

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

BEATRIZ BENASSI PEREIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA ESPECTROSCOPIA DE
INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA PAGAMENTO DE CANA POR
TEOR DE SACAROSE**

São Carlos – SP

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

BEATRIZ BENASSI PEREIRA

**ESTUDO DE VIABILIDADE DA ESPECTROSCOPIA DE
INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA PAGAMENTO DE CANA POR
TEOR DE SACAROSE**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal de São Carlos,
sob orientação do Prof. Dr. Renato Lajarim
Carneiro, como requisito parcial para a obtenção do
título de Bacharel em Química Tecnológica.

São Carlos – SP

2021

*Dedico este trabalho aos meus pais,
Raquel e Cairo, pelo amor, carinho e proteção
pela vida inteira. E, ao meu irmão, Lucas, pelo
amor e amizade eterna.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus, por me dar vida e saúde, tornando possível este trabalho;

A meus pais, Raquel Benassi e Cairo Romeu, que têm estado presentes em todos os momentos da minha vida, pelo incentivo, apoio e amor incondicional;

A meu irmão, Lucas Benassi por todo afeto, amor e amizade - estaremos sempre juntos;

A meus avós, Carolina Benassi, Reinaldo Benassi, Carolina Pereira e demais familiares que indiretamente fizeram parte dessa etapa da minha vida;

Ao Prof. Dr. Renato Lajarim Carneiro, por ter me orientado neste trabalho, com paciência e dedicação;

A meus amigos queridos de minha cidade natal, pela parceria e acolhimento em todas as minhas voltas para casa;

Ao handebol UFSCar por me proporcionar experiências incríveis nesses cinco anos;

A meus amigos de São Carlos e Brotas pelo companheirismo e paciência durante toda essa caminhada;

Ao laboratório de Produtos Naturais da UFSCar, em especial a minha querida orientadora de Iniciação Científica, Jéssica Amaral, por todos os aprendizados fundamentais para meu crescimento e evolução profissional;

À empresa Raízen Energia pela oportunidade de trabalho, e a todos os colaboradores, em especial meus líderes e companheiros de serviço Junior Nakanishi, Pablo Gomes e Levi Lopes, por todo ensinamento e apoio;

À Universidade, seu corpo docente, direção e administração, que oportunizaram horizontes que hoje vislumbro.

RESUMO

ESTUDO DE VIABILIDADE DA ESPECTROSCOPIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA PAGAMENTO DE CANA POR TEOR DE SACAROSE.

Este estudo foi desenvolvido em uma indústria sucroenergética, em um laboratório de pagamento de cana por teor de sacarose, onde o pagamento de cana-de-açúcar é determinado através de parâmetros analíticos como grau brix, leitura de pol, teor de fibra, dentre outros. A determinação desses parâmetros é feita por medidas instrumentais que requerem uma intensa atenção do operador, além de um custo elevado. Assim, a proposta desse estudo é demonstrar uma melhoria no processo, com a substituição do método convencional, o qual requer a demanda de muita mão de obra e materiais consumíveis, pela utilização de um espectrofotômetro de infravermelho próximo (NIR) acoplado ao método de automação. Esses modelos seriam utilizados para prever de forma mais rápida e com baixo custo os valores dos parâmetros analíticos reportados anteriormente. Os resultados observados demonstraram que a utilização do equipamento NIR se apresenta como um método robusto para análises de cana-de-açúcar, aumentando a amostragem da matéria-prima, garantindo resultados analíticos confiáveis para pagamento de cana-de-açúcar e com melhor viabilidade econômica quando comparada ao método convencional.

Palavras chave: Cana-de-açúcar; pagamento de cana; sacarose; NIR.

ABSTRACT

FEASIBILITY STUDY OF NEAR INFRARED SPECTROSCOPY FOR PAYMENT OF SUGARCANE BY SUCROSE CONTENT.

This study was developed in a sugarcane industry, in a sugarcane payment laboratory by sucrose content, where the payment of sugarcane is determined through analytical parameters such as Brix degree, Pol reading, fiber content, among others. The determination of these parameters is made by instrumental measurements that require intense operator attention. Thus, the purpose of this study is to demonstrate an improvement in the process, with the replacement of the conventional method, which requires a lot of labor and consumable materials, through the use of a near infrared spectrophotometer (NIR, near, infrared) coupled with the automation method. These models would be used to more quickly and cost-effectively predict the values of previously reported analytical parameters. The observed results showed that the use of NIR equipment is certified as a robust method for analyzing sugarcane, increasing the sampling of the raw material, ensuring reliable analytical results for the payment of sugarcane and with better economic viability when compared to the conventional method.

Keywords: Sugarcane; payment of cane; sucrose; NIR.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Composição cana-de-açúcar	12
Figura 2 – Composição do colmo da cana-de-açúcar.....	13
Figura 3 – Área plantada de cana-de-açúcar no Brasil.....	15
Figura 4 – Espectro eletromagnético	16
Figura 5 – Procedimento de rotina em laboratórios modernos de análise.....	17
Figura 6 – Descrição do método convencional	19
Figura 7 – Fatores que afetam resultados de impureza	20
Figura 8 – Sonda oblíqua em atuação	25
Figura 9 – Fluxograma de posicionamento do equipamento NIR.....	25
Figura 10 – Equipamento com o sistema NIR.....	26
Figura 11 – Fluxograma do sistema de análise NIR	27
Figura 12 – Gráfico de dispersão de Brix.....	28
Figura 13 – Gráfico de dispersão de Pol	29
Figura 14 – Gráfico de Dispersão de Fibra	30
Figura 15 – Comparativo de ATR mensal entre os métodos.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Divisão do espectro eletromagnético na região do infravermelho em três partes principais	16
Tabela 2 – Tipos de sonda e suas características	24
Tabela 3 – Comparativo de tempo entre método convencional e método futuro.....	31
Tabela 4 – Comparativo de custos entre diferentes métodos	32

LISTA DE ABREVIACÕES

ATR – Açúcares Totais Redutores

BA – Boletim de Análise

CONSECANA - Conselho dos produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo

CTC – Centro de Tecnologia Canavieira

IAA – Instituto de Açúcar e Álcool

IR - Infravermelho

IR próximo - Infravermelho próximo

IR médio - Infravermelho médio

IR distante - Infravermelho distante

MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

NIR - Near Infrared

PBU - Peso Bolo Úmido

PCTS – Pagamento de cana por teor de sacarose

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3.2. O SETOR SUCROALCOOLEIRO	14
3.3. ESPECTROFOTOMETRIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO.....	15
3.4. A QUIMIOMETRIA PARA ANÁLISES DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	17
4. MATERIAIS E MÉTODOS	18
4.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL	18
4.1.1. Determinação de Fibra Calculada.....	19
4.1.2. Determinação de Fibra Calculada.....	19
4.1.3. Determinação de Impureza Mineral	20
4.1.4. Determinação de Pol	20
4.1.4.1. Determinação de Pol Calculada.....	21
4.1.4.2. Determinação da Pureza do Caldo.....	21
4.1.4.3. Fator de transformação da Pol% do Caldo em Pol% da Cana	22
4.1.4.4. Pol da Cana %	22
4.1.4.5. Determinação de AR do Caldo.....	22
4.1.4.6. Determinação AR do Caldo Corrigido	22
4.1.5. Determinação de ATR.....	23
5. VALIDAÇÃO DO MÉTODO NIR	23
5.1. ANÁLISE PELO MÉTODO NIR	23
5.2. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS COMPARATIVOS.....	26
6. RESULTADOS	27
7. VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL.....	31
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 1.700 milhões de toneladas de cana-de-açúcar são produzidas anualmente em 24 milhões de hectares em todo o mundo. O Brasil é atualmente o maior produtor mundial da planta, pois apresenta fatores edafoclimáticos favoráveis, com destaque para o estado de São Paulo, que corresponde por 55% da área plantada no país (INVESTE SP, 2006). A cana de açúcar possui como principal característica mecanismos fisiológicos altamente evoluídos para produção e acúmulo de sacarose. Considerando que a sacarose é a principal matéria prima energética, o interesse industrial e financeiro em grandes e produtivos cultivos aumentou.

Em razão do crescimento do mercado sucroalcooleiro ao longo dos anos, surgiu a necessidade da implantação de um sistema de pagamento de cana-de-açúcar. Assim, houve a criação do IAA – Instituto do Açúcar Álcool, que tinha como objetivo ser responsável pelas diretrizes dos procedimentos em geral, como fiscalização e pagamento, que implantou o Sistema PCTS (Pagamento de Cana pelo Teor de Sacarose) nas usinas, em 1965, pela Lei 4.870 (CONSECANA PE, 2011). Após a extinção do IAA, e com a abertura do mercado, surgiu para o setor a necessidade da criação de uma entidade que fiscalizasse o pagamento, desenvolvimento, manutenção etc., oportunidade em que foi criado, em 1998, o CONSECANA (Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo). A partir deste Conselho, foi criado também o pagamento da cana pelo ATR (Açúcar Total Recuperável) e não mais pelo teor de sacarose (PCTS), onde as especificidades para algumas regiões variam de acordo com as características da matéria-prima.

