

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

MÁRIO ALTÊMIO DE FREITAS DALPIAN

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DE
USINA FLEX DE CANA-DE-AÇÚCAR E
SORGO-SACARINO**

SÃO CARLOS-SP
2024

Mário Altêmio de Freitas Dalpian

**Análise técnico-econômica de usina flex de cana-de-açúcar e
sorgo-sacarino**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Alice Medeiros de Lima

São Carlos – SP
2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

Folha de aprovação

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Alice Medeiros de Lima, DEQ/UFSCar

Prof. Fábio Bentes Freire, DEQ/UFSCar

Eng. Paulo Gabriel Ferreira de Azevedo, DEQ/UFSCar

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise abrangente do setor sucroenergético no Brasil, abordando diversos aspectos desde a evolução histórica até as perspectivas futuras. O estudo se inicia com uma investigação profunda sobre a evolução desse setor, destacando marcos importantes e influências que moldaram sua trajetória. Em seguida, o foco se volta para as Tecnologias Aplicadas na Produção de Etanol, examinando os avanços tecnológicos que impulsionaram a eficiência e a sustentabilidade na produção de etanol. Explorando o potencial do sorgo como matéria-prima na indústria sucroenergética, avaliadas frentes econômica e ambiental relacionadas ao setor são discutidas em profundidade no tópico aspectos econômicos e ambientais do setor. A metodologia adotada no estudo proporciona um método sólido para a coleta e análise de dados. Na seção Matérias-Primas e Processo de Produção, são discutidas as características da cana-de-açúcar e do sorgo como matérias-primas, além de abordar o processo de produção na Usina Flex. A Viabilidade Econômica é discutida através da análise do custo de operação, análise de preços de mercado e tendências, e retorno sobre investimento (ROI). A seção Análise de Preço de mercado explora a identificação do mercado-alvo e estratégias para maximizar receita e participação de mercado. Os Riscos, Mitigação e Resiliência são abordados através da identificação de riscos potenciais, estratégias de mitigação e planos de contingência, e resiliência da usina a condições adversas.

Finalmente, as Considerações Finais consolidam as descobertas do estudo, proporcionando uma síntese dos resultados, destacando as contribuições da pesquisa e oferecendo sugestões para futuras investigações. Em resumo, este trabalho oferece uma análise abrangente e aprofundada do setor sucroenergético no Brasil, abordando diversos aspectos desde a produção até os desafios econômicos e ambientais, proporcionando uma base sólida para entendimento e tomada de decisões no setor.

Palavras-chave do resumo: Sucroenergético, Setor sucroalcooleiro, Sorgo

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive analysis of the sugar-energy sector in Brazil, addressing various aspects from its historical evolution to future prospects. The study begins with an in-depth investigation into the evolution of this sector, highlighting key milestones and influences that have shaped its trajectory. Next, the focus shifts to the Technologies Applied in Ethanol Production, examining the technological advancements that have driven efficiency and sustainability in ethanol production. Exploring the potential of sorghum as a raw material in the sugar-energy industry, the economic and environmental fronts related to the sector are discussed in depth in the section on the economic and environmental aspects of the sector. The methodology adopted in the study provides a solid approach for data collection and analysis. In the Raw Materials and Production Process section, the characteristics of sugarcane and sorghum as raw materials are discussed, along with the production process at the Flex Plant. Economic Viability is discussed through the analysis of operational costs, market price trends, and return on investment (ROI). The Market Price Analysis section explores the identification of target markets and strategies to maximize revenue and market share. Risks, Mitigation, and Resilience are addressed through the identification of potential risks, mitigation strategies, contingency plans, and the plant's resilience to adverse conditions.

Finally, the Conclusion consolidates the findings of the study, providing a synthesis of the results, highlighting the contributions of the research, and offering suggestions for future investigations. In summary, this paper offers a comprehensive and in-depth analysis of the sugar-energy sector in Brazil, covering various aspects from production to economic and environmental challenges, providing a solid foundation for understanding and decision-making in the sector.

Keywords: Sugarcane and energy, Sugarcane and alcohol sector, Sorghum

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Sorgo-sacarino	3
2.2 Potencial do Sorgo como Matéria-Prima na Indústria Sucroenergética	5
2.3 Aspectos Econômicos e Ambientais do Setor Sucroenergético	7
3. METODOLOGIA	10
3.1 Características da Usina em Estudo	10
3.2 Procedimentos de Coleta de Dados	10
3.3 Matérias-primas e Processo de Produção	11
3.4 Viabilidade Econômica	
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
4.1. Produções Estimadas	14
4.2 Análise de Preços de Mercado	20
4.3 Retorno sobre Investimento (ROI)	22
5. CONCLUSÃO	24
REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

A busca por novas fontes de biocombustíveis é essencial no cenário atual, onde a escassez de combustíveis fósseis se torna cada vez mais evidente e as emissões de gases do efeito estufa são fatores preocupantes. Os combustíveis fósseis, como petróleo, carvão e gás natural, são recursos finitos e sua extração e uso têm causado impactos ambientais significativos.

Os biocombustíveis, produzidos a partir de biomassa orgânica, oferecem uma alternativa renovável e sustentável. Eles podem ser derivados de diversas fontes, como cana-de-açúcar, milho e sorgo, e têm o potencial de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões de poluentes, ajudando a combater as mudanças climáticas.

Investir em novas fontes de biocombustíveis não só promove a segurança energética, mas também impulsiona a economia verde, gerando empregos e desenvolvimento tecnológico. A produção de etanol a partir do sorgo-sacarino emergiu como uma área de interesse significativo no cenário sucroenergético, representando uma alternativa versátil e sustentável na busca por fontes renováveis de energia. De acordo com estudos de Goldemberg (2007), a agroindústria sucroalcooleira contribui substancialmente para a matriz energética brasileira, destacando-se como uma das principais fontes de energia renovável.

A cultura do sorgo-sacarino pode ser semeada visando atender a demanda das usinas durante o período de entressafra da cana-de-açúcar ou durante a safra de inverno, após uma cultura de verão. O sorgo-sacarino, uma variedade de sorgo selecionada pelo seu elevado teor de sacarose nos caules, se tornou uma cultura de interesse crescente devido à sua capacidade de adaptação a condições adversas, ao seu ciclo de crescimento relativamente curto e a diversificação das matérias-primas utilizadas.

Nesse sentido, a incorporação do sorgo, cultura que demonstra potencial para produção de biomassa e adaptação a diferentes condições climáticas, emerge como um elemento relevante na busca por maior eficiência e sustentabilidade. A abordagem flexível da usina, explorando diferentes matérias-primas, oferece não apenas uma resposta às demandas atuais do mercado, mas também sugere uma estratégia adaptativa diante de possíveis mudanças nas condições climáticas e econômicas.

O presente trabalho propõe uma análise tecno econômica detalhada de uma usina sucroenergética que adota uma abordagem flexível, combinando cana-de-açúcar e sorgo como principais matérias-primas. Essa abordagem visa explorar sinergias entre as culturas, aproveitando o maquinário já existente e otimizando a produção de biocombustíveis, açúcar e subprodutos. A decisão de investigar uma usina sucroenergética flex, que utiliza cana-de-açúcar e sorgo como matérias-primas, é respaldada por uma série de considerações estratégicas, como aproveitar o período de entressafra da cana-de-açúcar e diminuir a ociosidade do maquinário existente, e pela necessidade de explorar abordagens inovadoras diante dos desafios atuais do setor sucroenergético brasileiro.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização do sorgo como fonte adicional de biomassa para a produção de etanol tem sido investigada, oferecendo uma alternativa sustentável e complementar à cana-de-açúcar. A evolução histórica desse setor, desde a implementação do Proálcool até os avanços tecnológicos recentes, destaca a importância da cana-de-açúcar como matéria-prima versátil. No âmbito da produção de açúcar, Fernandes (2018) enfatiza a necessidade de estratégias que maximizem a eficiência do processo produtivo, abordando questões como a otimização da colheita, o uso de novas variedades de cana e a implementação de técnicas avançadas de processamento.

