

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

FELIPE DE OLIVEIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ETANOL VISANDO SOLUÇÕES PARA
MELHORAR A EFICIÊNCIA ECONÔMICA E AMBIENTAL**

Poços de Caldas/MG

2020

FELIPE DE OLIVEIRA GONÇALVES

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ETANOL VISANDO SOLUÇÕES PARA
MELHORAR A EFICIÊNCIA ECONÔMICA E AMBIENTAL**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia Química.

Orientador: Melina Savioli Lopes.

Co-orientador: Rafael Firmani Perna.

Poços de Caldas/MG

2020

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca campus Poços de Caldas

Gonçalves, Felipe de Oliveira.

G635a Análise da produção de etanol visando soluções para melhorar a eficiência econômica e ambiental / Felipe de Oliveira Gonçalves. – Poços de Caldas/MG, 2020.

89 f. –

Orientador(a): Melina Savioli Lopes.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, campus Poços de Caldas, 2020.

Bibliografia.

1. Etanol. 2. Biocombustíveis. 3. Cana-de-açúcar – Brasil. I. Lopes, Melina Savioli. II. Título.

CDD – 660.2

FELIPE DE OLIVEIRA GONÇALVES

ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE ETANOL VISANDO SOLUÇÕES PARA MELHORAR A EFICIÊNCIA ECONÔMICA E AMBIENTAL

A Banca examinadora abaixo-assinada, aprova a qualificação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia Química.

Aprovada em: 17 de março de 2020.

Profa. Dra. Melina Savioli Lopes
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
Instituição: Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Sérgio Andres Villalba Morales
Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Melina Savioli Lopes, Professor do Magistério Superior**, em 24/03/2020, às 21:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Andres Villalba Morales, Professor do Magistério Superior**, em 25/03/2020, às 12:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rubens Maciel Filho, Usuário Externo**, em 26/03/2020, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0283226** e o código CRC **9E4A4CAF**.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha orientadora Melina Savioli Lopes e ao meu co-orientador Rafael Firmani Perna por me orientarem ao longo de todo o trabalho. Aproveito a oportunidade para agradecer ao apoio da minha família. O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A indústria brasileira do etanol teve desde o início o seu desenvolvimento atrelado aos incentivos governamentais. O primeiro programa criado foi o Programa Nacional do Álcool, o qual deu resultados significantes para a indústria do etanol no Brasil. O mais recente programa governamental foi o RenovaBio. Foi criado em 2016 com o intuito de fomentar o desenvolvimento da indústria do etanol visando cumprir os acordos da COP21. Atualmente, o etanol é produzido em larga escala por mais de 300 usinas localizadas em todo território nacional. Embora a indústria do etanol esteja consolidada, ela tem enfrentado dificuldades financeiras nos últimos anos. Tais dificuldades resultaram na falência de algumas empresas. Essa situação representa um problema porque as usinas brasileiras são relevantes tanto no sentido econômico quanto social. Além disso, espera-se que haja um aumento considerável na demanda de etanol para os próximos anos. Portanto, é essencial que seja feita uma previsão baseada em dados históricos de produção de etanol, com intuito de saber se as usinas brasileiras serão capazes de suprir essa demanda. Outro ponto interessante é o estudo de possibilidades para otimizar as usinas, de modo que elas possam aumentar a produção de etanol, reduzir custos e explorar novos mercados, como o de créditos de descarbonização. Como consequência, será possível melhorar a saúde financeira das usinas brasileiras.

Palavras-chave: Demanda de etanol. Otimização no processo de etanol. Demanda de biocombustível. Cana-de-açúcar no Brasil. Previsão de produção.

ABSTRACT

The Brazilian ethanol industry since the beginning has had its development relied on governmental incentives. The first program created was the National Program of Alcohol that was the first to provide significant results in the ethanol industry. The most recent was the RenovaBio program. It was created in 2016 and aimed to foster the ethanol industry development in order to fulfill the agreement at COP21. Currently, the ethanol is produced on large scale by more than 300 companies located all over the Brazilian territory. Even though the ethanol industry is well consolidated, it has been facing financial issues in the last years and such issues resulted in the bankruptcy of some companies. This situation represents a problem because this industry is considered relevant in both aspects, economic and social for Brazil. In addition, it is expected an expressive increase in the ethanol demand in the next years. Therefore, it is essential to provide a forecast based on historical ethanol production data in order to evaluate if the Brazilian companies will be able to supply future demand. Another interesting factor is to study possibilities that can optimize these companies so they will be able to increase ethanol production, reduce costs and explore new markets, such as the carbon credits market. As a consequence, it will be possible to improve the financial conditions of companies that produce ethanol in Brazil.

Keywords: Ethanol demand in Brazil. Optimization in ethanol process. Biofuel demand. Sugarcane in Brazil. Forecast of production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Partes da cana-de-açúcar	14
Figura 2 - Concentração de lavouras de cana-de-açúcar no Brasil	18
Figura 3 - Rota necessária para a produção de etanol e açúcar a partir da cana-de-açúcar	21
Figura 4 - Etapas do pré-processamento da cana-de-açúcar	35
Figura 5 - Esquematização de uma moenda no pré-processamento da cana	39
Figura 6 - Exemplos de espaçamento na lavoura de cana. A esquerda tem-se espaçamento simples e a direita o espaçamento duplo.....	44
Figura 7 - Funcionamento da limpeza a seco da cana-de-açúcar	50
Figura 8 - Esquema de uma membrana de pervaporação	56
Figura 9 - Esquema representativo de destilação com aquecimento ôhmico	58
Figura 10 - Comparativo da elevação da temperatura (a) e produção de etanol (b) em função do tempo para a destilação ôhmica e convencional.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes de geração de energia elétrica nas plantas em operação no Brasil em 2018	26
Tabela 2 - Tipo de biomassa utilizada nas plantas de geração de energia elétrica no Brasil em 2018	26
Tabela 3 - Quantidade necessária de etanol anidro para gerar 1 CBio	29
Tabela 4 - Quantidade de etanol hidratado necessária para gerar 1 CBio	29
Tabela 5 - Mecanização em cidades paulistas produtoras de cana-de-açúcar na safra 2016/2017. Adaptado de (FREDO; CASER, 2017).....	37
Tabela 6 - Ganho econômico por milhão de toneladas de cana com alteração em parâmetros de carregamento e descarregamento	46
Tabela 7 - Custo de transporte e transbordo em cidades paulistas na safra 2016/2017 considerando uma distância de 25km.....	47
Tabela 8 - Avaliação de cada método de previsão considerando diferentes parâmetros estatísticos	63
Tabela 9 - Previsão obtida com os métodos ARIMA (1,0,1), Suavização Exponencial Dupla e Não Sazonal de Suavização de Tendência.	64
Tabela 10 - Simulação quanto as movimentações financeiras no mercado de CBio.	65
Tabela 11 - Possibilidades de ganhos com as melhorias sugeridas.....	66
Tabela 12 - Comparativo entre o etanol produzido a partir do milho e da cana-de-açúcar.	68

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	12
1.1.1	Objetivo geral	12
1.1.2	Objetivos específicos	12
1.2	PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	CANA-DE-AÇÚCAR.....	14
2.2	HISTÓRICO DO APROVEITAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR	15
2.3	PANORAMA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL.....	17
2.3.1	Indústria da cana-de-açúcar	17
2.3.2	Produção	19
2.3.3	Área colhida	19
2.3.4	Produtividade	20
2.4	PRODUTOS DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR	21
2.4.1	Etanol	22
2.4.2	Açúcar	24
2.4.3	Energia elétrica	25
2.4.4	Crédito de descarbonização (CBio)	28
2.5	TENDÊNCIA DE CONSUMO DE AÇÚCAR E ETANOL.....	30
2.5.1	Açúcar	30
2.5.2	Etanol	31
2.6	PRINCIPAIS USOS DO ETANOL NO BRASIL.....	32
2.7	MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL	33
2.7.1	Comparativo entre o etanol de milho e o etanol da cana-de-açúcar .	33
2.8	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ETANOL	35
2.8.1	Pré-processamento da cana	35
2.8.1.1	Colheita da cana-de-açúcar.....	35
2.8.1.2	Transporte e carregamento da cana.....	38
2.8.1.3	Preparação da cana-de-açúcar	38
2.8.1.4	Extração do caldo da cana	39
2.8.2	Processamento da cana-de-açúcar	40

2.8.2.1	Tratamento do caldo da cana-de-açúcar	40
2.8.2.2	Concentração do caldo.....	41
2.8.2.3	Fermentação	41
2.8.2.4	Destilação	42
2.8.2.5	Desidratação	42
2.9	MELHORIAS PROPOSTAS	43
2.9.1	Melhorias no pré-processamento	43
2.9.1.1	Colheita	43
2.9.1.2	Transporte e descarregamento da cana-de-açúcar	45
2.9.1.3	Preparação.....	49
2.9.1.4	Extração de açúcares.....	51
2.9.2	Melhorias no processamento da cana-de-açúcar	52
2.9.2.1	Tratamento do caldo.....	52
2.9.2.2	Concentração do caldo.....	53
2.9.2.3	Fermentação	55
2.9.2.4	Destilação	57
2.9.2.5	Desidratação do etanol.....	59
3	METODOLOGIA	61
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1	PREVISÃO DE PRODUÇÃO DE ETANOL.....	63
4.2	POTENCIAL ECONÔMICO DO MERCADO DE CBIO	64
4.3	GANHOS COM AS OTIMIZAÇÕES SUGERIDAS.....	65
4.4	USO DO ETANOL DE MILHO E DE CANA-DE-AÇÚCAR.....	67
5	CONCLUSÃO	71
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp.) tem importância econômica no Brasil desde o período colonial (ARAÚJO; SANTOS, 2013; HAAG; ACCORSI, 1978). Inicialmente, o principal produto proveniente da planta era o açúcar, pois, o mesmo representava fonte de riqueza para Portugal (HOLANDA, 1995). Na década de 1930 outro produto começou a ser aproveitado a partir da cana, o etanol. Isso começou por meio do decreto n.º 19 717, no dia 20 de fevereiro de 1931 (BRASIL, 1931). Apesar dessa primeira iniciativa do governo brasileiro, foi apenas na década de 1970 que a produção do etanol obteve crescimento expressivo. Esse fato ocorreu em razão de outra intervenção do governo, por meio do decreto n.º 76 593 no dia 14 de novembro de 1975, que resultou na criação do PROÁLCOOL (BRASIL, 1975; PIMENTEL, 1980).

Na década de 1980, usinas de cana-de-açúcar começaram comercializar um novo produto, a energia elétrica (EID et al., 1998). De modo similar aos produtos mencionados anteriormente, a venda de energia elétrica para o mercado, anos depois, foi estimulada pelo governo com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia (GRANVILLE et al., 2009). Outro programa governamental criado recentemente foi o RenovaBio com o objetivo de incentivar a produção de biocombustível até 2030 (BARROS, 2018a; PASQUAL et al., 2018). Além disso, esse programa visa fornecer maior estabilidade ao setor de biocombustíveis e atender os acordos firmados na COP 21 (21.ª Conferência das Partes) (OLIVEIRA; COELHO, 2019).

Atualmente o plantio de cana-de-açúcar, no Brasil, concentra-se nas regiões sudeste, nordeste e centro-oeste, no entanto, o cultivo da planta está presente ao longo de todo território nacional. No que diz respeito aos principais produtores, na região nordeste o estado de Pernambuco e Alagoas são os que mais se destacam. Já na região centro-oeste, Goiás é o estado com a maior produção, enquanto isso, no sudeste o estado de São Paulo e Minas Gerais são os principais *players* (CONAB, 2018b). Atualmente, existem 370 usinas as quais são responsáveis por movimentar o setor sucroenergético brasileiro (MAPA, 2018). Somente do setor sucroenergético são gerados 794 mil empregos formais diretos no ano de 2016 (BARROS, 2018b).

Apesar do negócio sucroenergético ser um setor de grandes dimensões e com longo histórico, no Brasil, o mesmo tem enfrentado dificuldades nos últimos

anos. Recentemente, problemas financeiros tem sido uma das razões para que se tenha percebido uma redução na área colhida (WALTER et al., 2014). Outros fatores tais como a falta de chuvas, políticas governamentais para controlar o preço da gasolina, baixos preços do açúcar, a necessidade de produtos importados aliado com a alta do dólar tem impacto negativamente o setor sucroenergético (FAVA; VINICIUS; TROMBIM, 2014; SANTOS; GARCIA; SHIKIDA, 2015). Como consequência de tais dificuldades, 62 empresas do setor sucroenergético estiveram relacionadas em casos de recuperação judicial ou falência (FAVA; VINICIUS; TROMBIM, 2014).

Considerando a importância do setor sucroenergético para economia brasileira e as dificuldades enfrentadas pelo mesmo, é importante que sejam feitos estudos para a otimização dos produtos comercializados pelo setor, de modo que haja fortalecimento do setor. Neste presente trabalho, o enfoque de otimização será dado à produção de etanol. A razão para a priorização da otimização da produção de etanol está no fato de atingir-se as metas governamentais estabelecidas na COP 21, atender a demanda nacional esperada para os próximos anos e explorar o mercado as oportunidades criadas pelo programa RenovaBio.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal desse trabalho é oferecer soluções de otimização na produção de etanol visando a segurança quanto ao fornecimento de etanol no Brasil por meio do aumento da produção do biocombustível no país com a finalidade de evitar a necessidade de importação de outros países.

1.1.2 Objetivos específicos

Este trabalho visa atender os seguintes itens:

- a) Otimizar os processos de produção de etanol, de modo a aumentar a produção, reduzir perdas e melhorar a eficiência ambiental.
- b) Oferecer possibilidades para melhorar a saúde financeira das usinas sucroenergéticas.
- c) Apresentar soluções para que as usinas possam explorar mais eficientemente o mercado de créditos de descarbonização.

- d) Fornecer a previsão de produção de etanol com base nos dados históricos de produção no Brasil.

1.2 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES

Neste trabalho as principais contribuições são:

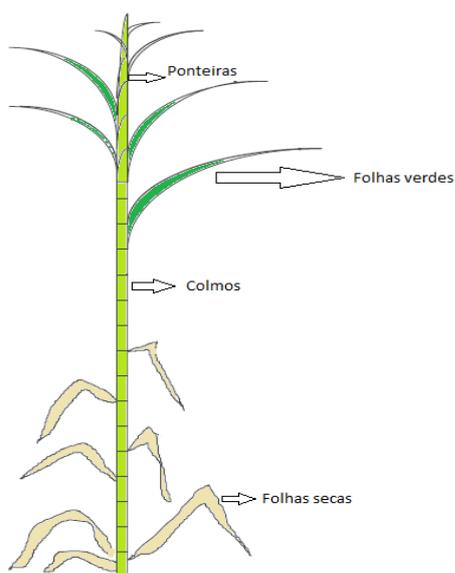
- a) Sugestões de otimização de usinas sucroenergéticas, visando a produção mais eficiente do etanol em termos de redução de perdas, aumento de ganhos financeiros, aumento de produção e melhoria na eficiência ambiental.
- b) Potencial do econômico do mercado de crédito de descarbonização.
- c) Comparativo entre o etanol de milho e o etanol de cana-de-açúcar e qual seria a melhor opção para a realidade brasileira.
- d) Sugestão de como melhorar a saúde financeira de usinas de cana no Brasil.
- e) Previsão de produção de etanol, de acordo com dados históricos de produção desse biocombustível. foi verificado se o ritmo de produção será suficiente para atender a demanda futura, e quais as consequências para o consumidor, usinas e governo brasileiro se a demanda não for atendida.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp) é a principal matéria-prima utilizada pelas usinas sucroalcooleiras brasileiras. Atualmente, as plantas utilizadas são geneticamente híbridas e os esforços para o melhoramento genético visam a obtenção de variedades que sejam mais resistentes ao ataque de pragas e ao aumento da capacidade de concentração de açúcares nas plantas, especificamente a sacarose. A partir da planta da cana-de-açúcar derivam-se vários produtos como o etanol, açúcar, aguardente, energia elétrica, entre outros (IBGE, 2017). Na Figura 1, pode-se observar as principais partes da cana.

Figura 1 - Partes da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de HASSUANI (2005)

Todas as partes da cana-de-açúcar mostradas na Figura 1 são aproveitadas pelas usinas, porém, cada parte tem uma finalidade. Os colmos por serem a porção da planta em que se concentra grande parte da sacarose, são utilizados para a produção de açúcar e etanol (DIAS, 2011). Além disso, os colmos após passarem pelo processo de moagem irão dar origem ao bagaço, o qual também é utilizado para a produção de energia elétrica (SOUZA; AZEVEDO, 2006). As folhas secas e verdes, e as ponteiros podem também serem utilizadas para a geração de energia elétrica e etanol (RÍPOLI; MOLINA; RÍPOLI, 2000).

2.2 HISTÓRICO DO APROVEITAMENTO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O plantio da cana-de-açúcar no Brasil com objetivo comercial iniciou-se ainda no período colonial. Em um primeiro momento o cultivo foi feito no Nordeste, pois, foi descoberto que o solo nessa região era propício para tal atividade. Esse fato, aliado com o conhecimento dos portugueses na comercialização do açúcar e com o elevado preço desse produto fez com que o Brasil se tornasse líder na produção mundial por aproximadamente um século (PRADO, 1976).

Outros fatores que possibilitaram o sucesso da produção de açúcar no período colonial foi a mão-de-obra escrava e a grande disponibilidade de terras. Esse período próspero da cana-de-açúcar no Brasil se estendeu até meados do século XVIII, quando houve uma crise decorrente da entrada do açúcar antilhano e o derivado de beterraba no mercado (PRADO, 1976).

No ano de 1931 a cana-de-açúcar novamente recebeu um certo destaque em razão do Decreto n.º 19 717, no dia 20 de fevereiro. No artigo 1.º desse decreto estava previsto a obrigatoriedade da adição de álcool anidro na proporção mínima de 5% na gasolina. Além disso, o artigo 9.º previa que veículos pertencentes ou a serviço da União, Estados ou municípios deveriam fazer uso de álcool, ou então gasolina com pelo menos 10% de álcool. Outro artigo que incentivava a utilização do álcool, era o artigo 10.º, por meio do qual era proibido precificar o frete pelo transporte de álcool em um valor maior que 50% do frete da gasolina. Por outro lado, de acordo com artigo 8.º, não era permitido que postos de combustível comercializassem apenas álcool, fato que não favorecia tanto os produtores de álcool (BRASIL, 1931).

No ano de 1942, a indústria produtora de etanol se destacou novamente. Nessa oportunidade, por meio do Decreto n.º 4 722 no dia 22 de setembro de 1942, o governo brasileiro informou que essa indústria se tratava de interesse nacional. Além disso, houve a taxação de preços baixos para o etanol, possivelmente tal medida foi devido à escassez de gasolina durante a Segunda Guerra Mundial. Durante o conflito de proporção mundial, há relato de que a proporção de etanol na gasolina chegou a 50% (CORTEZ, 2016).

Em 1973, o embargo promovido pelos países constituintes da OPEP (Organização dos Países Produtores de Petróleo) fez com que o preço do barril de petróleo aumentasse de 1,90 dólares para 11,20 dólares em apenas dois anos. Tal

acontecimento foi prejudicial para a economia brasileira, tendo em vista que na época aproximadamente 80% do petróleo consumido no Brasil era importado. Na mesma época as usinas de açúcar enfrentavam uma crise decorrente dos baixos preços do açúcar. Essa situação aliada com o aumento do barril, geraram condições para que no dia 14 de setembro de 1975, fosse criado o Proálcool (Programa Nacional do Álcool), por meio do Decreto n.º 76 593 (BRASIL, 1975; CORTEZ, 2016).

Durante o Proálcool foram feitas várias pesquisas para permitir o desenvolvimento de motores a álcool e *flex* no Brasil, melhores técnicas de cultivo da cana-de-açúcar e otimização das usinas. Além disso, houve também a criação e operação de usinas destinadas a produzir apenas álcool, isso fez com que a produção de álcool, no Brasil, atingisse 11,8 bilhões de litros entre 1985 e 1986. O Programa Nacional do Álcool foi finalizado, oficialmente, após o término do regime militar. Após esse período o programa deixou de receber incentivos governamentais, porém, continuaram a existir políticas que incentivassem o plantio de cana-de-açúcar e o uso do álcool como combustível para veículos (CORTEZ, 2016).

Ainda na década de 1980 outro produto começou a ser comercializado pelas usinas sucroalcooleiras, a energia elétrica. Apesar de no início da indústria sucroenergética a eficiência energética no processo de produção não ser a preocupação das usinas, contanto que não houvesse falta de energia elétrica para suprir as necessidades do empreendimento, em 1987 algumas usinas deram início à comercialização do excedente. Nesse mesmo ano, usinas sucroalcooleiras instaladas no estado de São Paulo venderam o excedente de energia elétrica para a Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL) (EID et al., 1998).

Aproximadamente 30 anos depois do aproveitamento da energia elétrica para a complementação das receitas de usinas sucroenergéticas outro produto surgiu devido a uma ação governamental. O surgimento do programa RenovaBio em 2016, o qual se objetiva a promover a produção de biocombustíveis no país (BARROS, 2018a; PASQUAL et al., 2018). O RenovaBio apresenta-se como uma oportunidade para usinas explorarem um novo produto, pois, conforme as normas do programa, produtores de biocombustíveis receberão uma quantidade de créditos de descarbonização (CBIO's), de acordo com a eficiência do processo de produção (BARROS, 2018a; GRASSI; PEREIRA, 2019).

Esses CBios obtidos poderão ser vendidos no mercado financeiro e consequentemente se tornar uma nova fonte de renda para as usinas (MME, 2017).

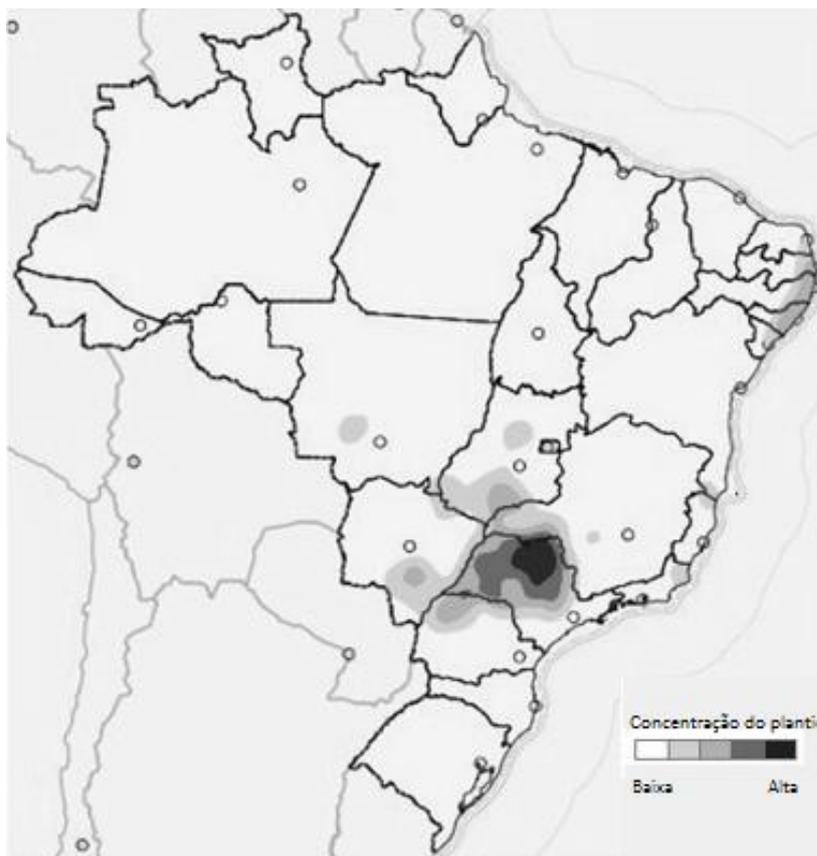
Além disso, explorar o mercado de créditos de descarbonização é interessante, pois, uma vez que haverá incentivos para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, abre-se precedente para o desenvolvimento expressivo do mercado de biocombustíveis no Brasil (SOUZA; MENDES; ARANDA, 2018).