A partir disto, as unidades industriais tornaram-se responsáveis pela avaliação da qualidade da matéria prima que estão a receber, através de análises realizadas pelo método convencional padronizado pelo CONSECANA, onde equipamentos, reagentes e processos analíticos são descritos e padronizados.

Com o avanço da automação nas usinas sucroenergéticas, surgiu a possibilidade de melhoria do processo analítico com a implementação de um equipamento NIR (infravermelho próximo) que utiliza princípios da quimiometria para quantificação do teor de sacarose.

A utilização dessa técnica tem como objetivo substituir as análises convencionais, e sua implementação tem como base a redução de custos de mão-de-obra e de materiais consumíveis, confiabilidade, rapidez e agilidade nos resultados das análises de cana-de-açúcar.

2. OBJETIVOS

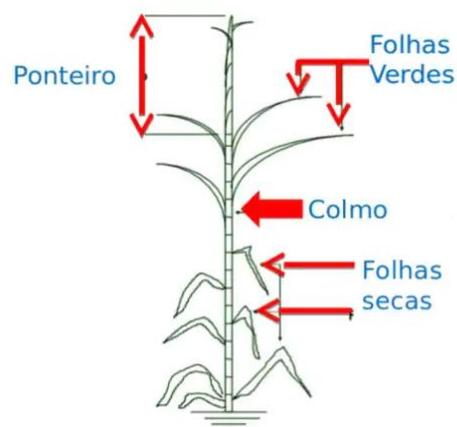
Este estudo tem como objetivo otimizar o processo de análises quantitativas de sacarose em cana-de-açúcar implementando a tecnologia de infravermelho próximo (NIR) como principal método analítico. Os objetivos específicos são: (i) Descrever o processo atual que opera através do método convencional em usinas sucroalcooleiras; (ii) Analisar a viabilidade financeira da aquisição e utilização na rotina do equipamento NIR; (iii) Descrever o processo novo que opera com auxílio de técnicas quimiométricas acopladas à automação do sistema.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A CANA DE AÇÚCAR COMO MATÉRIA PRIMA

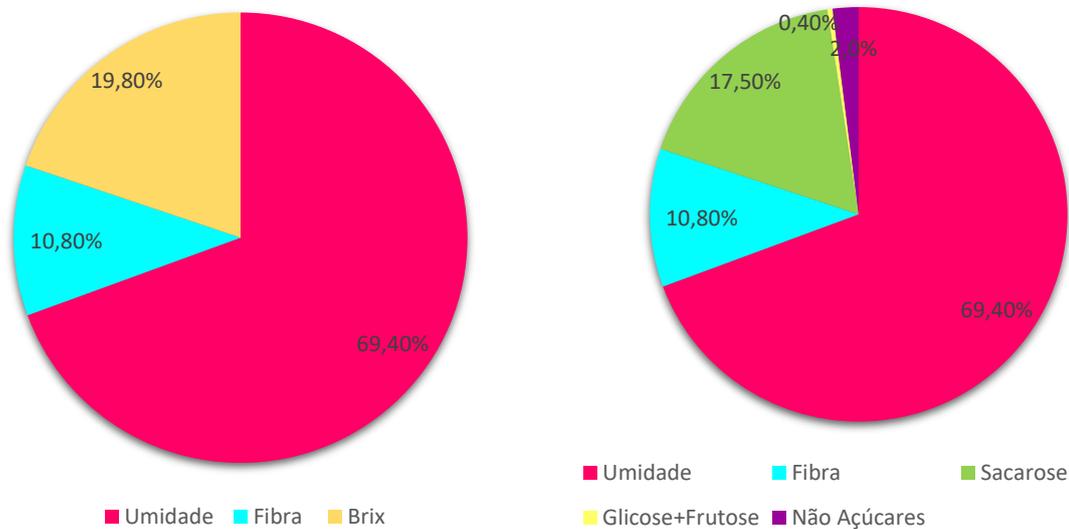
A cana de açúcar é uma planta de um grupo de espécies de gramíneas perenes altas do gênero *Saccharum*, nativas das regiões tropicais do sul da Ásia e da Melanésia, e utilizadas principalmente para a produção de açúcar e etanol. Tem caules - que podem também ser chamados de colmo - robustos, fibrosos e articulados que são ricos em sacarose (NAANDANJAIN, 2017). A Figura 1 apresenta a composição geral da cana, com colmo e folhas.

Figura 1 – Composição cana-de-açúcar



Fonte: RODRIGUES, 2015.

O colmo (caule) da cana-de-açúcar é constituído, em sua maior quantidade de caldo e sólidos insolúveis em água, conforme figura 2.

Figura 2 – Composição do colmo da cana-de-açúcar

Fonte: (CTC, 2014).

Os fatores necessários para uma produção de derivados de cana de açúcar são diversos, dentre eles: (i) elevado teor de sacarose; (ii) baixo teor de fibra; (iii) ausência ou pouco florescimento; (iv) elevada resistência a pragas e doenças; (v) pouco exigência em fertilidade e umidade; (vi) adequação da variedade ao ambiente (MENEGUETTI, 2010).

Além das características agrônômicas da cana, grau de maturação, a forma da colheita e a quantidade de impurezas vegetais e minerais que podem interferir na quantificação e qualificação dos valores pagos, essas características podem também interferir no processo produtivo, podendo gerar um aumento no consumo de insumos e desgaste dos equipamentos.

Quando a cana está pronta para ser processada, ela é colhida e enviada para a indústria. As formas de colheita podem se dividir em dois tipos: manual e/ou mecanizada. Sendo que para haver a colheita manual é necessário queimá-la antes, ainda no campo, o que ocasiona aumento da poluição do ar, efeitos negativos ligados a saúde populacional e empobrecimento do solo (OLIVEIRA, 2000).

Em relação às opções de sistemas de colheita, as operações de corte, carregamento, transporte e recepção da matéria-prima podem ser resumidas em manual, semi mecanizado e mecanizado, onde na forma manual o corte e o carregamento são realizados manualmente, podendo haver o transporte intermediário. No sistema semi mecanizado ocorre o corte manual

e o carregamento da matéria prima através das carregadeiras mecânicas, que é o transporte mais utilizado. Por fim, no sistema mecanizado a cana é recolhida por colhedoras e carretas de transbordo, empregando somente mão-de-obra especializada, como operadores de máquinas e tratoristas, sem a necessidade do emprego de trabalhadores braçais. Esta é a maneira mais eficiente, mas se a execução do trabalho não for bem feita, as perdas em eficiência serão maiores, em razão das impurezas arrastadas (CPT, 2019).

3.2. O SETOR SUCROALCOOLEIRO

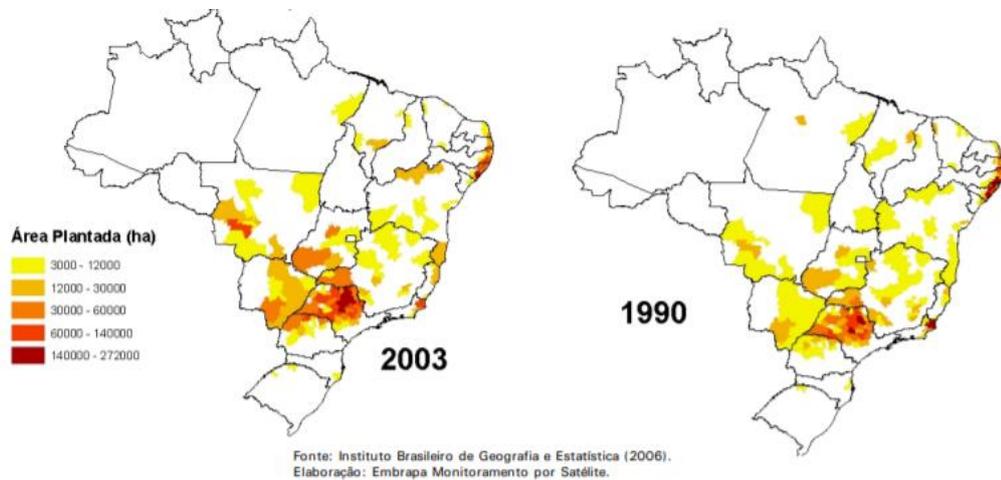
A cultura da cana-de-açúcar está intrinsecamente ligada à história e ao desenvolvimento do Brasil. Desde a época da Colonização, a cana tem experimentado um grande desenvolvimento agrônomo e industrial, pois o Brasil oferece as melhores condições edafoclimatológicas para a sua exploração quando comparamos a qualquer outro país. Por essa razão, observou-se um aumento na cadeia produtiva, devido à dimensão representada pelo valor de sua produção e exportação ao longo do tempo, e conferindo aos que detém sua propriedade um enorme poder econômico e político (CHEQUIN, 2015).

Uma das características marcantes do setor sucroalcooleiro nacional foi a produção integrada, ou seja, a atividade agrícola vinculada à atividade industrial. Essa prática esteve presente desde o início das atividades do setor, e se manteve até os dias atuais, reafirmando a preferência do Brasil por esse método de produção.