A integração do sorgo na indústria sucroenergética tem sido objeto de estudo, especialmente em relação à diversificação de matérias-primas. Autores como Silva e Oliveira (2020) exploram o potencial do sorgo-sacarino como alternativa à cana-de-açúcar, destacando suas características agrônomicas favoráveis e a capacidade de adaptação a diferentes condições climáticas.

2.1 Sorgo-sacarino

O sorgo-sacarino, também conhecido como sorgo-doce, é uma variedade de sorgo (*Sorghum bicolor*) cultivada especificamente por seu alto teor de sacarose nos caules. O sorgo é uma planta cerealífera amplamente cultivada em diversas regiões do mundo, utilizada principalmente para alimentação animal, produção de grãos e, em algumas variedades, produção de forragem. No caso do sorgo-sacarino, a planta foi selecionada e desenvolvida para otimizar a produção de açúcar em seus caules. Essa característica faz do sorgo-sacarino uma potencial fonte de matéria-prima para a produção de açúcar e etanol, além do processo de extração do açúcar ser semelhante ao utilizado com a cana-de-açúcar, não sendo necessário mudanças estruturais nos parques industriais (Embrapa, 2012).

O sorgo-sacarino tem sido explorado como uma alternativa para a produção de açúcar e biocombustíveis, proporcionando uma opção mais versátil e resistente em comparação com outras culturas. O setor sucroenergético brasileiro tem uma trajetória rica e complexa, marcada por transformações significativas ao longo das décadas. A evolução desse setor não apenas reflete mudanças tecnológicas, mas também reflete o papel estratégico que a produção de etanol e açúcar desempenha na matriz energética e na economia do país.

Além da produção de açúcar e etanol, o sorgo-sacarino também pode ser utilizado para a produção de forragem animal. O bagaço resultante do processo de extração de açúcar ou etanol pode ser usado como uma fonte de energia, contribuindo para a sustentabilidade agrícola.

O sorgo-sacarino tem ganhado destaque como uma alternativa viável à cana-de-açúcar em algumas regiões, especialmente onde a disponibilidade de água é um fator limitante. Sua capacidade de se adaptar a condições mais áridas e de ter um ciclo de crescimento relativamente curto pode oferecer vantagens em termos de gestão de recursos. As variedades híbridas de sorgo-sacarino continuam a ser desenvolvidas por meio de pesquisas em melhoramento genético, buscando melhorar ainda mais sua produtividade, resistência a doenças, eficiência no uso de recursos e outras características agrônômicas. No entanto, é importante notar que a produção de sorgo-sacarino não é tão disseminada quanto a de cana-de-açúcar, e a escolha entre essas culturas dependerá de uma variedade de fatores locais, econômicos e ambientais.

O advento do Programa Nacional do Alcool (Pro álcool) na década de 1970 representou um marco importante. Goldemberg (2007) ressalta que esse programa visava mitigar os impactos da crise do petróleo, impulsionando a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. A década de 1980 testemunhou uma diversificação ainda maior da produção sucroenergética. Além do etanol, as usinas passaram a gerar energia elétrica a partir do bagaço da cana, contribuindo para a geração de energia. O desenvolvimento de tecnologias para a produção de açúcar, etanol e energia elétrica consolidou o setor como uma força econômica e inovadora.

Além das características mencionadas anteriormente, a produção de sorgo-sacarino também pode trazer benefícios em termos de rotação de culturas. Introduzir o sorgo-sacarino em sistemas de rotação pode ajudar a melhorar a saúde do solo, reduzir a pressão de pragas e doenças específicas de outras culturas e contribuir para a gestão sustentável dos recursos agrícolas.

Macedo (2008) aponta que, ao longo das décadas, o setor superou desafios significativos, incluindo questões relacionadas à eficiência do processo produtivo, gestão de resíduos e adaptação às flutuações nos preços internacionais do açúcar e do petróleo. A evolução do setor sucroenergético no Brasil não pode ser compreendida sem considerar os avanços tecnológicos.

O sorgo-sacarino, por ser uma cultura que pode crescer em regiões com menor disponibilidade de água, pode ser uma escolha relevante em áreas propensas à escassez hídrica. Sua menor demanda de água, quando comparada com a cana-de-açúcar, pode ser um fator determinante em regiões onde a gestão sustentável dos recursos hídricos é crucial. A pesquisa constante em variedades de cana-de-açúcar mais produtivas, inovações no processo de produção de etanol e a implementação de técnicas mais eficientes contribuíram para a competitividade do setor. Sampaio (2015) destaca que o compromisso com práticas sustentáveis também se tornou uma prioridade. A busca por certificações ambientais, o uso eficiente da terra e a gestão responsável dos recursos hídricos tornaram-se elementos fundamentais para a sustentabilidade a longo prazo do setor. Apesar dos avanços, o setor sucroenergético enfrenta desafios contemporâneos.

O sorgo-sacarino, por ser uma cultura mais versátil em relação às condições climáticas e de solo, oferece flexibilidade aos agricultores que buscam diversificar suas atividades agrícolas. Essa diversificação não apenas contribui para a resiliência do sistema agrícola, mas também pode ser estrategicamente valiosa para enfrentar desafios específicos, como mudanças climáticas e flutuações nos mercados de commodities. A expansão da produção sem comprometer ecossistemas sensíveis, a necessidade de lidar com mudanças climáticas e a busca por fontes adicionais de biomassa são questões urgentes. Fernandes (2018) ressalta a importância de estratégias inovadoras, como a integração de novas culturas, para enfrentar esses desafios. A diversificação, como a incorporação do sorgo, emerge como uma alternativa viável para garantir a resiliência do setor em meio a incertezas futuras.

Embora a produção de sorgo-sacarino ainda esteja em processo de desenvolvimento em comparação com culturas mais estabelecidas, suas características adaptáveis e a capacidade de oferecer diversas opções, desde açúcar e etanol até forragem animal, fazem dele uma cultura de interesse em pesquisas agrícolas e práticas sustentáveis. A aceitação e adoção do sorgo-sacarino como uma cultura relevante dependerão da continuidade das pesquisas, do desenvolvimento de variedades aprimoradas e das condições específicas de cada região agrícola.

2.2 Potencial do Sorgo como Matéria-Prima na Indústria Sucroenergética

A busca por alternativas sustentáveis e eficientes na produção sucroenergética tem impulsionado a pesquisa em direção ao potencial do sorgo como uma valiosa matéria-prima. Esta seção abordará os aspectos relacionados ao uso do sorgo na indústria sucroenergética, destacando características agronômicas, potencial de produção de etanol e benefícios ambientais. O sorgo, especialmente a variedade conhecida como sorgo-sacarino, possui um potencial significativo como matéria-prima na indústria sucroenergética. O sorgo (*Sorghum bicolor* L.) tem demonstrado ser uma cultura versátil e adaptável a uma variedade de condições climáticas. De acordo com a May (2012) a capacidade do sorgo de crescer em regiões com menor disponibilidade de água, sendo uma opção atrativa para áreas com estresses hídricos sazonais. A adaptabilidade do sorgo a diferentes tipos de solo e sua resistência a pragas e doenças também são fatores que o tornam uma alternativa promissora para diversificação das culturas na indústria sucroenergética.

