

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FELIPE DOBROVOLSKI TOCHETTO

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL POR FERMENTAÇÃO DE
BETERRABA VERMELHA**

**Bagé
2021**

FELIPE DOBROVOLSKI TOCHETTO

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL POR FERMENTAÇÃO DE
BETERRABA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Sabrina Neves da Silva

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

T631e Tochetto, Felipe Dobrovolski

Estimativa da produção de bioetanol por fermentação de
beterraba vermelha / Felipe Dobrovolski Tochetto.
65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA DE ENERGIA, 2021.

"Orientação: Sabrina Neves da Silva".

1. Biocombustível. 2. Bioetanol. 3. Fermentação Alcoólica.
4. Beterraba Hortalíça. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

FELIPE DOBROVOLSKI TOCHETTO

**ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOETANOL POR
FERMENTAÇÃO DE BETERRABA VERMELHA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovada em: 10 de maio de 2021.

Banca examinadora:

Profa. Dra. Sabrina Neves da Silva
Orientadora

UNIPAMPA

Profa. Dra. Luciana Machado Rodrigues

UNIPAMPA

Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **SABRINA NEVES DA SILVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/05/2021, às 16:41, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANA MACHADO RODRIGUES, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/05/2021, às 16:42, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **LUCIANO VIECELI TAVEIRA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 10/05/2021, às 16:59, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0520889** e o código CRC **8E3A7B07**.

AGRADECIMENTO

À Professora Doutora Sabrina Neves da Silva pela paciência e pela orientação para realização deste trabalho.

Agradeço especialmente pela família que tenho e pelo apoio incondicional nas horas que mais precisei.

A todos os professores, dentro e fora de sala de aula, que contribuíram para meu aprendizado ao longo de minha vida.

“A derrota é um estado de espírito;
ninguém é derrotado até a derrota ter
sido aceita como uma realidade.”

Bruce Lee

RESUMO

Com o contínuo avanço industrial é crescente a demanda por energia, ao passo que aumenta a preocupação com as emissões de poluentes atmosféricos. Dessa forma, a utilização de fontes de energia renováveis, tais como biocombustíveis vem sendo foco de pesquisas. A matriz energética brasileira é composta, na sua grande parte por fontes renováveis, mesmo assim novas alternativas podem contribuir ainda mais para um desenvolvimento sustentável. Além de grandes áreas cultiváveis, o Brasil possui grande diversidade climática, o que possibilita a diversificação das fontes de energia utilizadas de acordo com a disponibilidade climática e geográfica. Para tal, foi mensurado o teor de sólidos solúveis presentes no suco de beterraba, extraído através de maceração e prensagem, para posterior estimativa da quantidade de açúcares fermentáveis presentes no mosto. Também foi estimada a produção de etanol sob condições distintas, como diferentes teores de sólidos solúveis, diferentes tempos de fermentação e diferentes quantidades de levedura adicionadas ao mosto. Foi estimada uma produtividade mínima de aproximadamente 936,54 L/ton/ha e uma produtividade máxima de 3796,45 L/ton/ha para concentrações de 10,175°Brix e 13,415°Brix, respectivamente.

Palavras-Chave: Biocombustível. Bioetanol. Fermentação alcoólica. Beterraba hortaliça.

ABSTRACT

With the continuous industrial advancement, the demand for energy is increasing, while the concern about the emissions of air pollutants is increasing. Thus, the use of renewable energy sources, such as biofuels, has been the focus of this research. The Brazilian energy matrix is mostly composed of renewable sources, yet new alternatives can contribute even more to sustainable development. In addition to large arable areas, Brazil has great climatic diversity, thus permitting the diversification of the energy sources used according to the climatic and geographic availability. For this purpose, the content of soluble solids present in red beet juice was measured, extracted through maceration and pressing, for later estimation of the amount of fermentable sugars present in the wort. Ethanol production was also estimated under different conditions, such as different levels of soluble solids, different fermentation times and different amounts of yeast added to the wort. It was estimated a minimum productivity of approximately 936,54 L/ton/ha and a maximum productivity of 3796,45 L/ton/ha for concentrations of 10.175°Brix and 13,415°Brix, respectively.

Keywords: Biofuel. Bioethanol. Alcoholic fermentation. Red beet.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –Fórmula estrutural do etanol.....	17
Figura 2 – Teor de etanol na gasolina brasileira entre 1930 e 2010	18
Figura 3 – Esquema do processo fermentativo	20
Figura 4–Obtenção de etanol da biomassa.....	20
Figura 5 – Produtividade média de etanol por área para diferentes culturas	21
Figura 6 – Fluxo da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar	22
Figura 7–Rotas tecnológicas para produção de etanol	24
Figura 8 – Reações que ocorrem na glicólise e fermentação alcoólica.....	25
Figura 9 – Pesagem das beterrabas descascadas	36
Figura 10 – Resultado da moagem	36
Figura 11 – Teor de sólidos solúveis no suco de beterraba	37
Figura 12 – Fermentação do mosto de beterraba hortaliça.....	39
Figura 13 – Quantidade de etanol produzido em 24h44
Figura 14 – Quantidade de etanol produzido em 36h.44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentrações dos principais nutrientes minerais para uma boa fermentação alcoólica.....	27
Tabela2 – Quantidade de elementos contida em cem gramas da parte comestível da beterraba hortícola	31
Tabela 3 – Valores médios de sólidos solúveis das beterrabas <i>in natura</i> e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba	33
Tabela 4 – Valores médios de pH das beterrabas <i>in natura</i> e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba	34
Tabela 5 – Valores médios açúcar redutor das beterrabas <i>in natura</i> e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba	34
Tabela 6 – Valores médios açúcar total das beterrabas <i>in natura</i> e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba	35
Tabela 7 – Correção da porcentagem de Sacarose	37
Tabela 8 – Organização e medições das amostras (1)	38
Tabela 9 – Organização e medições das amostras (2)	39
Tabela 10 – Estimativa de açúcares fermentescíveis totais no mosto	40
Tabela 11 – Estimativa da produção teórica de Etanol	41
Tabela 12 – Estimativa da produtividade teórica do etanol de beterraba hortalíça.....	41
Tabela 13 – Medições das amostras após a fermentação	42
Tabela 14 – Produção de CO ₂	43
Tabela 15 – Quantidade de etanol produzida.....	43
Tabela 16 – Quantidade de açúcares totais consumidas durante a fermentação ..	45
Tabela 17 – Eficiência do processo de fermentação	45
Tabela 18 – Estimativa da produtividade de etanol de beterraba.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS

AR – Açúcares Redutores

ART – Açúcares Redutores Totais

°C – Graus Celsius

cél – Células

g– Gramas

h – Horas

ha– Hectares

kg– Quilogramas

L – Litros

pH– Potencial hidrogeniônico

T – Temperatura

ton– Toneladas

V– Volume

LISTA DE SIGLAS

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico

CGEE - Centro De Gestão De Estudos Estratégicos

C_2H_5OH – Etanol

$C_6H_{12}O_6$ – Glicose

CO_2 – Dióxido de Carbono

IAC – Instituto Agronômico de Campinas

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVOGERAL	14
1.2 OBJETIVOSESPECÍFICOS	14
1.3 JUSTIFICATIVA	15
2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 Biomassa	15
2.2 Etanol	17
2.2.1 Obtenção de etanol por fermentação	19
2.2.2 Matérias-primas	20
2.2.2.1 Cana-de-açúcar	21
2.2.2.2 Milho	23
2.2.2.3 Mandioca	23
2.2.2.4 Beterraba açucareira	23
2.2.3 Preparo dos mostos de melação	24
2.2.4 Fermentação	24
2.2.5 Nutrição mineral e orgânica	26
2.2.6 Temperatura	27
2.2.7 pH	27
2.2.8 Concentração de açúcares	28
2.2.9 Concentração de inóculo	28
2.2.10 Correção dos mostos	28
2.2.11 Sistemas de fermentação	28
2.2.12 Biorreatores	29
2.2.13 Destilação	29
2.2.14 Retificação	30
2.2.15 Desidratação	31
2.3 Beterraba hortaliça	31
3 METODOLOGIA	35
3.1 Materiais	35
3.2 Métodos	35
4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47

REFERÊNCIAS.....	48
APENDICE.....	51

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial juntamente com a exponencial industrialização do planeta leva a uma crescente demanda energética. Em vista disso, são utilizadas cada vez mais fontes poluidoras e não renováveis, de origem fóssil, como por exemplo, o carvão, o petróleo e o gás natural.

Para que haja, então, desenvolvimento industrial-tecnológico da sociedade como um todo, deve-se buscar por recursos energéticos que causem menor impacto ao planeta. Como alternativa para este panorama, tem-se os biocombustíveis. Este trabalho teve por objetivo estudar o potencial energético de uma nova matéria-prima para a produção de bioetanol, a beterraba vermelha, via fermentação.

Para o desenvolvimento desta pesquisa foi necessário, primeiramente, estudar como esta matéria-prima é cultivada e utilizada no Brasil, buscar informações sobre as biomassas utilizadas e formas de utilização das mesmas no país, para então realizar o estudo de viabilidade de utilização para produção de bioetanol e posterior comparação com outras fontes.

1.1 OBJETIVO GERAL

Estimar a produção de bioetanol através da fermentação da beterraba vermelha, sob diferentes condições, para posterior análise do potencial de produção de bioetanol como fonte alternativa ou como fonte adicional, trabalhando em conjunto com as fontes já existentes na matriz atual.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos que compõem este trabalho são:

- Buscar por possíveis novas fontes de energia.
- Promover fontes de energia que contribuam para redução da emissão de gases do efeito estufa.
- Introduzir novas fontes na geração de energia.
- Verificar o potencial de utilização da beterraba hortaliça como matéria-prima para produção de biocombustível.

- Comparar os resultados obtidos com matérias-primas já utilizadas na produção de biocombustíveis.

1.3 JUSTIFICATIVA

Os resultados obtidos neste trabalho poderão vir a ser úteis no setor energético brasileiro, trazendo benefícios econômicos e ambientais para a população, aumentando a escala de produção do cultivar ao passo que contribui para a redução da emissão de poluentes atmosféricos.

Esta pesquisa também pretende expandir os conhecimentos existentes a respeito de biomassa e da utilização de biocombustíveis, bem como a diversificação da matriz energética.