2.3 PANORAMA DA CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

2.3.1 Indústria da cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar é cultivada em todas as regiões do Brasil, contudo, há a concentração da produção em determinadas regiões. A produção na região sudeste é a mais expressiva no país, na safra de 2018/2019, produziu-se 404.945,7 mil toneladas de cana, enquanto a segunda maior região produtora foi o centro-oeste, com 137.434 mil toneladas. As regiões nordeste e sul obtiveram resultados próximo a 40.000 mil toneladas de cana colhida. Na região norte, apesar de haver a produção de cana, a mesma é pouco expressiva em comparação com as demais regiões, com apenas 3.439,10 mil toneladas colhidas na mesma safra (CONAB, 2018b). Na Figura 2, observa-se a concentração das lavouras de cana-de-açúcar ao longo do território nacional.

Figura 2 - Concentração de lavouras de cana-de-açúcar no Brasil



Fonte: Adaptado de IBGE(2017)

Como informado anteriormente, no Brasil, de acordo com dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), em 2018, 370 estavam cadastradas (MAPA, 2018). Outro ponto interessante sobre as usinas brasileiras são os produtos que as mesmas obtêm a partir da cana-de-açúcar. Das 370 unidades, 224 são consideradas usinas mistas, ou seja, produzem tanto açúcar quanto etanol. Outras 118 unidades produzem apenas etanol, enquanto 16 usinas realizam apenas a produção do açúcar. Há ainda outras 12 unidades processadoras das quais não se tem informação sobre os produtos obtidos (MAPA, 2018).

Quanto a distribuição das usinas de cana ao longo do país, pode-se perceber pela Figura 2 que há maior concentração de usinas na região sudeste. No estado de São Paulo estão localizados 156 empreendimentos, enquanto Goiás é o segundo estado com a maior concentração de usinas, contando com 37. Na região nordeste, Alagoas é o estado que possui maior quantidade de usinas em funcionamento, no total são 21 unidades (MAPA, 2018).

O setor sucroenergético brasileiro é responsável por gerar mais de 950 mil empregos formais apenas na cadeia produtiva da cana e conta com cerca de 70 mil produtores independentes. Além disso, a cadeia sucroenergética é responsável por movimentar mais de 100 bilhões de dólares brutos e ter um produto interno bruto (PIB) do setor igual a 2% do PIB nacional. Do ponto de vista ambiental, o setor sucroenergético também possui grande relevância. Considerando-se desde o início da comercialização de carros *flex*, no Brasil, houve a redução em 350 milhões de toneladas equivalentes de CO₂ (UNICA; CEISE, 2016).

2.3.2 Produção

Para a safra de 2018/2019 espera-se que quantidade de cana-de-açúcar colhida no território brasileiro seja igual a 625.963 milhões de toneladas. Tal quantidade representa uma retração de 1,2% da capacidade de produção em relação à safra anterior (CONAB, 2018b). Para compreender as razões para essa redução é importante analisar os fatores que influenciam na produção, que são produtividade e área colhida.

2.3.3 Área colhida

É esperado que a área de cana-de-açúcar colhida na safra de 2018/2019 tenha uma redução de 1,3% em relação à safra de 2017/2018. Caso tal expectativa seja confirmada, será a segunda redução consecutiva na área cultivada. Reduções na área de cana-de-açúcar plantada vem ocorrendo desde a safra de 2016/2017 devido a alguns fatores. Primeramente, tem ocorrido redução da disponibilidade de terras para o plantio de cana-de-açúcar (CONAB, 2018b).

No que diz respeito ao aumento da área para o plantio de uma determinada cultura, cabe ao produtor decidir se possui o interesse ou não (ÁVILA, 2009). Em determinados casos, a decisão de expansão pode envolver outras culturas (SILVA e MIZIARA, 2011). Nessas situações a tomada de decisão não é um processo fácil, pois, o produtor deve considerar riscos e custos. No caso da cana-de-açúcar, os investimentos e custos são cerca de 2,5 vezes maiores que os necessários para produção de soja (MIZIARA, 2009).

Outro fator a ser considerado são os contratos entre usinas de cana e fazendeiros. Alguns contratos não têm sido renovados devido à distância entre a fazenda e usina ou pela baixa lucratividade obtida a partir de tais contratos (CONAB,

2018b). Além disso, um risco relacionado a esses contratos é o não pagamento ou atraso no pagamento aos proprietários das áreas rurais (NEVES; WAACK; MARINO, 1998). Outro fator que contribui para a diminuição da área colhida é a necessidade de renovação da lavoura, como resultado tem-se a disponibilização para novas sementes e rotação com outras culturas (CONAB, 2018b).

Problemas relacionados a saúde financeira das usinas também tem sido uma das razões para a redução na área colhida (WALTER et al., 2014). Além disso, fatores ambientais, políticos e mercadológicos também influenciaram de modo negativo o setor sucroenergético nos últimos anos (FAVA; VINICIUS; TROMBIM., 2014; SANTOS; GARCIA; SHIKIDA, 2015). Dentre os fatores políticos que foram desfavoráveis ao setor sucroenergético nos últimos anos pode-se citar o não repasse de 7,83% no valor da gasolina, conforme o reajuste realizado pela Petrobras em junho de 2012. Após isso, o governo ainda realizou a não cobrança da CIDE-combustível entre 2012 e maio de 2016 (MORAES et al., 2014). Ambas ações governamentais foram prejudiciais, pois, a gasolina, principal concorrente do etanol, foi mantida num preço que gerou uma situação insustentável para as usinas (MILANEZ et al., 2012).

2.3.4 Produtividade

A produtividade esperada para as lavouras de cana, no Brasil, para a safra de 2018/2019 é de 72.671 kg por hectare, o que é similar a produtividade obtida nas duas últimas safras. Embora o fato de não haver redução possa parecer interessante, a produtividade das lavouras de cana já alcançou quantidades maiores no passado. Por exemplo, no estado de São Paulo, na safra de 2009/2010, a produtividade quase atingiu 90.000kg por hectare, no entanto, para a safra de 2018/2019, espera-se que a produtividade média no estado seja por volta de 76.000kg por hectare. A mesma tendência vem ocorrendo em outros estados brasileiros. No Paraná, a redução entre as mesmas safras foi igual a 19.000kg por hectare, enquanto em Alagoas a diferença foi maior, igual a 26.000kg por hectare (CONAB, 2018b). Entre as razões para a redução observada nos últimos anos estão a falta de investimentos, pouca renovação das lavouras e redução nas chuvas (CARVALHO et al., 2015; MALKY; COLUMBA, 2010).

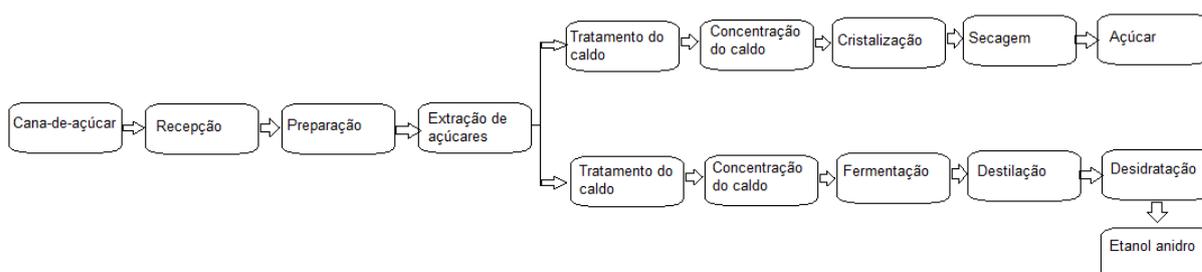
No Brasil, há uma ligação entre o contexto econômico e a diminuição na produção de cana-de-açúcar. Primeiramente, o contexto econômico no qual há o

aumento do nível de endividamento e do prejuízo obtido pelas usinas, associado com a preferência pelos bancos por uma maior liquidez e regras mais rígidas para o empréstimo de recursos financeiros levou a chances reduzidas para conseguir crédito. Uma vez que proprietários rurais possuem menor chance de obter créditos, os mesmos tendem a reduzir a expansão de lavouras e não renovar as lavouras. Tais fatores colaboraram para que houvesse redução na produtividade e produção (TREGEGGLE; ZILBERMAN, 2016).

2.4 PRODUTOS DERIVADOS DA CANA-DE-AÇÚCAR

Além dos aspectos relacionados a lavoura de cana-de-açúcar, é essencial entender quais produtos são obtidos a partir do processamento da planta. Atualmente, os principais produtos finais são o etanol e o açúcar (ZABED et al., 2017). Na Figura 3, está representado, de modo simplificado, a rota necessária para a obtenção dos produtos mencionados.

Figura 3 - Rota necessária para a produção de etanol e açúcar a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de DIAS et al. (2015)

Conforme a Figura 3, observa-se que há etapas compartilhadas para a produção de produtos finais e outras que não são. Outro aspecto interessante é a bifurcação presente após a extração de açúcares, tal divisão indica que as empresas devem escolher entre a produção de etanol ou açúcar. Portanto, isso mostra que há competitividade entre a produção de açúcar e etanol, e essa produção é orientada por fatores econômicos, como o valor de mercado desses produtos (ELISEU et al., 2019).

A energia elétrica também pode ser considerada como um produto obtido diretamente a partir da cana-de-açúcar (SMITHERS, 2014). A geração de energia elétrica em usinas é feita a partir da queima do bagaço de cana obtido após o processamento dos colmos para a obtenção dos açúcares (BEEHARRY, 1996).

Entre os benefícios de se obter eletricidade a partir da cana-de-açúcar está a menor emissão de gases estufa na atmosfera, pois, se evita a utilização de combustíveis fósseis, estima-se que a redução seja em torno de 17%, além de benefícios sócio-econômicos (JOHNSON et al., 2007).

2.4.1 Etanol

O etanol produzido pelas usinas sucroenergéticas pode ser comercializado na forma anidra e hidratada. O etanol hidratado é concentrado até 96,0% de etanol em volume e que tem aplicações para fins alimentícios, farmacêuticos, para a produção de cosméticos e como combustível (apenas no Brasil). Já o etanol anidro ou absoluto possui concentração mínima de etanol em 99% em volume, possuindo aplicações industriais e como combustível, sendo adicionado a gasolina (ZARPELON, 2008).

Um fato interessante sobre o etanol é que o mesmo pode ser considerado como de primeira, segunda, terceira e quarta geração. O etanol de primeira geração (1G) é aquele obtido a partir do processamento de açúcares, amido ou ainda de óleos vegetais, já o etanol de segunda geração (2G) é aquele obtido a partir da biomassa lignocelulósica (BUCHSPIES; KALTSCHMITT, 2018; PACHECO; SILVA, 2019). O etanol de terceira geração (3G) é aquele que faz uso de organismos marinhos, como as algas, como matéria-prima (JAMBO et al., 2016). No caso do etanol de quarta geração (4G), o mesmo é obtido à partir de algas geneticamente modificadas. Vale ressaltar que apenas o etanol de primeira e segunda geração são produzidos em escala comercial (ABDULLAH et al., 2019).

O etanol de segunda geração pode ter um impacto positivo na produção brasileira de etanol, podendo resultar em um aumento de 50% da produção atual. No entanto, esse biocombustível requer processos de produção mais eficientes para atingir todo o seu potencial. As primeiras plantas industriais de etanol de segunda geração, no Brasil, foram implantadas em 2011. No total, foram três instalações, sendo que duas em escalas comerciais e uma laboratorial. A produção obtida das três instalações juntas foi baixa, de apenas 140 milhões de litros por safra (BONOMI; DAYAN; JESUS, 2015).

Apesar de haver instalações ao nível comercial, a produção de etanol de segunda geração ainda não está realmente consolidada ao nível comercial, pois, vem enfrentando dificuldades. Tais dificuldades devem-se ao fato de ser uma

tecnologia ainda pouco desenvolvida e com elevado custo. Comparando-se o custos de produção do etanol de primeira e segunda geração percebe-se uma diferença considerável. Para o de primeira geração o custo é de USD 0,56 por litro, enquanto o de segunda geração é de USD 1,33 por litro (CHANDEL et al., 2019).

Para que ocorra o avanço mais acelerado do etanol de segunda geração, no Brasil, deve haver mais investimentos. Uma das possibilidades é o estabelecimento de parcerias em diversos níveis como de produção, tecnológico e serviços. Esse tipo de ação pode viabilizar o etanol de segunda geração em um futuro próximo (NERO; GUIMARÃES; FREIRE, 2018; ZOTT; AMIT; MASSA, 2011).

O consumo brasileiro de etanol, somando-se o anidro e hidratado, atingiu 29,7 bilhões de litros no ano de 2018, o que representa um aumento de aproximadamente 16% em relação ao ano anterior. Para o ano de 2019, até o mês de junho, o consumo de etanol anidro foi 6,7% menor em relação ao mesmo período de 2018. Já o consumo de etanol hidratado nesse período aumentou em mais de 2 bilhões de litros, o que significa um crescimento de 33%. Desse modo, espera-se que o consumo de etanol em 2019 seja maior que os anos anteriores (UNICA, 2019a).

Considerando a interação do mercado brasileiro de etanol com os outros países através da importação e exportação, percebe-se diferentes comportamentos para o etanol hidratado e anidro. Para o etanol hidratado, a quantidade importada é pouco relevante, no entanto, o volume exportado tem gerado em média 442 milhões de dólares, entre 2012 e 2018. No caso do etanol anidro, de 2012 a 2015 as exportações sempre foram consideravelmente maiores que as importações.

Contudo, em 2016 ambas tiveram valores muito próximos e nos anos seguintes as importações passaram a ser consideravelmente maiores que as exportações. Por exemplo, em 2018, as receitas com a exportação de etanol anidro foram cerca de 583 milhões de dólares, no entanto, as importações geraram um custo de 727 milhões de dólares. Como consequência, tem-se um resultado negativo na balança comercial para tal produto (ANP, 2019).

No que diz respeito aos principais países que comprem o etanol brasileiro, tem-se dois principais países, os Estados Unidos e a Coreia do Sul. Os Estados Unidos desde 2016, tem sido responsável por importar, em média, 56% do etanol brasileiro exportado, enquanto a Coreia do Sul importa, em média 30%. Por outro lado, observando-se as importações brasileiras de etanol, os Estados Unidos é o

responsável por praticamente 100% do fornecimento do biocombustível (MAPA, 2017a).

No contexto mundial, os principais produtores de etanol são os Estados Unidos e Brasil (EIA, 2015). Outro país importante no mercado mundial de etanol é a China. Levando-se em consideração que a China possui 20% da frota mundial de carros aliado ao crescimento acelerado do mercado de veículos no país, faz com que a China sofra pressões ambientais devido ao maior consumo de combustíveis. Uma maneira de diminuir tal pressão é por meio da utilização de etanol na frota de veículos no país (JIAO; LI; BAI, 2018).

A produção de etanol na China após um período de crescimento vem enfrentando dificuldades que impedem o avanço da produção do biocombustível no país. Um dos fatores que tem sido uma barreira é o aumento dos custos de produção principalmente devido ao aumento do custo da matéria-prima, que é o milho (HAO et al., 2018).

Outra barreira enfrentada por produtores de etanol na China é a redução nos subsídios para a produção do biocombustível. Tais incentivos são essenciais para que o negócio seja lucrativo, no entanto, com a redução, a lucratividade tem sido cada vez menor e em alguns casos, os produtores sofrem prejuízos. Além disso, como o preço do etanol na China é baseado no preço da gasolina e o preço da mesma tem diminuído nos últimos tempos, logo a lucratividade do etanol tem sido afetada negativamente (HAO et al., 2018).

2.4.2 Açúcar

Na safra de 2018/2019, a produção de açúcar no Brasil foi de aproximadamente 29 mil toneladas, o que representa uma redução de 24,7% para a safra anterior. No mesmo período, a produção de etanol aumentou de 27,8 mil litros para 33,1 mil litros (UNICA, 2019c). Tal situação está baseada no mix de produção etanol e açúcar, uma vez que como exposto anteriormente, as usinas devem escolher entre produzir etanol ou açúcar. A expectativa é que para a safra de 2027/2028 a cana moída seja destinada em 56% para a produção de etanol e 44% para a produção de açúcar (FIESP, 2017).

A respeito do destino do açúcar, é substancialmente maior a quantidade de açúcar exportado em relação à quantidade consumida no país (FIESP, 2017). No cenário mundial do mercado de açúcar o Brasil se apresenta como o maior

exportador de açúcar, tendo como principais compradores a China, Argélia, Arábia Saudita, Bangladesh e Emirados Árabes Unidos. Apesar da posição de destaque, o mercado internacional de açúcar não tem sido atrativo para as usinas nacionais em razão da disponibilidade de açúcar no mercado, fazendo com que os preços reduzissem. Como consequência, tem-se a preferência das usinas pela produção do etanol (CONAB, 2019b).

2.4.3 Energia elétrica

A comercialização de energia elétrica, no Brasil, desde 2004 ocorre principalmente através de dois ambientes distintos, o Ambiente de Contratação Regulada (ACR). Esse ambiente é destinado apenas à geradoras e distribuidoras, e os contratos nesse ambiente são antecedidos por licitação, com exceção de situações que sejam permitidas pela lei. Já o Ambiente de Contratação Livre (ACL), que é destinado a geradoras, comercializadoras, importadores, exportadores e consumidores livres. Esse tipo de ambiente não necessita de uma licitação, diferentemente do ACR (ANEEL, 2008).

Em 2017, 71% da energia elétrica foi comercializada no ACR, enquanto o restante foi comercializado no ACL. Nesse mesmo ano, do total de energia elétrica proveniente da biomassa, 69% foi comercializado no Ambiente de Contratação Livre e 31% no de Contratação Regulada. Especificamente quanto as usinas de cana-de-açúcar, dentre as que comercializaram energia elétrica em 2016, 57% venderam energia elétrica por meio do ACL, 8% através do ACR e 35% fizeram uso de outros tipos de ambientes (UNICA, 2018).

O setor de bioeletricidade possui grande potencial no Brasil. Em 2016, estima-se que tal tipo de eletricidade tenha tido o potencial técnico de gerar 150,9 TWh, o que seria aproximadamente a quatro usinas com a magnitude de Belo Monte no Pará. Entretanto, no mesmo ano, apenas 21,2 TWh foram exportados para rede (UNICA, 2018). Um dos fatos que explicam o baixo aproveitamento da bioeletricidade no país é o número de usinas que não vendem energia elétrica. Em 2016, 47% das usinas sucroenergéticas instaladas no país não fizeram a venda do excedente de energia elétrica (EPE, 2017). Na Tabela 1 estão as principais fontes utilizadas no país para geração de energia elétrica.

Tabela 1 - Fontes de geração de eletricidade em plantas no Brasil em 2018

Fonte	Potência Outorgada (MW)	%
Hídrica	107.546	64,9
Fóssil	28.023	16,9
Biomassa	14.675	8,9
Eólica	12.533	7,6
Nuclear	1.99	1,2
Solar	1.026	0,6
Total	165.793	100

Fonte: Adaptado de UNICA (2018)

Conforme a Tabela 1, observa-se que a energia elétrica proveniente da biomassa é a terceira principal fonte utilizada no Brasil. Em 2018, a bioeletricidade constituía 9% da potência outorgada pela ANEEL. Outro ponto interessante é que a fonte fóssil possui aproximadamente o dobro da potência outorgada da biomassa. Esse fato indica uma maior relevância das fontes fósseis em relação à biomassa. No entanto, tem-se que o gás natural possui potência outorgada de 13.705 MW, sendo menor que a biomassa (UNICA, 2018).

Quanto as fontes de energia renovável, mais especificamente sobre a bioeletricidade resultante da biomassa, tem-se a cana-de-açúcar como a principal fonte de geração. Na Figura 2 estão representadas as principais fontes de biomassa para a geração de energia elétrica.

Tabela 2 - Bioenergia utilizada em plantas de energia elétrica no Brasil em 2018

Fonte	Potência Outorgada (MW)
Cana-de-açúcar	11.247
Floresta	3.161
Biogás	1
Resíduos sólidos urbanos	135
Arroz	45
Capim elefante	32
Biocombustível líquido	5
Resíduos animais	4
Total	14.63

Fonte: Adaptado de UNICA (2018)

Pela Tabela 2, nota-se que a cana-de-açúcar é sem dúvidas a fonte mais importante para a geração de energia elétrica a partir da biomassa. Tal fato, conseqüentemente, ressalta não só a importância do setor sucroenergético, como também a relevância de um produto nem tão conhecido dessa indústria, a energia elétrica. Além disso, quando se considera a geração de energia elétrica liberada na rede em 2017, a bioeletricidade foi responsável por fornecer 25.482 GW, desse total, 84,15% foi proveniente da cana-de-açúcar (UNICA, 2018).

A produção de energia elétrica por meio da cana-de-açúcar apresenta uma série de vantagens. Primeiramente, evita-se a liberação de CO₂ na atmosfera. Em 2017, a bioeletricidade foi responsável por evitar a emissão de 9,6 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera, que é equivalente a plantar 67 milhões de árvores em 20 anos (UNICA, 2018). Além disso, a geração de energia elétrica possui grande impacto no lucro de usinas, na safra de 2014/2015 a venda de energia elétrica em alguns casos chegou a corresponder até 44% (OLIVA, 2017).

Outra vantagem é que a energia elétrica gerada a partir da cana acompanha a safra, que vai de novembro a abril. Tal fato é interessante, pois, nesse mesmo período ocorre a estiagem no país e conseqüentemente há maior dificuldade para geração de eletricidade através de hidrelétricas, em razão do baixo nível dos reservatórios. Outra vantagem é que a geração de bioeletricidade a partir da cana ocorre próximo aos grandes centros, o que reduz as perdas pela transmissão (KHATIWADA et al., 2012).

No que diz respeito a instalação em si, as usinas sucroenergéticas apresentam a vantagem de não necessitarem de uma grande área alagada para a geração de energia elétrica (SILVA et al., 2016). A necessidade de grandes reservatórios apresenta como um dos problemas, pois, 70% do potencial hidrelétrico restante do Brasil está localizado na região norte, onde a topografia não é favorável a construção de reservatórios (PEREIRA et al., 2012).

Quando se compara a bioeletricidade da cana com a energia hidrelétrica, outra vantagem que se observa é o multi-propósito das usinas de cana. Enquanto em usinas hidrelétricas produz-se apenas a eletricidade, em usinas sucroenergéticas produz-se eletricidade e combustível líquido, o etanol (OSMANI et al., 2013).