O nosso complexo sucroalcooleiro é considerado o mais moderno do mundo, onde o Brasil detém o título de maior produtor mundial, exercendo a liderança em todos os segmentos: cana-de-açúcar, açúcar e álcool.

A cana-de-açúcar brasileira é direcionada, basicamente, para a produção de açúcar e de álcool em proporção aproximada de 50% para cada um. Nos demais países produtores de cana, a totalidade é destinada para a produção de açúcar. A Região Centro-Sul é responsável por mais de 80% da produção do setor sucroalcooleiro, sendo São Paulo o principal Estado produtor (CARVALHO, 2006). A maior proximidade dos centros consumidores, as terras favoráveis ao plantio e a boa rentabilidade desta atividade fez com que a lavoura de cana-de-açúcar se expandisse mais nesse Estado, no entanto, a expansão da cana-de-açúcar é verificada também em outros Estados, principalmente nos da Região Centro-Oeste, como observamos na Figura 3.

Figura 3 – Área plantada de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: Nova Cana, 2005.

A forte disseminação da cultura da cana-de-açúcar no Brasil deve-se à valorização do etanol, como uma das principais fontes de energia limpa, uma vez que o mundo passou a reconhecer a necessidade de mudar sua matriz energética, até agora baseada quase que exclusivamente em combustíveis fósseis. Essa mudança visa primordialmente à minimização das consequências danosas do efeito estufa, por meio da utilização de fontes de energias renováveis, em atendimento às disposições estabelecidas no protocolo de Quioto, do mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL).

3.3. ESPECTROFOTOMETRIA DE INFRAVERMELHO PRÓXIMO

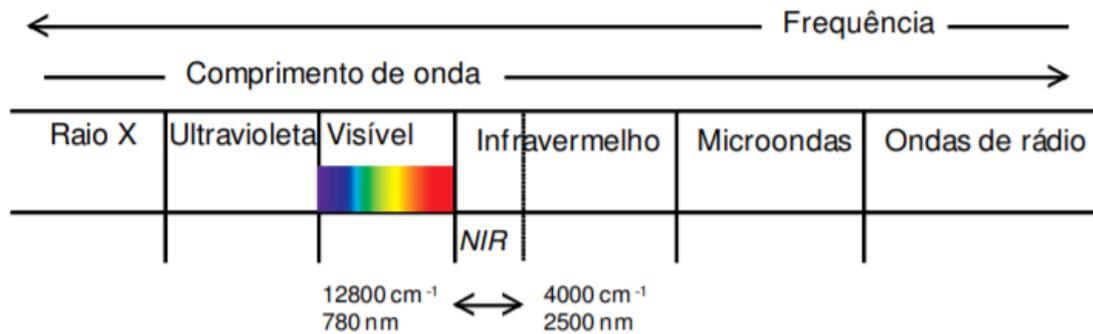
A utilização de métodos espectroscópicos apresenta diversas vantagens, como a pequena quantidade de amostra necessária para análise, processo é não destrutivo e alta frequência de amostragem. Tal fato apresenta-se como uma melhoria de processo, devido a sua rapidez em processamento de dados de análises e agilidade com os resultados.

A maioria dos compostos orgânicos e inorgânicos possui ligações covalentes, que absorvem radiação na região do infravermelho. No espectro eletromagnético, o infravermelho (IR, infrared) faz limites com a região visível e a região de micro-ondas. A região espectral do infravermelho compreende a radiação que varia em comprimento de onda de 12.800 a 10 cm^{-1} . É costume caracterizar as bandas de absorção em unidades de números de ondas (ν), que são

expressas em centímetros recíprocos (cm^{-1}). Às vezes, comprimentos de onda (λ) medidos em micrômetros (μm) também são utilizados.

Na Figura 4 pode-se observar a divisão do espectro eletromagnético com demarcações específicas na faixa do Infravermelho próximo (NIR) (OLIVEIRA, 2008).

Figura 4 – Espectro eletromagnético



Fonte: INFOESCOLA, 2006.

O espectro IR pode ser subdividido em três regiões, denominadas IR-próximo, IR-médio e IR-distante, de acordo com o tipo de aplicação e instrumentação, como observa-se na Tabela 1.

O espectro NIR recebe este nome em razão de sua proximidade do espectro visível. O infravermelho próximo corresponde à região onde pode-se observar bandas correspondentes às harmônicas ou modos de combinação de frequências fundamentais. As ligações envolvidas nesses modos de vibração normalmente são C-H, N-H, O-H e S-H.

Tabela 1 – Divisão do espectro eletromagnético na região do infravermelho em três partes principais

Região	Comprimento de onda/Frequência	Característica
Infravermelho próximo	0,8-2,5 μm (12500-4000 cm^{-1})	Região harmônica/combinação
Infravermelho médio	2,5-50 μm (4000-200 cm^{-1})	Região de vibração- rotação
Infravermelho distante	50-1000 μm (200-10 cm^{-1})	Região de rotação

Fonte: LIMA, et al, 2009.

Para absorver radiação infravermelha, a molécula precisa sofrer variação do momento de dipolo como consequência dos movimentos vibracional ou rotacional. Por isso, por exemplo, não possuem espectros de infravermelho dos gases cloro e iodo, para os quais o momento de dipolo resultante é igual a zero (OLIVEIRA, 2008).

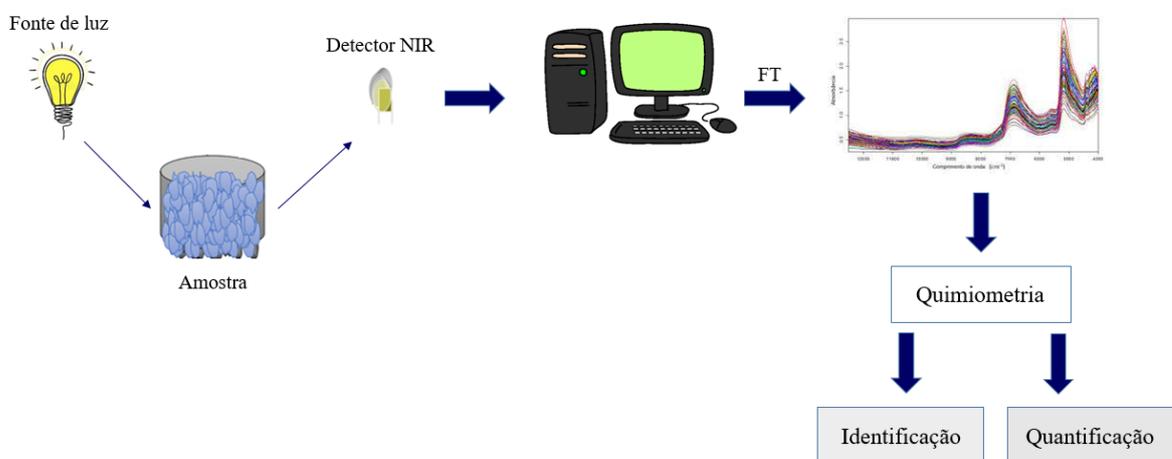
Em temperatura ambiente, a maioria das moléculas está em níveis de energias vibracionais fundamentais. Átomos ou grupos de átomos são deslocados um em relação ao outro, em uma frequência que é diretamente proporcional à constante de força de ligação, e inversamente proporcional à massa reduzida.

3.4. A QUIMIOMETRIA PARA ANÁLISES DE CANA-DE-AÇÚCAR

Quimiometria é o campo da química que utiliza ferramentas estatísticas e matemáticas para o planejamento e otimização das condições experimentais e para extração de informação química relevante de dados químicos multivariados.

A espectroscopia NIR e a Quimiometria convivem em simbiose, sendo que esta transforma os espectro NIR em resultados quantitativos, após procedimento adequado de calibração. (OLIVEIRA, 2008) A quimiometria é uma ferramenta valiosa para retirar as informações contidas nos espectros NIR, permitindo a identificação e a quantificação de diversos parâmetros em diferentes matrizes, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Procedimento de rotina em laboratórios modernos de análise



Fonte: FERREIRA, 2015.