O sorgo-sacarino, em particular, tem atraído atenção devido ao seu potencial de produção de biomassa e sacarose. Algumas variedades de sorgo apresentam teores de sacarose significativos em seus colmos, tornando-os uma fonte viável para a produção de etanol. Além disso, a rápida taxa de crescimento do sorgo e seu ciclo curto de cultivo representam vantagens adicionais, permitindo a colheita em períodos mais flexíveis em comparação com a cana-de-açúcar.

A introdução do sorgo na indústria sucroenergética não apenas oferece benefícios agronômicos, mas também pode contribuir para a sustentabilidade ambiental. O sorgo apresenta menor pegada hídrica em comparação com a cana-de-açúcar, sendo uma opção mais eficiente em termos de uso de recursos hídricos, especialmente em regiões onde a escassez de água é uma preocupação crescente.

Apesar do potencial promissor do sorgo, desafios técnicos e agronômicos precisam ser abordados. Variedades específicas de sorgo-sacarino, métodos ideais de cultivo e técnicas de processamento continuam em fase de otimização. O sorgo-sacarino é cultivado por seu alto teor de sacarose nos caules. Esse açúcar pode ser extraído e convertido em etanol, proporcionando uma fonte renovável de energia.

Conhecido por sua capacidade de se adaptar a uma variedade de condições climáticas, incluindo áreas com períodos de seca e solos menos férteis. Isso amplia a área

geográfica onde o sorgo-sacarino pode ser cultivado, oferecendo flexibilidade aos produtores. O sorgo, em geral, tem um ciclo de crescimento mais curto em comparação com a cana-de-açúcar. Isso pode permitir colheitas mais frequentes e uma produção contínua de matéria-prima ao longo do ano. O sorgo, incluindo o sorgo-sacarino, muitas vezes requer menos água em comparação com outras culturas produtoras de açúcar, como a cana-de-açúcar. Isso é particularmente relevante em regiões onde a água é um recurso limitado.

O sorgo-sacarino pode ser incorporado a sistemas de rotação de culturas, o que pode beneficiar a saúde do solo e reduzir a pressão de pragas e doenças associadas a culturas contínuas. A inclusão do sorgo-sacarino na indústria sucroenergética proporciona uma diversificação nas fontes de matéria-prima, reduzindo a dependência exclusiva da cana-de-açúcar. Isso pode ser estratégico para mitigar riscos associados a condições climáticas adversas ou flutuações nos preços de commodities.

2.3 Aspectos Econômicos e Ambientais do Setor Sucroenergético

A análise dos aspectos econômicos e ambientais é essencial para compreender a sustentabilidade e a viabilidade do setor sucroenergético. Este tópico abordará a interação entre os fatores econômicos e ambientais, destacando estudos e pesquisas que examinam o desempenho financeiro das usinas e os impactos ambientais associados à produção de etanol e açúcar. Os aspectos econômicos e ambientais do setor sucroenergético do sorgo-sacarino envolvem uma análise dos impactos financeiros e ambientais associados ao cultivo, processamento e uso dessa cultura na produção de biocombustíveis, principalmente o etanol.

A avaliação da viabilidade econômica e da rentabilidade é fundamental para a sustentabilidade das usinas sucroenergéticas. Autores como Gurgel (2019) ressaltam que a análise dos custos de produção, os preços de mercado para o etanol e açúcar, juntamente com fatores como subsídios e incentivos fiscais, influenciam diretamente a saúde financeira das usinas. Estudos realizados por Macedo (2008) indicam que a produção sucroenergética no Brasil tem sido historicamente competitiva, na maioria devido à eficiência do setor em otimizar o processo produtivo e aprimorar as práticas agrícolas. O sorgo-sacarino pode oferecer vantagens econômicas em termos de custo de produção, especialmente em regiões onde a água é um recurso limitado, uma vez que o sorgo frequentemente requer menos água em comparação com a cana-de-açúcar.

A diversificação das culturas com o sorgo-sacarino pode contribuir para a renda dos

agricultores, proporcionando uma alternativa viável e complementar a outras culturas existentes. A produção sucroenergética, embora uma fonte de biocombustíveis renováveis, não está isenta de impactos ambientais. Santos (2017) destacam que a expansão desordenada das plantações de cana-de-açúcar pode resultar em desmatamento, perda de biodiversidade e impactos negativos nos recursos hídricos. Para mitigar esses impactos, práticas sustentáveis tornaram-se uma prioridade. Autores como Sampaio (2015) exploram estratégias para o manejo responsável dos resíduos da produção, redução do uso de agroquímicos e a adoção de sistemas de produção mais eficientes e sustentáveis.

A integração do sorgo na indústria sucroenergética adiciona uma dimensão extra à análise econômica e ambiental. Estudos como os de Silva e Oliveira (2020) abordam o potencial econômico do sorgo como matéria-prima adicional, destacando sua rápida taxa de crescimento e adaptabilidade a diferentes condições climáticas como fatores que podem contribuir para a diversificação e estabilidade econômica. Contudo, é crucial considerar os impactos ambientais dessa integração. A pesquisa de Martinelli (2019) sugere que, embora o sorgo apresente benefícios em termos de pegada hídrica reduzida e melhorias no manejo do solo, é necessário um planejamento cuidadoso para evitar pressões adicionais sobre os ecossistemas naturais. A influência das políticas públicas e dos incentivos governamentais também desempenha um papel significativo nos aspectos econômicos e ambientais do setor sucroenergético. Autores como Cunha (2019) ressaltam que políticas que incentivam a produção de biocombustíveis, a redução de emissões de gases de efeito estufa e a promoção da sustentabilidade têm impactos diretos nas decisões estratégicas das usinas. A análise dessas políticas, incluindo subsídios e regulamentações ambientais, é crucial para compreender o contexto em que as usinas operam e para antecipar possíveis mudanças nas condições do mercado. O setor sucroenergético do sorgo-sacarino pode se beneficiar do mercado em expansão de biocombustíveis, contribuindo para a oferta de etanol e atendendo à demanda crescente por fontes de energia renovável. Investimentos em pesquisa e desenvolvimento tecnológico para aprimorar as variedades de sorgo-sacarino, bem como os processos de produção de etanol, podem resultar em eficiências econômicas aprimoradas.

A produção sustentável de etanol a partir do sorgo-sacarino pode abrir oportunidades em mercados internacionais que buscam alternativas mais sustentáveis e acessíveis para atender às metas ambientais. O sorgo, incluindo o sorgo-sacarino, é frequentemente elogiado por seu uso eficiente de água, o que é crucial em regiões propensas à escassez hídrica. A produção de etanol a partir do sorgo-sacarino pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa, principalmente quando comparada com fontes de energia fóssil.

A inclusão do sorgo-sacarino em sistemas de rotação de culturas pode beneficiar a saúde do solo, reduzindo a pressão de pragas e doenças e melhorando a fertilidade do solo. O cultivo do sorgo-sacarino pode contribuir para a biodiversidade agrícola, fornecendo uma alternativa valiosa em comparação com monoculturas extensivas. O uso eficiente de subprodutos, como o bagaço, para a geração de energia ou outros fins, pode aumentar a eficiência ambiental do processo. O sorgo-sacarino, devido ao seu ciclo de crescimento mais curto e à eficiência no uso de recursos, tem uma pegada de carbono menor em comparação com outras culturas mais intensivas em carbono.