2.4.4 Crédito de descarbonização (CBio)

O mercado de crédito de descarbonização foi criado por meio do programa RenovaBio, o qual é resultado da lei n.º 13.576 de 26 dezembro de 2017. Os créditos de descarbonização são provenientes da quantidade de toneladas de CO₂ que deixam de ser emitidas na atmosfera por meio da utilização de biocombustíveis no lugar de combustíveis fósseis (SAMPAIO et al., 2019).

Os CBios são calculados a partir da RenovaCalc^{MD}. Essa calculadora utiliza parâmetros pré-estabelecidos e foi elaborada pela Embrapa Meio Ambiente em conjunto com especialistas de diversas áreas. Para o cálculo de um CBio é feito o seguinte procedimento: primeiramente calcula-se a intensidade de carbono do biocombustível e posteriormente o do seu equivalente fóssil, por exemplo, etanol (biocombustível) e gasolina (combustível fóssil equivalente). A diferença obtida representará a nota de Eficiência Energético-Ambiental, a qual será atrelada ao volume de biocombustível produzido pela usina, desse modo ter-se-á a quantidade de CBio. Cada crédito representa uma tonelada de gases estufa que deixou de ser emitido (MATSUURA et al., 2018).

Após a contabilização dos CBios, os mesmos poderão serem comercializados, nesse momento é que de fato tem-se um produto. Para que o governo brasileiro possa cumprir as metas estabelecidas no Acordo de Paris, foram definidas metas para as distribuidoras de combustível, para tanto as distribuidoras necessitam de adquirir CBios. É importante destacar que o CBio poderá ser comercializado em bolsa de valores também, como qualquer outro ativo. Portanto, pessoas físicas também serão capazes de negociar tais ativos. Fazendo-se um comparativo, é como se o CBIO fosse uma criptomoeda, porém, com a vantagem de estimular a redução de emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (GRASSI; PEREIRA, 2019).

Nas Tabelas 3 e 4 é possível observar a quantidade de litros de biocombustível necessária para a geração de 1 CBio. Os dados na Tabela 1 são baseados em uma usina de desempenho mediano e nos parâmetros utilizados para a elaboração da RenovaCalc^{MD}.

Tabela 3 - Quantidade necessária de etanol anidro para gerar 1 CBio

Etanol anidro	Intensidade de carbono (gCO ₂ eq/MJ)	MJ/L	Redução da emissão	Nota de eficiência energética	gCO ₂ eq/L	Litro de combustível para gerar 1 CBio
2G 1G e	4,4	22,35	95%	83	1.855,35	538,98
2G	18,6	22,35	79%	68,8	1.537,93	650,22
1G	20,5	22,35	77%	66,9	1.495,46	668,69

Fonte: Adaptado de NOVACANA (2018)

Tabela 4 - Quantidade de etanol hidratado necessária para gerar 1 CBio

Etanol hidratado	Intensidade de carbono (gCO ₂ eq/MJ)	MJ/L	Redução da emissão	Nota de eficiência energética	gCO ₂ eq/L	Litro de combustível para gerar 1 CBIO
2G	4,7	21,34	95%	82,7	1.764,94	566,59
1G e 2G	18,9	21,34	78%	68,5	1.461,89	684,05
1G	20,8	21,34	76%	66,6	1.421,34	703,56

Fonte: Adaptado de NOVACANA (2018)

Nas Tabelas 3 e 4, é importante destacar alguns aspectos. No quesito intensidade de carbono, considera-se a soma das emissões durante a fase agrícola, industrial, transporte e utilização do biocombustível. Já na quantidade de megajoules por litro (MJ/Litro), tais valores são dados fornecidos na nota técnica da RenovaCalc. A redução na emissão é considerada como sendo a diferença das emissões do biocombustível e do seu equivalente fóssil. Sobre os valores de nota de eficiência energética, considera-se a quantidade de gases não emitidos na atmosfera devido à produção do biocombustível. A unidade gCO₂eq/L refere-se a quantidade equivalente em gramas de CO₂.

Outro ponto interessante a ser observado em relação ao mercado de crédito de descarbonização é a expectativa de evolução do mesmo. Enquanto para o ano de 2020 espera-se que sejam gerados por volta de 50 milhões de CBios, considerando a produção de etanol anidro, hidratado e biodiesel. Já no ano de 2030, a expectativa é de que sejam gerados cerca de 90 milhões de CBios, dos quais 58 milhões serão provenientes do etanol. Desse modo, observa-se o impacto positivo do mercado de créditos de descarbonização pode ter no setor sucroenergético (MME, 2017).

2.5 Tendência de consumo de açúcar e etanol

2.5.1 Açúcar

O consumo de açúcar está relacionado a alguns riscos à saúde como, por exemplo, aumentar a possibilidade de desenvolver câncer devido à alteração dos níveis de insulina no corpo humano, estresse oxidativo, inflamação e aumento da gordura corporal. Além disso, aconselha-se que a população reduza o consumo de açúcar, pois, pode levar à obesidade e afetar a saúde cardiometabólica, o que também pode aumentar os riscos de câncer (MAKAREM et al., 2018). Outro aspecto a ser observado é a associação de ingestão de sacarose e o consumo de produtos como bolachas e pães doces com o elevado risco de câncer endometrial (FRIBERG; WALLIN; WOLK, 2011).

Considerando os riscos relacionados à saúde humana em decorrência do consumo de açúcar em excesso, algumas legislações têm sido criadas com o intuito de fazer com que a população diminua o consumo de açúcar. No Brasil, há políticas que visam restringir a venda de bebidas açucaradas em escolas (BERGALLO et al., 2018). Tal restrição pretende abordar não só os efeitos negativos causados pelo consumo de açúcar em excesso por crianças, mas também o hábito de ingestão de alimentos não saudáveis (MONTERROSA et al., 2015).

Outra restrição é quanto a divulgação ou qualquer tipo de promoção de alimentos considerados não saudáveis. Empresas não podem se aproveitar da inocência de crianças para as suas vendas, e também não devem estimular o desenvolvimento de hábitos alimentares que não sejam saudáveis (BERGALLO et al., 2018).

Além do Brasil, outros 13 países da América-Latina adotaram políticas para incentivar a redução do consumo de açúcares. As medidas tomadas nesses países também incluem o aumento de impostos em bebidas açucaradas (BERGALLO et al., 2018). A prática de cobrança de impostos em bebidas açucaradas também está presente na Europa em países como Finlândia, França, Hungria e Letônia (LLOYD-WILLIAMS et al., 2014) e em países da Oceania como Fiji, Nauru, Samoa e Polinésia Francesa (THOW et al., 2010). É interessante notar a eficácia de tais medidas, pois, com a taxação de bebidas açucaradas a população reduzirá o consumo desses produtos e conseqüentemente estimula-se o consumo de bebidas saudáveis como sucos naturais (ESCOBAR et al., 2013). Como resultado da

taxação, a arrecadação obtida poderá beneficiar a própria população, como, por exemplo, por meio de melhorias no setor da saúde (SMITH, 2012).

2.5.2 Etanol

A frota brasileira de veículos entre os anos de 2017/2018 era composta por aproximadamente 39 milhões de veículos, dos quais 24% eram veículos *flex*, ou seja, movidos tanto a etanol quanto a gasolina. No entanto, para os anos de 2027/2028 espera-se que a frota brasileira atinga por volta de 45 milhões de veículos, sendo que 26% serão automóveis *flex*. O aumento de 2% aparentemente é pequeno, contudo, tal aumento significa um acréscimo de 3 milhões de veículos. Outro fator a ser observado, é que mesmo os veículos que não são *flex* e que são movidos apenas a gasolina, ainda possuem uma porcentagem de etanol adicionado à gasolina (FIESP, 2017).

É interessante, também, analisar a expectativa de crescimento da demanda doméstica. Enquanto para o etanol a expectativa para os anos de 2027/2028 o crescimento na demanda doméstica seja de 41% em relação ao ano de 2017, para o açúcar a espera-se que a demanda doméstica aumente apenas 6%. No quesito exportação, espera-se que o crescimento na exportação de etanol para os anos de 2027/2028 em relação a 2017 seja de 269%, em contrapartida, para o açúcar o aumento esperado é de 30% (FIESP, 2017). Quanto ao volume de etanol, espera-se a demanda de 47,1 milhões de metros cúbicos para o ano de 2028 (BARROS, 2018a).

Em relação à tendência para a etanol, é importante observar a questão da entrada de carros elétricos no Brasil, pois, é um assunto que gera insegurança no setor sucroenergético. Entretanto, tal insegurança pode ser amenizada analisando-se fatores para a entrada dessa nova tecnologia automotiva no mercado. Primeiramente, deve-se considerar que historicamente a mudança para novas fontes energéticas é feita de maneira lenta. Além disso, é importante considerar que a introdução do carro elétrico exigiria infraestrutura como locais adequados para que fosse feito o descarte e reciclagem de baterias (EPE, 2017).

Especificamente quanto a entrada de carros elétricos e híbridos no mercado brasileiro, a expectativa é que essa transição seja feita de modo mais lento que em países desenvolvidos. A primeira razão para isso é o preço de tais veículos. Atualmente no Brasil os carros híbridos ou elétricos são vendidos na faixa de preço

que varia entre R\$115.000,00 a R\$250.000,00 (EPE, 2017). No ano de 2017, houve o licenciamento de aproximadamente 2 milhões de veículos *flex*, enquanto de carros elétricos ou híbridos foram apenas 3.300 unidades (ANFAVEA, 2018).

Levando-se em conta o valor de aquisição de um veículo híbrido ou elétrico, os brasileiros dão preferência para automóveis luxuosos como os *SUV's*, caminhonetes e *sedans* médios. Como tais características diferem das dos veículos elétricos e híbridos, percebe-se que há uma incompatibilidade do valor desses automóveis com a preferência de compra dos brasileiros com poder aquisitivo equivalente (EPE, 2017).

Outro fator que dificulta a transição energética no setor automotivo é a questão de incentivo governamental. Essa tecnologia tem necessitado de incentivos governamentais, até mesmo em países nos quais a população apresenta elevada renda. Nesse sentido, no Brasil seria difícil haver incentivos governamentais especialmente devido às restrições orçamentárias enfrentadas pelo país nos últimos anos. Além disso, um dos principais motivos para a utilização de veículos movidos a energia elétrica ou híbridos é para que seja feita a redução de emissão de gases de efeito estufa. No entanto, no Brasil já existe uma alternativa para esse problema, o etanol, o qual já vem sendo utilizado e não exige mudança de infraestrutura. Como resultado das dificuldades para a implantação de carros elétricos e híbridos no Brasil, espera-se que, em 2026, os carros elétricos e híbridos componham menos 1% da frota nacional (EPE, 2017).

2.6 PRINCIPAIS USOS DO ETANOL NO BRASIL

Quando se fala de etanol, normalmente tende-se relacionar diretamente o produto com o combustível, pois, é a forma utilização mais comum. Entretanto, é importante identificar quais outras aplicações são feitas com o etanol. O motivo para isso é que caso a demanda futura de etanol não seja atendida, o impacto gerado não será apenas no mercado de biocombustíveis, mas também nas diversas indústrias onde o etanol é utilizado.

O etanol pode ser classificado de duas maneiras de acordo com a sua finalidade, etanol carburante e para outros fins. O etanol carburante é aquele utilizado como combustível em veículos, enquanto o etanol para outros fins possui aplicação na indústria farmacêutica, de alimentos, entre outras. Atualmente, de todo

etanol produzido no Brasil, cerca de 80% é destinado ao uso como biocombustível, 10% é exportado e o restante é utilizado nas diversas indústrias existentes no país (ABDALA, 2017).

2.7 MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA PARA PRODUÇÃO BRASILEIRA DE ETANOL

Um fator importante a ser analisado na questão da produção de etanol no Brasil, principalmente considerando a questão de atender a demanda crescente do biocombustível no país, é se há outra possibilidade de matéria-prima para o processo produtivo. A vantagem de haver outra fonte de matéria-prima para a produção de etanol é que tal fato contribui para aumentar a relevância do biocombustível no país e também para gerar mais estabilidade no setor (ECKERT et al., 2018).

No mundo há vários tipos de matéria-prima sendo utilizadas para produção de etanol, por exemplo: beterraba, sorgo e matéria lignocelulósica (DURASAM et al., 2017; ECKERT et al., 2018; KIM; DAY, 2011; LAOPAIBOON et al., 2007; VIIKARI; VEHMAANPERA; KOIVULA, 2012). No caso do Brasil, uma fonte alternativa para a produção de etanol é o milho pelo fato do Brasil ser o segundo maior produtor no mundo (ALLEN; VALDES, 2016). Outro fator que contribui para produção do etanol de milho pelo Brasil é que o país possui tecnologia avançada na agricultura de grãos. Portanto, há a possibilidade de melhorias cada vez maiores nesse setor (ALBRECHT; MISSIO, 2013).

É importante destacar que a produção de etanol de milho no Brasil já existe e está em operação em plantas localizadas no estado do Mato Grosso, Goiás e Paraná. Algumas dessas plantas são capazes de produzir tanto etanol de milho quanto de cana-de-açúcar. Na safra de 2018/2019, essas usinas produziram cerca de 790 milhões de litros do biocombustível (CONAB, 2019a).

2.7.1 Comparativo entre o etanol de milho e o etanol da cana-de-açúcar

Para a realização de um comparativo eficiente é importante que alguns fatores sejam analisados. Dentre os principais aspectos a serem analisados estão: custo por litro, estoque, tempo de fermentação, produtividade (litros de etanol por tonelada de matéria-prima), produtividade (tonelada de matéria-prima por hectare),

volume de pesticidas), volume de água, emissão de gases de efeito estufa, dias de funcionamento da planta e sub-produtos.

Primeiramente, analisando-se o custo por litro de etanol hidratado de milho, tem-se que o valor varia entre R\$ 0,97 e R\$ 1,84. É importante destacar que o valor de R\$ 0,97 considera o cenário mais otimista (PEREIRA, 2017). Por outro lado, o etanol de cana-de-açúcar tem custo de R\$ 1,80 para o etanol anidro e de R\$ 1,71 para o etanol hidratado (BIGATON et al., 2017). Em relação a possibilidade de estocar, o milho pode ser estocado por várias semanas, enquanto que a cana-de-açúcar deve ser processada logo após a colheita devido a contaminação bacteriana (LOPES et al., 2016).

No que diz respeito a produtividade de etanol por tonelada de matéria-prima, nota-se que há uma vantagem expressiva para o etanol de milho. Enquanto é possível produzir 400 litros de etanol por meio do processamento de uma tonelada de milho, para cada tonelada de cana-de-açúcar produz-se entre 70 e 85 litros de tonelada de etanol (FREITAS; MIURA, 2018). No entanto, se considerar a produtividade de matéria-prima por hectare, percebe-se uma vantagem para a cana-de-açúcar. A produtividade da cana por hectare é de 77 toneladas, em média, enquanto para o milho é de 5,5 toneladas por hectare (CONAB, 2018a; MAPA, 2017b).

Analisando-se volume de pesticida necessário para o cultivo de ambas matérias-primas, observa-se que há desvantagem para o etanol de milho. A lavoura de milho necessita de 7,4 litros de pesticida por hectare, por outro lado, a lavoura de cana-de-açúcar requer 4,8 litros (PIGNATI et al., 2017). No quesito volume de água necessário para a produção de etanol por meio dessas duas matérias-primas, ambas necessitam de volumes parecidos. O etanol de milho requer 2.570 litros, enquanto o etanol de cana precisa de 2.516 litros (CHIU et al., 2015).

Em relação às emissões de gases de efeito estufa, tem-se novamente que o processo produtivo de etanol para ambas matérias-primas emitem, de modo geral, a mesma quantidade, cerca de 20 gramas equivalentes de CO₂ por megajoule (ICF, 2017; WANG et al., 2014). Sobre a quantidade de dias em funcionamento de uma planta que produz etanol milho, tem-se o valor de 345 dias, por outro lado, a planta que produz etanol de cana opera entre 200 e 240 dias por ano. Entre os motivos para isso está a possibilidade de estocar o milho (FREITAS; MIURA, 2018; LOPES

et al., 2016). Por último, no quesito de sub-produtos, pode-se citar os grãos destilados com solúveis e para a cana-de-açúcar tem-se a vinhaça (DALL'AGNOL, 2017; MORAES et al., 2015). Os grãos destilados com solúveis podem ser utilizados como ração para bovinos, enquanto que a vinhaça possui aplicações como a fertirrigação e a sua queima para geração de energia elétrica (BEBÉ et al., 2009; CHRISTOFOLETTI et al., 2013; MORAES et al., 2014).

2.8 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ETANOL

2.8.1 Pré-processamento da cana

Para que seja possível obter o etanol de primeira geração a cana-de-açúcar deve passar por uma série de etapas. A seguir, serão detalhadas cada uma dessas fases. Na Figura 4 está apresentado o caminho percorrido pela cana-de-açúcar até chegar na destilaria, esse caminho consiste no pré-processamento da cana.

Figura 4 - Etapas do pré-processamento da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de BP BIOFUELS (2012)

2.8.1.1 Colheita da cana-de-açúcar

A colheita da cana atualmente pode ser feita de duas maneiras, manualmente e mecanicamente. O procedimento manual requer que seja feita a queima previamente ao corte da planta devido ao risco que as folhas cortantes da planta oferecem aos trabalhadores (DIAS, 2008). Tal procedimento vem sendo cada vez menos utilizado, em razão de fatores ambientais, legais e técnicos. Entre problemas ambientais relacionados com a queima da cana está a emissão de compostos nitrogenados como NO e NO₂. Esses compostos podem causar a contaminação de recursos hídricos e a chuva ácida (CARDOSO; MACHADO; PEREIRA, 2008).

A flora da região ao redor das queimadas também é afetada, isso porque a colheita é feita em períodos de seca, fazendo com que o fogo possa se espalhar

mais facilmente e atingir áreas de preservação ambiental, matas ciliares e até mesmo outras culturas. Além da flora, a fauna também é afetada negativamente pelas queimadas. Pelo fato do fogo se espalhar rapidamente, é comum que animais e insetos não consigam escapar a tempo. Vale destacar que não só o fogo em si, mas a elevação da temperatura e a fumaça também podem prejudicar a fauna (RONQUIM, 2010).

No que diz respeito aos aspectos técnicos negativos da colheita manual da cana tem-se perda de açúcares por exsudação, bem como a perda de palha. A palha pode ser posteriormente utilizada para a geração de energia elétrica, pode ser deixada no campo para formar uma camada que impedirá o desenvolvimento de outras plantas, portanto, ocorre a diminuição dos gastos com herbicidas (DIAS, 2011).

Considerando a legislação, no estado de São Paulo, que é o maior produtor de cana-de-açúcar no Brasil, a lei n.º 11.241, de 19 de setembro de 2002 prevê o fim gradativo da prática de queimadas em canaviais até o ano de 2021 para áreas mecanizáveis e até 2031 para as não mecanizáveis (ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2002). Além disso, o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético firmado com o governo paulista estabeleceu um acordo voluntário que previa fim das queimadas em 2014 para áreas mecanizáveis e 2017 para as não mecanizáveis. É importante destacar que esse protocolo é válido para as empresas que assinaram o acordo (MATOS et al., 2014).

Diferentemente da colheita manual, a colheita mecanizada não necessita de queimadas, portanto, eliminam-se vários problemas, como os comentados anteriormente. Outra vantagem da mecanização da colheita é a economia feita. Enquanto um trabalhador rural, no estado de São Paulo, faz, em média, o corte de 8,67 toneladas de cana por dia a colheitadeira executa o corte de 549 toneladas por dia. No final de uma safra, com a utilização de cada colheitadeira reduz-se aproximadamente em 64 o número de trabalhadores rurais (TORQUATO, 2013). Mesmo com o alto custo da aquisição de uma colheitadeira estima-se que há uma redução de 25% com a colheita mecanizada. Além disso, o uso de maquinário na atividade de corte significa aumento na produtividade (RONQUIM, 2010).

Mesmo com os pontos positivos apresentados anteriormente em relação à aplicação da colheita mecanizada, bem como os aspectos legais, acordos e questões ambientais ainda é possível observar a utilização de queimadas no momento da colheita da cana. Na Tabela 5, pode-se observar o índice de

mecanização da colheita de cana-de-açúcar em algumas cidades no estado de São Paulo.

Tabela 5 - Mecanização em cidades paulistas produtoras de cana-de-açúcar na safra 2016/2017

Cidade	Índice de mecanização (%)	Produção	Produção(t)	
			Mecanizada	Manual
Andradina	99,5	20.579.255	20.473.495	105.76
Araçatuba	95,5	17.699.011	16.948.321	750.69
Araraquara	92,1	22.557.932	20.709.449	1.848.483
Assis	94,2	17.346.024	16.415.943	930.081
Avaré	91,3	4.971.690	4.566.565	405.125
Barretos	93,2	35.973.468	33.609.502	2.363.966
Bauru	77,7	6.507.391	5.018.456	1.488.936
Botucatu	86,5	6.780.790	5.856.466	924.344
Bragança Paulista	26	158.725	40.04	118.685
Campinas	77,3	2.143.455.	1.656.590	486.865
Catanduva	88,1	20.146.181	17.749.975	2.396.206
Dracena	83,6	10.347.535	8.709.080	1.638.455
Franca	92,3	12.727.670	11.711.863	1.015.807
General Salgado	85,7	11.975.622	10.344.650	1.630.972
Itapetininga	56,1	3.653.028	2.091.200	1.561.828
Jaboticabal	92,3	23.003.575	21.281.455	1.722.120
Jaú	86,3	19.750.740	16.920.006	2.830.734
Limeira	81,8	13.709.972	11.249.309	2.460.663
Lins	97,9	12.374.178	12.115.213	258.965
Mogi-Mirim	78	3.621.480	2.935.262	686.218
Orlândia	92,7	29.997.616	27.796.227	2.201.389
Piracicaba	82,2	12.660.790	10.445.875	2.214.916
Presidente Prudente	88,5	20.066.531	17.820.989	2.245.542
Presidente Venceslau	98,6	8.692.793	8.579.024	113.769
Ribeirão Preto	84,4	27.695.382	23.432.978	4.262.405
São José do Rio Preto	89,5	22.650.770	20.317.945	2.332.825
Sorocaba	72,7	2.401.960	1.730.512	671.488
Tupã	87,7	10.848.798	10.634.855	776.967
Votuporanga	98	10.848.798	10.634.855	213.943

Fonte: Adaptado de FREDO; CASER (2017)

Conforme a Tabela 5, nota-se que maior parte do estado de São Paulo possui elevados índices de mecanização, com níveis acima de 90%. No entanto, em

idades como Bragança Paulista e Itapetininga percebe-se um nível muito baixo de mecanização das lavouras de cana. Todavia, vale destacar que nessas duas cidades a produção de cana-de-açúcar é consideravelmente inferior às demais. Por outro lado, há cidades como Sorocaba, Mogi-Mirim e Campinas em que a produção de cana-de-açúcar é alta, porém, o nível de mecanização ainda está abaixo de 80% ainda na safra de 2016/2017. Além desses municípios, há vários outros em que há grandes níveis de produção de cana, mas com níveis de mecanização abaixo de 90%, por exemplo, Catanduva, General Salgado e Jaú.

É importante destacar que algumas áreas devido à inclinação da superfície torna-se difícil realizar a colheita mecanizada, portanto, o que se tem observado é a migração para outras atividades agrícolas (FREDO; CASER, 2017).