2 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica está dividida entre os principais tópicos que compõem o tema abordado por esse trabalho. Em primeira instância, discute-se sobre biomassa e biocombustíveis, para geração de energia, de maneira sucinta. Na sequência é apresentado sobre etanol com ênfase no bioetanol, foco deste trabalho, etapas da obtenção do bioetanol, bem como suas matérias-primas, fatores que afetam a fermentação alcoólica e demais procedimentos seguidos em sua produção. Por último foi discutido sobre a beterraba hortaliça e seu cultivo no Brasil.

2.1 Biomassa

Segundo Neto *et al.* (2012), uma das primeiras fontes de energia a ser utilizada pelo ser humano foi a biomassa, porém, com a crescente utilização de reservas de petróleo, sua utilização foi sendo reduzida gradativamente, variando com o grau de industrialização de cada país. A biomassa pode ser utilizada como combustível nas formas sólida, líquida e gasosa e, recentemente, vem sendo empregada como principal alternativa aos combustíveis fósseis em processos que exigem conversão térmica.

Cortez (2008), afirma que a biomassa é uma matéria-prima de baixo custo, abundante na natureza, de fácil obtenção e de grande quantidade de energia devido à sua composição. Trata-se de uma das poucas fontes que pode facilitar a produção de energia em grande escala e de forma sustentável para apoiar o desenvolvimento da sociedade.

Em linhas gerais, a biomassa pode ser classificada em: i) Tradicional: composta basicamente por lenha e resíduos naturais e ii) Moderna: produzida a partir de processos tecnológicos abrangendo, neste caso, os biocombustíveis líquidos, briquetes e *pellets* (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

Por energia de biomassa, entende-se a energia derivada de matéria viva, como plantas e animais, resíduos sólidos urbanos, industriais e agrícolas (NETO *et al.*, 2012, p.83).

Ainda conforme Neto *et al.* (2012), 10,7% da oferta mundial de energia vem de biomassa. No Brasil, este valor chega a 30%. A classificação como energia renovável faz com que a biomassa seja o principal recurso energético alternativo aos combustíveis fósseis. Entretanto, para que a biomassa seja considerada como combustível, deve-se levar em consideração alguns pontos como a disponibilidade, as formas de obtenção, o poder calorífico, o transporte, as tecnologias de processamento e o custo. A geração de eletricidade a partir de biomassa ocorre principalmente nos setores sucroalcooleiro, de papel e celulose, arrozeiro, nas agroindústrias que utilizam os resíduos correspondentes (bagaço de cana-de-açúcar, resíduos de madeira e licor negro, casca de arroz).

O suprimento de energia elétrica é uma das condições indispensáveis para o alcance do desenvolvimento sustentável (PHILIPPI; REIS, 2016). Nesse sentido, o uso de biomassa na produção de energia elétrica é uma prática cada vez mais recorrente no país e as perspectivas são bastante animadoras e otimistas, com potencial de crescimento.

A geração de energia a partir da biomassa contribui para diminuição do uso de combustíveis fósseis e da dependência das hidrelétricas, diversificando a matriz energética sem que esta perca as características de energia renovável. É importante ressaltar que as unidades geradoras e as unidades produtoras de biomassa devem ser próximas para não elevar os custos com transporte. O uso da biomassa pode ainda contribuir para a descentralização da geração, reduzindo investimentos em linhas de transmissão e perdas de energia. Ao contrário de outras fontes de energia

intermitentes como a solar e a eólica, a energia da biomassa pode ser usada a qualquer momento (PHILIPPI; REIS, 2016).

Com a perspectiva de aumento na demanda de energia do Brasil até 2030 (Empresa de Pesquisa Energética, 2015), é também de se esperar um concomitante aumento na demanda por biomassa para atender este crescimento. Assim sendo, o desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento de cultivos de espécies e o uso de resíduos agrícolas e/ou agroindustriais para produção de biomassa, configuram-se como opções favoráveis à diversificação e descentralização do processo de geração de energia.

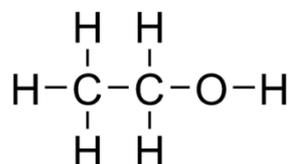
2.2 Etanol

São vários os tipos de biocombustíveis, porém os biocombustíveis líquidos apresentam vantagem em relação às outras formas, pois o transporte e armazenamento são mais fáceis, assim como a substituição pelos derivados de petróleo que estão sendo empregados (NETO *et al.*, 2012).

O etanol pode ser obtido por meio sintético ou biotecnológico. Sua obtenção por meio sintético acontece por hidratação do eteno, um hidrocarboneto de fórmula molecular C_2H_4 . Entretanto, sua principal forma de obtenção é por meio da biotecnologia. Para isso, utilizam-se leveduras *Saccharomyces cerevisiae*, que fermentam biomassa, gerando etanol e CO_2 . Essa biomassa pode ser proveniente de diversas espécies vegetais como milho, cana-de-açúcar e beterraba. (OLIVEIRA, 2015, p.21).

A seguir, na Figura 1, é mostrada a fórmula estrutural do etanol.

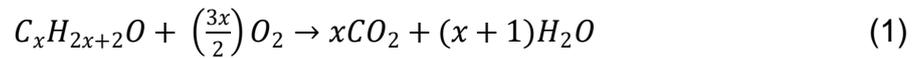
Figura 1 – Fórmula estrutural do etanol



Fonte: Oliveira (2015, p. 21)

É um líquido incolor, com ponto de fusão de -114°C e ponto de ebulição aos 78°C , a massa volumétrica é de $0,790 \text{ g/ml}$, é solúvel em qualquer concentração em água e frequentemente usado em misturas combustíveis com a gasolina, em proporções que variam de 10 a 85%. O uso dos álcoois como combustível ocorre em três maneiras principais: como combustíveis para um motor de

combustão, substituindo a gasolina; como um aditivo de combustível para aumento de octanagem ou antidetonante; e como combustível para a conversão direta em energia elétrica em uma célula a combustível. A Equação 1 descreve a reação genérica para a oxidação completa do álcool (MINTEER, 2016).



Ainda de acordo com o autor supracitado esta reação se dá em uma única câmara para um motor à combustão, enquanto em uma célula a combustível ela acontece em duas câmaras separadas, onde, em uma câmara que possui o ânodo, o álcool é oxidado a dióxido de carbono, e na outra, que possui o cátodo o oxigênio é reduzido à água.

A agência do Senado Federal diz que a Lei 10.203/01 (BRASIL, 2001), dita que a gasolina comum e a gasolina aditivada devem receber entre 20% e 24% de álcool etílico anidro combustível. Em 2006, a Resolução 35 da Agência Nacional do Petróleo (ANP) fixou em 23% o percentual de mistura de álcool nas gasolinas, a partir de 1º de março daquele ano.

A Figura 2 mostra um balanço do teor de etanol acrescido à gasolina desde 1930 até 2010. Nela, pode-se ver que há grande variação das concentrações da mistura decorrente de diferentes cenários políticos e econômicos nacional e mundial, ao longo dos anos.

Figura 2 – Teor de etanol na gasolina brasileira entre 1930 e 2010



Fonte: Adaptado de Young *et al.* (2008); Cortez (2016, p. 22)

2.2.1 Obtenção de etanol por fermentação

Segundo Lima *et al.* (2002), o etanol poder ser produzido por via destilatória, por via sintética ou por via fermentativa, sendo a última a mais importante para a obtenção do álcool etílico no Brasil.

Um dos fatores que torna a produção de etanol por fermentação a forma mais econômica de sua obtenção, é o grande número de matérias-primas naturais existentes em todo o País. Sua distribuição geográfica, que encerra diversos climas e tipos de solos, permite seu cultivo em quase todo o território e durante todo o ano. (LIMA *et al.*, 2002, p.2).

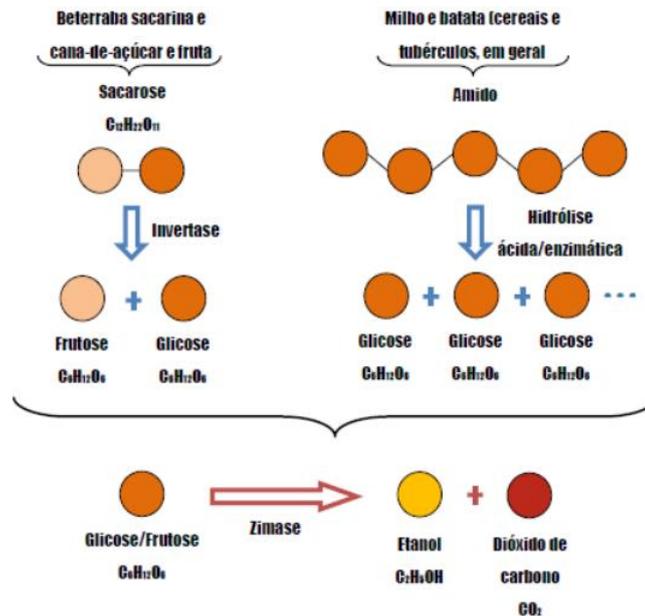
A conversão da matéria-prima em etanol ocorre por processo fermentativo, sendo realizado por leveduras, como por exemplo, a *Saccharomyces cerevisiae* e para que a fermentação tenha sucesso é necessária quantidade suficiente de leveduras (ALCARDE, 2015).

A fermentação ocorre em três etapas: i) Extração do açúcar sob a forma de solução líquida; ii) Fermentação do açúcar por parte das leveduras; e iii) Destilação do etanol (DERMIRBAS, 2007).

Na destilação, o etanol é recuperado na forma hidratada, com aproximadamente 96°GL (porcentagem em volume), correspondentes a cerca de 6% de água em massa. O etanol destilado pode ser estocado para uso direto (96°GL) ou pode ser enviado para a coluna de desidratação. Para desidratação, geralmente se adiciona cicloexano, formando-se assim, uma mistura azeotrópica ternária, com ponto de ebulição inferior ao do etanol anidro. Na coluna de desidratação, o cicloexano é adicionado no topo, e o etanol anidro é retirado no fundo, com aproximadamente 99,7°GL ou 0,4% de água em massa. A mistura ternária retirada do topo é condensada e decantada, enquanto a parte rica em água é enviada à coluna de recuperação de cicloexano (NOGUEIRA, 2008).

A Figura 3 mostra um esquema do processo fermentativo que ocorre pela utilização de diferentes matérias-primas e as etapas do processo. Em materiais ricos em açúcares, primeiro ocorre, por ação da invertase, a hidrólise da sacarose para posterior conversão dos açúcares redutores em etanol e dióxido de carbono. Já em materiais ricos em amido, primeiro ocorre a hidrólise ácida ou enzimática em glicose para em seguida ser realizada a fermentação alcoólica.