3 METODOLOGIA

A consolidação dos dados de produção foi feita usando o simulador de processos Pentagro. Uma ferramenta amplamente usada e consolidada no setor sucroenergético. O simulador visa construir um Gêmeo Digital da planta e reproduzir fielmente todos os parâmetros necessários, como produções de açúcar, etanol e energia, consumo de água e insumos e capacidade das operações unitárias. Foram utilizados os dados e o diagrama de uma usina real, a qual não iremos citar o nome por motivos de confidencialidade.

3.1 Características da Usina em Estudo

A usina sucroenergética selecionada para este estudo apresenta características distintas que a destacam no contexto da produção de etanol e açúcar a partir da cana-de-açúcar e sorgo. A compreensão detalhada dessas características é essencial para contextualizar a análise técnico econômica e avaliar o impacto potencial da integração do sorgo na matriz produtiva. Essa usina está estrategicamente localizada em uma região de clima tropical, propício para o cultivo da cana-de-açúcar e sorgo, tem uma extensão territorial dedicada às plantações é significativa, permitindo uma produção em escala comercial.

A infraestrutura da usina é moderna e incorpora avançadas tecnologias de processamento de biomassa e sua eficiência nos processos de moagem, extração e fermentação é uma prioridade, visando maximizar o rendimento de etanol e açúcar, tem uma moagem média diária de 20.000 toneladas de cana-de-açúcar por dia, uma produção aproximada de 800 m³/dia de etanol e cerca de 50.000 sacos/dia de açúcar. Uso de tecnologias, como a cogeração de energia elétrica a partir do bagaço de cana, destaca o compromisso da usina com práticas sustentáveis e econômicas. Imagens do diagrama do Gêmeo Digital da usina no anexo A.

3.2 Procedimentos de Coleta de Dados

A coleta de dados desempenha um papel crucial na pesquisa, fornecendo as informações necessárias para uma análise aprofundada dos aspectos técnicos e econômicos da usina sucroenergética flex de cana-de-açúcar e sorgo. Este tópico detalha os

procedimentos adotados para obter dados confiáveis e abrangentes que sirvam de base para a análise posterior.

A coleta de dados também envolveu uma análise detalhada de documentos internos da usina, como relatórios de produção. Esses documentos fornecem dados quantitativos e qualitativos cruciais para a compreensão do desempenho econômico e ambiental da usina ao longo do tempo.

3.3 Matérias-Primas e Processo de Produção

O sorgo-sacarino é a planta que mais se adapta ao setor sucroalcooleiro, principalmente quando cultivado no verão, visando fornecer matéria-prima de qualidade para abastecer o mercado na entressafra da cana-de-açúcar, para reduzir a instabilidade do mercado de etanol no Brasil. É uma planta de ciclo curto (110 a 120 dias), propagada por sementes, totalmente mecanizável e possível de ser processada com a mesma tecnologia industrial desenvolvida para a cana (Teixeira, 2017). Além disso, o bagaço do sorgo-sacarino apresenta poder calorífico equivalente ao bagaço de cana, sendo bastante eficiente na cogeração de energia.

O sorgo apresenta características adaptáveis a diferentes condições climáticas e solos, além de ter um ciclo de crescimento mais curto em comparação com a cana-de-açúcar. Autores como Wang (2008) ressaltam que o sorgo-sacarino tem potencial para ser uma alternativa promissora na produção de etanol, oferecendo flexibilidade na diversificação das fontes de biomassa. O processo de produção na usina sucroenergética flex é caracterizado pela integração eficiente das etapas de cultivo, colheita, processamento e produção de etanol e açúcar, a integração é crucial para maximizar a eficiência global do processo, reduzir custos operacionais e otimizar o aproveitamento dos recursos.

Uma visão geral da planta e dos vários produtos que podem ser derivados do sorgo Sacarino. O sorgo-sacarino tem emergido como uma alternativa promissora para diversificar as fontes de matéria-prima na produção sucroenergética. Autores como Oliveira (2020) destacam que o sorgo é uma planta anual e apresenta características que o tornam adequado para a produção de etanol.

Características Agronômicas:

- Adaptabilidade Climática: O sorgo-sacarino demonstra boa adaptação a diferentes condições climáticas, incluindo regiões com menor disponibilidade hídrica.

- **Ciclo de Cultivo:** O sorgo-sacarino geralmente possui um ciclo de cultivo mais curto em comparação com a cana-de-açúcar, variando de 4 a 6 meses.
- **Eficiência hídrica:** O sorgo é conhecido por sua eficiência no uso da água, sendo uma opção em regiões sujeitas a períodos de seca.

Contribuições para o Processo:

- **Teor de Sacarose:** Assim como a cana-de-açúcar, o sorgo-sacarino apresenta teores de sacarose em seus colmos, permitindo a produção de etanol.
- **Diversificação de Matérias-Primas:** O cultivo de sorgo-sacarino contribui para a diversificação da matriz produtiva, reduzindo a dependência exclusiva da cana-de-açúcar.
- **Sustentabilidade:** A adaptabilidade e eficiência hídrica do sorgo-sacarino o tornam uma escolha sustentável, especialmente em regiões com limitações de recursos hídricos.

A tabela a seguir apresenta os dados de composição do sorgo e da cana-de-açúcar.

Tabela 01 - Composição do caldo do sorgo e da cana-de-açúcar.

Parâmetros	Sorgo-Sacarino	Cana-de-Açúcar
Brix caldo	15 - 19	18 - 25
Pureza	60 - 75	80 - 90
Fibra (%)	12 - 20	10 - 15
Sacarose caldo (%)	8 - 13	14 - 22
AR caldo (%)	1 - 3	0,5 - 1
Glicose caldo (%)	0,5 - 2	0,2 - 1
Frutose caldo (%)	0,5 - 1,5	0 - 0,5
ART caldo(%)	12 - 17	15 - 24
Amido caldo (%)	até 0,5	0,001 - 0,05

Fonte: May (2012)

Em comparação com o caldo de cana, o caldo do sorgo-sacarino contém mais de açúcares redutores (AR). No entanto, possui menor pureza, caracterizando menos sacarose. Isso demonstra que o potencial do sorgo está mais voltado para a produção de etanol que açúcar, já que os açúcares redutores só podem ser usados no processo de produção de etanol, enquanto a sacarose pode ser usada tanto no processo do etanol quanto no de açúcar.

3.4. Viabilidade Econômica

A avaliação da viabilidade econômica de uma usina sucroenergética flex de cana-de-açúcar e sorgo é crucial para determinar a sustentabilidade financeira do empreendimento. Neste tópico, serão discutidos aspectos econômicos relevantes. Modelos avançados de avaliação econômica para usinas sucroenergéticas, considerando variáveis como custos de produção, e receitas provenientes da venda de etanol, açúcar e energia.