De acordo com Chrétien (2003), a quimiometria é a administração e processamento de informações de natureza química. O processo quimiométrico passa por um roteiro que inclui preparação dos dados, análise exploratória e calibração modelos de regressão multivariada.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. DESCRIÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL

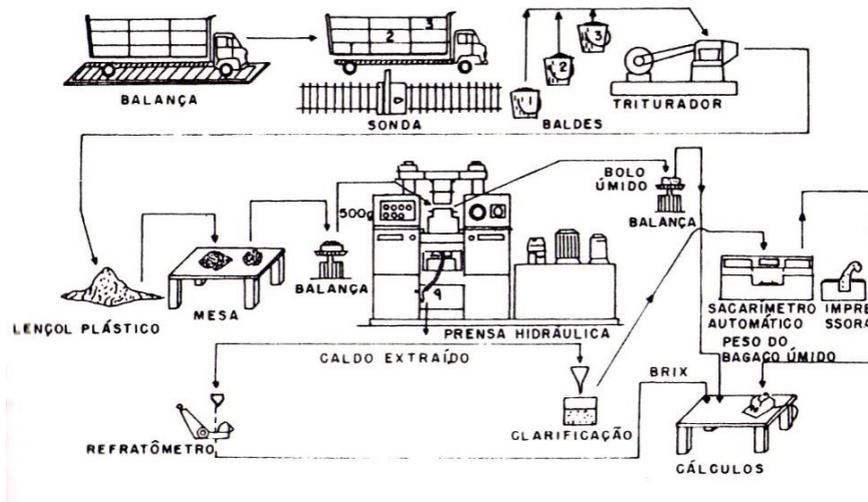
O acompanhamento da qualidade da matéria prima fornecida para o pagamento de cana-de-açúcar por teor de sacarose ocorre nos laboratórios das unidades industriais, onde os técnicos são responsáveis por diversos processos analíticos. Dentre esses processos podemos citar as seguintes etapas:

- Amostragem em sonda oblíqua;
- Desfibragem de amostras acima de 10 kg;
- Pesagem de 500g da amostra desfibrada;
- Prensagem da amostra para separação do caldo e bagaço;
- Pesagem do bolo úmido do bagaço;
- Clarificação do caldo para análise de Pol;
- Leitura em equipamento refratômetro quantificação de Brix;
- Leitura em equipamento sacarímetro para quantificação da Pol.

A Figura 6 ilustra, brevemente, todas as etapas do método convencional. Para determinação das características da cana-de-açúcar são utilizados diversos procedimentos. Abaixo serão listadas as metodologias das análises quantitativas de pol, brix, fibra calculada, glicose, frutose, sacarose e impureza mineral.

Para a realização dessas análises é necessária uma amostragem mecânica dos caminhões de cana-de-açúcar, através de uma sonda. Esta amostragem deve ser realizada totalizando mais de 10 kg de amostra, obtendo-se assim uma maior representatividade. Após esse processo, é necessário que a amostra seja desfibrada para posteriormente seguir com as análises.

Figura 6 – Descrição do método convencional



Fonte: IAA/PLANALSUCAR, 2018.

4.1.1. Determinação de Fibra Calculada

A determinação da Fibra é dada pelo peso do bolo úmido (PBU). A metodologia consiste em pesar 500g de amostra com uma tolerância de 0,5g. Logo após, essa amostra é prensada de acordo com as especificações (250kgf/cm² por 1 minuto). O caldo obtido servirá para determinações dos parâmetros de qualidade e a fibra é pesada determinando-se o peso do bolo úmido (PBU) com o qual é calculado a porcentagem de fibra. Este método apresenta como vantagem a rapidez, a qual permite obter o valor da fibra através de uma equação de regressão com o PBU.

O cálculo é determinado através da Equação 6:

$$Fibra = 0,379 + 0,0919 * PBU \quad (6)$$

4.1.2. Determinação de Fibra Calculada

A determinação de Brix (sólidos solúveis totais) do caldo extraído da amostra é realizada em um refratômetro digital. O procedimento consiste em extrair o caldo da amostra desfibrada através de uma prensa hidráulica e posteriormente realizar a leitura no refratômetro. Deve-se verificar se a temperatura do laboratório encontra-se entre 18° e 25°C.

4.1.3. Determinação de Impureza Mineral

A impureza Mineral é determinada a partir da queima da amostra desfibrada, que fica em temperatura de 700 °C, por 3 horas. Os fatores que impactam na impureza são apresentados na Figura 7:

Figura 7 – Fatores que afetam resultados de impureza

Fatores	Efeito IMP	Descrição
CLIMA	↓	Chuvvas muito abaixo do esperado na média histórica • Redução da produtividade na safra 14/15 e redução das impurezas
IDADE DO CANAVIAL	↓	Leve envelhecimento do canavial devido à menor renovação • Redução da produtividade agrícola e redução da impureza vegetal.
CANA BISADA	↑	Maior área de cana bisada • Redução da produtividade agrícola e piora na qualidade da matéria-prima colhida
COLHEITA MECANIZADA	↑	Incremento da colheita mecanizada • Aumento da quantidade de impurezas vegetais e, nos primeiros ciclos, redução da produtividade agrícola devido ao maior tráfego de máquinas e perdas na colheita.
DURAÇÃO DA SAFRA	↓	Período menor de safra com elevado rendimento de colheita • Redução TCH (colheita da cana com idade < 12 meses) e redução impurezas (termino safra em período seco) [? El Nino?]

Fonte: CTC, 2014.

4.1.4. Determinação de Pol

A sacarose é um composto orgânico que pertence ao grupo dos carboidratos. É um dissacarídeo que produz um equivalente de glicose e um equivalente de frutose na hidrólise. Grande parte das frutas possui a sacarose, no entanto, somente a cana-de-açúcar e a beterraba são capazes de produzir sacarose suficiente para a fabricação de açúcar cristal.

O controle analítico tem como principal objetivo a determinação de sacarose para estimar a taxa de produção de açúcar e etanol, bem como para pagamento de fornecedores de cana-de-açúcar.

O procedimento de análise consiste em realizar a leitura sacarimétrica do calue é determinada em sacarímetro digital. Para isso, são adicionados em um béquer 100mL do caldo extraído, adicionando-se em seguida aproximadamente 3,0 g de clarificante. Essa etapa é determinante na análise, pois é a partir dela que acontece a remoção completa dos não açúcares e o teor de sacarose é mantido, facilitando sua quantificação.

Após essa mistura, o caldo é homogeneizado com a ajuda de um mix e, logo em seguida, é realizada a filtração com papel qualitativo para que haja clarificação. Após o caldo ser clarificado, deve-se esperar no máximo 15 minutos para a realização da leitura em um sacarímetro digital.

4.1.4.1. Determinação de Pol Calculada

Para se obter o valor de Pol Calculada deve-se realizar o cálculo demonstrado na equação 7.

$$LC = LS * (1 + 0,000255 * (T - 20)) \quad (7)$$

Onde:

LC = Leitura Sacarimétrica Corrigida

LS = Leitura Sacarimétrica

T = Temperatura do laboratório (° C)

A partir disso, obtemos a porcentagem de pol no caldo, através da Equação 8.

$$Pol\%Caldo = LC * (0,2605 - 0,0009882 * Brix) \quad (8)$$

4.1.4.2 Determinação da Pureza do Caldo

Para a determinação da Pureza do Caldo, é utilizada a seguinte equação (9), onde Pza é a pureza do caldo.

$$Pza = 100 * \left(\frac{Pol\%Caldo}{Brix} \right) \quad (9)$$

Temos que, para a pureza, os valores devem estar entre 82,28 e 84,28; caso seja inferior ou superior é necessário realizar o cálculo de FPza, através da Equação 10.

$$FPza = \frac{Pza}{83,28} \quad (10)$$

4.1.4.3. Fator de transformação da Pol% do Caldo em Pol% da Cana

Posteriormente, podemos realizar a transformação da Pol% do caldo extraído pela prensa em Pol% da cana, calculando primeiramente o Coeficiente C, utilizando a Equação 11.

$$C = 1,0313 - 0,00575 * Fibra \quad (11)$$

4.1.4.4. Pol da Cana %

Após a determinação do coeficiente, pode-se calcular a Pol% cana (PC), utilizando a Equação 12.

$$PC = Pol\%Caldo * (1 - 0,018 * Fibra) * C * FPza \quad (12)$$

4.1.4.5. Determinação de AR do Caldo

Para a determinação de AR do Caldo é necessário utilizar os dados de Pureza (Pza) e aplicar na Equação 13.

$$AR = 6,9539 - 0,688 * Pza \quad (13)$$

4.1.4.6. Determinação AR do Caldo Corrigido

A partir do valor de AR obtido, pode-se determinar o ARC através da equação 14.

$$ARC = AR * (1 - 0,01 * Fibra) * C \quad (14)$$

4.1.5. Determinação de ATR

Utilizando os dados obtidos das Equações, presentes nas Equações 12 e 14, pode-se quantificar o ATR da cana, através da Equação 15.

$$ATR = PC * 9,36814 + ARC * 8,9 \quad (15)$$

Após as quantificações para determinação do ATR, calcula-se a remuneração da matéria-prima, que é aplicada nas unidades industriais através da Equação 16:

$$R = (ATR * P) \quad (16)$$

Onde: R: Remuneração em reais

ATR: kg de ATR

P: preço do ATR em reais

Todos os meses são realizados os cálculos do preço do Kg do ATR (P) pelo CONSECANA. Portanto, R é considerada a remuneração bruta do valor, ainda sendo deduzidos os valores de impostos, taxas de associação, valores relacionados a corte, carregamento e transporte, entre outros.

5. VALIDAÇÃO DO MÉTODO NIR

5.1. ANÁLISE PELO MÉTODO NIR

O equipamento NIR substituirá vários processos do laboratório de pagamento de cana-de-açúcar. Isso tende a reduzir o risco de segurança entre homem e máquina, além de minimizar a contaminação ao meio ambiente com resíduos químicos e reduzir toda mão de obra que é necessária. O novo método utiliza a sonda para amostragem e irá substituir todo o processo a partir do desintegrador de amostras e suas posteriores análises de caldo e fibra.