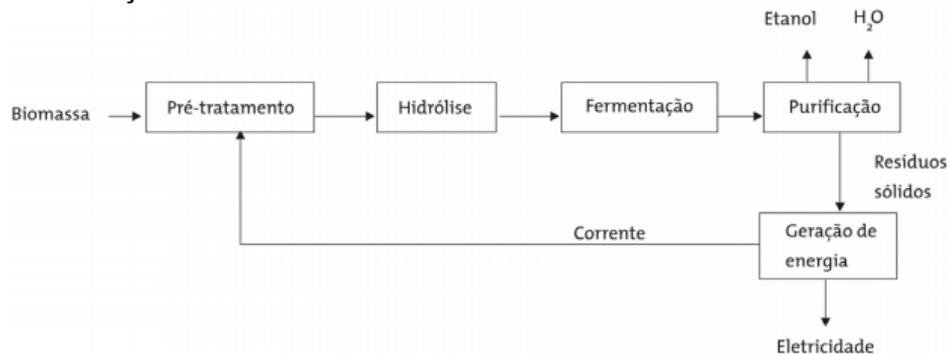
Figura 3 – Esquema do processo fermentativo



Fonte: Gupta; Demirbas (2010)

Já os processos de obtenção de etanol de 2ª geração por meio de hidrólise seguem, em linhas gerais, o modelo mostrado na Figura 4. Pode-se ver que antes que seja possível acontecer a fermentação, a biomassa deve passar por pré-tratamento e após pela hidrólise.

Figura 4 – Obtenção de etanol da biomassa



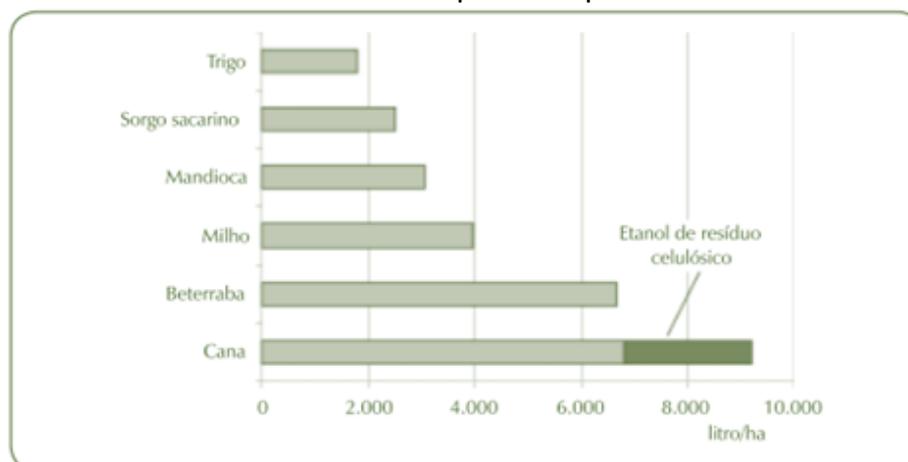
Fonte: Adaptado de Hamelinck *et al.* (2005); Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2009, p. 131)

2.2.2 Matérias-primas

Qualquer matéria-prima com suficiente teor de açúcar ou amido pode ser convertida em etanol, conforme mostra a Figura 5. Além disso, como no caso da

cana-de-açúcar pode-se gerar também etanol de segunda geração com os resíduos das palhas e outros resíduos celulósicos.

Figura 5 – Produtividade média de etanol por área para diferentes culturas



Fonte: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008, p. 71)

Há várias maneiras de classificar as matérias-primas para a produção de etanol, mas qualquer dos critérios que se adote deixa algo a desejar. Podemos classificá-las em matérias açucaradas, agrupando cana-de-açúcar, beterraba açucareira, sorgo sacarino, milho sacarino, melações, mel de abelhas e frutas; em matérias amiláceas e feculentas, agrupando grãos amiláceos, raízes e tubérculos feculentos; e matérias celulósicas, incluindo palhas, madeiras, resíduos agrícolas e resíduos sulfíticos de fábricas de papel. (LIMA *et al.*, 2002, p.3).

De acordo com Lima *et al.*(2002), as matérias açucaradas são subdivididas entre diretamente fermentescíveis, compostas por monossacarídeos, e as não diretamente fermentescíveis, as quais contêm dissacarídeos e necessitam passar pela inversão do açúcar (hidrólise). Já as matérias amiláceas e feculentas, para que sejam fermentadas, necessitam primeiramente passar pela sacarificação, na qual o amido infermentescível se transforma em açúcar fermentescível.

2.2.2.1 Cana-de-açúcar

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é destinado, em sua maior parte, à produção de açúcar e de etanol, porém, em menor escala, também contribui para a alimentação animal e fabricação de aguardente (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2010).

Ainda de acordo com o MAPA, a temperatura é um dos elementos climáticos mais importantes na produção, devendo a temperatura média do ar estar entre 30°C e 34°C para proporcionar taxa máxima de crescimento da cultura. Com temperaturas maiores que 35°C e inferiores a 25°C, há redução na produção e em situações com ocorrências de geadas frequentes o cultivo da espécie torna-se economicamente inviável (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2010).

A cana-de-açúcar é uma cultura plurianual com colheita anual, economicamente produtiva por três anos consecutivos, admitindo-se a média de rendimento agrícola de até 100 toneladas por hectare por ano. Através da moagem se obtém o caldo, que contém de 78 a 86% de água, 10 a 20% de sacarose, 0,1 a 2% de açúcares redutores (principalmente, glicose e frutose), 0,3 a 0,5% de cinzas e 0,5 a 1,0% de compostos nitrogenados, com a faixa de pH 5,2 a 6,8. Enquanto ainda seja possível fazer a fermentação com o caldo bruto, normalmente o mesmo é clarificado por meio de aquecimento, decantação e filtração, transformando-se em um mosto mais limpo, que fermenta melhor, espuma menos e suja menos as colunas de destilação (LIMA *et al.*, 2002).

Segundo Oliveira *et al.* (2001), se for empregado o manejo apropriado do cultivo é possível alcançar uma produtividade maior que 150 toneladas de matéria natural por hectare.

A Figura 6 mostra o fluxo da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar, onde até mesmo a indústria de açúcar pode ser beneficiada pela produção de etanol. O processo de extração do caldo é o mesmo para ambas as indústrias e a diferença de processo se dá a partir disso, onde para a produção de etanol deve ocorrer a fermentação do mesmo.

Figura 6– Fluxo da produção de etanol a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Neto (2012, p. 94)

2.2.2.2 Milho

O milho apresenta de 9 a 15% de água, 59 a 70% de extrativos não nitrogenados, 5 a 15% de material proteico, 1,5 a 8,5% de material celulósico, 1,3 a 4% de cinzas e teor de sólidos totais do caldo do colmo de até 18°Brix, com a produção no Brasil variando de 1,1 a 3 toneladas de grãos por hectare (LIMA *et al.*, 2002).

2.2.2.3 Mandioca

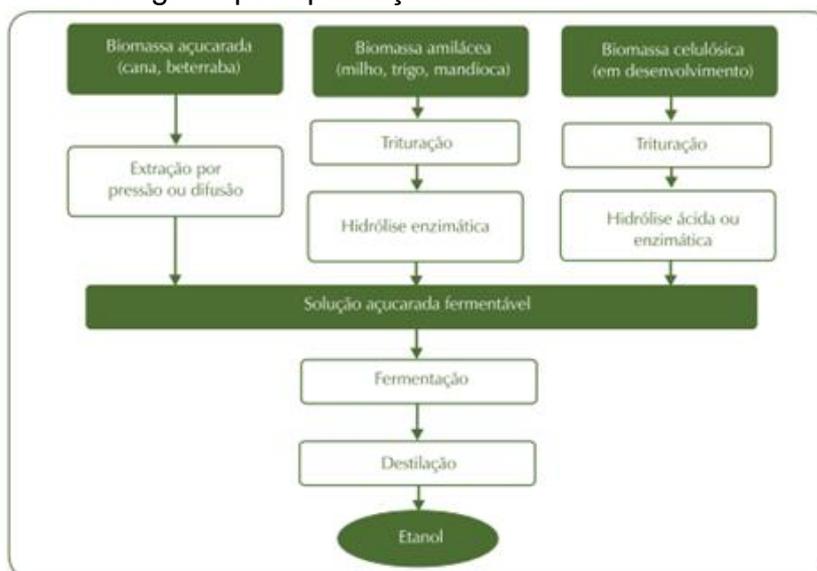
Segundo Lima *et al.* (2002), as raízes da mandioca podem conter de 67 a 75% de água, 18 a 23% de fécula e, em menor proporção, material proteico, celulose, graxas e cinzas. A produtividade de etanol proveniente da mandioca é maior que o produzido pela cana-de-açúcar, mas a produtividade agrícola da mandioca não compete com a da cana-de-açúcar.

2.2.2.4 Beterraba açucareira

A fermentação alcoólica a partir da beterraba açucareira ocorre em processo semelhante ao da cana-de-açúcar, pois ambas são matérias açucaradas (OLIVEIRA *et al.*, 2012).

De acordo com o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008) e Companhia de Gestão e Estudos Estratégicos (2008), a beterraba é limpa e fracionada em fatias finas, para que seu açúcar seja extraído em água quente por um difusor, resultando em um líquido açucarado com 16% de sólidos solúveis. A Figura 7 mostra as rotas tecnológicas para a produção de etanol para diferentes tipos de matérias-primas. Nela pode-se ver os diferentes processos necessários para materiais distintos.

Figura 7– Rotas tecnológicas para produção de etanol



Fonte: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008, p. 70)

2.2.3 Preparo dos mostos de melaço

O mosto é um líquido açucarado que pode ser fermentado e para seu preparo devem ser tomados alguns cuidados relativos à concentração de açúcares totais e sua relação com sólidos solúveis, acidez total e pH (preferencialmente entre 4,5 e 5), podendo ser necessário também a adição de nutrientes, anti-sépticos e controle da temperatura para maior eficiência no processo fermentativo (ALCARDE, 2015).

De acordo com Lima *et al.*(2002), os melaços utilizados para fermentação geralmente são diluídos para concentrações que variam de 15 a 25°Brix. A fermentação de mostos menos concentrados é mais rápida, e sujam menos os aparelhos de destilação, mas exigem maior volume útil de fermentadores, mais água para diluição e podem favorecer as infecções. Já os mostos com maior concentração podem ocasionar menores rendimentos por perdas em açúcares infermentados, temperaturas mais altas durante a fermentação, sujam mais os aparelhos de destilação, porém diminuem o volume útil das dornas, o consumo de vapor e o período de safra.

