limeira. Anais... Limeira, p.7, 2003.

NOVACANA.COM. **Processos de fabricação do etanol**. Disponível em: <<http://www.novacana.com/etanol/fabricacao/>>. Acesso em: 02 ago. 2019.

OLIVEIRA, R. C. et al. Multi-Model adaptive integration of real time optimization and model predictive control. **IFAC Papers OnLine**, v.52, n. 1, p. 661–666, 2019.

PARKASH, A. Modeling of ethanol production from molasses. **Industrial Chemistry**, v.1, n. 2, p. 1-6, 2015.

PRASAD S, ANOOP S, JOSHI H. Ethanol as an alternative fuel from agricultural, industrial and urban residues resources. **Conservation and Recycling**, v. 50, p.1-39, 2007.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. 2ª ed. São Paulo: Nobel/STAB, 1989. 248 p.

REIN, P. **Engenharia do açúcar de cana**. Berlim: Barten, 2013. 878 p.

RODELLA, A.R. Estudo quantitativo de características anatômicas da folha de *Panicum maximum* Jacq. e *Panicum coloratum* L. **Revista Agricultura**, v. 59, p. 163-174, 1989.

RODMAN, A. D. et al. Dynamic simulation and visualisation of fermentation: effect of process conditions on beer quality. **IFAC Dycops-cab**, p. 615-620, 2016.

RODRIGUES, D.; ORTIZ, L. **Em Direção à Sustentabilidade da Produção de Etanol de Cana-de-açúcar no Brasil**. 2006. Disponível em: <[http://www.vitaecivilis.org.br/anexos/etanol\\_sustentabilidade.pdf](http://www.vitaecivilis.org.br/anexos/etanol_sustentabilidade.pdf)>. Acessado em: 20 set. 2019.

ROSÁRIO, F. J. P.; CRUZ, N. J. T. Estratégias competitivas e de inovação na modernização recente da agroindústria sucroalcooleira do Brasil. **Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, p. 1-12, 2013.

RUHUL A. M. et al. Simulation of ethanol production by fermentation of molasses. **Journal of Engineering**, v. 1, n. 4, p. 69-73, 2013.

SILVA, J. G. et al. Energy balance for ethyl alcohol production from crops. **Science**, v. 201. n. 4359, p. 903-906, 1978.

ST-PIERRE, N. R. Reassessment of biases in predicted nitrogen flows to the duodenum by NRC 2001. **Journal of Dairy Science**, v. 86, p.344-350, 2003.

THEIL, H. **Applied economic forecasting**. Amsterdam, North-Holland Pub. Co.; Chicago, Rand McNally, 1966.

WANG, Y.; LIU, S. Kinetic modeling of ethanol batch fermentation by *Escherichia coli* FBWHR using hot-water sugar maple wood extract hydrolyzate as substrate. **Energies**, v. 7, p. 8411-8426, 2014.

## ANEXO A – Dados coletados no ano de 2018

Variáveis utilizadas como input no modelo, para estimação da produção de etanol e açúcar no ano de 2018, quantidade de cana-de-açúcar moída (PT), fibra bruta da cana-de-açúcar (FB) e quantidade de água injetada no sistema produtivo (H<sub>2</sub>O).

Data	Obs	PT (Kg)	FB (%)	H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )
23/04/2018	1	9293180	12,28	1345
24/04/2018	2	9215620	12,22	1225
25/04/2018	3	6461540	11,98	917
26/04/2018	4	9570900	11,73	1554
27/04/2018	5	7219240	11,59	745
28/04/2018	6	8810060	11,86	2035
29/04/2018	7	10304100	11,95	3353
30/04/2018	8	9512940	11,81	1238
01/05/2018	9	9708640	11,66	1270
02/05/2018	10	10224200	11,67	1511
03/05/2018	11	10442240	12,03	1749
04/05/2018	12	10130920	11,94	1294
05/05/2018	13	10115480	11,83	2194
06/05/2018	14	10008380	11,96	1330
07/05/2018	15	9700060	11,9	1308
08/05/2018	16	9665810	11,74	1394
09/05/2018	17	10161440	11,73	1447
10/05/2018	18	9965860	11,96	1251
11/05/2018	19	9502520	12,05	1506
12/05/2018	20	9117200	11,84	1609
13/05/2018	21	9829540	12,01	1215
14/05/2018	22	9581020	12,15	1487
15/05/2018	23	10017180	11,94	1645
17/05/2018	25	9945840	11,99	1361
18/05/2018	26	10431760	11,73	971
19/05/2018	27	1380860	11,6	1490
20/05/2018	28	9303380	11,96	1345