A volatilidade dos preços de commodities é uma variável crítica que influencia diretamente a viabilidade econômica da usina. Flutuações nos preços do petróleo, demanda global por biocombustíveis e políticas governamentais podem afetar significativamente a rentabilidade do setor sucroenergético.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Produções Estimadas

Para a coleta de dados de produções foram utilizados boletins reais da usina, os dados de qualidade do sorgo-sacarino e o Gêmeo Digital. O período de safra da usina em questão inicia no mês de abril e termina em novembro, para esses meses são utilizados os dados dos boletins de produção. O período de entressafra inicia em dezembro e finaliza em março, para a produção de sorgo vamos considerar apenas os meses de dezembro a fevereiro, deixando março como uma parada programada para manutenção. Os inputs de entrada no sistema estão nas tabelas 02, 03 e 04 abaixo:

Tabela 02 - Vazão Mássica Matéria-prima por mês

Mês	Dias Moagem	Moagem (t/mês)	Aproveitamento Agroindustrial (%)	Moagem efetiva (t/h)	Matéria-prima
Abril	21	361395	65,75	1090,58	CANA-DE-AÇÚCAR
Maio	31	647075	79,87	1088,93	CANA-DE-AÇÚCAR
Junho	30	528190	67,26	1090,69	CANA-DE-AÇÚCAR
Julho	31	739258	91,11	1090,58	CANA-DE-AÇÚCAR
Agosto	31	678923	83,67	1090,63	CANA-DE-AÇÚCAR
Setembro	30	616134	78,46	1090,67	CANA-DE-AÇÚCAR
Outubro	31	479908	59,14	1090,7	CANA-DE-AÇÚCAR
Novembro	25	487039	74,43	1090,6	CANA-DE-AÇÚCAR
Dezembro	31	567240,25	75	1017,09	SORGO
Janeiro	31	567240,25	75	1017,09	SORGO
Fevereiro	28	567240,25	75	1126,06	SORGO

Fonte: Autor

A tabela acima mostra a vazão mássica efetiva por hora de matéria-prima que entrou no sistema, as colunas de Moagem e Aproveitamento Agroindustrial (porcentagem do tempo que a usina realmente operou), para os dados de cana-de-açúcar, foram tiradas do boletim de produção. Para o sorgo, foi feita uma média dos dados da cana-de-açúcar, já que

não existem dados reais para esse mês. A tabela 4 traz os dados de qualidade da matéria-prima utilizada. Para a cana-de-açúcar, foi usado o boletim de dados reais da usina. Já para o sorgo, foram usados os dados médios da Tabela 01. O dado de Terra (%) é uma consideração teórica média, usado tanto para a cana quanto para o sorgo.

Tabela 03 - Qualidade Matéria-prima por mês

Mês	Pol (%)	Pureza (%)	Fibra (%)	AR (%)	ART (%)	Terra (%)	Brix (%)	Matéria-prima
Abril	10,3 4	78,88	12,45	0,79	11,67	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Maio	12,2 3	83,36	12,67	0,65	13,53	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Junho	13,6 7	86,06	12,82	0,58	14,97	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Julho	14,1 7	87,51	12,66	0,54	15,45	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Agosto	15,1 1	87,98	13,03	0,52	16,43	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Setembro	15,0 3	88,12	13,49	0,51	16,33	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Outubro	14,9 5	88,91	13,44	0,49	16,23	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Novembro	14,1 3	86,77	14,1	0,54	15,42	0,95	-	CANA-DE-AÇÚCAR
Dezembro	-	67,5	16	2	12,03	0,95	17	SORGO
Janeiro	-	67,5	16	2	12,03	0,95	17	SORGO
Fevereiro	-	67,5	16	2	12,03	0,95	17	SORGO

Fonte: Autor

Além disso, são necessários dados do processo de forma global, como perdas, eficiências e mix de produção. Para os dados do sorgo foram feitas médias dos dados de cana-de-açúcar. A Tabela 04 abaixo nos mostra esses dados:

Tabela 04 -Dados de Processo

Mês	Perdas Indeterminadas (%)	Perdas Extração (%)	Perdas Tratamento (%)	Eficiência Fermentação (%)	Eficiência Destilaria (%)	Mix Açúcar (%)	Matéria-prima
Abril	2,22	3,04	0,55	87,5	99,78	84,26	CANA-DE-AÇÚCAR
Maio	2,32	3,06	0,54	88,9	99,78	83	CANA-DE-AÇÚCAR
Junho	2,28	3,09	0,54	89,1	99,78	82	CANA-DE-AÇÚCAR
Julho	2,5	3,16	0,49	89,7	99,78	82,76	CANA-DE-AÇÚCAR
Agosto	2,7	3,19	0,49	89,6	99,78	78	CANA-DE-AÇÚCAR
Setembro	2,7	3,25	0,46	88,8	99,78	78,5	CANA-DE-AÇÚCAR
Outubro	2,6	3,41	0,48	89,1	99,78	77,26	CANA-DE-AÇÚCAR
Novembro	2,5	3,46	0,5	88,9	99,78	78,26	CANA-DE-AÇÚCAR
Dezembro	2,48	3,21	0,51	88,95	99,78	80,51	SORGO
Janeiro	2,48	3,21	0,51	88,95	99,78	80,51	SORGO
Fevereiro	2,48	3,21	0,51	88,95	99,78	80,51	SORGO

Fonte: Autor

Por fim, após preencher todos os dados de entrada, temos os dados de produção de açúcar, etanol, energia e bagaço:

Tabela 05 - Produção de Açúcar.

Mês	Açúcar (t/mês)	Açúcar (sc./dia)	Matéria-prima
Abril	21936	31774	CANA-DE-AÇÚCAR
Maio	49520	40001	CANA-DE-AÇÚCAR
Junho	44919	44523	CANA-DE-AÇÚCAR
Julho	65730	46544	CANA-DE-AÇÚCAR
Agosto	60760	46850	CANA-DE-AÇÚCAR
Setembro	55107	46824	CANA-DE-AÇÚCAR
Outubro	43263	47196	CANA-DE-AÇÚCAR
Novembro	40561	43597	CANA-DE-AÇÚCAR
Dezembro	30534	26279	SORGO
Janeiro	30534	26279	SORGO
Fevereiro	30566	29126	SORGO

Fonte: Autor

Tabela 06- Produção de Etanol.

Mês	Etanol Absoluto (m³/mês)	Etanol Hidratado (m³/mês)	Etanol Anidro (m³/mês)	Matéria-prima
Abril	9511	9968	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Maio	17612	14458	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Junho	15789	16548	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Julho	22376	23452	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Agosto	23756	24898	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Setembro	21040	22051	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Outubro	15947	16713	0	CANA-DE-AÇÚCAR
Novembro	16033	5112	11175	CANA-DE-AÇÚCAR
Dezembro	18790	19694	0	SORGO
Janeiro	18790	19694	0	SORGO
Fevereiro	17639	18486	0	SORGO