2.2.4 Fermentação

As reações que ocorrem durante a fermentação podem ser conferidas na Figura 8. Nela pode-se ver que a reação começa com a produção de acetaldeído e

gás carbônico a partir do ácido pirúvico sob ação da enzima descarboxilase, para após ocorrer de fato a fermentação alcoólica, onde são gerados dióxido de carbono e etanol.

A fermentação, em seu sentido amplo, consiste no uso de células de quaisquer origens para a produção de moléculas de interesse econômico (ROCHA; VITTOLO, 2017, p. 119).

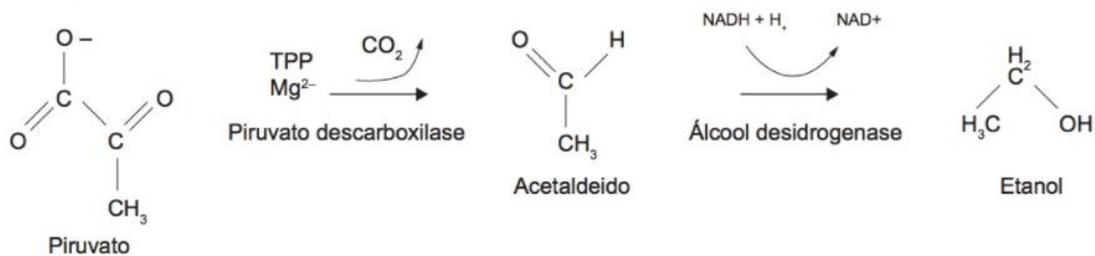
A fermentação alcoólica é a responsável pela produção do álcool etílico e do gás carbônico. A reação consiste primeiramente na produção de aldeído acético e gás carbônico a partir do ácido pirúvico sob ação da enzima descarboxilase. Em seguida o aldeído acético é reduzido a álcool etílico, sob ação da enzima álcool desidrogenase e da oxidação do NADH. (Matos, 2015, p. 152).

Figura 8—Reações que ocorrem na glicólise e fermentação alcoólica

Glicólise



Fermentação alcoólica



Fonte: Oliveira (2015, p.26)

A maior parte dos substratos fornecidos à levedura, como a sacarose, a glicose e a frutose por exemplo, na ausência de oxigênio, é convertida em etanol e CO₂. A fermentação é influenciada por diversos fatores (nutrientes, minerais, vitaminas, inibidores, substâncias do próprio metabolismo, pH, temperatura e outros) e envolve 12 reações sequenciais, onde cada etapa envolve uma enzima específica (Lima *et al*, 2002).

Na fermentação, as leveduras transformam os açúcares do mosto em etanol. Esse processo corresponde à glicólise, uma via biológica de dez etapas, onde são produzidos um açúcar de três carbonos, o piruvato e a energia; e à fermentação alcoólica em si, onde são gerados dióxido de carbono e etanol, ou álcool etílico, a partir do piruvato. (OLIVEIRA, 2015, p. 26).

Conforme Lima *et al.*(2002), nem toda a energia consumida durante a fermentação é convertido em etanol, resultando em um consumo de 5% de açúcar para gerar produtos secundários da fermentação (glicerol, ácidos orgânicos, álcoois superiores, acetaldeído, entre outros). Desta forma, obtém-se 95% de etanol do total que poderia ser formado durante a fermentação.

Ainda de acordo com o autor supracitado, pode-se distinguir numa fermentação alcoólica uma fase preliminar, uma fase tumultuosa e uma fase final ou complementar.

De acordo com Alcarde (2015), a fase preliminar, ou *lag-fase*, é iniciada com a adição da levedura ao mosto, caracterizando-se pela intensa multiplicação celular da levedura, através do consumo dos açúcares presentes no meio. A fase tumultuosa é marcada pela produção de álcool e forte liberação de CO₂, aumento da temperatura, progressivo aumento de espumas e elevação da acidez do mosto.

A fase complementar caracteriza-se pela diminuição da intensidade do desprendimento do dióxido de carbono, por menor agitação do líquido e diminuição da temperatura. Nessa fase a concentração de açúcares chega ao fim (LIMA *et al.*, 2002, p. 22).

Durante a fermentação deve-se ter rígido controle, para que a mesma ocorra de forma eficiente. Para isso deve-se observar alguns pontos, como: o odor da fermentação, que deve se assemelhar ao de frutas maduras; aspectos da espuma; a presença de drosófilas; a temperatura; a densidade do mosto; e a acidez no substrato em fermentação, que não deve apresentar grande diferença entre o início e final da fermentação (LIMA *et al.*, 2002).

2.2.5 Nutrição mineral e orgânica

Cada tipo de microrganismo, de acordo com reino, filo, classe e espécie, possui diferentes necessidades nutricionais e obtém energia de diferentes maneiras (OLIVEIRA, 2015, p. 16). A Tabela 1 mostra os principais nutrientes minerais necessários para que a fermentação alcoólica possa ocorrer da maneira mais eficiente possível, nela pode-se ver que os diferentes nutrientes possuem diferentes concentrações ideais para influenciarem positivamente a fermentação.

Tabela 1 – Concentrações dos principais nutrientes minerais para uma boa fermentação alcoólica

Nutrição mineral	Concentração em mg/L	Nutriente mineral	Concentração em mg/L
NH ₄ ⁺	50 - 150	Co ⁺⁺	3,5
P	62 - 560	Co ⁺⁺ **	10
K ⁺	700 - 800	Zn ⁺⁺	0,5 - 10
Ca ⁺⁺	120	Cu ⁺⁺	7
Mg ⁺⁺	70 – 200	Mn ⁺⁺	10 - 33
SO ₄ ⁻	7 – 280	Mn ⁺⁺ *	10 (10 - 80)
Na ⁺	200	Fe ⁺⁺	0,2

Fontes: Adaptado de Amorim(1997); *Lima (1953); **Lima, (1962); Lima *et al.* (2002)

2.2.6 Temperatura

A temperatura atua como bem estabelecido por meio da variação da energia cinética das moléculas, que, por sua vez, modificando a velocidade das reações químicas intracelulares (ROCHA; VITOLO, 2017, p. 120).

Segundo Lima *et al.*(2002), a faixa ideal de temperatura para a fermentação industrial é de 26°C a 35°C, e quanto mais alta a temperatura, mais rápido ocorre a fermentação do mosto, porém favorece a contaminação bacteriana e também torna a levedura mais sensível à toxidez do etanol.

2.2.7 pH

Segundo Rocha e Vitolo (2017), o pH influi sobre o crescimento celular por sua ação sobre as reações intracelulares, onde as velocidades em que as mesmas ocorrem aumentam e/ou diminuem, em função da sensibilidade do pH do meio pelas enzimas envolvidas.

Os valores mais adequados para a fermentação estão entre 4 e 5, porém ela pode ocorrer dentro de limites maiores. Os mostos industriais geralmente possuem pH que vai de 4,5 e 5,5, entretanto as fermentações alcoólicas desenvolvem-se bem em níveis de pH mais elevados, pH 5,8/5,9. Os caldos de cana, por exemplo, podem

fermentar sem a correção da acidez, com um pH natural que varia de 5,2 a 6,8 (LIMA *et al.*, 2002).

2.2.8 Concentração de açúcares

De acordo com Lima *et al.*(2002), conforme a concentração de açúcares aumenta no mosto a ser fermentado, aumenta a velocidade de fermentação, a produtividade, e reduz a formação de glicerol por unidade de substrato processado, acarretando um estresse osmótico da levedura.

2.2.9 Concentração de inóculo

Maiores concentrações de levedura na dorna permitem fermentações mais rápidas, com maior produtividade e com maior controle sobre as bactérias contaminantes, além de restringir o crescimento da própria levedura. Industrialmente se parte de uma proporção de 10 a 20 gramas de levedura para cada litro de mosto, por uma questão de custos, sendo possível gerar rapidamente grande massa de inóculo. Normalmente usa-se essa quantidade de leveduras para inocular uma fração inicial do volume total de caldo, que se dilui a uma concentração de 13ºBrix e deixa-se fermentar, para após dividir o mosto fermentado nas diferentes dornas de fermentação e completar o volume total com mosto diluído (LIMA *et al.*, 2002).

2.2.10 Correção dos mostos

Há fatores que influenciam na fermentação alcoólica. A correção do mosto, caso seja necessária, pode ser realizada para se obter fermentações regulares, homogêneas e puras, porém sua necessidade varia para cada tipo de matéria-prima. Após realizar a correção do mosto, o mesmo pode ser inoculado para dar início ao processo de fermentação (LIMA *et al.*, 2002).

2.2.11 Sistemas de fermentação

Segundo Matos (2015), o processo de fermentação descontínuo, ou a batelada, incorre na interrupção do mesmo para remoção do produto formado.

Também existe a fermentação a batelada alimentada, onde se estipula determinado número de alimentações, com a utilização do mesmo efluente e células, cessando o processo após o número estipulado.

No entanto, se o foco é a produtividade, realmente a produção contínua pode se mostrar mais interessante quando se tem um equilibrado controle do processo fermentativo. Na produção contínua, as correntes de alimentação e remoção do produto são contínuas, não havendo interrupção do processo fermentativo (MATOS, 2015, p.155).

De acordo com Lima *et al.* (2002), no processo de fermentação descontínua, a nível industrial, existem quatro sistemas de processo, que se denominam de sistema de cortes, sistema de reaproveitamento do inóculo, sistema com culturas puras e sistemas de recuperação de leveduras, também denominado de reciclagem. Esses sistemas de funcionamento permitem que a fermentação atinja a fase tumultuosa mais rapidamente, pois coloca-se o substrato em contato com uma elevada concentração de leveduras (3×10^9 cél/L, ou mais).

2.2.12 Biorreatores

Segundo Oliveira (2015), um biorreator é um recipiente, ou um tanque, onde ocorre um bioprocesso e pode apresentar tamanhos variáveis, dependendo da necessidade de produção.

Quando se constrói um biorreator, é possível pensar em um processo específico ou em um leque de processos que aquele aparelho possa atender. Isso é importante porque ele deve satisfazer todas as necessidades do processo, como a manutenção da esterilidade, o fornecimento e saída de gases, as condições de temperatura e pressão, assim como a alimentação do sistema em caso de processos contínuos ou em batelada alimentada. (OLIVEIRA, 2015, p. 18).