O método convencional, como citado anteriormente, possui diversas etapas, constituindo-se de uma intensa mão de obra, além do risco eminente de prensagem de mãos ao realizar a desfibragem da cana. A operação nos dias hoje em um laboratório de pagamento de

cana-de-açúcar acontece após pesagem do caminhão na balança através de uma sonda, seja ela oblíqua, horizontal ou trator para retirada de uma amostragem.

Para a escolha da sonda é necessário levar em conta diversos fatores, sendo eles: tempo, tipo de operação, necessidade de manutenção, amostragem e representatividade. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre os três tipos de sonda.

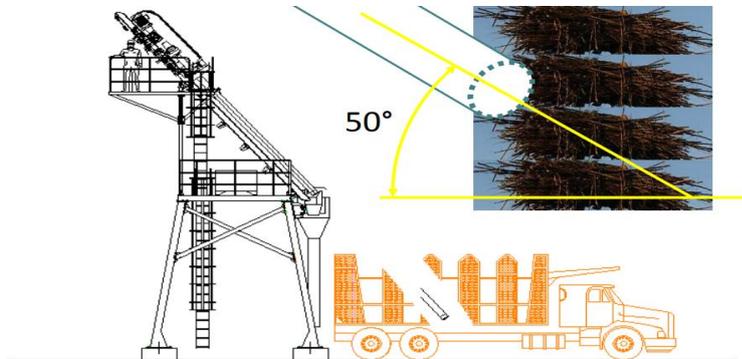
Tabela 2 – Tipos de sonda e suas características

Fatores	Sonda Trator	Sonda Horizontal	Sonda oblíqua
Representatividade	Amostras retiradas nas laterais do caminhão. Baixa representatividade.	Amostras retiradas nas laterais do caminhão com maior profundidade. Baixa representatividade.	Coleta por cima da carga do caminhão com penetração inclinada, chegando até 150 mm do piso da carreta. Boa representatividade.
Tempo	De 5 a 8 minutos	De 4 a 7 minutos	1 minuto e 30 segundos
Amostragem	Até 100 por dia	Até 150 por dia	Até 300 por dia
Operação	Manual	Semi automática	Automática
Manutenção	Alta	Média	Baixa

Fonte: BIAGI, 2018

O processo citado no laboratório de pagamento de cana-de-açúcar escolhido para o estudo, se inicia com a amostragem através de uma sonda oblíqua, como indica a Figura 8, devido aos diversos benefícios que ela apresenta, garantindo uma amostragem íntegra da amostra. Essa sonda, quando comparada com as demais, tem um tempo de amostragem menor e uma maior representatividade da amostra, além de permitir uma maior amostragem diária pelo fato de operar automaticamente e exigir uma baixa manutenção.

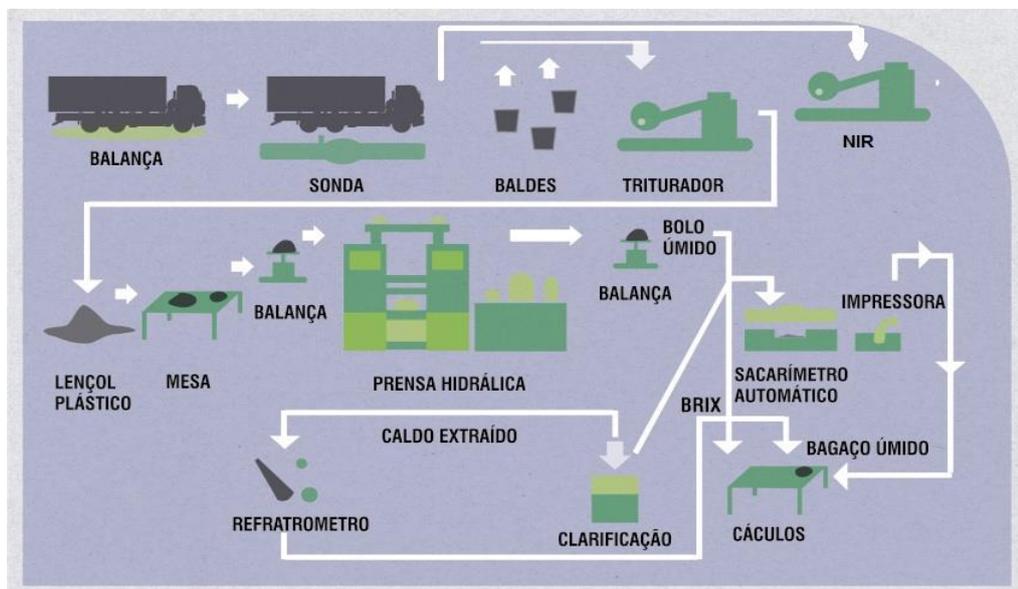
Figura 8 – Sonda oblíqua em atuação



Fonte: BIAGI, 2018.

A utilização da sonda é necessária para ambos os métodos analíticos (Convencional e NIR), visto que o equipamento NIR substituirá o desintegrador e toda parte analítica, como prensa, balança, sacarímetro, refratômetro, além de toda mão de obra, e reduzindo drasticamente o tempo de análise, como indica a Figura 9.

Figura 9 – Fluxograma de posicionamento do equipamento NIR

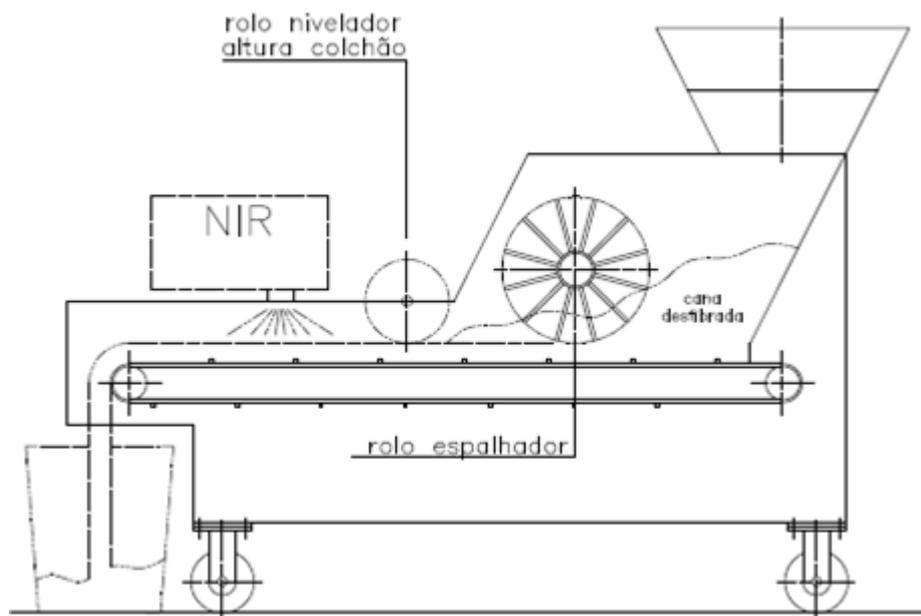


Fonte: CNPEM, 2017.

5.2. VALIDAÇÃO DOS MÉTODOS COMPARATIVOS

A validação do modelo de calibração quimiométrico utilizado no NIR, como descrito na Figura 10 e 11, é realizada comparando os resultados obtidos por esta técnica com o procedimento convencional, devendo ser observada a representatividade amostral da maturação da cana. Os ensaios foram conduzidos no ano 2021 e seguiram os procedimentos estabelecidos pelo Consecana para obter a homologação do sistema com o método de quimiometria.

Figura 10 – Equipamento com o sistema NIR



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

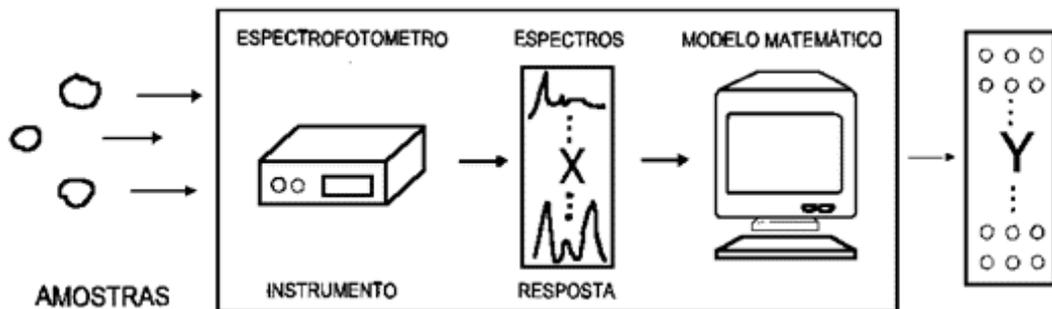
A calibração foi realizada com ao menos 6.000 (seis mil) pares de dados e a validação com 300 (trezentos) pares de dados ao longo do ano.