Fonte: Autor

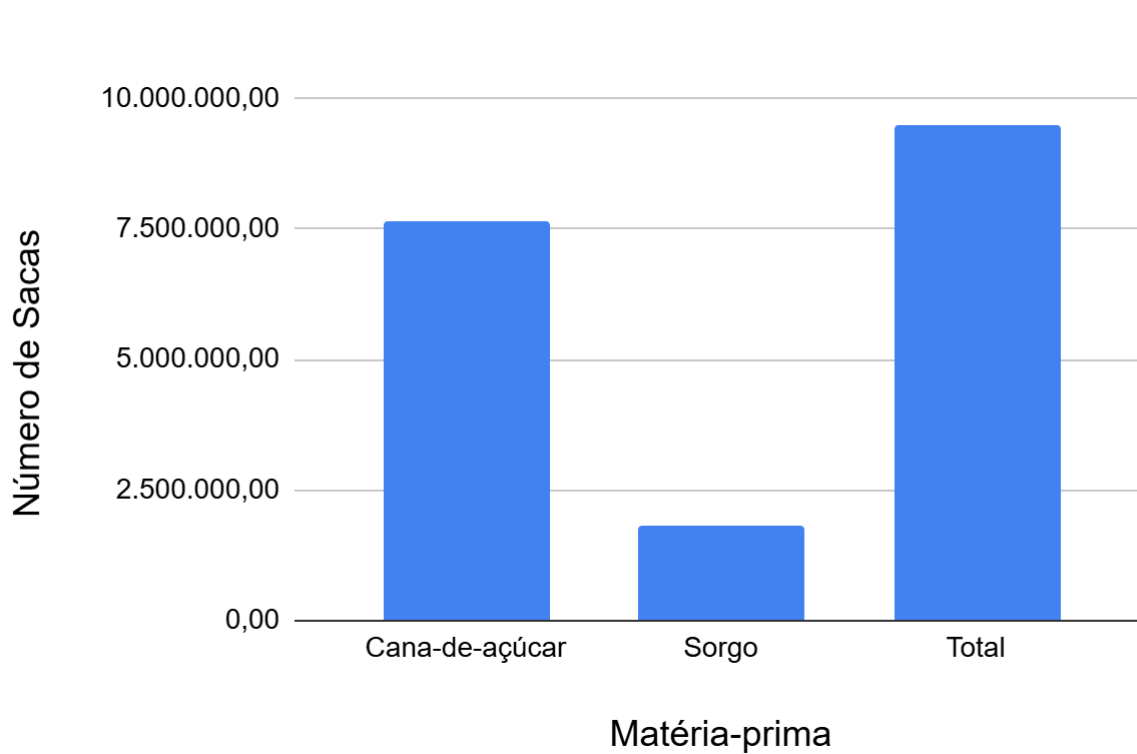
Tabela 07 - Produção de Energia e Bagaço.

Mês	Energia Gerada (kWh)	Energia Consumida (kWh)	Consumo Específico (kW/te)	Energia Exportada (MWh)	Sobra Bagaço (t/mês)	Matéria-prima
Abril	36028	12613	34,9	23415,34	-1631,78	CANA-DE-AÇÚCAR
Maio	65341	22078	34,12	43262,46	-1938,23	CANA-DE-AÇÚCAR
Junho	54155	17958	34	36196,9	-2300,22	CANA-DE-AÇÚCAR
Julho	73646	25135	34	48.511,02	-1099,1	CANA-DE-AÇÚCAR
Agosto	68551	23083	34	45467,95	2286,36	CANA-DE-AÇÚCAR
Setembro	66115	20863	33,86	45252,07	-2117,11	CANA-DE-AÇÚCAR
Outubro	50806	16418	34,21	34388,47	-921,46	CANA-DE-AÇÚCAR
Novembro	53974	17339	35,6	36635,54	-173,22	CANA-DE-AÇÚCAR
Dezembro	61202,56	19489,27	34,34	41713,29	21947,26	SORGO
Janeiro	61202,56	19489,27	34,34	41713,29	21947,26	SORGO
Fevereiro	55279,73	17603,2	34,34	37676,53	17303,33	SORGO

Fonte: Autor

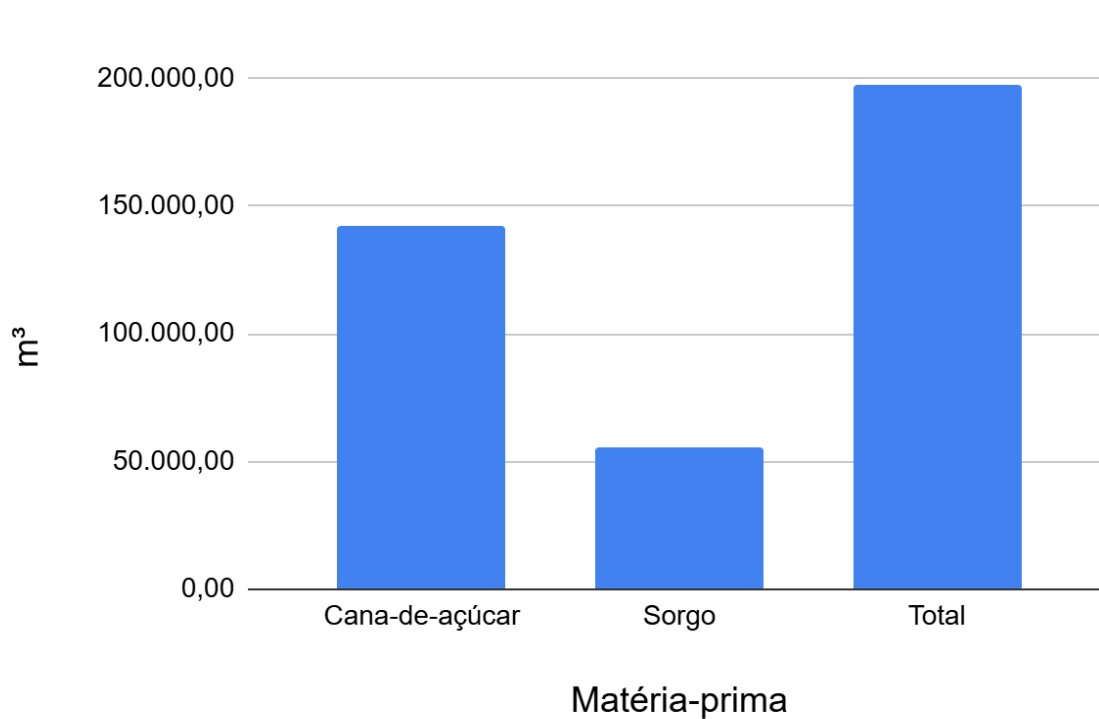
Comparando as produções de cana-de-açúcar, sorgo e total (somando as duas matérias primas), temos os seguintes gráficos:

Figura 01 - Produção de açúcar na safra por matéria-prima.



Fonte: Autor

Figura 02 - Produção de etanol absoluto na safra por matéria-prima.



Fonte: Autor

Comparando os cenários com a inclusão do sorgo e sem, temos que a produção de açúcar aumentou 19,35% e a de etanol absoluto aumentou 28%. Era esperado que o aumento da produção de etanol fosse maior que a de açúcar, pois a pureza do sorgo é menor do que a da cana-de-açúcar, ou seja, o menos sacarose em sua composição, que é o componente necessário para a produção do açúcar.

4.2 Análise de Preços de Mercado

A análise de preços de mercado e tendências é uma componente crucial na avaliação da viabilidade econômica de uma usina sucroenergética, demandando uma abordagem estratégica que considere tanto os fatores internos quanto os externos. A tabela abaixo mostra os valores de venda dos produtos gerados pela usina e o custo operacional por tonelada de matéria-prima usada.

Tabela 08 - Preço de venda e custo operacional.

Açúcar (R\$/Saca de 50 kg)	Etanol hidratado (R\$/Litro)	Etanol Anidro (R\$/Litro)	Energia (R\$/kWh)	Bagaço (R\$/tonelada)	Custo Operacional (R\$/t)
129,71	2,5438	2,9342	0,44	100	120

Fonte: Autor

Os dados de preço do açúcar, etanol hidratado e etanol anidro foram obtidos do site da CEPEA (Centro de Estudos Avançado em Economia Aplicada). Já os demais valores foram obtidos em entrevistas com colaboradores da usina em questão. Com os dados monetários e produções, podemos calcular a receita líquida e o custo de operação, como mostrado na tabela abaixo:

Tabela 09 - Receita bruta por produto.