2.2.13 Destilação

A destilação é uma operação pela qual um líquido, por efeito de aquecimento, passa para a fase gasosa e, em seguida, volta ao estado líquido por meio de resfriamento (LIMA *et al.*, 2002, p.29).

A destilação é uma operação unitária que tem por objetivo a separação de substâncias e é uma das principais operações das indústrias petrolíferas e químicas (BARBOSA, 2015, p. 75).

De acordo com Rizzon e Meneguzzo (2008), o processo de destilação é possível pela diferença entre o ponto de ebulição da água (100°C) e do etanol(78,4°C), sendo que o ponto de ebulição de uma solução hidroalcoólica é intermediário entre o ponto de ebulição individual dos dois componentes da mistura e quanto maior o grau alcoólico da solução, mais próximo será seu ponto de ebulição ao do álcool.

Conforme Lima *et al.*(2002), o material fermentado pode conter de 88 a 93% de água, 12 a 7% de etanol e o restante pode ser composto por álcoois amílico, isoamílico, propílico butílico, isobutílico, aldeídos, ácidos, furfural, ésteres, ácidos orgânicos e também glicerina. A destilação dos vinhos é realizada por diversas vezes até que se forme uma mistura azeotrópica, onde não é mais possível separar os componentes por destilação.

Ainda de acordo com o autor supracitado a destilação do vinho gera vapores de álcool e água, que depois de resfriados forma um líquido de concentração alcoólica superior à do vinho, sem apresentar substâncias sólidas.

Segundo Barbosa (2015), a destilação pode ser realizada por dois diferentes processos e é classificada como destilação via processo contínuo ou destilação via processo descontínuo, também conhecido como destilação à batelada.

2.2.14 Retificação

Após a destilação obtém-se o flegma, que apresenta teor alcoólico mais elevado que os vinhos, porém contendo impurezas. O processo de retificação separa as impurezas do álcool, ao passo que concentra o líquido alcoólico (LIMA *et al.*, 2002).

A obra “Etanol: destilarias” de Rasovsky (1973) *apud* Cunha-Salata (2012), cita os métodos de Barbet e Sorel, para retificação de etanol. O primeiro é baseado na temperatura de ebulição de cada impureza, enquanto o segundo parte das diferentes solubilidades das impurezas em etanol concentrado em ebulição (CUNHA-SALATA, 2012).

2.2.15 Desidratação

O processo de retificação concentra o destilado até o grau alcoólico do álcool hidratado (97%). Para obter o álcool anidro, é necessária uma etapa de desidratação, realizada por destilação com agente desidratador (ciclohexano) ou por peneira molecular (ALCARDE, 2015).

Em âmbito industrial a desidratação pode ser empregada com a utilização de substâncias químicas, como óxido de cálcio, acetato de sódio, carbonato de potássio que agem absorvendo a água do etanol, ou via processos físicos que se baseiam na variação da pressão, destilação em presença de um terceiro corpo, separação do etanol por peneiras moleculares, entre outros (LIMA *et al.*, 2002).

2.3 Beterraba hortaliça

De acordo com o Instituto Agronômico de Campinas (2011), a beterraba (*Beta Vulgaris L.*) é uma hortaliça da família *Chenopodiaceae*, originária do sul e do leste da Europa e norte da África, com colheita anual, bianual ou tetra-anual, dependendo da variedade cultivada. É uma das principais hortaliças cultivadas no Brasil, sendo conhecida também como beterraba vermelha ou beterraba de mesa. Sua cor vermelho-arroxeadada se dá devido à presença de pigmentos hidrossolúveis, como as betalaínas. A Tabela 2 faz um levantamento das quantidades dos elementos presentes em cem gramas de beterraba vermelha, mostrando que a raiz possui um total de 87,3% de água e 9,9 gramas de carboidratos totais.

Tabela 2– Quantidade de elementos contida em cem gramas da parte comestível da beterraba hortícola

Componente	Parte aérea	Raiz
Água (%)	90,9	87,3
Valor energético (cal)	24	43
Proteínas (g)	2,2	1,6
Lipídios (g)	0,3	0,1
Carboidratos totais (g)	4,6	9,9

Continua

Conclusão		
Componente	Parte aérea	Raiz
Fibras (g)	1,3	0,8
Cinzas (g)	2	1,1
Cálcio (mg)	119	16
Fósforo (mg)	40	33
Ferro (mg)	3,3	0,7
Sódio (mg)	130	60
Potássio (mg)	570	335
Vitamina A (U.I.)	6100	20
Tiamina (mg)	0,1	0,03
Riboflavina (mg)	0,22	0,05
Niacina (mg)	0,4	0,4
Ácido ascórbico (mg)	30	10

Fonte: Adaptado de Triani *et al.* (1993); Instituto Agronômico de Campinas (2011)

Segundo o Censo Agropecuário do INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2009), os cinco principais Estados produtores em 2006 eram o Paraná, concentrando a maior produção (20,0%), São Paulo (17,0%), Minas Gerais (15,5%), Rio Grande do Sul (15,0%) e Bahia (8,0%), totalizando mais de 75% da quantidade produzida do país.

Conforme Tivelli *et al.*(2011), a beterraba hortalixa é uma planta típica de clima temperado, produzindo bem em temperaturas amenas, em torno de 20°C e germinando entre 10°C e 15°C, podendo ser semeada durante o ano todo nas principais regiões produtoras do país, desde que se evite temperaturas maiores que 25°C. Os tipos de solo mais indicados para o cultivo da beterraba de mesa são argilo-arenosos, friáveis e bem drenados, sendo necessário o preparo adequado do solo. Ainda de acordo com o autor supraindicado, a planta atinge o ponto de colheita de 70 a 110 dias após a semeadura, dependendo da variedade cultivada, do sistema de manejo empregado e da época de plantio, necessitando de grande número de pessoas para a operação de arranque e corte das folhas. Sua produtividade é muito variável, normalmente chegando a atingir 30 toneladas por hectare.

Segundo a ISLA Sementes, a variedade Early Wonder pode ser semeada durante o ano todo em todo o território nacional, possuindo um ciclo de 60 dias no verão e de 75 dias no inverno. Sua temperatura ótima para cultivo é de 29°C com exigência mínima de temperatura de 4°C e de temperatura máxima de 35°C. Leva de 4 a 14 dias para germinar e pode render cerca de 33 mil plantas por hectare, necessitando por volta de 10,5 kg de sementes por hectare.

Em seu trabalho "Aceitabilidade e Qualidade Nutricional de Beterrabas *in natura* e Pré-processadas Submetidas a Diferentes Métodos de Cocção", Ramos (2015), caracterizou e analisou diferentes aspectos da beterraba hortaliça crua e sob diferentes métodos de cocção.

Segundo a autora, para determinação do teor de sólidos solúveis foi utilizado um refratômetro de mesa do tipo ABBE (marca Atago-N1) a 25°C, tendo encontrado os valores mostrados na Tabela 3, onde pode-se ver que para a beterraba *in natura* todos os valores apresentaram teores iguais e a beterraba fatiada, exposta ao processo de cocção por pressão, foi a que apresentou menor teor de sólidos solúveis.

Tabela 3 – Valores médios de sólidos solúveis das beterrabas *in natura* e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba

Preparo	Com casca	Sem casca	Fatiada
Vapor	10,23±0,75	9,17±0,21	10,80±0,10
Pressão	10,57±0,67	8,40±0,30	5,73±0,12
Forno	13,57±0,74	12,97±0,40	15,33±0,81
Imersão	8,60±0,36	7,83±0,23	7,47±0,21
<i>In natura</i>	10,07±0,93	10,07±0,93	10,07±0,93

Fonte: Ramos (2015)

Para determinação do pH, foi realizada medição da amostra com auxílio de um potenciômetro digital DMPH - 2, de acordo com metodologia descrita por Instituto Agrônomo de Campinas (2008). Os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Valores médios de pH das beterrabas *in natura* e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba

Preparo	Com casca	Sem casca	Fatiada
Vapor	5,72±0,04	5,97±0,06	5,62±0,04
Pressão	5,66±0,03	5,93±0,05	5,69±0,03
Forno	5,66±0,08	5,54±0,02	5,68±0,07
Imersão	5,75±0,02	5,97±0,01	5,72±0,02
<i>In natura</i>	5,87±0,12	5,87±0,12	5,87±0,12

Fonte: Ramos (2015)

Os açúcares redutores (AR) e açúcares redutores totais (ART) foram determinados segundo metodologia descrita por Somogy e adaptada por Nelson (1944). O aparelho utilizado foi o espectrofotômetro Micronal B382, sendo a leitura realizada a 535 nanômetros. Os resultados são expressos em porcentagem. A Tabela 5 mostra que os diferentes métodos de cocção da beterraba influem na quantidade de açúcares redutores presentes na amostra e que, para a beterraba *in natura*, ou seja, sem passar por nenhum processo de cocção, os valores médios encontrados para a beterraba com casca e para a beterraba fatiada foram os menores.

Tabela 5 – Valores médios açúcar redutor das beterrabas *in natura* e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba

Preparo	Com casca	Sem casca	Fatiada
Vapor	1,54±0,26	0,13±0,03	0,27±0,00
Pressão	1,03±0,35	0,15±0,02	0,15±0,05
Forno	1,41±0,86	0,42±0,02	0,32±0,02
Imersão	1,17±0,08	0,17±0,01	0,21±0,02
<i>In natura</i>	0,18±0,04	0,18±0,04	0,18±0,04

Fonte: Ramos (2015)

A Tabela 6 mostra os valores médios de açúcar total presentes nas diferentes amostras. Pode-se notar que as amostras com maior quantidade de açúcares totais presentes foram as que foram levadas ao forno.

Tabela 6 – Valores médios açúcar total das beterrabas *in natura* e com os diferentes preparos e métodos de cocção da beterraba

Preparo	Com casca	Sem casca	Fatiada
Vapor	6,62±0,75	5,92±0,54	6,64±0,10
Pressão	6,78±0,57	4,82±0,37	3,32±0,18
Forno	9,37±0,74	7,75±0,24	10,52±0,46
Imersão	5,58±0,44	4,91±0,10	4,75±0,20
<i>In natura</i>	7,17±0,28	7,17±0,28	7,17±0,28

Fonte: Ramos(2015)

3 METODOLOGIA

3.1 Materiais

O material utilizado para a pesquisa proposta neste trabalho, *Beta Vulgaris*, foi comprado em supermercado local, da cidade de Bagé, Rio Grande do Sul. Foram adquiridas beterrabas maduras, da variedade Early Wonder, segundo funcionários do supermercado. A levedura empregada no processo fermentativo foi a *Saccharomyces cerevisiae*. Foram utilizados também diferentes equipamentos para medição, como proveta graduada de 500 ml, balança, termômetro, refratômetro e medidor de pH digital.