21/05/2018	29	8068760	11,82	1398
22/05/2018	30	9965480	11,69	984
23/05/2018	31	8466300	11,95	1295
24/05/2018	32	8565680	11,83	935
25/05/2018	33	6580660	11,59	1643
26/05/2018	34	8732960	12,07	1778
27/05/2018	35	603740	12,18	1851
30/05/2018	36	5341480	12,38	1107
01/06/2018	38	9579760	11,92	1882
02/06/2018	39	9467460	12,15	1932
03/06/2018	40	9463300	12,09	1621
04/06/2018	41	9327660	12,35	2087
05/06/2018	42	9228440	12,31	1711
06/06/2018	43	8960360	12,41	1838
07/06/2018	44	9262680	12,47	1812
08/06/2018	45	8958220	12,4	1805
09/06/2018	46	8902420	12,27	1980
10/06/2018	47	9397580	12,4	2160
11/06/2018	48	8636460	12,37	1910
12/06/2018	49	8672040	12,3	1902
13/06/2018	50	9293440	12,56	1868
14/06/2018	51	8884520	12,66	2184
15/06/2018	52	8292720	12,45	1720
16/06/2018	53	9139100	12,36	1961
17/06/2018	54	9221100	11,93	1590
21/06/2018	56	7995920	12,03	2336
22/06/2018	57	8881820	12	1754
23/06/2018	58	8134080	11,83	716
26/06/2018	59	8768840	12,09	2190
27/06/2018	60	9054680	11,83	3891
28/06/2018	61	9161600	12,02	1824
29/06/2018	62	9102680	12	1978
30/06/2018	63	8877840	11,84	1955



01/07/18	64	7818560	12,02	1918
02/07/18	65	9593960	12,06	1856
03/07/18	66	9295360	12,4	1717
04/07/18	67	8778340	12,22	2241
05/07/18	68	9871600	11,56	1809
06/07/18	69	9448240	11,6	2286
07/07/18	70	9320380	12,01	1596
08/07/18	71	9508680	11,99	1698
09/07/18	72	9248720	12,01	1807
10/07/18	73	8237620	12,19	2042
11/07/18	74	9126980	12,44	2345
12/07/18	75	9047000	12,22	2200
13/07/18	76	5552080	11,8	2163
14/07/18	77	9160720	11,82	2294
15/07/18	78	9326180	11,63	2192
16/07/18	79	9667300	11,67	2235
17/07/18	80	8552380	11,75	2015
18/07/18	81	9394320	11,98	2035
19/07/18	82	8729820	11,84	1633
20/07/18	83	9415760	12,01	2352
21/07/18	84	9114060	11,88	2422
22/07/18	85	9121960	11,94	2653
23/07/18	86	9210360	11,9	2517
24/07/18	87	8868860	11,92	2362
25/07/18	88	9134360	12,05	2527
26/07/18	89	7226700	12	2315
27/07/18	90	4217660	12,21	2213
28/07/18	91	9009560	12,71	2338
29/07/18	92	8681120	12,84	1144
30/07/18	93	8592400	12,55	2366
10/08/2018	94	8362180	13,1	2288
11/08/2018	95	7692860	13,37	2471
12/08/2018	96	8133180	12,89	2552

13/08/2018	97	8002640	13,53	2791
14/08/2018	98	7780140	13,83	2668
15/08/2018	99	9039460	13,26	2449
16/08/2018	100	8053840	13,06	2613
17/08/2018	101	7429780	13,18	2432
18/08/2018	102	8120800	13,57	2271
19/08/2018	103	7934200	13,52	2817
20/08/2018	104	7949960	13,42	2814

**Fonte:** Usina Alcoeste Bioenergia Ltda.

## ANEXO B – Dados coletados no ano de 2019

Variáveis utilizadas como input no modelo, para estimação da produção de etanol e açúcar no ano de 2019, quantidade de cana-de-açúcar moída (PT), fibra bruta da cana-de-açúcar (FB) e quantidade de água injetada no sistema produtivo (H<sub>2</sub>O).