As coletas e análises por NIR e convencional foram feitas pelo técnico do laboratório e acompanhadas pelo Gestor de Controle de Qualidade, garantindo que as análises fossem feitas simultaneamente. O processo analítico seguiu o seguinte processo:

- Coletar as amostras em toletes com peso mínimo de 10 kg conforme os procedimentos do CONSECANA, através de sonda oblíqua de diferentes carregamentos de cana, e anotar números dos BAs-Boletins de Análises;

- Transferir as amostras para o desintegrador e acionar o equipamento;
- Todo material amostrado desintegrado será analisado como tal pelo sistema NIR, que estará acoplado à esteira de cana desfibrada com a leitura de cada amostra.
- Coletar a mesma amostra analisada pelo sistema NIR esteira para a realização das análises descritas a seguir: Análises de Brix, Pol, Fibra da cana pelo método da prensa hidráulica, conforme as Normas do Sistema CONSECANA.
- Análises de Sacarose, Glicose e Frutose por cromatografia iônica conforme método determinado. As amostras deverão ser mantidas refrigeradas até a determinação dos carboidratos.
- Semanalmente, a equipe do sistema NIR acessa de forma remota o equipamento para obtenção dos dados. De posse destes dados, há a atualização dos índices de correlação e encaminhamento dos dados estatísticos para toda a equipe de desenvolvimento dos ensaios.

Figura 11 – Fluxograma do sistema de análise NIR

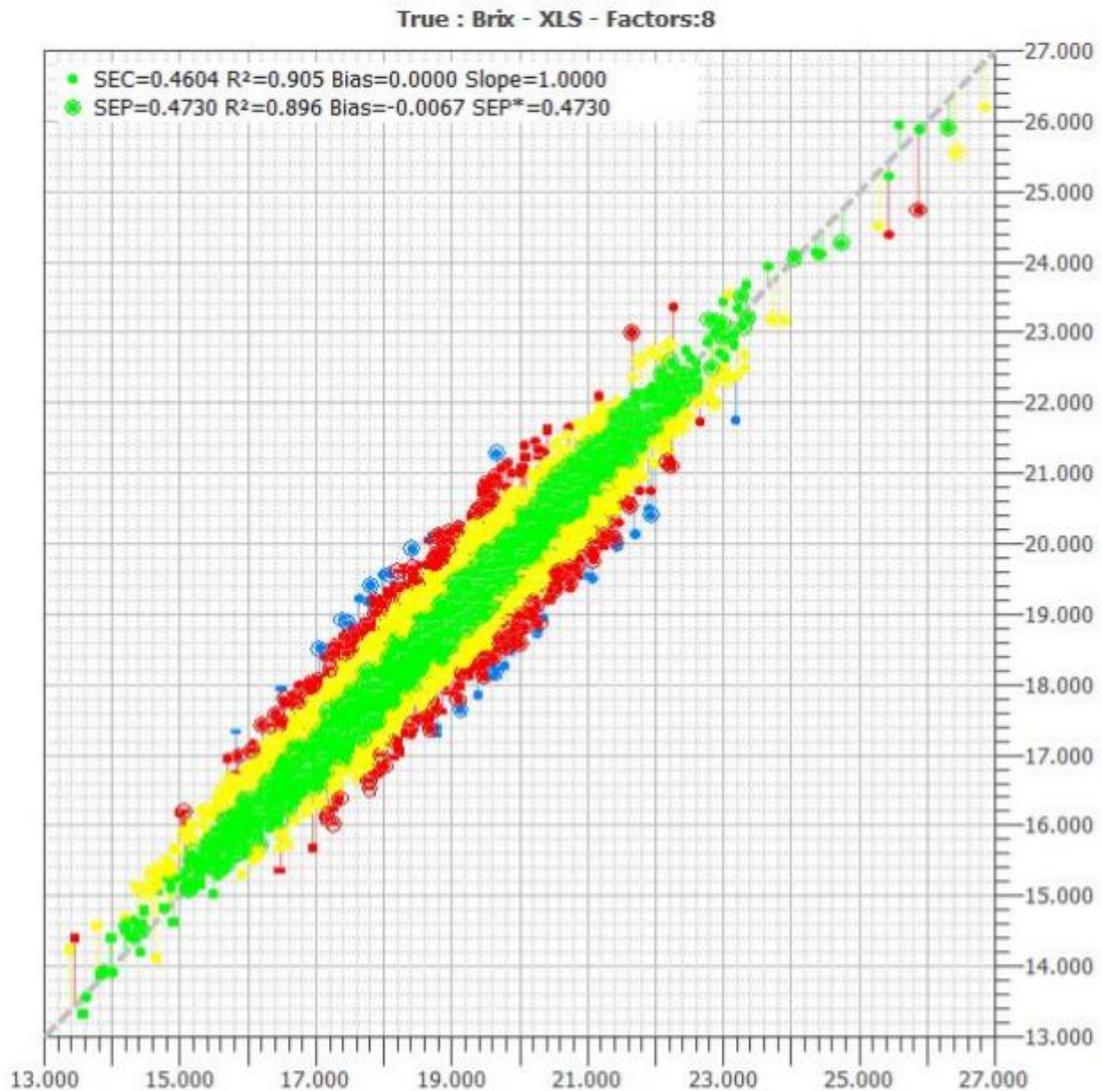


Fonte: QUÍMICA NOVA, 1999.

6. RESULTADOS

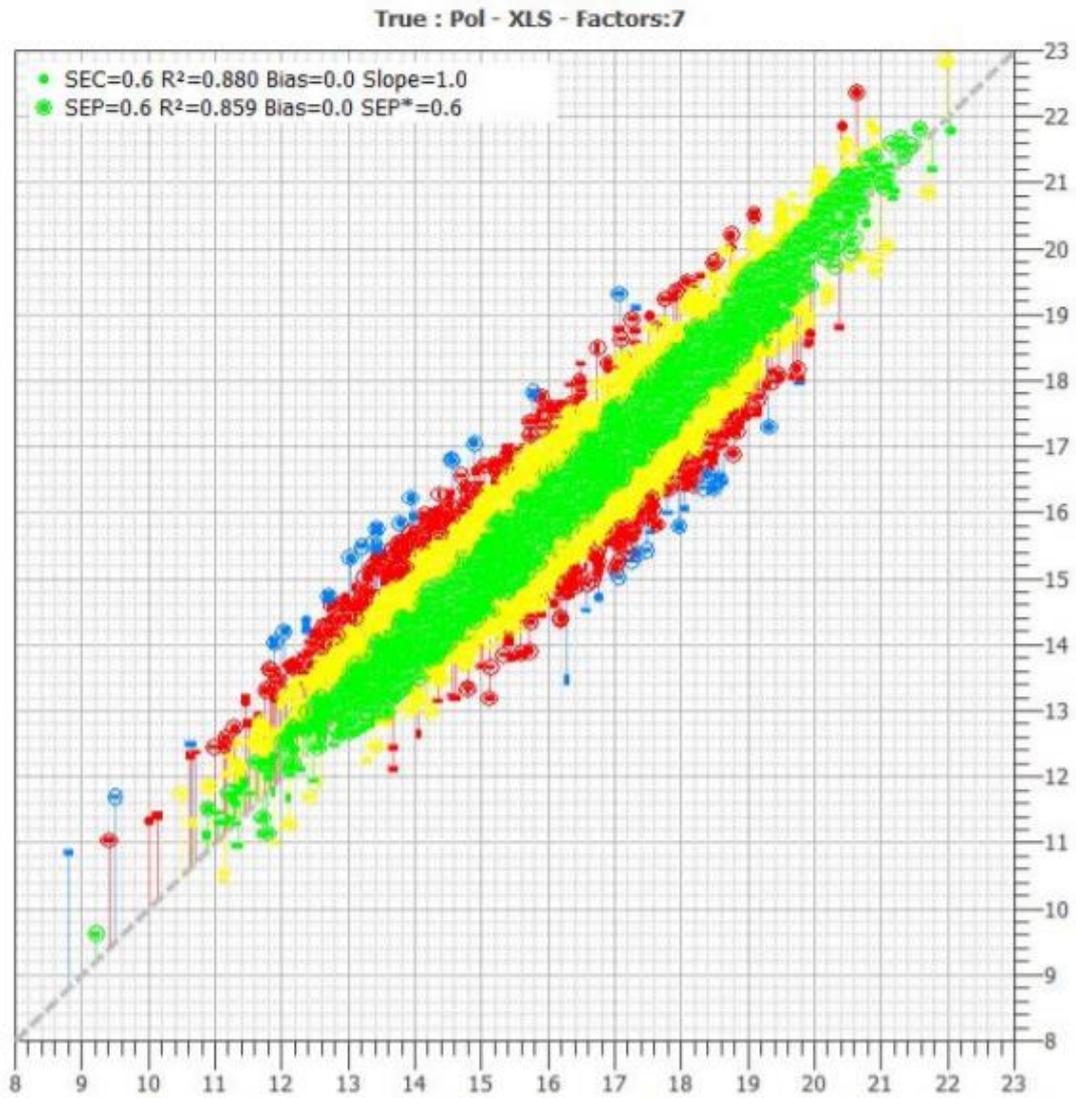
Os resultados apresentados a seguir referem-se às amostras analisadas no ano de 2021.