3.2 Métodos

Foi realizado o descascamento das beterrabas e a pesagem das amostras, medindo 5,046 kg. Após pesagem deu-se início à moagem manual do produto e posterior prensagem manual para obtenção do suco cru de beterraba. A Figura 9 mostra a quantidade de beterraba utilizada para desenvolvimento deste trabalho, já descascada. A Figura 10 mostra a beterraba processada, após a moagem manual.

Figura 9 – Pesagem das beterrabas descascadas



Fonte: Autor (2021)

Figura 10 – Resultado da moagem



Fonte: Autor (2021)

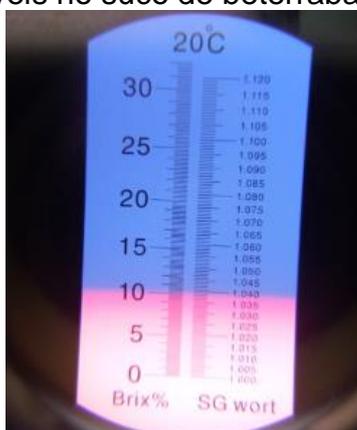
O suco obtido pelo processo de prensagem, foi despejado cuidadosamente em proveta graduada de 500ml e, com a utilização de um termômetro digital do tipo espeto verificou-se que a temperatura do suco estava em 22,5°C.

O material foi bem agitado e como auxílio de uma pipeta milimétrica, foi obtido pequeno volume de suco e despejado sobre a lente do refratômetro portátil,

calibrado em 20°C, e assim foi mensurado um teor de sólidos solúveis presente na amostra de aproximadamente 10°Brix, como pode ser visto na Figura 11.

Como o refratômetro estava calibrado para uma temperatura de 20°C deve-se atentar para a correção da medição em função da temperatura constatada anteriormente, para não obter valor incompatível. A Tabela 7, obtida no Manual de Métodos de Análises de Bebidas e Vinagres, fornecido pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA traz as devidas correções em função da temperatura medida (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2021).

Figura 11 – Teor de sólidos solúveis no suco de beterraba



Fonte: Autor (2021)

Tabela 7 – Correção da porcentagem de Sacarose

		Percentagem de Sacarose (°Brix)														
°C	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	
	Adicionar do Brix lido															
21	0,06	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	
22	0,13	0,13	0,14	0,14	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	
23	0,19	0,20	0,21	0,22	0,22	0,23	0,23	0,23	0,23	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	
24	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30	0,30	0,31	0,31	0,31	0,31	0,31	0,32	0,32	0,32	0,32	
25	0,33	0,35	0,36	0,37	0,38	0,38	0,39	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	
26	0,40	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	0,48	
27	0,48	0,50	0,52	0,53	0,54	0,55	0,55	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	
28	0,56	0,57	0,60	0,61	0,62	0,63	0,63	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	
29	0,64	0,66	0,68	0,69	0,71	0,72	0,72	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	
30	0,72	0,74	0,77	0,78	0,79	0,80	0,80	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	

Fonte: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento(2021).

Devido a Tabela 7 não apresentar valor correspondente para a temperatura medida, foi utilizado um método de interpolação de dados para encontrar o teor de sólidos solúveis para a temperatura medida e o valor encontrado para a temperatura de 22,5°C foi de 10,175°Brix.

Logo em seguida, realizou-se a medida de pH no líquido e foi aguardado o tempo de estabilização dos valores exibidos no visor do aparelho, em torno de 10 segundos. Assim foi encontrado um pH de aproximadamente 5,6.

O experimento foi dividido em duas partes, onde, para um melhor entendimento do comportamento da fermentação de beterraba vermelha decidiu-se proceder com a fermentação com dois diferentes teores de sólidos solúveis, de 10,175°Brix e outro com maior concentração de açúcares. Além disso foi analisado o processo de fermentação alcoólica para duas quantidades distintas de levedura, uma de 5g e uma de 10g e para tempos de fermentação de 24 horas e 36 horas.

Para a obtenção do mosto com maior concentração de sólidos solúveis, o mesmo foi mantido sob fogo médio, durante aproximadamente 10 minutos. Após esfriar com o auxílio do refratômetro foi realizada a medição do teor de sólidos solúveis presentes na amostra, de forma idêntica a citada anteriormente. Desta forma, para uma temperatura de 25,7°C foi constatada uma concentração de 13,415°Brix, já com a aplicação de correção para uma temperatura, de acordo com a Tabela 7.

As Tabelas 8 e 9 mostram com maior propriedade como foi organizado o experimento e os diferentes valores de volume, peso, temperatura, concentração de sólidos solúveis, as quantidades de levedura adicionadas ao mosto, bem como os diferentes tempos de fermentação, para cada uma das amostras.

Tabela 8 – Organização e medições das amostras (1)

	Volume (ml)	Peso(g)	Temperatura (°C)
A1	225	383	22,5
A2	225	380	22,5
A3	225	379	22,5
A4	225	382	22,5
A5	200	355	25,7
A6	200	356	25,7
A7	200	356	25,7
A8	200	356	25,7

Fonte: Autor (2021)

Tabela 9 – Organização e medições das amostras (2)

	°Brix	Tempo (h)	Levedura (g)
A1	10,175	24	5
A2	10,175	36	5
A3	10,175	24	10
A4	10,175	36	10
A5	13,415	24	5
A6	13,415	36	5
A7	13,415	24	10
A8	13,415	36	10

Fonte: Autor (2021)

As fermentações ocorreram em pares, onde para cada par, contendo a mesma quantidade de sólidos solúveis e o mesmo volume de mosto foi acrescentado quantidades iguais de levedura, porém com tempos de fermentação diferentes, sendo de 24 horas e de 36 horas. Isso foi feito porque o volume dos biorreatores eram demasiadamente pequenos, impossibilitando o recolhimento de amostras para medição.

Foi escolhido o método de fermentação descontínua, com biorreatores construídos com garrafas de água mineral de 500 ml, de PET (Politereftalato de Etileno), adaptadas para expelir o CO₂ formado sem que oxigênio pudesse entrar no meio fermentativo, como mostra a Figura 12.

Figura 12– Fermentação do mosto de beterraba hortalíça



Fonte: Autor (2021)

Após cada uma das amostras atingir o tempo estipulado inicialmente, de 24 horas e de 36 horas, a fermentação foi interrompida e o vinho foi filtrado em tecido de algodão. Depois de filtradas, as amostras foram pesadas e foi feita a aferição da temperatura, do pH e do volume para cada uma delas.

Para poder realizar uma análise mais profunda dos resultados obtidos deve-se encontrar a quantidade, em gramas, de sólidos solúveis presentes na solução antes da fermentação. Para isso foi assumido que a quantidade de sólidos solúveis medida no refratômetro é relativa somente à soma das quantidades de sacarose e de açúcares redutores, já presentes na solução antes da hidrólise da sacarose, via invertase, ou seja, açúcares que possuem potencial fermentativo.

Foi levado em conta que 10,175°Brix equivalem a 10,175 gramas de sólidos solúveis em 100 gramas de solução e que 13,415°Brix equivalem a 13,415 gramas de sólidos solúveis em 100 gramas de solução. A equação 2 representa o que foi dito e a Tabela 10 mostra uma quantidade estimada de açúcares fermentescíveis totais presentes no mosto.

$$AT = \frac{^{\circ}Brix \cdot m_A}{100} \quad (2)$$

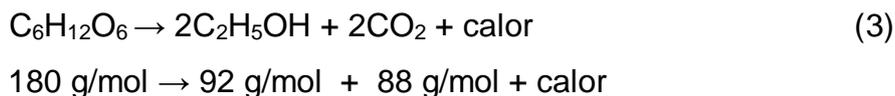
Onde, AT é a quantidade de Açúcares Totais e m_A é a massa da amostra a ser considerada.

Tabela 10 – Estimativa de açúcares fermentescíveis totais no mosto

Açúcares Totais (g)	
A1	38,970
A2	38,665
A3	38,563
A4	38,868
A5	47,623
A6	47,757
A7	47,757
A8	47,757

Fonte: Autor (2021)

Sabendo-se tais valores e com auxílio da Equação 3, pode-se estimar a quantidade teórica de produção de etanol para posterior comparação com a quantidade real produzida.



A Tabela 11 traz os resultados estimados que foram calculados para a produção teórica de etanol, através dos valores estimados para a quantidade de açúcares fermentescíveis totais presentes no mosto, juntamente com a equação 2.

Tabela 11 – Estimativa da produção teórica de etanol

	Etanol Teórico (g)	Etanol Teórico (%)
A1	19,9181	5,4570
A2	19,7621	5,4291
A3	19,7101	5,3270
A4	19,8661	5,3260
A5	24,3407	7,5125
A6	24,4093	7,5805
A7	24,4093	7,1792
A8	24,4093	7,1792

Fonte: Autor (2021)

Sendo a massa específica do etanol (não anidro) igual a 789 kg/m³ e, segundo as informações relativas à produtividade de beterraba (ton/ha), obtidas pelo Instituto Agrônomo de Campinas (2011), pode-se estimar quantos litros de etanol podem ser gerados por tonelada de beterraba hortaliça por hectare cultivado. A Tabela 12 apresenta os valores calculados para estimar a produtividade teórica da produção de etanol a partir da beterraba hortaliça.

Tabela 12 – Estimativa da produtividade teórica do etanol de beterraba hortaliça

	kg/ton	L/ton	L/ton/ha
A1	52,0052	65,9128	1977,3848
A2	52,0055	65,9132	1977,3975
A3	52,0052	65,9128	1977,3847
A4	52,0048	65,9124	1977,3721
A5	68,5651	86,9013	2607,0416
A6	68,5649	86,9011	2607,0335
A7	68,5649	86,9011	2607,0335
A8	68,5649	86,9011	2607,0335

Fonte: Autor (2021)

Deve-se ressaltar que os valores apresentados na Tabela 12 não diferem da quantidade de tempo decorrida na fermentação nem a quantidade utilizada de levedura, pois leva-se em conta que todos os açúcares que poderiam ter sido fermentados foram metabolizados.

4 APRESENTAÇÃO DA PESQUISA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a fermentação ser interrompida, de acordo com os tempos de fermentação predeterminados, os vinhos foram retirados dos biorreatores e os mesmos foram filtrados com o auxílio de um tecido de algodão. Foi então realizada a medição de volume do vinho, de sua temperatura, pH e peso resultante. Os valores das medições realizadas após a fermentação das amostras podem ser conferidos na Tabela13.