2.8.1.2 Transporte e carregamento da cana

De acordo com a Figura 4, após a colheita da cana, a próxima atividade é o transporte e descarregamento. Essas duas atividades devem ser bem planejadas para que seja possível reduzir o tempo entre a colheita e o processamento. O motivo para a menor espera é para evitar a contaminação bacteriana, a qual pode causar a perda de açúcares (LOPES et al., 2016). Portanto, é importante que haja controle de tráfego de caminhões, colheitadeiras, bem como planejamento do canavial, de modo que o tempo de espera seja o menor possível (DIAS, 2008).

2.8.1.3 Preparação da cana-de-açúcar

Após o transporte e descarregamento da cana é feita a preparação da cana. Primeiramente, deve ser feita a limpeza da cana. Essa etapa é essencial devido à presença de impurezas minerais e vegetais, as quais precisam ser removidas, pois, podem afetar negativamente as etapas posteriores em razão da multiplicação de micro-organismos. Usualmente, a etapa de limpeza consiste na utilização de água em circuito fechado, a qual irá remover parte das impurezas aderidas à cana. Vale destacar que a água de lavagem é decantada para ser reutilizada posteriormente (DIAS, 2008).

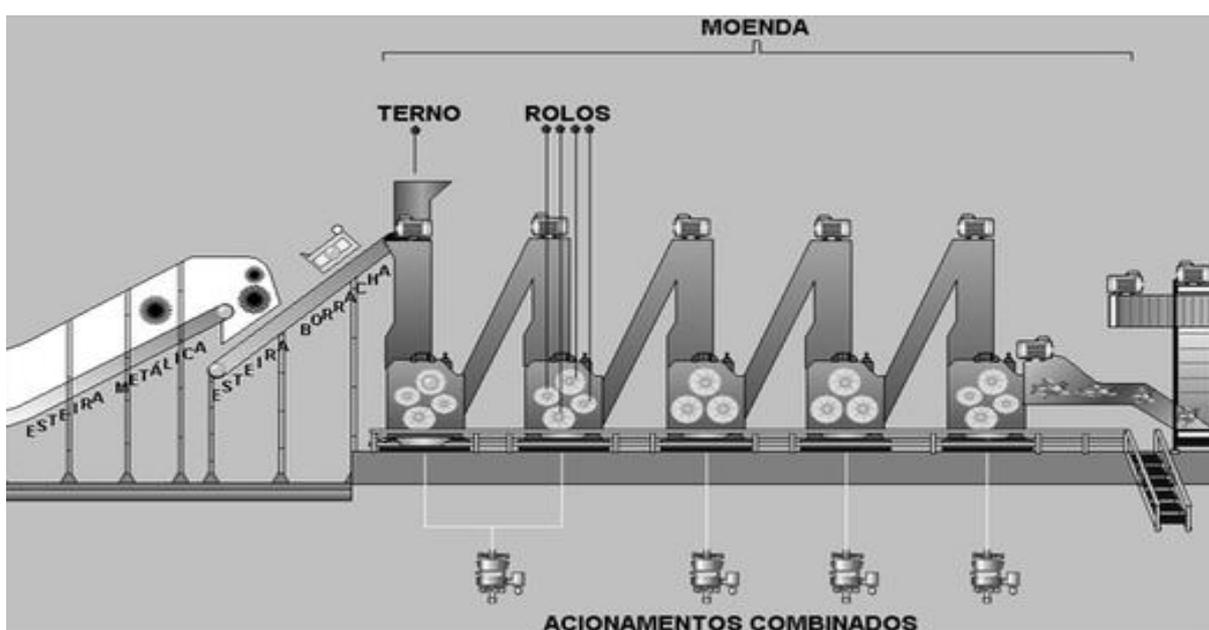
Uma vez que a cana é lavada, a mesma segue para a próxima etapa que consiste no corte em pedaços menores. Esse corte é realizado por facas giratórias conhecidas como niveladores. Em seguida é feita o esmagamento dos pedaços de cana, a fim de propiciar melhores condições para a etapa seguinte, que é a extração

de açúcares. Durante as etapas de corte e limpeza há, geralmente, um eletroímã com a função de promover a eliminação de materiais metálicos que possam ter sido aderidos à cana no momento da colheita no campo (DIAS, 2008).

2.8.1.4 Extração do caldo da cana

A última etapa do pré-processamento da cana-de-açúcar como apresentado na Figura 4 é a extração de açúcares. Geralmente, no Brasil, essa etapa é realizada por meio da utilização de moendas.

Figura 5 - Esquemática de uma moenda no pré-processamento da cana



Fonte: Adaptado de STESSE (2011)

Na Figura 5 pode-se observar como é constituída uma moenda. Basicamente, uma moenda é constituída por ternos, os quais possuem de três a quatro rolos. Com o intuito de evitar parada na produção da usina, seja por manutenção ou defeito, é aconselhável que haja duas moendas. Na chegada a moenda, a cana picada anteriormente é prensada pelos rolos a altas pressões, de modo a promover a retirada do caldo localizado no interior das células da cana. Esse processo de compressão para a retirada do caldo é repetido em todos os ternos (DIAS, 2008). Entre os ternos é acrescida a água (embebição) com o intuito de elevar o nível de extração de sacarose (DIAS et al., 2015). No que diz respeito ao funcionamento das moendas, os ternos podem ter acionamento feito por turbinas a vapor, no entanto, o

acionamento elétrico é mais interessante, pois, permite a economia de energia (DIAS, 2008).

2.8.2 Processamento da cana-de-açúcar

No que diz respeito ao processamento da cana-de-açúcar, conforme apresentado na Figura 3, essa etapa se divide em duas partes. Após a extração dos açúcares, o caldo pode ser tratado visando a produção de açúcar ou pode ser beneficiado com o intuito de obter-se o etanol de primeira geração. A seguir, as etapas relativas ao processamento da cana-de-açúcar serão descritas visando a produção de etanol. Portanto, não será dado enfoque para a produção de açúcar.

2.8.2.1 Tratamento do caldo da cana-de-açúcar

O caldo que será tratado é proveniente da última etapa do pré-processamento, a extração de açúcares. Nessa etapa, o primeiro passo é fazer a remoção de impurezas, que possam ter passado da etapa de extração de açúcares. Tais impurezas podem ser, por exemplo, minerais ou pequenas partículas vegetais (DIAS et al., 2015). Essa remoção de partículas pode ser feita por meio da utilização de peneiras ou hidrociclones (DIAS, 2008).

Feito isso, é necessário o aquecimento do caldo até 70 °C e em seguida adiciona-se o hidróxido de cálcio o qual tem a função de realizar a correção do pH, para que o mesmo esteja entre 7,0 e 7,2. É importante que o pH esteja nessa faixa, pois, para faixas de pH mais ácidos ocorre a decomposição da sacarose e consequentemente a perda de açúcares (DIAS, 2008).

Após a adição do hidróxido de cálcio, é feito o aquecimento até 105 °C. Vale destacar que o aquecimento até temperaturas menores, pode acarretar problemas na clarificação como a formação de flocos e menor eficiência na retirada de gases. Caso o aquecimento seja feito até temperaturas mais elevadas há a perda de açúcares. Além disso, a temperatura ligeiramente acima do ponto de ebulição da água facilita a obtenção de um resultado satisfatório na etapa a seguir, que é a utilização de um balão flash para remoção de gases não condensáveis (DIAS, 2008).

Em seguida a etapa de retirada de gases, é feita a clarificação. Essa etapa consiste na decantação do caldo com a utilização de um polímero floculante para que sejam eliminadas impurezas que possam ter chegado até essa etapa. O produto

de fundo obtido no decantador é filtrado e recirculado e passa novamente pelo balão flash, pois, o mesmo possui uma quantidade de açúcares (DIAS, 2008).

Vale destacar que o tratamento do caldo para a produção de etanol e açúcar é muito semelhante. A diferença está no fato que para a produção de açúcar, é necessário fazer a sulfitação, visando eliminar componentes que possam afetar na coloração do caldo (PINA et al., 2017). Uma vez que a coloração não tem influência na produção de etanol, não é preciso realizar essa etapa (DIAS, 2008).

2.8.2.2 Concentração do caldo

A etapa de concentração do caldo clarificado é importante, pois, requer-se uma determinada concentração de açúcares no caldo para que a fermentação seja realizada (DIAS et al., 2015). O processo de concentração pode ser feito por meio da utilização de evaporadores. Geralmente, empregam-se evaporadores com 5 ou mais estágios (DIAS, 2008).

Na concentração o caldo é concentrado de 15° Brix até cerca de 22° Brix. É usual fazer a concentração de apenas parte do caldo até 65° Brix e então realizar a mistura com o restante para que seja obtida a concentração desejada de todo o caldo (DIAS, 2008).

Vale destacar que em seguida a concentração é interessante que seja feita a esterilização do caldo, antes de iniciar a fermentação. Essa ação faz com que se elimine microorganismos que podem afetar negativamente a fermentação (DIAS, 2008).

2.8.2.3 Fermentação

A fermentação realizada em usinas de cana para a produção de etanol, de modo geral, segue o processo de Melle-Boinot, o qual consiste no reciclo de células de leveduras (LALUCE et al., 2016). O reciclo de células é consiste primeiramente, na centrifugação da levedura e posteriormente no tratamento da levedura com água e ácido sulfúrico, visando remover compostos que inibem a ação do microorganismo (DIAS, 2008). A vantagem de se utilizar o reciclo de células é a obtenção de maior produção de etanol e a melhor adaptação da levedura a concentrações maiores tanto de etanol quanto de açúcar. Além disso, outra vantagem que se tem é o menor tempo necessário para se realizar o processo fermentativo (CARLOS; OLITTA; NITSCHKE, 2011; OLIVA et al., 2013).

Durante o processo fermentativo, é essencial que se tenha o controle da temperatura. Para atingir um resultado satisfatório no que diz respeito a produção de etanol, é estabelecido que deve-se evitar temperaturas acima de 32 °C (ALDIGUIER et al., 2004). Contudo, em países tropicais, como é o caso do Brasil, onde as temperaturas são, na maior parte do ano, elevadas, deve-se ter um cuidado maior para evitar a elevação da temperatura no momento da fermentação (LALUCE et al., 2016).

2.8.2.4 Destilação

Uma vez que a fermentação é concluída, inicia-se a destilação. No início deste processo o vinho, que é o produto da fermentação, sem leveduras possui concentração de etanol de cerca de 10% em massa (DIAS, 2008). Entretanto, o etanol hidratado, que é uma das opções de combustível utilizados no Brasil, precisa ter concentração de etanol até cerca de 96% (ZARPELON, 2008). Visando o aumento do teor de etanol, utiliza-se a destilação (DIAS et al., 2015).

O processo de destilação apresenta vários desafios para a indústria brasileira do etanol, entre eles estão a integração energética devido ao elevado consumo energético e a sustentabilidade ambiental. No quesito ambiental, um dos grandes desafios está relacionado a produção de vinhaça. A vinhaça é um resíduo rico em minerais que costuma ser utilizada na fertirrigação. Entretanto, a mesma pode causar problemas ambientais como a salinização do solo e contaminação de efluentes (SILVA et al., 2018).

2.8.2.5 Desidratação

Como mencionado anteriormente, o etanol também pode ser utilizado na forma de etanol anidro como combustível. No entanto, para se obter o etanol anidro é necessário fazer a desidratação, de modo que se reduza o teor de água na mistura (DIAS et al., 2015). Conforme a legislação brasileira, o etanol anidro deve ter pelo menos 99% em volume de etanol (ZARPELON, 2008).

No que diz respeito a desidratação do etanol, há mais de uma possibilidade para se obter o etanol anidro. Atualmente, pode-se fazer uso de destilação azeotrópica com ciclohexano, destilação extrativa com monoetilenoglicol ou ainda fazer uso da adsorção com peneiras moleculares. O método mais utilizado é a destilação azeotrópica ainda que apresente elevado consumo energético.

Possivelmente, uma das razões para isso, é o fato de essa técnica ter sido a única alternativa para a obtenção do etanol anidro até meados dos anos 1990 (DIAS et al., 2015).

2.9 MELHORIAS PROPOSTAS

Nesta seção serão abordadas melhorias propostas na literatura. Essas mudanças visam abranger tanto as etapas do pré-processamento quanto as do processamento. O intuito delas é fornecer possibilidades para que usinas de cana-de-açúcar apresentem melhor desempenho em aspectos técnicos, sócio-econômicos e ambientais. Dessa forma, os empreendimentos do setor sucroenergético estarão mais aptos para enfrentar desafios futuros, como o aumento na demanda de etanol, e os atuais, como problemas financeiros. Outra possibilidade interessante, é que tais melhorias podem permitir que as usinas desfrutem de oportunidades para o crescimento do setor sucroenergético, por exemplo, o programa RenovaBio.

2.9.1 Melhorias no pré-processamento

2.9.1.1 Colheita

Relacionado a colheita, foi visto anteriormente que atualmente há duas maneiras de se realizar essa etapa, sendo elas a mecanizada e manual. Além disso, foi mostrado que a colheita mecanizada possui diversas vantagens em relação a manual, especialmente no que diz respeito aos aspectos ambientais e de produtividade. Entretanto, a colheita mecanizada possui possibilidades de melhoria no seu desempenho.

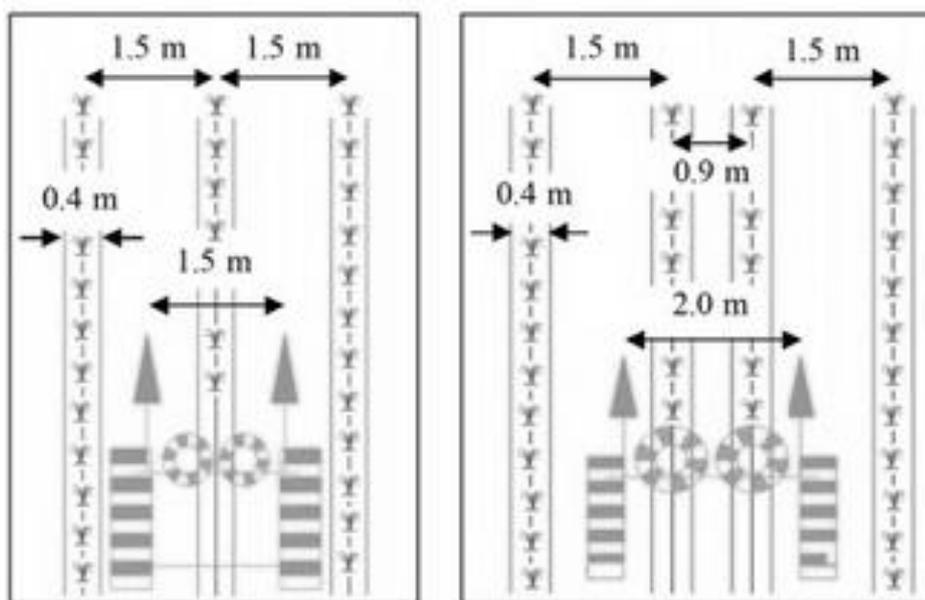
Se o advento da mecanização nos canaviais no passado permitiu o aumento significativo da produtividade, atualmente, ela é um empecilho para que se consiga aumentar cada vez mais a quantidade de cana colhida nas lavouras. O motivo para isso é que o tráfego de maquinários que pesam cerca 50 toneladas vem sendo prejudicial ao solo. Dentre os problemas causados está a compactação do solo, o que impede a absorção adequada de nutrientes e água (SOUSA et al., 2017).

Atualmente, devido à falta de controle de tráfego de maquinários nas lavouras de cana-de-açúcar, tem se como resultado a compactação de 60% do solo onde é realizado a colheita mecanizada. Portanto, deve ser feito o uso de métodos que

permitam menor compactação do solo, de modo que se consiga aumentar a produtividade (ESTEBAN et al., 2019).

Uma possibilidade para mitigar tal problema é a utilização de tráfego de maquinário controlado por GPS (*Global Positioning System*). Essa solução permite que as máquinas circulem nas fileiras de cana-de-açúcar, sem causar a compactação do solo em locais que prejudicam o crescimento da planta e também sem evitar danos às plantas de cana, como, por exemplo, a quebra de caules. Em conjunto com essa alternativa, pode ser utilizado uma nova forma de espaçamento entre as fileiras de cana-de-açúcar. Um exemplo desse forma de espaçamento está apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Exemplos de espaçamento na lavoura de cana. A esquerda tem-se espaçamento simples e a direita o espaçamento duplo



Fonte: Adaptado de ESTEBAN et al. (2019)

Na Figura 6 pode-se observar, conforme o espaçamento sugerido (à direita), que o mesmo permite a vantagem de se adaptar melhor à utilização de maquinário. Outra vantagem desse método é o melhor aproveitamento da área para a plantação de cana, sendo possível plantar maior quantidade (ESTEBAN et al., 2019).

Os ganhos de produtividade utilizando a técnica de espaçamento duplo com o tráfego controlado são expressivos. Em experimentos feitos em uma lavoura de cana-de-açúcar em duas safras consecutivas os resultados foram de 18,77

toneladas por hectare a mais na safra de 2015/2016 e na safra seguinte a vantagem da nova técnica foi de 15,74 toneladas de cana por hectare (ESTEBAN et al., 2019).

Além disso, a utilização de controle de tráfego em lavouras de cana-de-açúcar apresenta melhores resultados em relação à emissão de gases estufa, devido ao maior número de cortes por ciclo da cana. A redução em gramas de CO₂ equivalente por litro de etanol produzido da colheita mecanizada convencional para colheita com mecanizada com controle de tráfego é de 56,3 (CHAGAS et al., 2016).

No quesito econômico, a utilização de controle tráfego permite ganhos maiores por ciclo da cana. Tais custos ainda podem ser potencializados por meio da utilização de uma cultura de rotação, como o cânhamo (*Crotalaria Juncea L.*), pois, a mesma permite menor uso de fertilizantes nitrogenados e agrotóxicos. Apenas com a utilização de controle de tráfego é possível aumentar os ganhos em USD 154,51 por hectare a cada ano. No entanto, com a utilização do controle de tráfego em conjunto com o cânhamo (*Crotalaria Juncea L.*) tem-se o aumento nos ganhos por hectare a cada ano de USD 187,13 (CHAGAS et al., 2016).

Em suma, as otimizações na colheita da cana-de-açúcar são essenciais e como visto anteriormente, elas podem trazer grandes benefícios. Outro fator que justifica a aplicação de melhorias está no custo da colheita da cana. Estima-se que 40% dos custos operacionais de produção da cana estejam relacionados a colheita (PECEGE, 2015).

2.9.1.2 Transporte e descarregamento da cana-de-açúcar

A logística na indústria da cana-de-açúcar é de suma importância no sentido de melhorar a eficiência na execução das diversas etapas necessárias para a obtenção dos produtos desejados. Uma dificuldade existente no setor está na maneira de gerenciar etapas como o carregamento e transporte da cana até o local de processamento da planta (FREITAS et al., 2019).

Os custos relacionados apenas ao transporte e descarregamento da cana-de-açúcar até a usina estão por volta de 12% do custo total de produção (IANNONI; MORABITO, 2002). Um dos fatores que fazem com que os custos de transporte se tornem mais relevantes é a crescente mecanização que ocorreu nos canaviais brasileiros nos últimos anos. O elevado nível de mecanização permitiu que aumentasse a quantidade de cana colhida, porém, começou haver a necessidade de

um melhor planejamento para evitar ociosidade de equipamentos (FREITAS et al., 2019).

O controle de parâmetros relacionados às atividades de transporte e descarregamento podem significar ganhos expressivos ao final de uma safra. Na Tabela 6, observam-se os ganhos com a melhoria de diversos parâmetros durante o transporte e carregamento.

Tabela 6 - Ganho econômico por milhão de toneladas de cana com alteração em parâmetros de carregamento e descarregamento

Parâmetro	Variação no parâmetro	Ganho econômico
Rendimento por litro de combustível (km/litro)	+ 0,1	R\$ 242,4 mil
Tempo de descarregamento e carregamento (hora)	-1	R\$ 2,585 milhões
Taxa de ocupação (tonelada)	+1	R\$ 400 mil
Distância percorrida (km)	-1	R\$ 329,8 mil

Fonte: Adaptado de PERÁ; BRANCO; CAIXETA (2017)

Conforme a Tabela 6, nota-se que uma pequena variação em alguns parâmetros de carregamento e descarregamento gera um impacto significativo a cada milhão de cana transportada. Por exemplo, a diminuição de apenas uma hora no carregamento e descarregamento de um milhão de toneladas de cana gera um ganho de R\$ 2,585 milhões. Ainda, o aumento no rendimento de 0,1 km por litro de combustível consumido resulta em um ganho de R\$ 242,4 mil a cada um milhão de tonelada de cana transportada. Portanto, isso mostra que a etapa de transporte e descarregamento merece a devida atenção para que sejam feitas melhorias, pois, a mesma pode resultar em uma economia expressiva para usinas.

Tabela 7 - Custo de transporte e transbordo em cidades paulistas na safra 2016/2017 considerando uma distância de 25km

Cidade	Transporte (R\$/t)	Transbordo (R\$/t)
Paulo de Faria	7,54	7,57
Monte Aprazível	7,10	4,98
Andradina	11,59	6,33
Valparaíso	7,49	9,74
Olímpia	5,92	7,31
Guariba	7,55	5,99
Barra Bonita	7,42	7,07
Jaú	7,42	5,99
Assis	7,72	8,34
Piracicaba	8,43	5,65
Ourinhos	7,65	6,35
Chavantes	6,49	6,05
Bariri	9,44	7,31
Santa Barbara	6,72	4,94
Novo Horizonte	8,53	5,32
Igarapava	7,00	5,65

Fonte: Adaptado de FRANÇOSO et al. (2017)

Conforme a Tabela 7, pode-se observar que o custo de transporte e transbordo varia consideravelmente de uma cidade para outra, ainda que seja no mesmo estado. Desse modo, percebe-se que os ganhos com economias feitas no transporte e transbordo como mostrado na Tabela 6, podem ser significativamente maiores em algumas regiões do que em outras. Tal fato, mostra o quanto é importante financeiramente para usinas que sejam feitas melhorias nessas etapas de produção.

Uma das opções para a redução de custo na etapa de transporte e carregamento da cana-de-açúcar é a utilização de rodotrens com peso bruto total combinado (PBTC) de 91 toneladas, ao invés dos rodotrens convencionais com 74 PBTC. Conforme estimativas, essa alteração representaria redução de 21% no custo com transporte da cana até a usina (PERÁ; BRANCO; CAIXETA, 2017).

Ainda no quesito da forma de transportar, outra alternativa interessante para algumas regiões é o uso de ferrovias. No estado de São Paulo há 30 usinas localizadas há uma distância média de 5 quilômetros das linhas férreas e outras 40 usinas localizadas a uma distância média de 10 quilômetros. Essa possibilidade apresenta a vantagem da existência das ferrovias, a retirada de rodotrens de

rodovias e o fato de o transporte ferroviário possuir melhor eficiência relacionada ao consumo de combustível em relação à grande carga que é transportada (PERÁ; BRANCO; CAIXETA, 2017).