Data	Obs	PT (Kg)	FB (%)	H <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )
24/03/2019	1	1765700	11,79	1570
25/03/2019	2	5541420	11,81	1355
26/03/2019	3	5612460	11,81	1100
27/03/2019	4	6894400	12,23	1352
28/03/2019	5	6866340	12,03	1622
29/03/2019	6	7307680	12,18	1898
30/03/2019	7	8181720	11,97	1898
31/03/2019	8	8446260	11,85	2120
01/04/2019	9	7922140	11,68	1985
02/04/2019	10	7675420	11,57	2025
03/04/2019	11	8039620	11,74	2157
04/04/2019	12	8154940	11,97	2394
05/04/2019	13	8395900	12,03	2342
06/04/2019	14	8954260	12,05	2203
07/04/2019	15	7587000	11,66	2204
10/04/2019	16	7636780	12,86	2230
11/04/2019	17	10354160	12,14	2933
12/04/2019	18	7024640	12,19	2213
17/04/2019	19	3346300	12,42	970
18/04/2019	20	8698680	12,14	2526
19/04/2019	21	10479460	12,14	3317
20/04/2019	22	8981640	12,1	2834
21/04/2019	23	10443400	12,14	3279
22/04/2019	25	10375180	12,01	3391
23/04/2019	26	10238180	12,1	3367
24/04/2019	27	10188260	12,31	3420
25/04/2019	28	10477620	12	3395
26/04/2019	29	8120820	12,08	2655

27/04/2019	30	9372460	11,73	3099
28/04/2019	31	7737140	11,79	2306
29/04/2019	32	9071730	11,76	3065
30/04/2019	33	9695480	11,69	3336
01/05/2019	34	9647460	11,85	3330
02/05/2019	35	9684780	12,37	3293
03/05/2019	36	7218940	12,15	2453
04/05/2019	38	9952340	12,36	3254
05/05/2019	39	9782340	12,34	3271
06/05/2019	40	10072880	11,66	3082
10/05/2019	41	9447920	11,44	2993
11/05/2019	42	9062940	11,87	3282
12/05/2019	43	9739320	11,74	3081
13/05/2019	44	8682120	11,63	2682
14/05/2019	45	9675340	11,68	2973
15/05/2019	46	8300360	11,93	2581
16/05/2019	47	7480840	11,92	2339
17/05/2019	48	5791040	12,13	1796
18/05/2019	49	9766540	11,88	3102
19/05/2019	50	9759240	11,8	2948
20/05/2019	51	10242540	11,85	3041
21/05/2019	52	9649140	11,75	2774
22/05/2019	53	9561780	11,74	2689
23/05/2019	54	8800620	12,31	2563
24/05/2019	56	10064600	12,12	3157
25/05/2019	57	10262540	11,91	3221
26/05/2019	58	8030640	11,89	2454
27/05/2019	59	9419940	12,03	3266
28/05/2019	60	10205480	12,19	3485
29/05/2019	61	10051260	12,23	3524
30/05/2019	62	9980640	12,44	3501
31/05/2019	63	9546920	12,26	3183
01/06/2019	64	9217260	12,23	2962

02/06/2019	65	9647780	11,96	3114
03/06/2019	66	2267080	12,25	840
05/06/2019	67	8953900	12,48	3119
06/06/2019	68	10156620	12,06	3417
07/06/2019	69	10518340	12,26	3710
08/06/2019	70	10855400	12,09	3682
09/06/2019	71	10055840	11,87	3447
10/06/2019	72	9601500	12,35	3076
11/06/2019	73	10291160	12,51	3475
12/06/2019	74	10396300	12,59	3860
13/06/2019	75	9056940	12,6	3239
14/06/2019	76	10711440	12,82	4035
15/06/2019	77	9651560	12,55	3729
16/06/2019	78	10112620	12,3	3813
17/06/2019	79	10247980	12,39	3847
18/06/2019	80	9556840	12,36	3833
19/06/2019	81	9445980	12,32	3394
20/06/2019	82	10853480	12,42	4151
21/06/2019	83	10851200	12,53	4121
22/06/2019	84	10111940	12,55	3747
23/06/2019	85	8853740	12,41	3200
24/06/2019	86	9652440	12,51	3428
25/06/2019	87	9683520	12,32	3709
26/06/2019	88	10493240	12,29	4338
27/06/2019	89	9032600	12,36	3721
28/06/2019	90	10092040	12,45	3963
29/06/2019	91	9408220	12,21	4143
30/06/2019	92	10187780	12,18	3160
01/07/2019	93	9413880	12,43	3258
02/07/2019	94	9419240	12,44	3420
03/07/2019	95	9489940	12,61	2400
05/07/2019	96	394960	12,76	2612
06/07/2019	97	6922480	12,82	3933

07/07/2019	98	9064320	12,54	3744
13/07/2019	99	9357180	12,36	3454
14/07/2019	100	9531920	12,94	4004

**Fonte:** Usina Alcoeste Bioenergia Ltda.