Mês	Açúcar (R\$)	Etanol (R\$)	Energia (R\$)	Bagaço (R\$)
Abril	86.549.489	25.355.352	10.302.750	-163.178
Maio	160.842.772	36.778.566	19.035.482	-193.823
Junho	173.252.934	42.094.370	15.926.636	-230.022
Julho	187.155.136	59.656.180	21.344.849	-109.910
Agosto	188.385.967	63.335.100	20.005.898	228.636
Setembro	182.204.675	56.092.571	19.910.911	-211.711
Outubro	189.775.910	42.514.275	15.130.927	-92.146
Novembro	141.372.810	13.003.702	16.119.638	-17.322
Dezembro	105.668.564	50.098.081	18.353.848	2.194.726
Janeiro	105.668.564	50.098.081	18.353.848	2.194.726
Fevereiro	105.780.321	47.024.102	16.577.673	1.730.333
Total	1.626.657.141	486.050.378	191.062.458	5.330.309

Fonte: Autor

Tabela 10 - Custo, receita bruta total e receita líquida.

Mês	Custo Operacional	Receita Bruta	Receita Líquida
Abril	43.367.400	122.044.413	78.677.013
Maio	77.649.000	216.462.998	138.813.998
Junho	63.382.800	231.043.918	167.661.118
Julho	88.710.960	268.046.255	179.335.295
Agosto	81.470.760	271.955.601	190.484.841
Setembro	73.936.080	257.996.445	184.060.365
Outubro	57.588.960	247.328.966	189.740.006
Novembro	58.444.680	170.478.828	112.034.148
Dezembro	68.068.830	176.315.218	108.246.388
Janeiro	68.068.830	176.315.218	108.246.388
Fevereiro	68.068.830	171.112.429	103.043.599
Total	748.757.130	2.309.100.286	1.560.343.156

Fonte: Autor

4.3 Retorno sobre Investimento (ROI)

O cálculo do Retorno sobre Investimento (ROI) é um indicador crucial na avaliação da viabilidade econômica de uma usina sucroenergética, permitindo mensurar o desempenho financeiro do empreendimento em relação aos recursos investidos. Pode ser calculado por:

$$ROI = (\text{Ganhos} - \text{Custos} / \text{Custos}) \times 100 \quad \text{eq. (1)}$$

Ganhos representam os retornos financeiros gerados pelo investimento.

Custos englobam os investimentos iniciais e operacionais.

Tabela 11 - Retorno sobre investimento das matérias-primas.

Matéria-prima	Receita Líquida (R\$)	Custo Operacional (R\$)	ROI (%)
Cana-de-açúcar	1.240.806.781,60	544.550.640,00	227,9
Sorgo	319.536.375,30	204.206.490,00	156,5
Total	1.560.343.156,90	748.757.130,00	208,4

Fonte: Autor

Podemos notar que o retorno sobre o investimento do sorgo-sacarino é menor em cerca de 31% comparado a cana-de-açúcar. No entanto, ainda mostra um retorno de 156% do valor investido.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Ao concluir esta análise sobre a produção de usinas sucroenergéticas, é possível perceber a complexidade e a interconexão de diversos elementos que compõem esse setor crucial para a matriz energética global. Ao longo deste estudo, foram abordados temas que vão desde as tecnologias aplicadas na produção até os impactos ambientais, a viabilidade econômica e as estratégias de mercado. A integração de tecnologias inovadoras na produção de etanol é fundamental para a eficiência operacional e a sustentabilidade ambiental. O potencial do sorgo como matéria-prima na indústria sucroenergética apresenta desafios e oportunidades singulares. Explorar a diversificação de matérias-primas pode fortalecer a resiliência do setor diante de variações climáticas e pressões econômicas.

A viabilidade econômica das usinas sucroenergéticas está intrinsecamente ligada aos desafios e dinâmicas do mercado global. A análise realizada ao longo deste estudo proporcionou uma compreensão abrangente da produção de açúcar, etanol e energia em usinas sucroenergéticas, abordando desde as tecnologias aplicadas até os aspectos econômicos, ambientais e estratégicos do setor.

Os resultados obtidos por meio da metodologia empregada e dos procedimentos de coleta de dados ofereceram uma base sólida para as análises técnico econômicas realizadas. Diante das complexidades e desafios identificados durante esta pesquisa no setor sucroenergético, diversas oportunidades emergem para investigações futuras que possam expandir ainda mais o conhecimento e contribuir para avanços significativos na área. O estudo mostrou que embora o investimento na utilização de sorgo-sacarino não seja tão relevante quanto a cana, ainda assim é uma estratégia interessante se olharmos para situação de entressafra, quando as usinas não têm produções significativas. Nesse caso, a usina obteria um lucro de cerca de 320 mil reais. Além de ser uma alternativa para abastecer o mercado de etanol e energia, já que nesse período de entressafra, com menos chuvas, temos menor disponibilidade de energia. Por fim, a utilização do sorgo sacarino alinhado com as tendências de mercados e políticas ambientais é uma opção viável para o setor sucroenergético.

Pesquisas futuras podem se concentrar na avaliação de novas matérias-primas promissoras para a produção de açúcar e etanol, ampliando as opções e aumentando a resiliência do setor. Além disso, não foi levada em consideração nessa pesquisa a geração de créditos de carbonos a partir da utilização do sorgo-sacarino na entressafra. Outra opção é explorar diferentes estratégias operacionais, como um mix voltado mais para etanol ou para

açúcar. A composição do sorgo é composta por mais fibra que a cana-de-açúcar, aumentando a produção de bagaço. Com isso pode-se aumentar a geração de energia elétrica ou a produção de etanol de segunda geração. Também, análises de créditos de carbono podem contribuir ainda mais para o potencial econômico da utilização do sorgo ou outra cultura durante o período de entressafra, já que a terra destinada para o plantio de cana passa por períodos de ociosidade. Enfim, esse estudo ainda não abrange todo o potencial econômico e ambiental do sorgo sacarino, mas mostra que é uma opção viável para sua utilização no setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS

- AGUILAR, P. B. de; PIRES, D. A. de A.; FROTA, B. C. B.; RODRIGUES, J. A. S.; ROCHA JÚNIOR, V. R.; REIS, S. T. dos. Características agronômicas de genótipos de sorgo mutantes BMR e normais utilizados para corte e pastejo. **Scientia Agraria Paranaensis**, [S. l.], v. 14, n. 4, p. 257–261, 2015. DOI: 10.18188/sap.v14i4.9998. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/scientiaagraria/article/view/9998>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- ANSOFF, H. Strategies for diversification. **Harvard Business Review**, v. 35, p. 113-124, Sept./Oct. 1957.
- ARAÚJO, C. F. A. Silagens de sorgo com diferentes níveis de inclusão de feno de cunhã (*clitoria ternatea* l.) sob cultivo irrigado. 2018. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Petrolina**, Petrolina, 2018.
- CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches. Sage publications, 2017.
- DYER, J. H.; SINGH, H. The Relational View: Cooperative Strategy and Sources of Interorganizational Competitive Advantage. **The Academy of Management Review**, v. 23, n. 4, p. 660–679, 1998.
- FERNANDES, F.; SILVA, C. S.; SANTOS, M. V. B.; LIMA, C. J. B. Estudo da produção de etanol a partir de sorgo biomassa (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). In: **CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS**, 3., 2018, Salvador. Anais... Campina Grande: Conepetro, 2018.
- FERNANDES, P. B.; THEODORO, G. F.; GURGEL, A. L. C.; COSTA, C. M.; COSTA, A. B. G.; SANTANA, J. C. S.; SILVA, M. G. P.; BOMFIM, L. N.

Aspectos relacionados ao potencial forrageiro do sorgo: Revisão. **PUBVET**, v. 14, p. 119, 2020.