Como mencionado anteriormente, uma das questões a serem solucionadas em relação ao transporte da cana é ociosidade dos equipamentos. Nesse sentido, é essencial que o funcionamento da usina seja mantido constante o tempo todo. Para tanto, é importante que problemas como o congestionamento de caminhões e o tempo de espera para descarga de caminhões seja reduzido ao mínimo possível (MEURER; LOBO, 2015).

Um dos métodos que podem ser utilizados para redução do tempo de espera, tanto para o carregamento quanto para o descarregamento da cana-de-açúcar é o *Quick Response Manufacturing* (QRM). O QRM é uma técnica que visa a redução do tempo entre a solicitação e entrega de materiais interna e externamente em uma indústria. Desse modo é possível que se consiga a redução de custos (CHENG; KUAN, 2018; OLIVEIRA; FREITAS; GODINHO, 2018).

Dentro do QRM, tem-se uma ferramenta chamada de *Manufacturing Critical-Path Time* (MCT). Fazer o uso dessa ferramenta na otimização das etapas de carregamento e descarregamento de canaviais é interessante, pois, a mesma aponta o tempo que é empregado para a realização de uma determinada atividade. Além disso, o MCT indica quanto tempo demandado em cada atividade possui valor agregado e quanto de tempo é gasto em ações sem valor agregado, como esperas e retrabalhos (LIMA et al., 2012).

Em um estudo de caso realizado em uma usina no norte do estado de São Paulo, foi utilizado a metodologia QRM e a ferramenta MCT. Essa usina tem a capacidade de moagem de 3.800.000 toneladas de cana por ano e conta com 20 colheitadeiras, 32 tratores para realizar o transbordo e mais 34 caminhões responsáveis para levar a cana do campo até a usina. Foi identificado que a redução de 40% no tempo de espera para o transbordo resultaria em melhoria de 6% na eficiência do processo de colheita. Financeiramente, constatou-se que o pequeno aumento na eficiência significaria redução de R\$ 0,53 no custo da tonelada de cana processada e ao final da safra a economia seria de R\$ 1.172.784,00 (FREITAS et al., 2019).

De modo a reduzir o tempo de espera, algumas soluções podem ser adotadas como, por exemplo, a integração do sistema de logística com o computador de bordo dos caminhões. Dessa maneira seria possível obter maior precisão no tempo necessário para o transbordo de carregamento do caminhão. O mesmo procedimento poderia ser realizado com a integração do sistema de logística com o computador de bordo das colheitadeiras (FREITAS et al., 2019).

2.9.1.3 Preparação

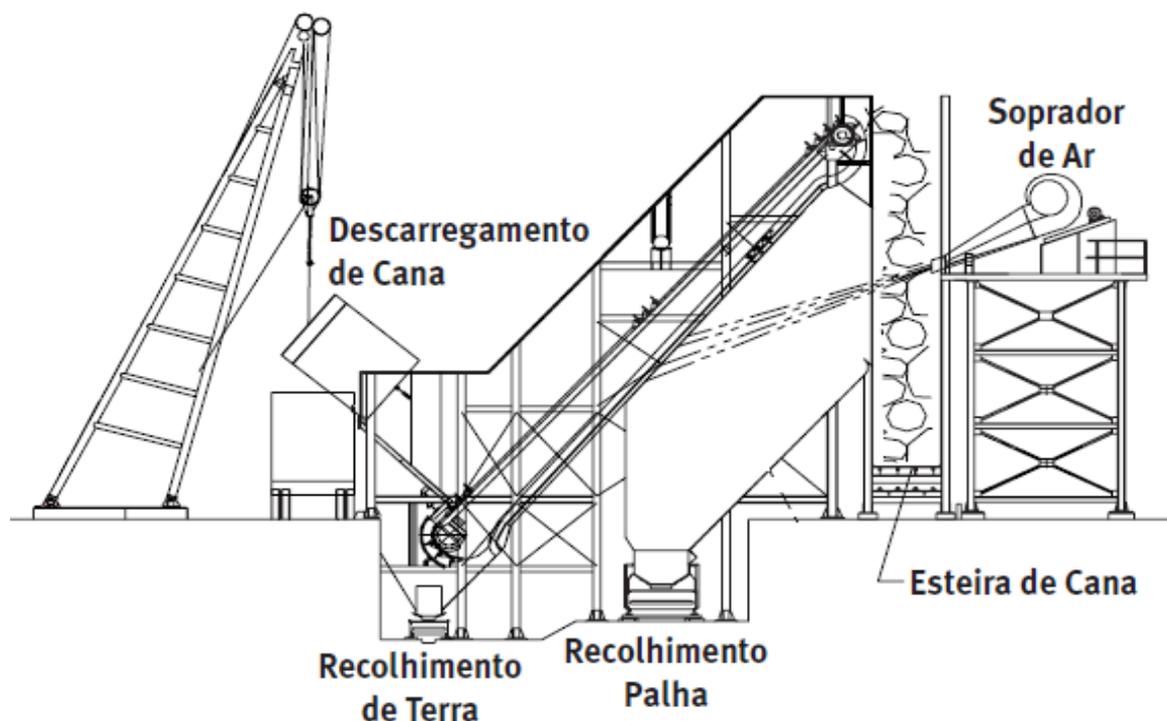
A etapa de preparação da cana-de-açúcar é realizada previamente a entrada da mesma na planta industrial. Também conhecida como recepção da cana, essa etapa é necessária para que seja feita a retirada de impurezas minerais e vegetais aderida na planta. No passado, quando a cana era colhida manualmente era possível o uso de água para retirada de impurezas sem perda de açúcares. Contudo, com a utilização da colheita mecanizada e com as colheitadeiras realizando o corte da cana, o uso da água provoca perda de açúcares. Desse modo, deve ser feita a limpeza de outra maneira para que evite prejuízos (ELISEU et al., 2019). Além disso, a utilização da colheita mecanizada fez com que houvesse maior presença de impurezas na cana. Enquanto na colheita manual tinham-se 3,66% de impureza nos caminhões, na colheita mecanizada a porcentagem de impureza subiu para 9,49% (AHMED; ELDIN, 2015).

A qualidade da cana que entra na planta industrial representa ganhos tanto para o dono da usina quanto para fazendeiros. No caso dos fazendeiros o ganho é proveniente do fato que a cana é analisada conforme o padrão Consecana e ABNT NBR 16271. Basicamente, é mensurado o teor de açúcar total recuperável (ATR), ou seja, a quantidade de sacarose na cana-de-açúcar. O pagamento feito ao produtor rural é proporcional ao ATR da cana (ELISEU et al., 2019). Para a indústria o ganho relacionado a qualidade da cana, principalmente no quesito de limpeza da cana, é devido ao aumento na eficiência do processo de recuperação do produto de interesse caso haja menos impurezas. O aumento de 1% de impurezas na cana representa a perda de 0,1% na eficiência de recuperação de sacarose (AHMED; ELDIN, 2015).

Uma alternativa para a limpeza da cana com a utilização de água é a limpeza a seco. Essa técnica permite que seja evitado o problema de perda de açúcares devido à presença de água e possibilita uma limpeza eficiente (TROMBETA;

CAIXETA, 2017). Além disso, a limpeza a seco da cana permite a redução da quantidade de água utilizada para a obtenção dos produtos de interesse. Apenas na lavagem da cana, em média, são consumidos 2,2 metros cúbicos de água, sendo que esse volume pode variar entre 2 e 5 metros cúbicos por tonelada de cana (ANA, 2009). Na Figura 7, é apresentado o esquema do funcionamento da limpeza a seco.

Figura 7 - Funcionamento da limpeza a seco da cana-de-açúcar



Fonte: Adaptado de ANA (2009)

Conforme a Figura 7, nota-se que primeiramente as impurezas minerais são separadas por peneiras logo após o descarregamento da cana. Em seguida, a cana-de-açúcar é movimentada por esteiras e ao final a mesma sofre uma queda e durante essa queda um soprador de ar faz a remoção da palha dos colmos da cana.

Vale destacar algumas usinas não fazem uso completo do sistema de limpeza a seco. Nesses casos, ainda há a utilização de água para que seja realizado o arraste de impurezas minerais após o descarregamento (ANA, 2009). Em casos que o método de limpeza a seco é praticado parcialmente ainda tem-se resultados satisfatórios na economia de água. É possível obter redução de 80% na captação para lavagem da cana e tem-se a redução de 40% no volume de águas residuárias (CETESB, 2011).

Outra vantagem que se tem com o uso do método de limpeza a seco está no desgaste e trocas de martelos e facas nos picadores de cana. Foi identificado que esse método permite a redução de 50% no custo com manutenção e troca de facas (GRANELLI; FRANCO; LOPES, 2016). A vantagem econômica está presente também em relação a menor quantidade de água consumida, pois, os custos com a utilização de água podem ser elevados ao final de uma safra. Por exemplo, em uma usina com capacidade de processamento de 240.000 toneladas de cana por mês, ao final de uma safra poder ter um gasto com água por volta de 38 mil dólares (GONÇALES et al., 2018). Portanto, é interessante financeiramente que seja feita a redução no consumo de água.

Apesar das vantagens associadas ao sistema de limpeza a seco, o mesmo também apresenta desvantagens para as usinas. A principal, é o alto custo de aquisição (GONÇALES et al., 2018). O valor para a compra desse sistema é de aproximadamente 3 milhões de reais (CETESB, 2011). Entretanto, estima-se que o retorno do investimento é de cerca de 4 safras, mas vale destacar que o período de 4 safras considerou que o custo do equipamento foi da ordem de 10 milhões de reais (GONÇALES; BARROS; CAMPOS, 2015).

2.9.1.4 Extração de açúcares

A extração de açúcares da cana-de-açúcar é a última etapa no pré-processamento da cana. A eficiência desse estágio é de suma importância para que seja obtida uma produtividade satisfatória na quantidade de etanol e também de açúcar (BARBOSA; SANTIAGO; SELEGHIM, 2017).

Uma alternativa para a extração de açúcares através do uso de moenda, é por meio da utilização de difusores (DIAS, 2008). Nos últimos anos tem aumentado o uso de difusores, no Brasil, pois, os mesmos apresentam uma série de benefícios em relação às moendas. Entre as vantagens está a maior eficiência, menor consumo energético e menor gasto necessário com manutenção (BARBOSA; SANTIAGO; SELEGHIM, 2017).

Entretanto, usinas, de modo geral, optam pela aquisição de moendas devido ao conservadorismo e pelo fato de poder fazer investimento gradual com moendas. Com moendas é possível fazer a aquisição de quatro ternos e posteriormente adquirir outros. No caso dos difusores a compra é feita do equipamento como um

todo, sem a possibilidade de fazer aumentos graduais como no caso das moendas (DIAS, 2008).

Um dos grandes desafios das usinas durante a extração de açúcares é o controle da temperatura e pH do meio, pois, a sacarose sofre decomposição em meios ácidos e em temperaturas acima de 80 °C (DIAS, 2008). De modo geral, em países em desenvolvimento, a maioria das usinas faz o controle do pH manualmente. Portanto, são retiradas amostras em determinados intervalos de tempo. Nessas situações o problema está no fato de não se ter uma análise constante do meio em que ocorre a extração de açúcares. Além disso, a medida em que é feita a adição de reagentes para a correção do pH, é importante que sejam feitas medidas simultaneamente de ambos temperatura e pH (OSORE; OGOLA; OGOT, 2019).

Entre os benefícios de se fazer uso da automatização nos difusores é a possibilidade de obtenção de melhores resultados na extração de açúcares. A melhoria nos resultados podem ser analisados em termos de sólidos dissolvidos (%BRIX), teor de oligossacarídeos (%POL). Com a utilização da automatização, tem-se aumento de 1 %BRIX e 1%POL (OSORE; OGOLA; OGOT, 2019).

2.9.2 Melhorias no processamento da cana-de-açúcar

2.9.2.1 Tratamento do caldo

Na etapa de tratamento do caldo tem-se observado poucas mudanças nos processos colocados em práticas nas usinas. Além disso, nas pesquisas científicas são poucos trabalhos que objetivam a melhoria da etapa de tratamento do caldo. Nos casos de sugestões para melhoria nessa etapa, na maioria dos estudos o foco é para a redução de compostos que provocam alterações na cor e que terão impacto na produção do açúcar. Como esse trabalho visa a otimização de processos para a produção do etanol e o fator “cor” não é relevante nesse caso, nessa seção não serão abordados melhorias para a produção de etanol. Devido à falta de estudos focados para o tratamento visando melhorar a produção de etanol, a expectativa é que não ocorra mudanças significativas nesse processo nos próximos anos (ELISEU et al., 2019).

Para o tratamento do caldo visando a produção do açúcar sugere-se a utilização de ultrafiltração em conjunto com a nanofiltração. Essa técnica apresentou resultados interessantes como a remoção de 96,5% de compostos responsáveis por

causar algum tipo de coloração no caldo e remoção de 99,99% de partículas que conferem maior turbidez. Outra vantagem desse método é que o mesmo não necessita da aplicação de produtos químicos. Entretanto, devido à incrustação há redução no fluxo e conseqüentemente no desempenho. No momento, essa técnica é viável e estável por apenas 45 dias em operação contínua em planta em escala piloto. Contudo, pelas vantagens apresentadas mostra-se como uma opção promissora para o tratamento do caldo visando a produção de açúcar (LUO et al., 2016).

Outra possibilidade interessante é de aplicar técnicas para o clareamento do caldo sem que seja necessário a sulfitação. A vantagem de evitar a sulfitação é a eliminação de sulfitos no açúcar. A ozonação é uma alternativa promissora para a sulfitação, uma vez que provoca a degradação do ácido gálico, um pigmento presente no caldo e posteriormente ao açúcar (SARTORI et al., 2017).

2.9.2.2 Concentração do caldo

Nas usinas de etanol a cana-de-açúcar pode ser processada visando a obtenção do etanol e do açúcar ou apenas a produção de etanol. Em situações que o etanol e o açúcar são produzidos, utiliza-se o caldo para a produção do açúcar, enquanto o etanol pode ser produzido a partir do melaço, que é um sub-produto do processamento da cana, ou de uma mistura entre o caldo e o melaço (ARSHAD; ABBAS; IQBAL, 2019; ELISEU et al., 2019).

Como comentado anteriormente, antes de se iniciar a fermentação é interessante que seja feita a concentração do caldo e para tanto são utilizados evaporadores. Quando se utiliza evaporadores de múltiplos efeitos tem-se a redução de vapor necessário para concentração do caldo, visto que apenas o primeiro efeito utiliza o vapor proveniente das turbinas. Tal aspecto resulta em economia energética, o que é interessante para as usinas, pois, permite vender maior excedente de energia elétrica ou utilizar o bagaço para outras finalidades lucrativas como a produção de etanol de segunda geração (ELISEU et al., 2019).

Entre os problemas da utilização de evaporadores é que se trata de um processo com alto custo energético. Além disso, a ocorrência de incrustações faz com que haja perda de eficiência, que aliado ao alto custo energético, resulta em perdas financeiras consideráveis para usinas. Devido à formação de incrustações, a perda na taxa de evaporação pode ser cerca de 30% em apenas 14 dias. Para

contornar tal problema deve ser feito a parada no processo para a realização da limpeza. Ou seja, em conjunto com a menor eficiência, tem-se perda na produção devido às paradas para limpeza. Como a incrustação tende a ser mais acentuada no primeiro feito, uma alternativa para contornar essa questão é a instalação de um primeiro efeito adicional, de modo a minimizar o problema da parada na produção (JORGE et al., 2010).

Uma alternativa interessante para o uso de evaporadores no processo convencional de concentração do caldo é a osmose reversa. Nessa sugestão, indica-se o uso de membranas para realizar a pré-concentração do caldo e em seguida aplicam-se evaporadores para finalizar o processo de concentração. A principal vantagem dessa solução é a redução de cerca de 33% no consumo energético apenas na etapa de concentração do caldo. Contudo, a desvantagem nesse método é a perda de açúcares durante o processo de separação nas membranas. Para mitigar tal problema uma das possibilidades é a realização de recirculação no sistema de membranas (MADAENI; ZERESHKI, 2010). Essa economia é interessante, pois, o consumo de energia elétrica na etapa de concentração do caldo, com a utilização de evaporadores, é de cerca de 142,3 kWh por tonelada de cana moída (BOCCI; DI CARLO; MARCELO 2009). Contudo, vale destacar que a osmose reversa ainda apresenta problemas técnicos para ser operada em escala comercial.

Outra possibilidade interessante para otimizar o uso dos evaporadores de múltiplos efeitos é fazer a integração energética de modo a também realizar a concentração da vinhaça. A vinhaça tem sido utilizada na fertirrigação devido à presença de nitrogênio, fósforo e potássio. Entretanto, devido à elevada produção e os custos de transporte desse subproduto da destilação, é interessante que seja feita sua concentração visando reduzir o volume e conseqüentemente o custo de transporte (CORTES et al., 2018).

No que diz respeito a concentração da vinhaça, pode-se obter uma redução de volume em torno de 90%. Essa diminuição representa um ganho significativo para usinas, pois, reduz-se o custo com transporte. Considerando um cenário, onde se tem uma distância de 12 km da usina até o local de aplicação da vinhaça para fertirrigação, a produção diária de vinhaça igual a 15.300 metros cúbicos, é possível que se tenha a economia de cerca de 1,42 milhões de dólares por ano (CORTES et al., 2018).

Outra vantagem de realizar a integração energética nesse caso, é a possibilidade de se obter maior excedente de bagaço, cerca de 42% da quantidade produzida durante a extração do caldo. Esse aspecto torna-se consideravelmente interessante, pois, é possível fazer uso do bagaço para diferentes finalidades. Por exemplo, é possível utilizar para a produção de energia elétrica ou para a produção de etanol de segunda geração. Portanto, além da economia no custo de transporte da vinhaça, tem-se a oportunidade de aumentar os ganhos da usina (CORTES et al., 2018).

2.9.2.3 Fermentação

A fermentação no Brasil é realizada de duas maneiras, em processo contínuo e em batelada. O processo mais difundido é o em batelada, contudo, há a utilização de processo contínuo algumas destilarias. O processo contínuo apresenta a vantagem de ter menores custos relacionados à sua instalação. Entretanto, a eficiência nesse tipo de processo é menor que em batelada em razão da maior contaminação bacteriana causada pela impossibilidade de limpeza frequente do reator (ELISEU et al., 2019).

Apesar do processo em batelada apresentar menos problemas devido à contaminação bacteriana se comparado com o processo contínuo, o mesmo ainda possui algumas desvantagens. Entre os problemas enfrentados na fermentação em batelada, estão o alto custo de instalação e a dificuldade de controle de parâmetros como gradiente de temperatura e presença de zonas mortas (ELISEU et al., 2019).

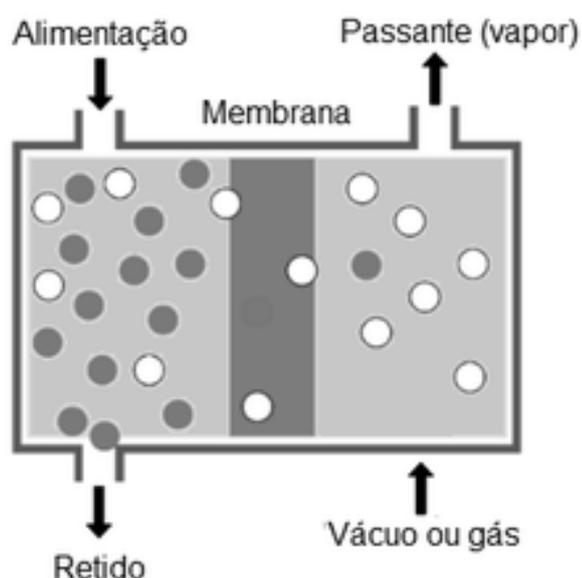
A otimização no processo de fermentação é essencial para uma usina, pois, a mesma possui influência direta nas etapas seguintes para a obtenção dos produtos finais. A destilação, que é a próxima etapa após a fermentação tem seu consumo energético afetado diretamente pela concentração de etanol no vinho, que é líquido resultante da fermentação. Um dos fatores limitantes a produção de etanol durante a fermentação é justamente o teor de etanol, pois, este atua como inibidor das leveduras responsáveis pelo processo fermentativo. Portanto, uma possibilidade interessante seria a retirada constante do etanol enquanto o mesmo é produzido na fermentação (CASTRILLON et al., 2018).

A sugestão de melhoria no processo de fermentação a ser apresentada neste trabalho é a realização da fermentação extrativa. Entre as possibilidades dentro da fermentação extrativa, sugere-se a utilização de membranas de pervaporação. Por

meio do uso dessas membranas pode-se realizar retirada de etanol do meio onde está ocorrendo a fermentação e conseqüentemente reduzir o problema de inibição das leveduras devido à concentração de etanol. Vale destacar que não é interessante realizar a total retirada do etanol, pois o mesmo ajuda a reduzir a contaminação bacteriana (SANTORO et al., 2017).

A membrana de pervaporação tem seu mecanismo de separação baseado no gradiente de potencial químico. Para que seja feita a separação deve haver uma mistura na fase líquida, a qual entrará em contato com uma membrana semi-permeável. Em um dos lados da membrana é aplicado um gás ou vácuo de modo a gerar uma diferença de potencial. Como resultado da separação tem-se o retido e o passante, sendo este o produto de interesse, que no caso de uma fermentação seria o etanol (SONG et al., 2019). Na Figura 8 tem-se a representação do funcionamento de uma membrana de pervaporação.

Figura 8 - Esquema de uma membrana de pervaporação



Fonte: Adaptado de SONG et al. (2019)

Entre os benefícios de se utilizar membranas de pervaporação durante o processo de fermentação está a maior produção de etanol, tendo-se aumento de 1,2%. Durante a processo seguinte, que é a destilação tem-se menor produção vinhaça. A redução nesse caso é de aproximadamente 50%. Tal fato é interessante, pois, a vinhaça como mencionado anteriormente é um sub-produto da destilação, que pode gerar um impacto ambiental. No que diz respeito ao consumo energético durante a destilação, com a utilização de membranas de pervaporação na etapa de

fermentação, é possível reduzir o consumo de energia em 14% (CASTRILLON et al., 2018).

Apesar dos benefícios apresentados com relação à aplicação de membranas de pervaporação, é essencial que previamente a sua implantação seja feito um estudo de viabilidade econômica, bem como o impacto que a mesma pode gerar em outros sub-sistemas. O motivo para isso, é que cada usina apresenta suas particularidades, mesmo que o processo utilizado seja similar em praticamente todas as usinas sucroenergéticas (CASTRILLON et al., 2018). Além disso, a verificação da viabilidade econômica é essencial, pois, as membranas de pervaporação possuem elevado custo, principalmente para serem aplicadas em escala comercial (ELISEU et al., 2019).