Para os resultados de análise de Brix até o momento foram utilizados 6007 amostras, no qual o modelo para calibração para brix apresenta-se robusto, com o erro padrão de 0,47, abaixo do especificado pelo Consecana, de 0,6.

Figura 12 – Gráfico de dispersão de Brix

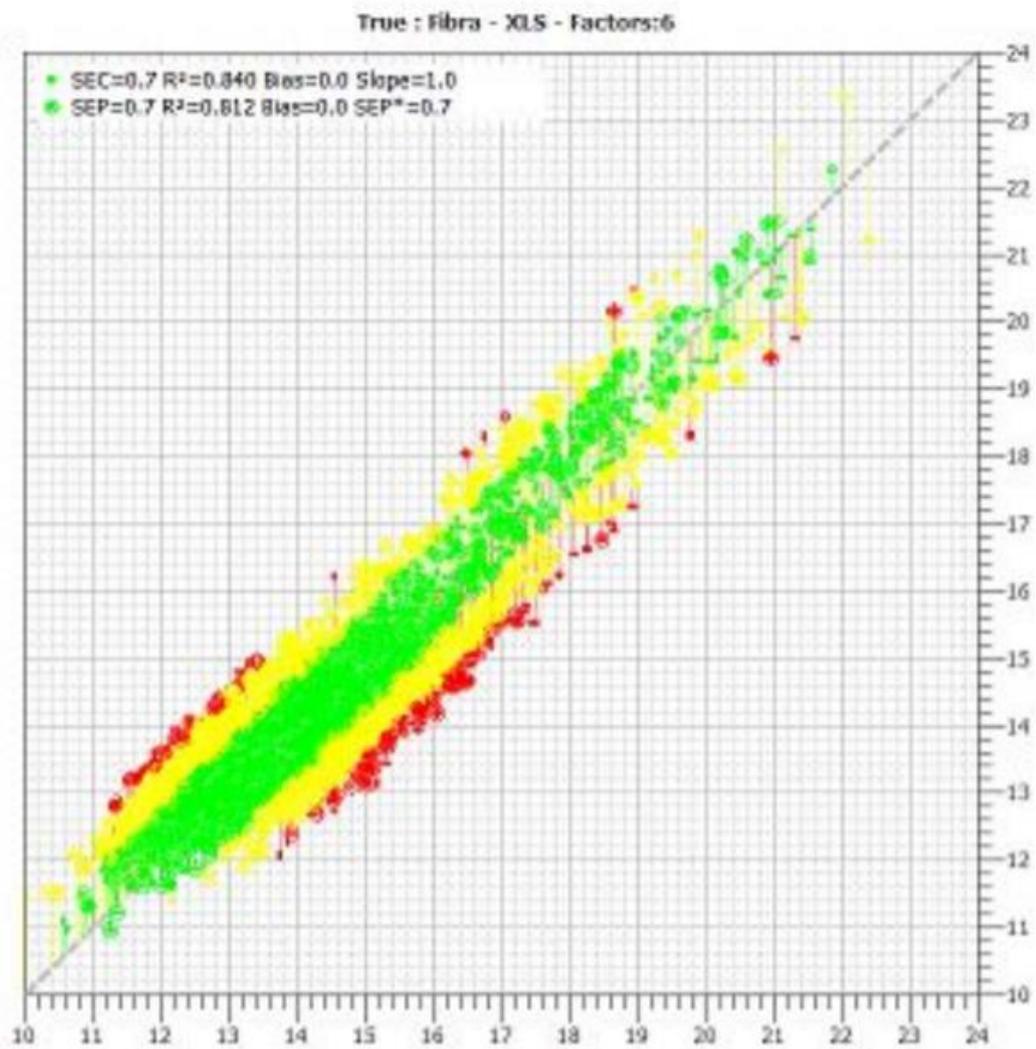
Fonte: SOFTWARE NIR, 2021.

O mesmo método foi utilizado para se obter os desvios padrões de Pol e Fibra. Para o modelo da Pol, no entanto, foram utilizadas um total de 6057 amostras na calibração, o erro padrão entre o método NIR e o método convencional encontrado foi de 0,60 igual ao valor máximo especificado pelo Consecana.

Figura 13 – Gráfico de dispersão de Pol

Fonte: SOFTWARE NIR, 2021.

Por fim, para o modelo de Fibra prensa, foram utilizadas 6030 amostras para a calibração. O erro padrão obtido foi de 0,70, igual ao valor máximo especificado pelo Consecana.

Figura 14 – Gráfico de Dispersão de Fibra

Fonte: SOFTWARE NIR, 2021.

A partir das figuras 12, 13 e 14, pode-se observar que os valores de Erro Padrão de Predição (SEP), obtidos para os parâmetros de Brix, Pol e Fibra, estão abaixo ou igual aos limites estabelecidos pelo CONSECANA, validando, de fato, o método quimiométrico para uso rotineiro no laboratório de pagamento de cana por teor de sacarose.

7. VIABILIDADE DA SUBSTITUIÇÃO DO MÉTODO CONVENCIONAL

Ao realizar uma comparação entre os procedimentos, foram levados em conta todas as etapas necessárias e seus respectivos tempos de análises para o método convencional e método futuro, com a implementação do equipamento NIR. Na Tabela 3 observamos os dados obtidos.

Tabela 3 – Comparativo de tempo entre método convencional e método futuro

Etapas do processo	Tempo de análise	Etapas do processo	Tempo de análise
Método convencional	Método convencional	Método futuro	Método futuro
Amostragem em sonda oblíqua	5 min	Amostragem em sonda oblíqua	5 min
Desfibragem de amostras acima de 10 kg	10 min	Desfibragem de amostras acima de 10 kg	3 min
Pesagem de 500g da amostra desfibrada	3 min	Equipamento NIR	1 min
Prensagem da amostra	5 min		
Peso do bolo umido do bagaço	3 min		
Clarificação do caldo	3 min		
Leitura em equipamento refratômetro quantificação de Brix	5 min		
Leitura em equipamento sacarímetro para quantificação da POL	10 min		
Total	44 min	Total	9 min

Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

Como se observa na Tabela 3, o processo analítico convencional demanda um maior tempo. Ao analisar a porcentagem de economia de tempo, tem-se que o método futuro é quase 5 vezes mais rápido quando comparado com o método convencional, gerando uma viabilidade significativa.

O processo analítico convencional, além de necessitar de mais tempo de análise, gera muito custo por ano de safra, incluindo custos com equipamentos, materiais de laboratório e mão de obra. A Tabela 4 descreve todos os gastos e suas respectivas descrições.

Tabela 4 – Comparativo de custos entre diferentes métodos

Comparativo de custos entre diferentes métodos			
Método convencional		Método futuro	
Denominação	Custos	Denominação	Custos
Equipamentos	R\$ 119.530,00	Aquisição equipamento NIR	R\$ 300.000,00
Mão de obra	R\$ 1.008.000,00	Mão de obra	R\$ 20.000,00
Materias de laboratório	R\$ 116.000,00	Manutenções preventivas por ano	R\$ 403.200,00
Total ano safra	R\$ 1.243.530,00	Total ano safra	R\$ 723.200,00

Fonte: Elaborado pelo autor, 2021.

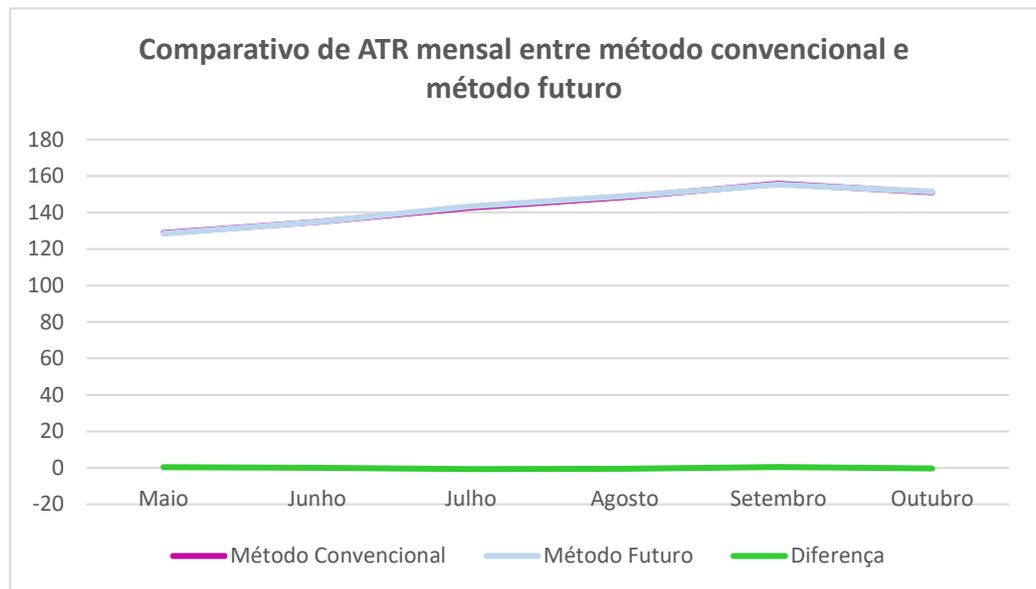
É notório que sua maior economia ocorre através do custo de mão de obra, onde observa-se uma queda drástica nos valores quando compara-se método convencional x método futuro.