Tabela 13 – Medições das amostras após a fermentação

	V (ml)	T (°C)	pH	Peso (g)
A1	222	26,1	4,8	365
A2	195	24,5	4,9	364
A3	225	26,1	4,9	370
A4	230	24,5	4,9	373
A5	180	25,6	4,6	324
A6	177	24,3	4,8	322
A7	195	25,4	4,6	340
A8	194	24,5	4,7	340

Fonte: Autor (2021)

Neste trabalho, foi assumido que a variação de massa ocorrida durante a fermentação do mosto se deu única e exclusivamente pela formação de dióxido de carbono, expelido para a atmosfera. Assim, com o auxílio da equação química da formação de etanol via processo fermentativo (Equação 3) e, considerando que toda a sacarose presente no suco de beterraba foi convertida em açúcares fermentescíveis, pode-se fazer o cálculo estequiométrico para obter um valor aproximado de etanol produzido. A Tabela 14 mostra os valores obtidos para a variação de massa ocorrida durante a fermentação alcoólica.

Tabela 14 – Produção de CO₂

	Δm (g)
A1	18
A2	16
A3	9
A4	9
A5	31
A6	34
A7	16
A8	16

Fonte: Autor (2021)

Deve-se levar em consideração que, segundo o que foi observado por Pasteur, durante o processo fermentativo em torno de 5% do açúcar consumido é utilizado para produção de produtos secundários, sendo assim, foi estimado produção efetiva de 95% de etanol. A Tabela 15 mostra os valores estimados da produção de etanol, em massa e em porcentagem.

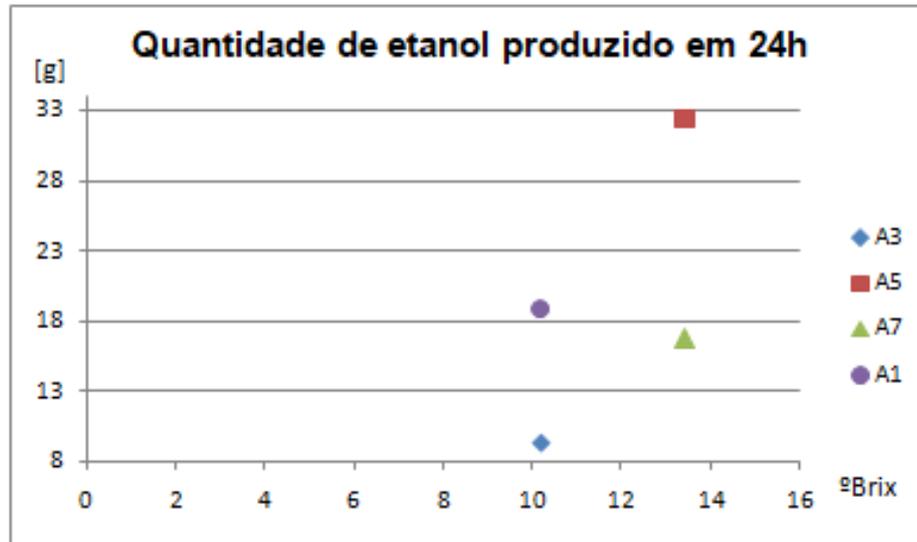
Tabela 15 – Quantidade de etanol produzida

	Quantidade de etanol produzida (g)	Porcentagem de etanol produzida (%)
A1	17,877	4,8972
A2	15,890	4,3652
A3	8,938	2,4149
A4	8,938	2,3959
A5	30,788	9,5019
A6	33,767	10,4861
A7	15,890	4,6730
A8	15,890	4,6730

Fonte: Autor (2021)

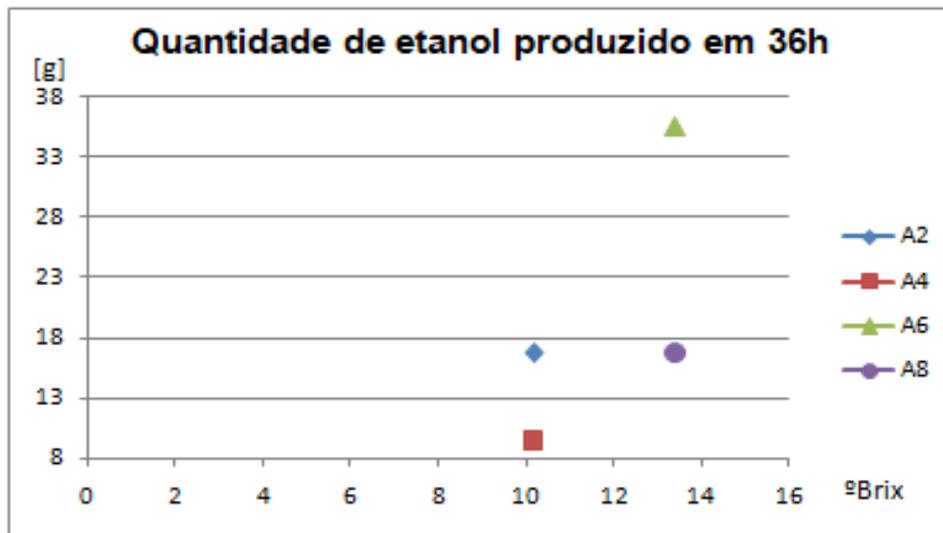
As Figuras 13 e 14 apresentam os gráficos da quantidade de etanol produzida, para diferentes teores de sólidos solúveis, em função de diferentes tempos de amostragem.

Figura 13 – Quantidade de etanol produzida em 24h



Fonte: Autor (2021)

Figura 14 – Quantidade de etanol produzida em 36h



Fonte: Autor (2021)

Através de cálculos estequiométricos, pela equação 3, pode-se descobrir a quantidade de açúcares totais consumida durante o processo de fermentação, para formação de etanol e produtos secundários. A Tabela 16 mostra os valores estimados de açúcares totais que foram metabolizados durante a fermentação.

Tabela 16 – Quantidade de açúcares totais consumidas durante a fermentação

	Quantidade de AT (g)	Quantidade de AT (%)
A1	36,8182	9,6131
A2	32,7273	8,6124
A3	18,4091	4,8572
A4	18,4091	4,8191
A5	63,4091	17,8617
A6	69,5455	19,5352
A7	32,7273	9,1930
A8	32,7273	9,1930

Fonte: Autor (2021)

Pode-se agora estabelecer a eficiência no processo fermentativo para cada amostra analisada, segundo a Equação 4:

$$\eta(\%) = (\text{Etanol Produzido}/\text{Etanol Teórico}) * 100 \quad (4)$$

A Tabela 17 mostra os resultados encontrados para a determinação da eficiência do processo fermentativo para cada uma das amostras, levando em consideração os valores estimados encontrados para a produção de etanol e a estimativa para a produção teórica de etanol, segundo a equação 3:

Tabela 17 – Eficiência do processo de fermentação

	Etanol Produzido (g)	Etanol Teórico (g)	Eficiência (%)
A1	17,877	19,9181	89,7525
A2	15,890	19,7621	80,4064
A3	8,938	19,7101	45,3473
A4	8,938	19,8661	44,9912
A5	30,788	24,3407	126,4877
A6	33,767	24,4093	138,3366
A7	15,890	24,4093	65,0981
A8	15,890	24,4093	65,0981

Fonte: Autor (2021)

A Tabela 18 mostra os valores estimados para produtividade de etanol através da utilização da beterraba hortaliça em litros por tonelada por hectare de cultivo.

Tabela 18 – Estimativa da produtividade de etanol de beterraba

	kg/ton	L/ton	L/ton/ha
A1	49,1336	62,2732	1868,199
A2	44,0189	55,7907	1673,724
A3	24,8256	31,4647	943,9425
A4	24,6309	31,2179	936,5382
A5	91,2931	115,7074	3471,222
A6	99,8465	126,5483	3796,448
A7	46,9864	59,5518	1786,557
A8	46,9864	59,5518	1786,557

Fonte: Autor (2021)

Observando os resultados obtidos neste experimento, verificou-se que o par de amostras A5 e A6 foram os que obtiveram maior produção de etanol, superando ainda as estimativas iniciais para a produção teórica. Essa diferença se deve ao fato das medições iniciais de sólidos solúveis não serem fator único e determinante para o potencial fermentativo nem para a qualidade da fermentação e de seus produtos. Para suportar tal processo, deveria ser feito em conjunto uma análise detalhada do açúcares redutores presentes na solução, antes da fermentação.

Percebeu-se que não houve influência significativa no aumento de tempo de fermentação, porém os mostos que entraram em contato com quantidade maior de leveduras apresentaram queda significativa de produtividade, como no caso das amostras A7 e A8 que apesar de possuírem maior quantidade de açúcares fermentescíveis acabaram por produzir menos etanol do que as amostras A1 e A2. Isto provavelmente se deve ao fato de que quando se aumenta a quantidade de leveduras presentes no mosto, para uma mesma concentração de açúcares, elas começam a competir entre si na busca por alimento, afetando a eficiência do processo fermentativo e por consequência diminuindo a produção de etanol.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho contribuiu para evidenciar que a beterraba hortaliça pode ser também utilizada como matéria-prima para a produção de bioetanol, para trabalhar de maneira combinada com a matéria-prima cana-de-açúcar.

Acredita-se que mesmo apresentando potencial para uso a beterraba hortaliça não entraria como substituto da cana-de-açúcar, pois a segunda ainda oferece a possibilidade de geração auto-suficiente de energia térmica, necessária durante o processo de destilação. Sendo assim, seria um adicional para as áreas onde o cultivo de cana-de-açúcar é impossibilitado em decorrência das baixas temperaturas, bem como alternativa para o uso de culturas de cobertura de solo durante o inverno, gerando renda extra para os agricultores.

Apesar da impossibilidade de análises mais aprofundadas em razão da restrição de equipamentos laboratoriais, foi observado que é viável a produção de etanol a partir da beterraba hortaliça, uma vez que houve a fermentação alcoólica mesmo com o teor de sólidos solúveis mais baixo, 10,175°Brix. Se considerarmos ainda que os valores obtidos na Tabela15 são apropriados, devemos levar em consideração ainda o cultivo bianual ou tri anual, dependendo das condições disponíveis, o que aumentaria consideravelmente a produção do bioetanol ao longo do ano.