2.9.2.4 Destilação

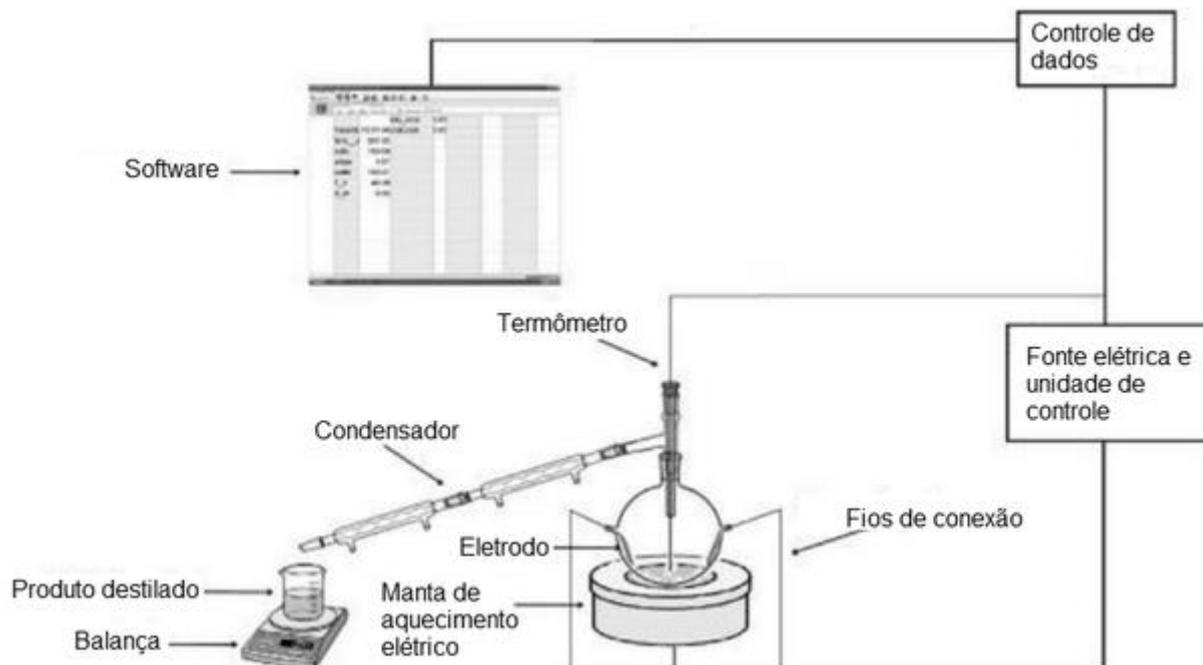
Conforme mencionado previamente, o consumo energético é um dos grandes desafios para a indústria sucroenergética brasileira. Estima-se que o processo de destilação seja responsável pelo consumo de 50% de toda energia requerida pela destilaria (TGARGUIFA; ABDERAFI; BOUNAHMIDI, 2017). Entre os problemas causados por essa condição estão os custos provenientes do consumo energético e emissão de gases estufa (KIM; DALE, 2005).

Uma alternativa com potencial para substituir o processo de destilação para obtenção do etanol é a destilação ôhmica assistida. Essa técnica tem o objetivo de reduzir os problemas enfrentados durante a destilação convencional (GAVAHIAN et al., 2019). O aquecimento ôhmico consiste basicamente no aquecimento do meio através da aplicação de corrente elétrica, de modo que haja transformação da energia elétrica em energia térmica. A vantagem desse método é a elevada taxa de conversão de energia elétrica para energia térmica (GAVAHIAN; FARAHNAKY, 2018).

A destilação ôhmica assistida é similar a destilação convencional, entretanto, o aquecimento do meio é promovido por um aquecedor ôhmico (GAVAHIAN; FARAHNAKY, 2018). O aquecimento ôhmico funciona de modo adequado em fluidos condutores de energia elétrica em razão da necessidade de movimentação de elétrons. Como o meio proveniente da fermentação possui baixa condutividade elétrica deve ser acrescentado uma solução salina (GAVAHIAN; FARAHNAKY;

SASTRY, 2016). Na Figura 9 pode-se observar como é constituído a técnica sugerida, em escala laboratorial.

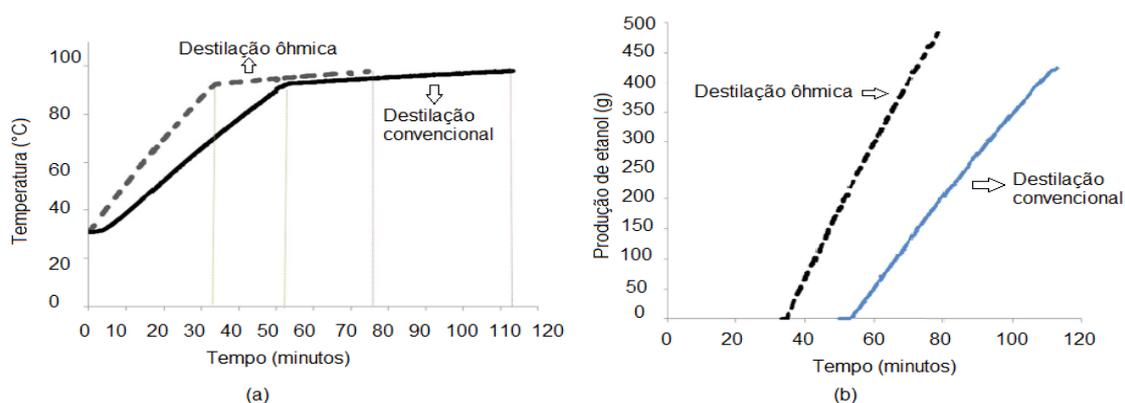
Figura 9 - Esquema representativo de destilação com aquecimento ôhmico



Fonte: Adaptado de GAVAHIAN; FARAHNAKY; SASTRY (2016)

Como mencionado anteriormente, devido a elevada taxa de aquecimento com a aplicação do aquecimento ôhmico, é possível reduzir outro problema encontrado na destilação convencional, que é o tempo demandado no processo. Na Figura 10, observa-se como ocorre o aumento da temperatura e a produção de etanol, em função do tempo, considerando a destilação ôhmica e a destilação convencional.

Figura 10 - Comparativo da elevação da temperatura (a) e produção de etanol (b) em função do tempo para a destilação ôhmica e convencional



Fonte: Adaptado de GAVAHIAN; FARAHNAKY; SASTRY (2016)

Conforme a Figura 10 (a), observa-se que o tempo necessário para atingir a temperatura de ebulição da mistura (etanol e água), cerca de 93 °C, durante a destilação ôhmica leva-se em torno de 35 minutos, enquanto na destilação convencional o tempo requerido é em torno de 53 minutos. No que diz respeito a produção de etanol, na Figura 10 (b), nota-se que o tempo necessário para destilação convencional iniciar é maior justamente devido ao maior tempo para atingir a temperatura de ebulição da mistura. Como consequência disso, tem-se que o tempo total do processo de obtenção do etanol por meio da destilação ôhmica seja em torno de 75 minutos. Por outro lado, na destilação convencional o tempo necessário para completar o processo é de cerca de 110 minutos.

Outros dois pontos interessantes em relação à produção de etanol por meio da destilação ôhmica em relação a convencional está na qualidade e quantidade do etanol produzido, emissão de dióxido de carbono e consumo energético resultante desses processos. No que diz respeito da qualidade e quantidade estas são similares para ambos processos de destilação. Entretanto, observa-se menor consumo energético por grama de etanol produzido pelo processo de destilação ôhmica, cerca de 0,49 Wh/g etanol, enquanto que na destilação convencional o consumo é em torno de 0,71 Wh/g etanol. A destilação ôhmica também apresenta vantagem em relação à quantidade de CO₂ emitida por grama de etanol produzido, sendo cerca de 0,4 gCO₂/g etanol. Já na destilação convencional observa-se emissão de cerca de 0,57 gCO₂/g etanol (GAVAHIAN; FARAHNAKI; SASTRY, 2016).

Apesar das vantagens apresentadas, a destilação com aquecimento ôhmico ainda não está desenvolvida em escala industrial, no entanto, trata-se de uma tecnologia promissora e que merece ser estudada por usinas sucroenergéticas.

2.9.2.5 Desidratação do etanol

Para a produção do etanol desidratado têm-se como opções mais difundidas, no Brasil, a destilação com ciclohexano ou com monoetilenoglicol. Contudo, recentemente a utilização de peneiras moleculares vem crescendo devido a possibilidade de redução no consumo de vapor. Estima-se que tal redução possa ser de até 33% em relação à destilação azeotrópica (ELISEU et al., 2019).

Apesar das peneiras moleculares representarem uma redução no consumo de vapor, é importante destacar que as mesmas não podem ser aplicadas logo após a fermentação. O motivo para isso é que o contato dos poros das membranas com o

produto da fermentação causa a obstrução dos poros e conseqüentemente reduz consideravelmente a adsorção de moléculas de água. Portanto, a faixa de aplicação das peneiras moleculares, em relação à porcentagem de etanol na mistura é de 96,5% até 99,5% (PATIL; PATIL; Bhole, 2016).

Uma alternativa promissora para as peneiras moleculares são as membranas hidrofílicas. No início, os estudos da utilização dessas membranas na produção do etanol apresentaram como principal fator limitante o baixo fluxo de etanol anidro obtido. Se inicialmente o fluxo obtido era entre 0,5 kg/m² h e 1,7 kg/m² h, atualmente há opções disponíveis com maiores fluxos como, por exemplo, de 28 kg/m² h e 36 kg/m² h. A principal vantagem de se utilizar as membranas hidrofílicas em relação às membranas moleculares é redução no consumo energético (KANG et al., 2014).

Uma possibilidade interessante para usinas sucroenergéticas fazerem uso na produção de etanol anidro é combinar uma técnica já utilizada, a destilação azeotrópica e a aplicação de peneiras moleculares. O principal fator para motivar essa combinação está no fato da destilação azeotrópica consumir elevada quantidade de energia para a produção do etanol anidro. Fazendo o uso dessas técnicas em conjunto, o consumo energético pode ser reduzido em cerca de 50% (KUNNAKORN et al., 2013).

3 METODOLOGIA

A metodologia desse trabalho consistiu em alguns aspectos essenciais. Inicialmente, foi importante analisar qual a situação das lavouras de cana-de-açúcar no Brasil, tendo em vista que é a principal matéria-prima para produção de etanol no país. Para tanto, foi preciso identificar quais as principais regiões produtoras, o quanto foi produzido em cada região e quais os principais estados produtores. Além disso, foi necessário identificar quais produtos são obtidos da cana para que seja possível analisar se há competição entre eles. Outro ponto relevante em relação aos produtos derivados da cana, foi preciso analisar qual a tendência de consumo dos mesmos, de modo a possibilitar a priorização um desses produtos.

Outro aspecto importante, foi desenvolvimento de uma previsão de produção para o produto que tivesse tendência de aumento no consumo (etanol), com a finalidade de identificar se o ritmo da produção nos últimos anos seria capaz de atender a demanda futura. Para a previsão foi necessário utilizar dados históricos de produção de etanol no Brasil. Esses dados foram inseridos no software Oracle® Crystal Ball. No *software*, foi necessário utilizar a ferramenta *Predictor*, fornecer os atributos dos dados, selecionar os métodos de previsão e também quais os métodos de erros seriam utilizados para avaliar os métodos de previsão.

Nos atributos dos dados, os dados históricos foram classificados em anos, pois, os mesmos continham a produção de etanol em cada ano. O fator sazonalidade foi selecionado como *AutoDetect* embora não houvesse sazonalidade na produção de etanol, uma vez que não havia fatores sazonais que fizessem com que a produção fosse afetada de um ano para outro. Na opção eventos, três eventos foram incluídos: o fim do programa Pró-Álcool em 1985, a entrada de veículos flex em 2003 e programa RenovaBio em 2016 (GIROLDO et al., 2005; ISABELLA et al., 2017; SANTOS, 2016).

Quanto aos métodos de previsão, todos os métodos não sazonais e o método ARIMA foram selecionados a fim de obter-se diferentes resultados de previsão e conseqüente fosse possível escolher qual método era o melhor. Para avaliar os métodos utilizou-se Média Percentual Absoluta do Erro (MAPE) e a técnica de previsão aplicada foi *Standard forecasting*, pois, a mesma assume que cada dado tem a mesma relevância.

Após feita a previsão, comparou-se o resultado obtido com a demanda esperada para 2028 e fez-se a avaliação se o ritmo de produção seria capaz de atingir o volume de etanol necessário no futuro.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PREVISÃO DE PRODUÇÃO DE ETANOL

Para a previsão da produção de etanol para os próximos anos utilizou-se dados históricos para a produção de etanol. Esses dados são desde a safra de 1980/1981 até a safra de 2018/2019 (UNICA, 2019b).

Após a configuração da previsão conforme apresentado na seção 2, o *software* forneceu a volume de etanol a ser produzido para os próximos 12 anos, com base nos dados históricos. Para comparar os métodos e escolher qual é o melhor, fez-se uso de parâmetros estatísticos fornecidos pelo *software*. Tais parâmetros são mostrados na Tabela 2 com os resultados para cada método.

Tabela 8 - Avaliação de cada método de previsão considerando diferentes parâmetros estatísticos

Método de previsão	Parâmetros	
	Média Percentual Absoluta do Erro (MAPE)	Theil's U
ARIMA (1,0,1)	9,03%	0,8722
Suavização Exponencial Dupla	9,31%	0,9514
Não Sazonal de Suavização de Tendência	9,32%	0,9514
Média Móvel Simples	9,87%	1
Suavização Exponencial Simples	9,87%	1,05
Média Móvel Dupla	10,84%	1,05

Fonte: Próprio autor

Outro procedimento importante para poder avaliar cada método é saber quais os valores adequados para cada parâmetro estatístico. Para o MAPE é importante que os valores estejam abaixo de 10% para validar a previsão (KHAIR et al., 2017), portanto, somente o modelo da Média Móvel Dupla não é adequado conforme esse parâmetro. Considerando Theil's U, os valores devem estar abaixo de 1, o que indica que a previsão é válida (BLIEMEL, 1973). Aplicando Theil's U, apenas três modelos se mostram válidos, ARIMA (1,0,1), Suavização Exponencial Dupla e Não Sazonal de Suavização de Tendência. A previsão proveniente de cada método está apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Previsão obtida com os métodos ARIMA (1,0,1), Suavização Exponencial Dupla e Não Sazonal de Suavização de Tendência

Ano	ARIMA (1,0,1) - (1.000m ³)	Suavização Exponencial Dupla - (1.000m ³)	Não Sazonal de Suavização de Tendência - (1.000m ³)
2020	34.640	34.022	34.018
2021	36.232	34.946	34.937
2022	37.881	35.870	35.855
2023	39.587	36.794	36.772
2024	41.352	37.718	37.688
2025	43.178	38.642	38.603
2026	45.066	39.566	39.517
2027	47.018	40.490	40.431
2028	49.034	41.414	41.343
2029	51.118	42.338	42.254
2030	53.269	43.262	43.165
2031	55.490	44.186	44.075

Fonte: Próprio autor

A partir dos dados da Tabela 9, nota-se que, de acordo com o método ARIMA (1,0,1), o ritmo atual da produção de etanol, no Brasil, será o suficiente para atingir a demanda esperada para 2028. Por outro lado, os métodos Suavização Exponencial Dupla e Não Sazonal de Suavização de Tendência indicam que o ritmo da produção brasileira de etanol não será o bastante para alcançar a demanda futura de etanol. Além disso, conforme os dois últimos métodos, nem mesmo em 2031 será produzido a quantidade necessária para 2028. No método ARIMA (1,0,1), percebe-se que a produção será um pouco maior do que o necessário para 2028. Nesse sentido, é válido destacar que circunstâncias negativas que possam ocorrer futuramente podem comprometer o suprimento dessa demanda. Como consequência, é importante que otimizações em usinas de cana sejam identificadas e aplicadas na indústria de modo que seja possível aumentar o volume de produção.

4.2 POTENCIAL ECONÔMICO DO MERCADO DE CBIO

O mercado resultante da RenovaBio é promissor. Na Tabela 10, estão apresentadas movimentações financeiras hipotéticas do mercado de CBios com

base em valores de produção de etanol da safra de 2018/2019 e a quantidade de litros necessária para gerar 1 CBio, conforme mostrado anteriormente

Tabela 10 - Simulação quanto as movimentações financeiras no mercado de CBio.

Aspectos	Etanol Anidro	Etanol hidratado
Produção na safra 2018/2019 (bilhões de litros) (CONAB, 2018b)	11,24	19,17
Quantidade de litros de combustível para gerar 1 CBio	668,69	703,56
Quantidade de CBios resultantes (milhões)	16,8	27,24
Preço do CBio a R\$45,00 (milhões de R\$) (MME, 2017)	756,4	1.226,1
Preço do CBio a R\$97,00 (milhões de R\$) (MME, 2017)	1.630,4	2.642,9
Preço do CBio a R\$149,00 (milhões de R\$) (MME, 2017)	2.504,5	4.059,8

Fonte: Próprio autor

De acordo com a Tabela 10, observa-se que com base nos volumes de etanol anidro e hidratado produzidos na safra de 2018/2019, considerando-se que ambos são apenas de primeira geração percebe-se que o mercado proveniente da venda de CBios mostra-se promissor. Considerando-se valores esperados pelo Ministério de Minas e Energia para o CBio, conforme diferentes cenários, sendo de R\$ 45,00 para o cenário pessimista e R\$ 149,00 para o cenário otimista é possível fazer uma estimativa dos ganhos gerados com a venda desse ativo no mercado financeiro (MME, 2017). No cenário mais pessimista tem-se um mercado de 2 bilhões de reais gerados pela comercialização de CBios. No entanto, em um cenário otimista as vendas de CBio podem chegar a 6,5 bilhões de reais.

4.3 GANHOS COM AS OTIMIZAÇÕES SUGERIDAS

Na Tabela 11 estão apresentados os ganhos com as melhorias propostas anteriormente. Vale destacar que as melhorias consideram ganhos em produtividade, eficiência energética, ambientais e econômicos. É interessante destacar que a melhoria no desempenho ambiental pode significar aumento nos ganhos

econômicos, uma vez que a quantidade de créditos de descarbonização recebidos pela usina pode aumentar.

Tabela 11 - Possibilidades de ganhos com as melhorias sugeridas

(continua)		
Etapas	Sugestão	Ganhos
Pré-processamento		
Colheita	Rotação de cultura com Cânhamo (<i>Crotalaria Juncea L</i>); Técnica de espaçamento duplo e controle de tráfego (ESTEBAN et al., 2019).	Aumento de produtividade em 17,22 t/ha (média) (ESTEBAN et al., 2019); US\$ 187,13 por hectare; redução de 56 gCO ₂ eq/L (CHAGAS et al., 2016).
Transporte e descarregamento	Rodotrens de 91 PBTC (PERÁ; BRANCO; CAIXETA, 2017); Utilização da técnica MCT (FREITAS et al., 2019).	Redução em 21% no custo com transporte (PERÁ; BRANCO; CAIXETA, 2017); Redução em R\$0,53 no custo da tonelada de cana processada (FREITAS et al., 2019).
Preparação	Limpeza a seco (TROMBETA; CAIXETA, 2017).	Redução em 80% na captação de água para lavagem e redução de 40% no volume de água de lavagem (CETESB, 2011); Redução de 50% nos custos com manutenção (GRANELLI; FRANCO; LOPES, 2016).
Processamento		
Extração de açúcares	Uso de difusores e automatização deles (DIAS, 2008; OSORE; OGOLA; OGOT, 2019).	Aumento em 1% BRIX e 1% POL (OSORE; OGOLA; OGOT, 2019).
Tratamento do caldo	Ultrafiltração (LUO et al., 2016).	Não há necessidade de sulfitação; Não necessita de aplicação de produtos químicos (LUO et al., 2016)

Tabela 11 - Possibilidades de ganhos com as melhorias sugeridas (conclusão)

Etapas	Sugestão	Ganhos
Processamento		
Concentração do caldo	Osmose reversa em conjunto com evaporadores e integração energética para concentração da vinhaça (BOCCI; DI CARLO; MARCELO, 2009; MADAENI; ZERESHKI, 2010); Redução de 90% do volume de vinhaça; Maior excedente de bagaço, em torno de 42% (CORTES et al., 2018).	Redução de 33% no consumo energético, cerca de 142,3 kWh por tonelada de cana moída (BOCCI; DI CARLO; MARCELO, 2009; MADAENI; ZERESHKI, 2010); Redução de 90% do volume de vinhaça; Maior excedente de bagaço, em torno de 42% (CORTES et al., 2018).
Fermentação	Uso de membranas de pervaporação e retirada de etanol (SANTORO et al., 2017).	Aumento de 1,2% na produção do etanol; Possibilita redução em 50% na produção de vinhaça na destilação; Reduzem em 14% o consumo energético na destilação (CASTRILLON et al., 2018)
Destilação	Destilação ohmica assistida (GAVAHIAN; FARAHNAKY, 2018).	Menor tempo exigido para finalizar o processo; redução de 0,22 Wh por grama de etanol; Redução de 0,17gCO ₂ /g etanol (GAVAHIAN; FARAHNAKY; SASTRY, 2016);
Desidratação do etanol	Destilação azeotrópica em conjunto com peneiras moleculares (KUNNAKORN et al., 2013).	Possibilidade de redução de cerca de 50% no consumo energético (KUNNAKORN et al., 2013).

Fonte: Próprio autor

Como pode ser observado na Tabela 11, os ganhos com as melhorias propostas são interessantes e têm potencial para colaborar na solução de problemas das usinas sucroenergéticas brasileiras, como a saúde financeira precária. Além disso, as melhorias sugeridas atuam como uma prováveis soluções para que seja possível garantir que a demanda futura de etanol no Brasil seja atendida.

4.4 USO DO ETANOL DE MILHO E DE CANA-DE-AÇÚCAR

A possibilidade da produção do etanol de cana-de-açúcar e de milho leva ao questionamento de qual matéria-prima é melhor para a produção do biocombustível.

Nesse sentido, fez-se um comparativo entre o etanol de milho e o de cana, levando-se em consideração fatores econômicos, ambientais e técnicos.

Tabela 12 - Comparativo entre o etanol produzido a partir do milho e da cana-de-açúcar

Fatores	Matéria-prima	
	Milho	Cana-de-açúcar
Custo por litro (R\$)	Entre R\$0,97 e R\$1,84 (etanol hidratado) (PEREIRA, 2017).	R\$1,80 para o ethanol anidro e R\$1,71 para ethanol hidratado (BIGATON et al., 2017)
Estoque	Pode ser estocado por várias semanas (LOPES et al., 2016).	Deve ser processado logo depois da colheita (LOPES et al., 2016)
Tempo de fermentação	45 a 60 horas (CHUM et al., 2014).	6 to 12 hours (CHUM et al., 2014).
Produtividade (litros por tonelada de matéria-prima)	400 litros de etanol por tonelada de milho (FREITAS; MIURA, 2018).	70 a 85 litros de etanol por tonelada de cana (FREITAS; MIURA, 2018).
Produtividade (tonelada de matéria-prima por hectare)	5,5 toneladas por hectare (CONAB, 2018a).	77 toneladas por hectare (MAPA, 2017b) .
Volume de pesticidas	7.4 litros por hectare (PIGNATI et al., 2017).	4.8 litros por hectare (PIGNATI et al., 2017).
Volume de água	2.570 litros por hectare (CHIU et al., 2015).	2.516 litros por hectare (CHIU et al., 2015)
Emissão de gases estufa	15 to 20 grams equivalent of CO ₂ /MJ (ICF, 2017).	20 gramas equivalente de CO ₂ /MJ (WANG et al., 2014).
Dias de funcionamento da planta	345 dias por ano (LOPES et al., 2016).	Entre 200 e 240 dias por ano (FREITAS; MIURA, 2018).
Sub-produto	Grãos destilados com solúveis (DGS) (DALL'AGNOL, 2017).	Vinhaça (MORAES et al., 2015).