Além disso, analisando o valor total de custos no ano safra temos que, após a inserção do método NIR na rotina, pode-se obter uma economia de aproximadamente 89% no valor total. Sendo assim, a partir do comparativo de custos de métodos observa-se uma viabilidade econômica apresentada pelo método NIR.

Para finalizar, realizou-se o comparativo mensal entre os dados de ATR calculado pelo método convencional e ATR calculado pelo método NIR. É de conhecimento geral que os resultados do ATR são diretamente dependentes do Pol% da Cana e da Leitura Sacarimétrica, como evidenciado nas equações 12 e 15.

A Figura 15 representa um gráfico comparativo. Podemos observar que os valores obtidos no método convencional e no método futuro estão quase que inteiramente sobrepostos, e que a linha de tendência da diferença tende a zero.

Figura 15 – Comparativo de ATR mensal entre os métodos.



Fonte: Elaborado pela autora, 2021.

A partir do exposto, a diferença entre os fatores determinantes para o preço final de kg de ATR de cana estão dentro do previsto.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O setor sucroalcooleiro nacional detém uma importância histórica indelével não apenas por ser uma atividade econômica secular, mas também pela dimensão representada pelo valor de sua produção e exportação ao longo do tempo.

Foi descrito no trabalho todo o processo analítico do método convencional, utilizado para pagamento de fornecedores, sendo que tal processo é executado em um laboratório químico demandando tempo elevado e considerável mão de obra. Este método ainda apresenta diversos riscos de segurança e impacto ambiental.

O método NIR, no entanto, está ligado ao conjunto de automação que praticamente isenta o operador de riscos a sua segurança. Esse método também demanda uma quantidade de manutenção baixa, otimizando o tempo e os custos quando comparado ao método convencional.

Ao realizar o comparativo de dados entre método convencional e método NIR, observa-se que a implementação do uso de NIR na rotina é extremamente benéfica. A partir

dessa, obteremos análises em um curto período de tempo, e o valor total utilizado em ano safra no laboratório de pagamento de pagamento de cana por teor de sacarose diminuirá drasticamente.

Conclui-se, então, a partir do trabalho apresentado, que a implantação do NIR na rotina é viável e pode ser utilizada para demais usinas sucroalcooleiras.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARAL, Rafael Camargo de. Como definir o ponto de colheita da cana – de – açúcar. *Milk Point*. 2010. Disponível em <https://www.milkpoint.com.br/artigos/producao/como-definir-o-ponto-de-colheita-da-canadeacucar-67828n.aspx>. Acesso em 10 de out de 2021.

ARAÚJO, Julio M. A. *Química de Alimentos: teoria e prática*. 3ª ed. Viçosa: Editora UFV, 2004.

BIAGI, Paulo. Sonda Oblíqua IRBI Modelo FB 06. *IRBI*. 2018. Disponível em: <http://www.irbi.com.br/br/noticia/sonda-obliqua-irbi-modelo-fb-06>. Acesso em 10 de out de 2021.

CARVALHO, G. R; OLIVEIRA, C. *O setor sucroalcooleiro em perspectiva*. Campinas –SP. 2006.

CHEQUIN, B. G; GRANDI, G. O setor sucroalcooleiro brasileiro: origem e desenvolvimento

CHRÉTIEN, J. R. ‘Boosting Chemometrics in Europe’, *Chemom. Intell. Lab. Syst.*67 (2003)

CNPEN, Métodos e tecnologias para análise de cana. Disponível em: <http://cnpem.br/metodos-e-tecnologias-para-analise-de-cana/>. Acesso em 21 de out. de 2021.

CPT. Calendário Agrícola. Banco de dados. Disponível em: Acessado em: 02 nov. 2021.

CTC, 2014; Disponível em: <http://ctc.com.br/>. Acesso em 16 de out. de 2021.

DESCOMPLICA 2017; Disponível em: <https://descomplica.com.br/blog/historia/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-terceira-revolucao-industrial/>. Acesso em 01 de nov. de 2021.

FERREIRA, Marcia Miguel Castro – Livro Quimiometria – Conceitos, métodos e aplicações (2015)

GOVERNO DO BRASIL. Brasil é referência no campo da energia limpa e renovável. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2021/10/brasil-e-referencia-no-campo-da-energia-limpa-e-renovavel> Acesso em: 02 de nov de 2021.

INFOESCOLA. Espectro Eletromagnético. Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/espectro-eletromagnetico/> Acesso em: 13 out de 2021.

JUNIOR, Moises Francisco Farah. A Terceira Revolução Industrial e o Novo Paradigma Produtivo: Algumas Considerações sobre o Desenvolvimento Industrial Brasileiro nos Anos 90. Revista FAE. Curitiba, 2000.

HAMERSK. F. Estudo de variáveis no processo de carbonatação do caldo de cana-de-açúcar. Curitiba – PR: UFPR. 2009 (dissertação)

IAA PLANALSUCAR – Base de dados da pesquisa agropecuária. Disponível em: <http://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&biblioteca=vazio&busca=autoria:PLANALSUCAR.> Acesso em 20 de out. de 2021.

LIMA, K. M. G, RAIMUNDO, I. M, SILVA, A. M. S, PIMENTEL, M. F. Sensores ópticos com detecção no infravermelho próximo e médio. Química Nova. 2009.

MENEGUETTI, C.C, MEZAROBIA, S. GROFF, A. M. Fatores relacionados ao cultivo da cana-de-açúcar. Campo Mourão – PR. 2010.

MOREIRA, E. F. P. Expansão, concentração e concorrência na agroindústria canavieira em São Paulo: 1975 a 1987. 119 p. 1989. Dissertação (Mestrado em Economia) – Instituto de Economia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas (SP), 1989.

NAANDANJAIN. Cana de açúcar. Banco de dados. Disponível em: <https://naandanjain.com.br/culturas/cana-de-acucar/>. Acessado em: 21 out. 2021.

NOVA CANA. A produção de cana de açúcar no Brasil (e no mundo). Disponível em: <https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo>. Acessado em: 21 out. 2021.

NUNES, Elis Fernando. Cana-de-açúcar: a produção de etanol e seus benefícios. Monografia. Barretos-SP. 2007.

OLIVEIRA, F.C. Disposição de lodo de esgoto e composto de lixo urbano num Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. 2000. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

OLIVEIRA, Ingrid Komorizono. Aplicação de quimiometria e espectroscopia no infravermelho no controle de qualidade de biodiesel e mistura biodiesel/diesel. Dissertação de mestrado. Campinas – SP. 2008.

PORTAL DA INDUSTRIA. Indústria 4.0: Entenda seus conceitos e fundamentos. Disponível em: <http://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/industria-4-0/> Acesso em 02 de nov de 2021.

PORTAL DO AGRONEGÓCIO. Milho e cana: vantagens e desvantagens. Disponível em: <http://www.portaldoagronegocio.com.br/noticia/milho-e-cana-vantagens-e-desvantagens-decada-um-111228>. Acesso em: 18 out. 2021.

PROÁLCOOL – PROGRAMA BRASILEIRO DE ÁLCOOL. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/proalcool/proalcool.htm>. Acesso em: 09 Out. 2021.

RODRIGUES, Claubert Damas. Características e Composição Tecnológica da cana-de-açúcar. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/jaojaojaojao/caracteristicas-dacana-de-acucar/> Acesso em: 01, nov de 20213

QUÍMICA NOVA, Quím. Nova vol.22 n.5 São Paulo Sept./Oct. 1999.

SILVEIRA, Cristiano; LOPES, Guilherme. O que é indústria 4.0. Citisystems, nov/2016. Disponível em: Acesso em 16 de out. de 2021.

SWI, Eletrificação gerou a segunda revolução industrial da Suíça. Disponível em: https://www.swissinfo.ch/por/ciencia/hist%C3%B3ria_eletrifica%C3%A7%C3%A3o-gerou-a-segunda-revolu%C3%A7%C3%A3o-industrial-da-su%C3%AD%C3%A7a/44255112. Acesso em 17 de out. de 2021.

UNESP CIÊNCIA, Indústria 4.0 - Transformação e Desafios para os cenários Brasileiros; Disponível em: <http://unespciencia.com.br/2018/02/01/industria-93/>. Acesso 17 de out.de 2021.

VIAN, C. E. F. Agroindústria canavieira: estratégia competitivas e modernização. Campinas: Editora Átomo, 2003.

WERT, A. O que é a 4ª Revolução Industrial e como ela deve afetar nossas vidas. Disponível em: https://wertambiental.com.br/2019/01/15/industria_4-0/ Acesso em: 1 de nov de 2021.

WIKIPÉDIA 2005; Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:P%C3%A1gina_principal. Acesso em 17 de out. de 2021.