GOMES, A. L. M.; JACOVACI, F. A.; BOLSON, D. C.; NUSSIO, L. G.; JOBIM, C. C.; DANIEL, J. L. P. Effects of light wilting and heterolactic inoculant on the formation

of volatile organic compounds, fermentative losses and aerobic stability of oat silage. **Animal Feed Science and Technology**, v. 247, p. 194-198, 2019. DOI: 10.1016/j.anifeedsci.2018.11.016.

GOMES, L. R. DA R. et al. Performance agronômica de híbridos de sorgo granífero estimada pelo método GGE biplot. **Colloquium Agrariae**, v. 15, n. 5, p. 42–56, 2019.

GOMES-ROCHA, F. M. et al. Fermentation characteristics and bromatological composition of sweet sorghum bagasse silages. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 19, n. 2, p. 157-165, 2018. DOI: 10.1590/s1519-99402018000200002.

GOLDEMBERG, J. Ethanol for a Sustainable Energy Future. **Science**, v. 315, n. 5813, p. 808-810, 2007.

GONZAGA MASULLO, Y. A.; GURGEL, H.; LAQUES, A. E. Avaliação da efetividade de áreas protegidas: conceitos, métodos e desafios. **GEOgraphia**, v. 21, n. 46, p. 91-105, 2019. DOI: 10.22409/GEOgraphia2019.v21i46.a14396.

HIMMEL, M. E. et al. Biomass Recalcitrance: Engineering Plants and Enzymes for Biofuels Production. **Science**, v. 315, n. 5813, p. 804-807, 2007.

JAÍZA, F. R. C. et al. Influência da salinidade e adubação na germinação e crescimento inicial do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench CV. BRS 610). 2016. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal, Paraíba, Brasil, 2016.**

LIMA, F. C. Análise dos impactos dos incentivos fiscais nas usinas sucroalcooleiras. **Revista de Política Agrícola**, v. 30, n. 1, p. 56-69, 2021.

LIMA, P. F. et al. Boas práticas agrícolas e MIP em sorgo forrageiro. In: **WORKSHOP INTERNACIONAL DE DEFESA SANITÁRIA VEGETAL**, 2., 2020, Viçosa. Anais... Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2020.

MACEDO, M.C.M. Degradação de pastagens: conceitos, alternativas e métodos de recuperação. Curso de Pastagens, 2001, Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS. Impresso, 12 p.

MACEDO, M.C.M. Integração lavoura e pecuária: alternativa para sustentabilidade da produção animal. In: **SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM: PLANEJAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUÇÃO EM PASTAGENS**, 18, 2001, Piracicaba. Anais... Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 257-283.

MACEDO, M.C.M. Pastagens no ecossistema Cerrado: evolução das pesquisas para o desenvolvimento sustentável. In: **SIMPÓSIO - A PRODUÇÃO ANIMAL E O FOCO NO AGRONEGÓCIO**, 2005, Goiânia. Anais... Goiânia: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2005. p. 56-84.

MACEDO, M.C.M.; ZIMMER, A.H.; KICHEL, N.A. Preparo, conservação, calagem e adubação do solo para implantação de pastagens nos cerrados. In: **CURSO: FORMAÇÃO, RECUPERAÇÃO E MANEJO DE PASTAGENS**, 2008, Campo Grande. Palestras apresentadas... Campo Grande: EMBRAPA-CNPGC, 2008. p. 70-83.

MAY, A. et al. **Sistema Embrapa de produção agroindustrial de sorgo sacarino para bioetanol: Sistema BRS1G-Tecnologia Qualidade Embrapa**. Sete Lagoas: Embrapa, 2012. 120 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/72469/1/Doc-139-1.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2024.

MELO, J. O. et al. **Repeat variants for the SbMATE transporter protect sorghum roots from aluminum toxicity by transcriptional interplay in cis and trans.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 116, n. 37, p. 18372-18377, 2019.

MELO, J. O. et al. **The Plant Journal**, 2013.

NOLAN, T. M. et al. Brassinosteroids: Multidimensional regulators of plant growth, development, and stress responses. **The Plant Cell**, v. 32, p. 295-318, 2020.

OLIVEIRA, A. C. Políticas públicas para o etanol no Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 26, n. 3, p. 76-93, 2017.

OLIVEIRA, I. C. M. et al. Combining ability of biomass sorghum lines for agroindustrial characters and multitrait selection of photosensitive hybrids for energy cogeneration. **Crop Science**, v. 59, p. 1554-1566, 2019.

OLIVEIRA, L. B.; SOUZA, E. J. Impact of public policies on the competitiveness of the ethanol industry in Brazil. **Energy Economics**, v. 117, p. 105801, 2022.

PEREIRA, F. R.; OLIVEIRA, A. C. Sustainability and public policies for the bioenergy sector: A case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 133, p. 110268, 2020.

PORTER, K. S.; AXTELL, J. D.; LECHTENBERG, V. L.; COLENBRANDER, V. F. Phenotype, fiber composition, and in vitro dry matter disappearance of chemically induced brown midrib (bmr) mutants of sorghum. **Crop Science**, v. 18, p. 205-208, 1978.

ROONEY, W. L.; AYDIN, S. Genetic control of a photoperiod-sensitive

response in *Sorghum bicolor* (L.) Moench. **Crop Science**, v. 39, n. 2, p. 397-400, 1999.

ROSS, W. M. Use of population breeding in sorghum: problems and prospects. In: **ANNUAL CORN AND SORGHUM RESEARCH Proceedings...**, 1973, Washington. Anais... Washington: ASTA, 1973. p. 205-209.

SANTOS, A. S. Influência da salinidade e adubação na germinação e crescimento inicial do sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench CV. BRS 610). 2016. **Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Campina Grande**, Pombal, Paraíba, Brasil, 2016.

SILVA, R. M. et al. Incentives and efficiency in Brazilian sugarcane ethanol plants. **Energy Policy**, v. 121, p. 598-608, 2018.

SILVEIRA, D. C. DA et al. Caracterização físico-químico do melado de sorgo granífero sacarino [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 6, p. 216–219, 2011.

SMITH, J. S. C. et al. Genetic diversity, among elite sorghum inbred lines assessed with simple sequence repeats. **Crop Science**, v. 40, p. 226-232, 2000.

SMITH, O. et al. A domestication history of dynamic adaptation and genomic deterioration in *Sorghum*. **Nature Plants**, v. 5, p. 369-379, 2019.

TEIXEIRA, T. P. M. Estudo da maturação e ponto de colheita em materiais de sorgo destinados à bioenergia. 2017. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.

TIDD, J.; BESSANT, J.; PAVITT, K. Managing innovation: integrating

technological, market and organizational change. 3. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2005.

TOLMASQUIM, M. T. Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TURNER, K. E. et al. Carcass merit and meat quality in Suffolk lambs, Katahdin lambs, and meat-goat kids finished on a grass-legume pasture with and without supplementation. **Meat Science**, v. 98, p. 211-219, 2014. DOI: 10.1016/j.meatsci.2014.06.002.

UMANKANTH, A. V.; KUMAR, A. A.; VERMERRIS, W.; TONAPI, V. A. Sweet Sorghum for Biofuel Industry. **Breeding Sorghum for Diverse End Uses**, p. 255–270, 2019.

USSAR, S. et al. Interactions between Gut Microbiota, Host Genetics and Diet Modulate the Predisposition to Obesity and Metabolic Syndrome. *Cell Metabolism*, v. 22, p. 516–530, 2015.

WANG, D. et al. Grain sorghum is a viable feedstock for ethanol production. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, v. 35, p. 313-320, 2008.

ZEFERINO, G. L. Sorghum Cultivars analysis for ethanol extraction and production of silage. 2015. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2015.