Fonte: Próprio autor

Conforme a Tabela 12, observa-se que em determinados fatores o etanol de milho é mais vantajoso do que o de cana. Entretanto, quando se considera outros

aspectos o etanol de cana mostra-se mais interessante. Observando-se o custo por litro de etanol produzido, nota-se que o etanol de milho tem custo variando de R\$ 0,97 a R\$ 1,84. Nesse ponto o etanol de milho mostra-se mais viável economicamente, contudo, vale destacar que o valor de R\$ 0,97 é obtido no melhor cenário (PEREIRA, 2017). No quesito de estocagem da matéria-prima, há uma grande diferença. Enquanto o milho pode ser armazenada por várias semanas, a cana-de-açúcar deve ser processada logo após a colheita (MCLAREN, 2009). A razão para isso é perda de açúcares causada pela ação de microorganismos (SOLOMON, 2000).

Em relação ao tempo de fermentação a vantagem para o etanol de cana é notável. A fermentação mais rápida para a produção do etanol de cana é devido a maior concentração de células no processo (LOPES et al., 2016). Outro motivo é que na fermentação do caldo da cana faz-se reciclo de leveduras, enquanto na fermentação do milho isso não ocorre em razão da alta concentração de sólidos (JACQUES; LYONS; KELSALL, 2003).

Analisando a quantidade de etanol produzida por tonelada de matéria-prima, percebe-se que há uma diferença significativa, a qual leva a uma vantagem do etanol de milho (MCLAREN, 2009). No entanto, quando se observa a quantidade de matéria-prima produzida por hectare, a cana mostra ser mais promissora. No quesito produtividade, a cana-de-açúcar tem maior vantagem ambiental, pois, produz-se mais etanol por hectare. Esse ponto é importante devido a questões de competitividade entre produção de alimento e de combustível (FERREIRA; HORRIDGE, 2014).

Observando-se o volume de pesticidas para produção das duas matérias-primas, nota-se uma ligeira vantagem para o etanol de cana (BORDONAL et al., 2018). Esse ponto é relevante, pois, o uso de pesticidas está relacionado com sérios problemas de saúde em humanos, além do fato de serem prejudiciais ao meio ambiente (AKTAR; SENGUPTA; ARANDA, 2009).

No quesito volume de água necessário e a quantidade de gases estufa gerados para a produção de etanol de milho e cana não há diferença considerável. No entanto, em relação ao número de dias de funcionamento da planta para a produção do etanol com cada matéria-prima, percebe-se uma diferença significativa. A usina que produz etanol de milho consegue funcionar por mais dias ao longo em razão da possibilidade de estocar a matéria-prima (LOPES et al., 2016).

O último fator considerado no comparativo realizado é o sub-produto obtido após a obtenção do etanol. Os grãos destilados com solúveis podem ser utilizados como ração para gado, já a vinhaça gerada após o processamento da cana pode ser utilizada na fertirrigação com o intuito de reduzir o seu impacto ambiental (BEBÉ et al., 2009; CHRISTOFOLETTI et al., 2013). A vantagem de utilizar a vinhaça na fertirrigação é por se tratar de uma forma com custo baixo de repor nutrientes no solo (KLEIBER et al., 2015). Outro uso para a vinhaça é a geração de bioeletricidade por meio da sua digestão anaeróbia e consequente formação de biogás, o qual é utilizado para gerar eletricidade (MORAES et al., 2014).

Após realizada a comparação entre o etanol produzido a partir da cana-de-açúcar e o obtido a partir do milho, nota-se que o etanol de cana é uma opção que apresenta mais vantagens considerando-se os parâmetros abordados.

5 CONCLUSÃO

Analisando-se a produção brasileira de etanol é possível notar que se trata de um mercado consolidado e com grande potencial e demandas. No entanto, considerando-se o ritmo de produção desde o início da década de 1980, percebe-se que é possível que as demandas não sejam atendidas no futuro, podendo causar implicações negativas. Portanto, é crucial que haja otimização dos processos para que a produção do biocombustível seja aumentada, de modo que as usinas localizadas no Brasil sejam capazes de suprir as necessidades do mercado.

É interessante destacar que as possibilidades de otimização apresentadas neste trabalho não só fornecem a chance de aumentar o volume de etanol produzido, visando atender a demanda futura, mas também procuram atender outros aspectos. As melhorias buscam reduzir perdas nos processos de produção do biocombustível, o que é essencial para que haja resultados positivos nos balanços financeiros das usinas e consequentemente evitar problemas como a falência de empresas. A melhoria na saúde financeira de usinas sucroenergética também atua, de certo modo, na garantia do suprimento da demanda futura de etanol, pois, a tendência é que quanto maior o número de usinas no mercado, maior o volume de combustível produzido. Além disso, a quantidade de usinas pode contribuir para maior credibilidade e visibilidade do setor sucroenergético brasileiro, o que facilita atrair mais investimentos.

Outro aspecto abordado é a maior eficiência ambiental atingida com o uso de algumas sugestões de otimização nos processos. É essencial destacar que com a criação do mercado de créditos de descarbonização (CBios), a maior eficiência ambiental além de garantir que o governo atinja as metas estabelecidas na COP21, também possibilita para as usinas maiores ganhos financeiros com a venda desses ativos no mercado financeiro. Ou seja, a ganhos no quesito ambiental significam ganhos financeiros para usinas, servindo como mais um estímulo para a adoção de medidas para otimizar os processos.

As otimizações apresentadas neste trabalho também ajudam a evitar o problema da competitividade entre o uso de terras para produção de alimentos e de combustível. Isso porque é possível aumentar a produção sem que haja a necessidade de ocupar maior porção de terras agricultáveis. Ainda nesse sentido, há a discussão entre o uso do etanol de milho e o etanol de cana-de-açúcar,

especialmente porque o milho pode ser utilizado para a fabricação de alimentos. Visando atender a demanda futura de etanol, mas sem prejudicar a produção de alimentos, uma alternativa para o caso do Brasil é o uso do milho como uma fonte secundária para produção do etanol. Dessa maneira, o etanol de cana seria a principal fonte e a responsável pela maior parcela da produção de etanol no Brasil. Já o milho atuaria como secundário, especialmente no caso das usinas de cana não serem capazes de atenderem a demanda futura.

REFERÊNCIAS

- ABDALA, Thaís Oliveira. **Análise comparativa dos processos de produção de etanol anidro**. 2017. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.
- ABDULLAH, Bawadi et al. Fourth generation biofuel: A review on risks and mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, n. 4 2018, p. 37–50, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.018>>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- AHMED, Adam E.; ALAM-ELDIN, Amna O.M. An assessment of mechanical vs manual harvesting of the sugarcane in Sudan – The case of Sennar Sugar Factory. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 14, n. 2, p. 160–166, Jun. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jssas.2013.10.005>>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- AKTAR, Wasim; SENGUPTA, Dwaipayan; CHOWDHURY, Ashim. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. **Interdisciplinary Toxicology**, v. 2, n. 1, p. 1–12, 1 mar. 2009. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21217838> <<http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=PMC2984095>>. Acesso em: 02 fev 2020.
- ALBRECHT, Leandro Paiola ; MISSIO, Rodrigo Fernando. **Manejo de Cultivos Transgênicos**. 2013. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2013.
- ALDIGUIER, Andy Salomon. et al. Synergistic temperature and ethanol effect on *Saccharomyces cerevisiae* dynamic behaviour in ethanol bio-fuel production. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 26, n. 4, p. 217–222, 20 Jul. 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00449-004-0352-6>>. Acesso em: 02 fev. 2020.
- ALLEN, Ed; VALDES, Constanza. **Brazil's Corn Industry and the Effect on the Seasonal Pattern of U.S. Corn Exports**. . Washington: [s.n.], 2016. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/35806/59643_aes93.pdf?v=42536 <<https://www.ers.usda.gov/webdocs/publications/84408/aes-100.pdf?v=42937>>. Acesso em: 02 fev 2020. Acesso em: 02 fev. 2020.
- ANA. **Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética**. Brasília: Agência Nacional das Águas (ANA), 2009.
- ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: TDA Comunicação, 2008.
- ANFAVEA. **Publicação mensal da Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores - ANFAVEA | Brasil**. . Brasília: [s.n.], 2018.
- ANP. **Importações e exportações**. . Brasília: [s.n.], 2019.

ARAÚJO, Edilaine da Silva; SANTOS, Juliana Agustineli Pereira. O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional. **Revista Facider**, n. 4, 2013. Disponível em: <<http://seicesucol.edu.br/revista/index.php/facider/article/view/37>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ARSHAD, Muhammad; ABBAS, Mazhar; IQBAL, Munawar. Ethanol production from molasses: Environmental and socioeconomic prospects in Pakistan: Feasibility and economic analysis. **Environmental Technology & Innovation**, v. 14, n. Maio 2016, p. 100317, Maio 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100317>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ASSEMBLÉIA LEGISLATIVA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei N° 11.241, de 19 de setembro de 2002**. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2002/lei-11241-19.09.2002.html>>. Acesso em: 3 set. 2019.

ÁVILA, Silvia Regina Starling Assad. **Efeitos sócio-econômicos da expansão da cana-de-açúcar no vale do São Patrício Silvia**. 2009. 119 f. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Química). Universidade de Brasília, 2009.

BARBOSA, Larissa de Souza Noel Simas; SANTIAGO, Patrícia Aparecida; SELEGHIM JR., Paulo. Modelling a Multi-Stage Diffuser for Sucrose Extraction in Sugarcane Biorefineries. **Defect and Diffusion Forum**, v. 379, n. Dez 2018, p. 149–156, Nov. 2017. Disponível em: <<https://www.scientific.net/DDF.379.149>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BARROS. **Brazil Biofuels Annual 2018 USDA**. . Washington: [s.n.], 2018a. Disponível em: <[https://gain.fas.usda.gov/Recent GAIN Publications/Biofuels Annual_Sao Paulo ATO_Brazil_8-10-2018.pdf](https://gain.fas.usda.gov/Recent%20GAIN%20Publications/Biofuels%20Annual_Sao%20Paulo%20ATO_Brazil_8-10-2018.pdf)>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BARROS, Geraldo. **Mercado de trabalho do agronegócio brasileiro - A dinâmica dos empregos formais na agroindústria sucroenergética de 2000 a 2016**. . Piracicaba: [s.n.], 2018b.

BEBÉ, Felizarda Vilma et al. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação com vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 6, p. 781–787, fev. 2009.

BEEHARRY, Revin P. Extended sugarcane biomass utilisation for exportable electricity production in Mauritius. **Biomass and Bioenergy**, v. 11, n. 6, p. 441–449, Jan. 1996. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953496000505>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BERGALLO, Paola et al. Regulatory initiatives to reduce sugar-sweetened beverages (SSBs) in Latin America. **PLoS ONE**, v. 13, n. 10, p. 1–17, 19 out. 2018. Disponível em: <<http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0205694>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BIGATON, Aline et al. Previsão de custos do setor sucroenergético na região Centro-Sul do Brasil: safra 2017/18. **Revista Ipecege**, v. 3, n. 3, p. 65, 31 ago. 2017. Disponível em: <<https://revista.ipecege.com/Revista/article/view/185>>. Acesso em:

02 fev. 2020.

BLIEMEL, Friedhelm. **Theil's Forecast Accuracy Coefficient: A Clarification**. Journal of Marketing Research, v. 10, n. 4, p. 444, nov. 1973. Disponível em: <<https://www.jstor.org/stable/3149394?origin=crossref>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BOCCI, E.; DI CARLO, A.; MARCELO, D. **Power plant perspectives for sugarcane mills**. Energy, v. 34, n. 5, p. 689–698, maio. 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544209000292>>. Acesso em: 05 fev. 2020.

BONOMI, Antonio; DAYAN, Charles; JESUS, Farias. De promessa a realidade : como o etanol celulósico pode revolucionar a indústria da cana-de-açúcar - uma avaliação do potencial competitivo e sugestões de política pública. **BNDES Setorial**, n. 41, p. 237–294, 2015. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/4283>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BORDONAL, Ricardo de Oliveira et al. Sustainability of sugarcane production in Brazil. **A review. Agronomy for Sustainable Development**, v. 38, n. 2, p. 13, 27 abr. 2018. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s13593-018-0490-x>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

BP BIOFUELS. **Case study : a sugarcane ethanol plant in Brazil**. . São Paulo: [s.n.], 2012.

BRASIL. **Decreto nº 19.717, de 20 de Fevereiro de 1931**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-19717-20-fevereiro-1931-518991-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 6 abr. 2019.

BRASIL. **Decreto nº 76.593, de 14 de Novembro de 1975**. Disponível em: <<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

BUCHSPIES, Benedikt; KALTSCHMITT, Martin. A consequential assessment of changes in greenhouse gas emissions due to the introduction of wheat straw ethanol in the context of European legislation. **Applied Energy**, v. 211, n. set. 2017, p. 368–381, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.105>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CARDOSO, Arnaldo Alves; MACHADO, Cristine de Mello Dias; PEREIRA, Elisabete Alves. Biocombustível, o Mito do Combustível Limpo. **Química Nova na Escola**, p. 9–14, maio. 2008.

CARLOS, Luiz; OLITTA, Thiago; NITSCHKE, Saul. Ethanol Production in Brazil: The Industrial Process and Its Impact on Yeast Fermentation. Biofuel Production-Recent Developments and Prospects. [S.l.]: **InTech**, 2011. v. 1530. . Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/biofuel-production-recent-developments-and-prospects/ethanol-production-in-brazil-the-industrial-process-and-its-impact-on-yeast-fermentation>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CARVALHO, André Luiz De et al. **Impact of climate changes on potential sugarcane yield in Pernambuco, northeastern region of Brazil**. Renewable

Energy, v. 78, p. 26–34, jun. 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148114008507>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CASTRILLON, Carolina et al. Improvements in fermentation and cogeneration system in the ethanol production process: Hybrid membrane fermentation and heat integration of the overall process through Pinch Analysis. **Energy**, v. 156, p. 468–480, ago. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.092>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CETESB. Limpeza à seco: Economia de água e redução no descarte de águas residuárias. **Produção mais limpa (P+ L) / Produção e Consumo Sustentáveis (PCS)**, n.º 77. Novo Horizonte: [s.n.], 2011.

CHAGAS, Mateus Flávio et al. Environmental and economic impacts of different sugarcane production systems in the ethanol biorefinery. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 10, n. 1, p. 89–106, Jan. 2016. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.1623>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CHANDEL, Anuj et al. Comparative analysis of key technologies for cellulosic ethanol production from Brazilian sugarcane bagasse at a commercial scale. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, p. bbb.1990, 26 mar. 2019. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bbb.1990>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CHENG, Bong; KUAN, Chong. Implementing Quick Response Manufacturing to Improve Delivery Performance in an ETO Company. **International Journal of Engineering & Technology**, v. 7, n. 2.28, p. 38, 16 maio. 2018. Disponível em: <<https://www.sciencepubco.com/index.php/ijet/article/view/12879>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CHIU, Chung Chia; SHIANG, Wei-Jung; LIN, Chiuhsiang Joe. The Water Footprint of Bioethanol. **Journal of Clean Energy Technologies**, v. 4, n. 1, p. 43–47, 2015. Disponível em: <<http://www.jocet.org/index.php?m=content&c=index&a=show&catid=45&id=538>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CHRISTOFOLETTI, Cintya Aparecida et al. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, n. 12, p. 2752–2761, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.005>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CHUM, Helena Lago et al. A comparison of commercial ethanol production systems from Brazilian sugarcane and US corn. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 8, n. 2, p. 205–223, mar. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/bbb.1448>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Grãos - Safra 2017/18 - Nono Levantamento**. . Brasília: [s.n.], 2018a. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/item/download/20861_fb79e3ca2b3184543c580cd4a4aa402b>. Acesso em: 3 jun. 2019.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - safra 2019/2020 - Primeiro levantamento.** . Brasília: [s.n.], 2019a.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar - safra 2019/2020 - Segundo levantamento.** . Brasília: [s.n.], 2019b.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de cana de açúcar - Safra 2018/19 - Primeiro levantamento.** . Brasília: [s.n.], 2018b. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/component/k2/item/download/17727_4e54c5103a0ab4a15529e35307c79b2e>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CORTES, Edgar Fernando et al. **Vinasse concentration and juice evaporation system integrated to the conventional ethanol production process from sugarcane – Heat integration and impacts in cogeneration system.** *Renewable Energy*, v. 115, p. 474–488, jan. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.036>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CORTEZ, Barbosa Luiz Augusto. **Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro.** 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

DALL'AGNOL, Amélio. **Etanol de milho no Brasil?** . Brasília: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://radar.cnpso.embrapa.br:8080/documents/10179/16724/Etanol+de+milho+no+Brasil/eecaf6b7-587b-4db1-9bac-6a8b777a9800;jsessionid=576F6E9E3E51D65FDA21794FA8BD507D>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

DIAS, Marina Oliveira de Souza. **Desenvolvimento e otimização de processos de produção de etanol de primeira e segunda geração e eletricidade a partir da cana-de-açúcar.** 2008. 253 f. Dissertação - (Mestrado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

DIAS, Marina Oliveira de Souza. **Simulation of ethanol production processes from sugar and sugarcane bagasse, aiming process integration and maximization of energy and bagasse surplus.** 2011. 282 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DIAS, Marina Oliveira de Souza et al. Sugarcane processing for ethanol and sugar in Brazil. **Environmental Development**, v. 15, p. 35–51, Jul. 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.004>>. Acesso em: 02 fev 2020.

DURAIAM, Ramesh; SALELGN, Ketemaw e BERKETE, Abiyu Kerebo. Production of Beet Sugar and Bio-ethanol from Sugar beet and it Bagasse: A Review. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 43, n. 4, p. 222–233, 25 jan. 2017. Disponível em: <<http://www.ijettjournal.org/archive/ijett-v43p237>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ECKERT, Claudio.Telessaim. et al. Maize ethanol production in Brazil: Characteristics and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 3907–3912, fev. 2018. Disponível em:

<<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.082>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

EIA. **Fuel Ethanol Production**. Disponível em:

<<http://www.eia.gov/cfapps/ipdbproject/iedindex3.cfm?tid=90&pid=44&aid=8&cid=EZ,&syid=1990&eyid=2010&unit=MMTCD>>. Acesso em: 27 ago. 2019.

EID, Farid; CHAN, Kelson; PINTO, Sandro da Silva. **Tecnologia e co-geração de energia na indústria sucroalcooleira paulista: uma análise da experiência e dificuldades de difusão**. Informações Econômicas, v. 28, n. 5, p. 1–6, 1998.

ELISEU, Nicula de Castro Rubens et al. Assessment of Sugarcane-Based Ethanol Production. Fuel Ethanol Production from Sugarcane. [S.l.]: **IntechOpen**, 2019. v. i. p. 13. Disponível em: <<https://www.intechopen.com/books/fuel-ethanol-production-from-sugarcane/assessment-of-sugarcane-based-ethanol-production>>. Acesso em: 02 fev 2020.

EPE. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026**. . Brasília: MME - Ministério de Minas e Energia, 2017.

ESCOBAR, Maria A et al. **Evidence that a tax on sugar sweetened beverages reduces the obesity rate: a meta-analysis**. BMC Public Health, v. 13, n. 1, p. 1072, 13 dez. 2013. Disponível em: <<http://bmcpublichealth.biomedcentral.com/articles/10.1186/1471-2458-13-1072>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ESTEBAN, Diego Alexander et al. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. **Soil and Tillage Research**, v. 187, n. November 2018, p. 60–71, abr. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

FAVA, Marcos; VINÍCIUS, Neves; TROMBIN, Gustavo. **A Dimensão do Setor Sucroenergético - mapeamento e quantificação da safra 2013/14**. . Ribeirão Preto: [s.n.], 2014.

FERREIRA, Joaquim Bento de Souza; HORRIDGE, Mark. Ethanol expansion and indirect land use change in Brazil. **Land Use Policy**, v. 36, p. 595–604, jan. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2013.10.015>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

FIESP. **Outlook FIESP 2027 - Projeções para o agronegócio brasileiro**. 1. ed. São Paulo: FIESP - Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2017.

FRANÇOSO, Renato Frias et al. Relação do custo de transporte da cana-de-açúcar em função da distância. **Revista iPecege**, v. 3, n. 1, p. 100, 16 fev. 2017. Disponível em: <<https://revista.ipecege.org.br/Revista/article/view/123>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

FREDO, César; CASER, Darci. **Mecanização da Colheita da Cana-de-açúcar atinge 90 % na Safra 2016 /17**. Análises e Indicadores do Agronegócio, v. 12, n. 6, p. 6, 2017.

FREITAS, Larissa Diniz et al. Analysis and proposal of reduction of lead time in the

process of cutting, loading and transportation in a sugar cane factory: a study case. **Gestão & Produção**, v. 26, n. 3, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2019000300221&tlng=en>. Acesso em: 02 fev. 2020.

FREITAS, Carlos; MIURA Alex. Situação Atual e Perspectivas da Produção Brasileira de Etanol de Milho. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, v. 13, n. 5, p. 5, 2018.

FRIBERG, Emilie; WALLIN, Alice; WOLK, Alicja. Sucrose, High-Sugar Foods, and Risk of Endometrial Cancer--a Population-Based Cohort Study. **Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention**, v. 20, n. 9, p. 1831–1837, 1 set. 2011. Disponível em: <<http://cebp.aacrjournals.org/cgi/doi/10.1158/1055-9965.EPI-11-0402>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GAVAHIAN, Mohsen et al. Emerging techniques in bioethanol production: from distillation to waste valorization. **Green Chemistry**, v. 21, n. 6, p. 1171–1185, 2019. Disponível em: <<http://xlink.rsc.org/?DOI=C8GC02698J>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GAVAHIAN, Mohsen; FARAHNAKY, Asgar. Ohmic-assisted hydrodistillation technology: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 72, n. set. 2017, p. 153–161, fev. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924224417306118>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GAVAHIAN, Mohsen; FARAHNAKY, Asgar; SASTRY, Sudhir. Ohmic-assisted hydrodistillation: A novel method for ethanol distillation. **Food and Bioproducts Processing**, v. 98, p. 44–49, abr. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fbp.2015.11.003>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GIROLDO, Mauro Berti et al. Development of 1.6L Flex Fuel Engine for Brazilian Market. 22 Nov. 2005, Washington: **SAE International**, 22 nov. 2005. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2005-01-4130/>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GONÇALES, Marciel.; BARROS, Marcelo Jorge; CAMPOS, Fábio César **Sustentabilidade no Processo de Recepção da Cana de Açúcar em Usina Sucroalcooleira**. International Workshop Advances in Cleaner Production, p. 1–10, 2015. Disponível em: <<https://www.mendeley.com/viewer/?fileId=332ba8c8-cd76-1035-75dd-f4a03b32bd74&documentId=2efdccb-cb81-3355-b18a-79b78a83b399>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GONÇALES, Manoel et al. Opportunities and challenges for the use of cleaner production to reduce water consumption in Brazilian sugar-energy plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 353–363, jun. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618307753>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

GRANELLI, Amanda; FRANCO, Nelson; LOPES, Lucas Souza. **Análise da viabilidade técnica e econômica do Sistema de Separação e Limpeza A Usina Granelli é uma empresa localizada em Charqueada-SP**. 2016. 11 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de

Engenharia, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

GRANVILLE, Sérgio et al. Recent Advances of Sugarcane Biomass Cogeneration in Brazil. 2009, Calgary: **IEEE**, 2009. p. 1–5.

GRASSI, Marcos.; PEREIRA, Gabriel. Energy-cane and RenovaBio: Brazilian vectors to boost the development of Biofuels. **Industrial Crops and Products**, v. 129, n. December 2018, p. 201–205, mar. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.12.006>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

HAAG, Hamann Pier; ACCORSI, Wlad Radquir. Deficiência de macro e micronutrientes em cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* spp) variedade CB 41-76 cultivada em solução nutritiva. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, v. 35, p. 125–168, 1978. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0071-12761978000100009&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 02 fev. 2020.

HAO, Han et al. Biofuel for vehicle use in China: Current status, future potential and policy implications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. set. 2016, p. 645–653, Feb. 2018. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.045>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

HARB, Alfonso Farjan Malky; COLUMBA, Juan Carlos Ledezma. **Financial and economic feasibility of sugar cane production in northern La Paz**. Latinoamerican and Caribbean environmental Economics Program (LACCEP), 13., nº 2010. La Paz: [s.n.], 2010.

HASSUANI, Suleiman José. **Biomass power generation - Sugar cane bagasse and trash**. 1. ed. Piracicaba: PNUD - Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / CTC - Centro de Tecnologia Canavieira, 2005. v. 5.

HOLANDA, Sergio Buarque. **Raízes do Brasil**. 26. ed. São Paulo: Companhia das Letras, 1995.

IANNONI, Ana Paula; MORABITO, Reinaldo. Análise do sistema logístico de recepção de cana-de-açúcar: um estudo de caso utilizando simulação discreta. **Gestão & Produção**, v. 9, n. 2, p. 107–127, 2002.

IBGE. **A Geografia da cana-de-açúcar - Dinâmica territorial da produção agropecuária**. 1. ed. Rio de Janeiro: IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017.

ICF. **A Life-Cycle Analysis of the Greenhouse Gas Emissions of Corn-Based Ethanol**. . Washington: [s.n.], jan. 2017. Disponível em: <https://www.usda.gov/oce/climate_change/mitigation_technologies/USDAEthanolReport_20170107.pdf>. Acesso em: 30 maio. 2019.

ISABELLA, Giuliana et al. Another driver of the Brazilian fuel ethanol supply chain: the consumers' preferences. **Revista de Administração**, v. 52, n. 3, p. 304–316, 2017.

JACQUES, Kallum; LYONS, Thomas; KELSALL, Drenthe. **The Alcohol Textbook 4**

th Edition A reference for the beverage, fuel and industrial alcohol industries. 4. ed. Nottingham: Nottingham University Press, 2003. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2993570/mod_resource/content/1/The_Alcohol_Textbook-4_Ed.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2020.

JAMBO, Siti Azmah et al. A review on third generation bioethanol feedstock. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 65, p. 756–769, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.064>>. Acesso em: 02 fev 2020.

JIAO, Jianling; LI, Jingjing; BAI, Yu. Ethanol as a vehicle fuel in China: A review from the perspectives of raw material resource, vehicle, and infrastructure. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 832–845, Apr. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.141>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

JOHNSON, Frederic et al. Cane Energy for Sustainable Development and Economic Competitiveness in Southern Africa. 2007, Durban: **South African Sugar Technologists Association**, 2007.

JORGE, Louis. et al. Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system. **Journal of Food Engineering**, v. 99, n. 3, p. 351–359, ago. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.03.017>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

KANG, Qian et al. Hydrophilic membranes to replace molecular sieves in dewatering the bio-ethanol/water azeotropic mixture. **Separation and Purification Technology**, v. 136, p. 144–149, nov. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2014.09.009>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

KHAIR, Ummul et al. Forecasting Error Calculation with Mean Absolute Deviation and Mean Absolute Percentage Error. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 930, n. 1, p. 012002, dez. 2017. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1742-6596/930/i=1/a=012002?key=crossref.285555572bb6ab236adacddb7dccb94d>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

KHATIWADA, Dilip et al. Power generation from sugarcane biomass – A complementary option to hydroelectricity in Nepal and Brazil. **Energy**, v. 48, n. 1, p. 241–254, dez. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.015>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

KIM Alexander; DALE Daniel. Environmental aspects of ethanol derived from no-tilled corn grain: Nonrenewable energy consumption and greenhouse gas emissions. **Biomass and Bioenergy**, v. 28, n. 5, p. 475–489, 2005.

KIM, Misook; DAY, Donal F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 38, n. 7, p. 803–807, 29 jul. 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s10295-010-0812-8>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

KLEIBER, Jânio et al. Fertirrigação com vinhaça na produção de cana- Henrique Azevedo Mendes Fertirrigation with vinasse on the production of sugarcane. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 11, n. 2, p. 7–12, abr. 2015. Disponível

em: <<http://revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/532>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

KUNNAKORN, Dario et al. Techno-economic comparison of energy usage between azeotropic distillation and hybrid system for water-ethanol separation. **Renewable Energy**, v. 51, p. 310–316, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2012.09.055>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

LALUCE, Cecília et al. Fermentation of sugarcane juice and molasses for ethanol production. O'HARA, I. M. . S. G. M. (Ed.). . **Sugarcane-Based Biofuels and Bioproducts**. 1. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2016. p. 55–85.

LAOPAIBOON, Lakkana et al. Ethanol production from sweet sorghum juice in batch and fed-batch fermentations by *Saccharomyces cerevisiae*. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 23, n. 10, p. 1497–1501, 11 set. 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11274-007-9383-x>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

LIMA, Andrey Domingues et al. Proposta de aplicação da abordagem Quick Response Manufacturing (QRM) para a redução do lead time em operações de escritório. **Production**, v. 23, n. 1, p. 1–19, 22 maio. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-65132013000100001&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 02 fev. 2020.

LLOYD-WILLIAMS, Ffion et al. Smorgasbord or symphony? Assessing public health nutrition policies across 30 European countries using a novel framework. **BMC Public Health**, v. 14, n. 1, p. 1195, 21 dez. 2014. Disponível em: <<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed16&NEWS=N&AN=71447588>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

LOPES, Mario Lucio et al. Ethanol production in Brazil: a bridge between science and industry. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 47, p. 64–76, dez. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.bjbm.2016.10.003>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

LUO, Jianquan et al. Refining sugarcane juice by an integrated membrane process: Filtration behavior of polymeric membrane at high temperature. **Journal of Membrane Science**, v. 509, p. 105–115, jul. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.02.053>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MADAENI, Samantha.; ZERESHKI, Sarah. Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse osmosis. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 6, p. 1270–1276, jun. 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.002>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MAKAREM, Nour et al. Consumption of Sugars, Sugary Foods, and Sugary Beverages in Relation to Cancer Risk: A Systematic Review of Longitudinal Studies. **Annual Review of Nutrition**, v. 38, n. 1, p. 17–39, 21 ago. 2018. Disponível em: <<https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev-nutr-082117-051805>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MAPA. **Etanol - Comércio Exterior Brasileiro**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/etanol-comercio-exterior-brasileiro>>. Acesso em: 27 ago. 2019a.

MAPA. **Evolução da Produtividade e da Produção de Cana-de-Açúcar no Brasil por Ano-Safra**. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/arquivos-producao/copy3_of_08a_areacolhidaCONABMAPA.pdf>. Acesso em: 25 maio. 2019b.

MAPA. **Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia**. . Brasília: [s.n.], 2018.

MATOS, Carolina Roberta Alves De et al. **Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético Paulista : Dados consolidados das safras**. . São Paulo: [s.n.], 2014.

MATSUURA, Marília I. S. Folegatti et al. **RenovaCalc: Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio Método e ferramenta para a contabilidade da Intensidade de Carbono de Biocombustíveis no Programa RenovaBio**. Brazil: ANP. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/images/Consultas_publicas/2018/n10/CP10-2018_Nota-Tecnica-Renova-Calc.pdf>. , 2018 Acesso em: 02 fev. 2020.

MCLAREN, Jordan. **Sugarcane as a feedstock for biofuels**. . Chesterfield: [s.n.], 2009. Disponível em: <<https://www.ncga.com/file/541/sugarcanewhitepaper092810.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MEURER, Angelica Patricia Sommer; LOBO, Debora Da Silva. Caracterização da logística do sistema agroindustrial (SAG) da cana-de-açúcar no centro-oeste do Brasil. **Revista Economia & Gestão**, v. 15, n. 39, p. 45–65, 8 jul. 2015. Disponível em: <<http://periodicos.pucminas.br/index.php/economiaegestao/article/view/4964>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MILANEZ, Artur Yabe et al. O déficit de produção de etanol no Brasil entre 2012 e 2015: determinantes, consequências e sugestões de política. **Biocombustíveis - BNDES Setorial**, v. 35, p. 277–302, 2012. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3508.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MIZIARA, Fausto. **Expansão da Lavoura de Cana em Goiás e Impactos Ambientais**. 2009, Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Sociologia, 2009. p. 20.

MME. **Nota Explicativa sobre a Proposta de Criação da Política Nacional de Biocombustíveis**. . Brasília: [s.n.], 2017. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/10584/32426543/RenovaBio+-+Nota+Explicativa/52ef58fa-ae4d-43d0-b5a4-c658e3660825;jsessionid=9B0CC2FAD5CF6053296CC7057FF5421D.srv155>>.

MONTERROSA, Eva Claus. et al. Stakeholder perspectives on national policy for regulating the school food environment in Mexico. **Health Policy and Planning**, v.

30, n. 1, p. 28–38, fev. 2015. Disponível em:
<<https://academic.oup.com/heapol/article-lookup/doi/10.1093/heapol/czt094>>.
Acesso em: 02 fev. 2020.

MORAES Ana et al. Etanol - do início às fases atuais de produção. **Revista de Política Agrícola**, v. XXIII, n. 4, p. 5–22, 2014.

MORAES, Bruna et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825–835, jan. 2014. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.07.018>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

MORAES, Bruna S. et al. Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane ethanol production in Brazil: Challenges and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 44, p. 888–903, apr. 2015. Disponível em:
<<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.023>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

NERO, Antonio Calil; GUIMARÃES, Maria José O.C.; FREIRE, Estevão. Business models for commercial scale second-generation bioethanol production. **Journal of Cleaner Production**, v. 184, p. 168–178, maio. 2018. Disponível em:
<<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261830550X>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

NEVES, Marcos Fava; WAACK, Roberto Silva; MARINO, Matheus Kfourri. Sistema Agroindustrial da Cana-de-Açúcar: Caracterização das Transações entre Empresas de Insumos, Produtores de Cana e Usinas. 1998, Poços de Caldas: **SOBER**, 1998. p. 559–572.

NOVACANA. **O mercado de carbono no setor financeiro**. Disponível em:
<<https://www.novacana.com/n/eventos/mario-sergio-vasconcelos-febraban-o-mercado-de-carbono-no-setor-financeiro-030818>>. Acesso em: 2 set. 2019.

OLIVA et al. The Brazilian technology of fuel ethanol fermentation – yeast inhibition factors and new perspectives to improve the technology. **Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments**. Badajoz: Formatex, 2013. p. 371–379.

OLIVA, Felipe Cardoso. Avaliação financeira do setor sucroenergético depois do boom. **Revista de Política Agrícola**, v. 26, n. 1, p. 49–64, 2017.

OLIVEIRA José; COELHO, Suani. Biodiesel in Brazil Should Take Off with the Newly Introduced Domestic Biofuels Policy: RenovaBio. QUBEISSI, M. AL (Ed.). . Biofuels - Challenges and opportunities. 1. ed. São Paulo: **IntechOpen**, 2019. v. 1. p. 161–177. Disponível em: <<http://www.intechopen.com/books/trends-in-helicobacter-pylori-infection/floating-drug-delivery-systems-for-eradication-of-helicobacter-pylori-in-treatment-of-peptic-ulcer-d>>.

OLIVEIRA, Leandro Gomes; FREITAS, Denise Cervilha; GODINHO, Moacir. A aplicação da abordagem quick response manufacturing (QRM) no processo de desenvolvimento de novos lápis de olhos. **Revista Produção Online**, v. 18, n. 2, p. 504–531, 15 jun. 2018. Disponível em:
<<https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/2844>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

OSMANI, Atif et al. Electricity generation from renewables in the United States: Resource potential, current usage, technical status, challenges, strategies, policies, and future directions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 24, p. 454–472, ago. 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.011>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

OSORE, Emmanuel; OGOLA, Joseph.; OGOT, Marianne. **Characterization of Levels of Automation on the Quality of Sugar Cane Juice Extraction : Case of Kenya**. *Journal of Automation and Control*, v. 7, n. 1, p. 15–24, 2019.

PACHECO, Rui; SILVA, Carla. Global warming potential of biomass-to-ethanol: Review and sensitivity analysis through a case study. **Energies**, v. 12, n. 13, 2019.

PASQUAL, Janaina et al. Assessment of Collective Production of Biomethane from Livestock Waste for Urban Transportation Mobility in Brazil and the United States. **Energies**, v. 11, n. 4, p. 997, 20 Apr. 2018. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1996-1073/11/4/997>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

PATIL, Nilesh; PATIL, Vilas; BHOLE, Shashikant. Molecular Sieve Dehydration: a Major Development in the Field of Ethanol Dehydration To Produce Fuel Ethanol. **Asian Journal of Science and Technology**, v. 07, n. jun. p. 2897–2902, 2016.

PECEGE. **Custos de produção de cana-de-açúcar, açúcar, etanol e bioeletricidade no Brasil: fechamento da safra 2014/2015 e acompanhamento da safra 2015/2016**. 1. ed. Piracicaba: Programa de Educação Continuada em Economia e Gestão de Empresas - PECEGE, 2015.

PERÁ, Thiago; BRANCO, José Eduardo; CAIXETA, José Vicente. Rethinking Sugarcane Logistics in Brazil: Productivity, Modeling, Rail Transport and Digital Agriculture. , **Logística do Agronegócio: Oportunidades e Desafios.**, n^o 1. Piracicaba: [s.n.], 2017.

PEREIRA, Marcos Paulo et al. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 6, p. 3786–3802, ago. 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.03.024>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

PEREIRA, Willian Victor de Souza. **Usina Flex de Etanol: Estudo de viabilidade técnica do uso de milho na entressafra da cana-de-açúcar**. 2017. 19 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

PIGNATI, Wanderlei Antonio et al. Distribuição espacial do uso de agrotóxicos no Brasil: uma ferramenta para a Vigilância em Saúde. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 22, n. 10, p. 3281–3293, out. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-81232017021003281&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 02 fev. 2020.

PIMENTEL, Luiz Straunard. The Brazilian ethanol program. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 22, n. 10, p. 1989–2012, out. 1980. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/bit.260221002>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

PINA, Eduardo et al. Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations. **Energy**, v. 138, p. 1263–1280, nov. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.054>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

PRADO, Caio. **História Económica do Brasil**. 20. ed. São Paulo: Editora Brasiliense, 1976.

RÍPOLI, Tomaz Caetano Cannavam; MOLINA, Walter Francisco; RÍPOLI, Marco Lorenzco Cunali. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 677–681, dez. 2000. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/sa/v57n4/a13v57n4.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

RONQUIM, Carlos Cesar. **Queimada na colheita da cana-de-açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos**. . Campinas: [s.n.], 2010.

SAMPAIO, Isabelle L. M. et al. Electricity Production from Sugarcane Straw Recovered Through Bale System: Assessment of Retrofit Projects. **BioEnergy Research**, 26 jul. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12155-019-10014-9>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SANTORO, Sergio et al. Strategy for scale-up of SBS pervaporation membranes for ethanol recovery from diluted aqueous solutions. **Separation and Purification Technology**, v. 176, p. 252–261, abr. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2016.12.018>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SANTOS, Gesmar Rosa. **Quarenta anos de etanol em larga escala no Brasil: desafios, crises e perspectivas**. 1. ed. Brasília: IPEA, 2016. Disponível em: <https://www3.eco.unicamp.br/nea/images/arquivos/Book_Quarenta_Anos_de_Etanol.pdf#page=189>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SANTOS, Gesmar Rosa; GARCIA, Eduardo Afonso; SHIKIDA, Pery Francisco Assis. A crise na produção do etanol e as interfaces com as políticas públicas. **Boletim Radar**, n. 39, p. 27–38, jun. 2015.

SARTORI, Juliana Aparecida et al. Criegee mechanism as a safe pathway of color reduction in sugarcane juice by ozonation. **Food Chemistry**, v. 225, p. 181–187, jun. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.028>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SILVA Antônio et al. **Electricity supply security and the future role of renewable energy sources in Brazil**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 59, p. 328–341, jun. 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.001>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SILVA Nelson; MIZIARA, Fausto. Sucroalcohol sector and agricultural frontier expansion in the Goiás state, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 3, p. 399–407, 6 jul. 2011. Disponível em: <<http://www.revistas.ufg.br/index.php/pat/article/view/11054>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SILVA, Rodrigo O. et al. Multi-objective optimization of an industrial ethanol

distillation system for vinasse reduction – A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 183, p. 956–963, maio. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652618304980>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SMITH, Richard. Why a Macroeconomic Perspective Is Critical to the Prevention of Noncommunicable Disease. **Science**, v. 337, n. 6101, p. 1501–1503, 21 set. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencemag.org/content/337/6101/1501.full.pdf%5Cnhttp://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS&PAGE=reference&D=emed10&NEWS=N&AN=2012555776>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SMITHERS, Jeff. Review of sugarcane trash recovery systems for energy cogeneration in South Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 915–925, abr. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.042>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SOLOMON, Sérgio. Post-Harvest cane deterioration and its milling consequences. **Sugar Tech**, v. 2, n. 1–2, p. 1–18, 2000.

SONG, Yimeng et al. Mass transport mechanisms within pervaporation membranes. **Frontiers of Chemical Science and Engineering**, v. 13, n. 3, p. 458–474, 22 set. 2019. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11705-018-1780-1>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

SOUSA, Allan Charles Mendes et al. Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, n. 1, p. 173–182, 2017.

SOUZA Marcos; AZEVEDO, Paulo Furquim De. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 44, n. 2, p. 179–199, jun. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032006000200002&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 02 fev 2020.

SOUZA, Lorena Mendes; MENDES, Pietro A.S.; ARANDA, Donato A.G. Assessing the current scenario of the Brazilian biojet market. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 98, p. 426–438, dez. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.09.039>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

STESSE, Dérek. **Conceito de automação de moenda adotado na Usina Trapiche, com uso da velocidade linear**. Disponível em: <<http://www.smar.com/newsletter/marketing/index181.html>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

TGARGUIFA, Ahmed; ABDERAFI, Souad; BOUNAHMIDI, Tijani. Modeling and optimization of distillation to produce bioethanol. **Energy Procedia**, v. 139, p. 43–48, dez. 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.170>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

THOW, Anne Marie et al. Taxing soft drinks in the Pacific: implementation lessons for improving health. **Health Promotion International**, v. 26, n. 1, p. 55–64, 1 mar. 2010.

Disponível em: <<https://academic.oup.com/heapro/article-lookup/doi/10.1093/heapro/daq057>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

TORQUATO, Sergio Alves. Mecanização da colheita da cana-de-açúcar : benefícios ambientais e impactos na mudança do emprego no campo em São Paulo , Brasil
Mechanized sugarcane harvesting : environmental benefits and impacts on the rural.
Revista Brasileira de Ciências Ambientais, v. 39, n. dez, p. 49–62, 2013.

TREGEGGLE, Daniel; ZILBERMAN, David. **The Yield Dynamics of Perennial Crops : An Application to Sugarcane in Brazil I**. 2016, Boston: [s.n.], 2016. p. 1–41. Disponível em: <<https://tind-customer-agecon.s3.amazonaws.com/77486e93-b1fb-4c34-85b3-1f04fe054fbe?response-content-disposition=inline%3Bfilename%2A%3DUTF-8%27%27AAEDraft.pdf&response-content-type=application%2Fpdf&AWSAccessKeyId=AKIAXL7W7Q3XHDXDQYS&Expires=1559573924>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

TROMBETA, Natália de Campos; CAIXETA, José Vicente. Potencial e Disponibilidade de Biomassa de Cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n. 3, p. 479–496, set. 2017. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032017000300479&lng=pt&tlng=pt>. Acesso em: 02 fev. 2020.

UNICA; CEISE. **Setor sucroenergético no Brasil - Uma visão para 2030**. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/7948692/UNICA-CEISE_Setor+Sucroenergético+no+Brasil_Uma+Visão+para+2030.pdf/80da9580-60c7-4f53-afaf-030ad01f3ebf;jsessionid=AC802B166C93389BED1AB445EAB7CD10.srv155>. Acesso em: 26 ago. 2019.

UNICA. **A bioeletricidade da cana em números – Março de 2018**. . São Paulo: [s.n.], 2018.

UNICA. **Consumo de combustíveis - Etanol anidro e hidratado**. Disponível em: <<http://unicadata.com.br/historico-de-consumo-de-combustiveis.php?idMn=11&tipoHistorico=10&acao=visualizar&idTabela=2362&produto=Etanol%2Bhidratado%2Bcombust%2526iacute%253Bvel&nivelAgregacao=1>>. Acesso em: 26 ago. 2019a.

UNICA. **Histórico de produção e moagem por produto**. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=31&tipoHistorico=2&acao=visualizar&idTabela=2333&produto=etanol_total&safralNi=1980%252F1981&safraFim=2018%252F2019&estado=RS%252CSC%252CPR%252CSP%252CRJ%252CMG%252CES%252CMS%252CMT%252CGO%252CDF%252CBA%252CSE%252CAL%25>. Acesso em: 22 maio. 2019b.

UNICA. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol por safra**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=2334&safra=2018%252F2019&estado=RS%252CSC%252CPR%252CSP%252CRJ%252CMG%252CES%252CMS%252CMT%252CGO%252CDF%252CBA%252CSE%252CAL%25>>

CPE%252CPB%252CRN%252CCE%252CPI%252CMA%252CTO%252CPA%252CAP%25>. Acesso em: 28 ago. 2019c.

VIIKARI, Larry; VEHEMAANPERÄ, Jordan; KOIVULA, Andersen. Lignocellulosic ethanol: From science to industry. **Biomass and Bioenergy**, v. 46, p. 13–24, Nov. 2012. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953412002140>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

WALTER, Arnaldo et al. Brazilian sugarcane ethanol: developments so far and challenges for the future. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment**, v. 3, n. 1, p. 70–92, 18 Jan. 2014. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/9781118957844.ch24>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

WANG, Lei et al. Economic and GHG emissions analyses for sugarcane ethanol in Brazil: Looking forward. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 571–582, Dec. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.212>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ZABED, Herman et al. Bioethanol production from renewable sources: Current perspectives and technological progress. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, p. 475–501, maio. 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.076>>.

ZARPELON, Florenal. **As especificações do álcool focadas para o mercado mundial**. . Brasília: [s.n.], 2008. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/Especificacoes_do-Alcool_Focado_para_Mercado_Mundial_000fxgfcrtu02wyiv80soht9hal6t8qx.pdf>. Acesso em: 02 fev. 2020.

ZOTT, Christoph; AMIT, Raphael; MASSA, Lorenzo. The Business Model: Recent Developments and Future Research. **Journal of Management**, v. 37, n. 4, p. 1019–1042, 2 jul. 2011. Disponível em: <<http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0149206311406265>>. Acesso em: 02 fev. 2020.