Sabe-se ainda que a vinhaça tem elevado potencial para geração de biogás, para utilização como biofertilizante em lavouras, e ainda para a alimentação animal, agregando valor à cadeia produtiva e, desta forma, aumentando a viabilidade da utilização da beterraba hortaliça para essa finalidade.

REFERÊNCIAS

- ALCARDE, André Ricardo. **Fermentação**. EMBRAPA, 2015. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_105_22122006154841.html#:~:text=Ag%C3%Aancia%20Embrapa%20de%20Informa%C3%A7%C3%A3o%20Tecnol%C3%B3gica,por%20meio%20da%20fermenta%C3%A7%C3%A3o%20alco%C3%B3lica. Acesso: 15/03/2021
- BARBOSA, Gleisa P. **Operações da indústria química: princípios, processos e aplicações**. 1ª Edição São Paulo: Érica, 2015
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO; CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar** : energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008. 732 p.
- CORTEZ, Luís A. B. **Proálcool 40**: Universidades e Empresas: 40 Anos de Ciência e Tecnologia para o Etanol Brasileiro. Editora Blucher, 2016.
- DEMIRBAS, A., 2007, **Producing and Using Bioethanol as an Automotive Fuel, Energy Sources**, Part B, 2, p 391-401.
- DA ROSA, Sergio E. S.; GARCIA, Jorge L. F **O etanol de segunda geração: limites e oportunidade**. Revista do BNDES 32, dezembro 2009
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco energético nacional 2015: ano base 2014: relatório síntese**. Rio de Janeiro, 2015. 292 p.
- ISLA SEMENTES. **Beterraba Early Wonder Tall Top**. Disponível em: <https://isla.com.br/produto/Beterraba-Early-Wonder-Tall-Top/69>. Acesso: 20/04/2021
- LIMA, Urgel de Almeida *et al.* **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. Editora Blucher, 2001.
- MATOS, Simone Pires D. **Processos de Análise Química: Contexto Histórico e Desenvolvimento Industrial**. Editora Saraiva, 2015.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Portaria 241/2010** de 10/08/2010. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=1377920479>. Acesso: 15/03/2021
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Manual de Métodos de Análises de Bebidas e Vinagres**, Portaria nº 76 de 26 de novembro de 1986. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/laboratorios/credenciamento-e-laboratorios-credenciados/legislacao->

metodos-credenciados/arquivos-metodos-da-area-bev-iqa/nao-alcoolicos-08-solidos-soluveis-o-brix.pdf Acesso:17/03/2021

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília, DF: Editora Ideorama, 2008. p. 52-63

MINTEER, Shelley. **Alcoholic Fuels: An Overview**. CRC Press, 2016

BORGES NETO, Manuel R.; CARVALHO, Paulo **Geração de Energia Elétrica - Fundamentos**. Editora Saraiva, 2012

OLIVEIRA, M. W. et al. **Análise quantitativa do crescimento da variedade de cana-de-açúcar**. Viçosa: UFV/SBB, 2001

OLIVEIRA, L. M.; SERRA, J. C. V.; MAGALHÃES, K. B. **Estudo comparativo das diferentes tecnologias utilizadas para produção de etanol**. Revista Eletrônica do Curso de Geografia, Jataí, 2012.

OLIVEIRA, Vanessa da G. **Processos Biotecnológicos Industriais - Produção de Bens de Consumo com o uso de Fungos e Bactérias**. Editora Saraiva, 2015.

PHILIPPI JUNIOR, A.; DOS REIS, L. B. **Energia e Sustentabilidade**. Barueri: Manole, 2016.

RAMOS, Juliana A. **Aceitabilidade e qualidade nutricional de beterrabas *in natura* e pré-processadas submetidas a diferentes métodos de cocção**. Botucatu: Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2015

RASOVSKY, E. M. **Etanol: destilarias**. Rio de Janeiro: Instituto do Açúcar e do Etanol, 1973. (Coleção Canavieira, n.2).

RIPOLI, T. C. C.; MOLINA JR, W. F.; NOGUEIRA, M. C. S.; MATTOS, J. R. **Equivalente energético do palhiço da cana-de-açúcar**. FEALQ, 1990

RIZZO, Luiz A.; MENEGUZZO, Júlio. **Sistemas de Produção de Destilado de Vinho**. Embrapa Uva e Vinho, 2008. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Vinho/SistemaProducaoDestiladoVinho/destilacao.htm>. Acesso em: 03/04/2021

SALATA, Cristiane D. C. **Sistemas de purificação de bioetanol para mini destilarias de mandioca**. Botucatu: Tese de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Ciências Agrônomicas, 2012

TIVELLI et al. **Beterraba: do plantio à comercialização**. Campinas: Instituto Agrônomico, 2011. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/cprural/flipbook/pb/pb53/assets/basic-html/page4.html>. Acesso em: 05/03/2021

VITOLLO, Michele; ROCHA FILHO, José A. **Guia para aulas práticas de biotecnologia de enzimas e fermentação**: Editora Edgard Blücher Ltda, 2017

APÊNDICE A

Estimativa da produção de bioetanol por fermentação de beterraba vermelha

Felipe Dobrovolski Tochetto

RESUMO

Com o contínuo avanço industrial é crescente a demanda por energia, ao passo que aumenta a preocupação com as emissões de poluentes atmosféricos. Dessa forma, a utilização de fontes de energia renováveis, tais como biocombustíveis vem sendo foco de pesquisas. A matriz energética brasileira é composta, na sua grande parte por fontes renováveis, mesmo assim novas alternativas podem contribuir ainda mais para um desenvolvimento sustentável. Além de grandes áreas cultiváveis, o Brasil possui grande diversidade climática, o que possibilita a diversificação das fontes de energia utilizadas de acordo com a disponibilidade climática e geográfica. Para tal, foi mensurado o teor de sólidos solúveis presentes no suco de beterraba, extraído através de maceração e prensagem, para posterior estimativa da quantidade de açúcares fermentáveis presentes no mosto. Também foi estimada a produção de etanol sob condições distintas, como diferentes teores de sólidos solúveis, diferentes tempos de fermentação e diferentes quantidades de levedura adicionadas ao mosto. Foi estimada uma produtividade mínima de aproximadamente 936,54 L/ton/ha e uma produtividade máxima de 3796,45 L/ton/ha para concentrações de 10,175°Brix e 13,415°Brix, respectivamente.

Palavras-chaves: Biocombustível. Bioetanol. Fermentação alcoólica. Beterraba hortaliça.

ABSTRACT

With the continuous industrial advancement, the demand for energy is increasing, while the concern about the emissions of air pollutants is increasing. Thus, the use of renewable energy sources, such as biofuels, has been the focus of this research. The Brazilian energy matrix is mostly composed of renewable sources, yet new

alternatives can contribute even more to sustainable development. In addition to large arable areas, Brazil has great climatic diversity, thus permitting the diversification of the energy sources used according to the climatic and geographic availability. For this purpose, the content of soluble solids present in red beet juice was measured, extracted through maceration and pressing, for later estimation of the amount of fermentable sugars present in the wort. Ethanol production was also estimated under different conditions, such as different levels of soluble solids, different fermentation times and different amounts of yeast added to the wort. It was estimated a minimum productivity of approximately 936,54 L/ton/ha and a maximum productivity of 3796,45 L/ton/ha for concentrations of 10.175°Brix and 13,415°Brix, respectively.

Keywords: Biofuel. Bioethanol. Alcoholic fermentation. Red beet.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial juntamente com a exponencial industrialização do planeta leva a um aumento crescente de demanda energética. Nesse sentido, é crescente a utilização de fontes poluidoras e não renováveis, de origem fóssil, como por exemplo, o carvão, o petróleo e o gás natural.

Para que haja, então, desenvolvimento industrial-tecnológico da sociedade como um todo, deve-se buscar por recursos energéticos que causem menor impacto ao planeta. Os biocombustíveis entram como alternativa para este panorama.

Desta maneira, este trabalho busca estimar a produção de bioetanol através da fermentação da beterraba vermelha, sob diferentes condições, para posterior análise do potencial de produção de bioetanol como fonte alternativa ou como fonte adicional, trabalhando em conjunto com as fontes já existentes na matriz atual.

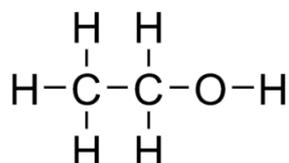
Os resultados obtidos neste trabalho poderão vir a ser úteis no setor energético brasileiro, trazendo benefícios econômicos e ambientais para a população, aumentando a escala de produção do cultivar ao passo que contribui para a redução da emissão de poluentes atmosféricos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ETANOL

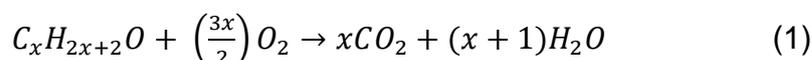
Segundo Oliveira (2015), o etanol é um líquido incolor com ponto de ebulição em 78°C e odor característico, obtido por métodos químicos ou microbiológicos, sendo sempre encontrado como uma solução hidroalcoólica que pode ter de 1 a 8% de água. A Figura 1 traz a representação da fórmula estrutural do etanol.

Figura 1 – Fórmula estrutural do etanol



Fonte: Oliveira (2015, p. 21)

Possui ponto de fusão de -114°C e ponto de ebulição aos 78°C, a massa volumétrica é de 0,790 g/ml, é solúvel em qualquer concentração em água e frequentemente usado em misturas combustíveis com a gasolina, em proporções que variam de 10 a 85%. O uso dos álcoois como combustível ocorre em três maneiras principais: como combustíveis para um motor de combustão, substituindo a gasolina; como um aditivo de combustível para aumento de octanagem ou antidetonante; e como combustível para a conversão direta em energia elétrica em uma célula a combustível. A Equação 1 descreve a reação genérica para a oxidação completa do álcool. (MINTTEER, 2016).



A Figura 2 mostra um balanço do teor de etanol acrescido à gasolina desde 1930 até 2010. Nela, pode-se ver que há grande variação das concentrações da mistura decorrente de diferentes cenários políticos e econômicos nacional e mundial, ao longo dos anos.

Figura 2 – Teor de etanol na gasolina brasileira entre 1930 e 2010

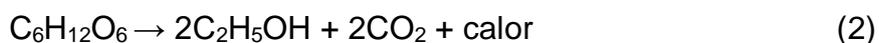


Fonte: Adaptado de Young *et al.* (2008); Cortez (2016, p. 22)

2.2.1 OBTENÇÃO DE ETANOL POR FERMENTAÇÃO

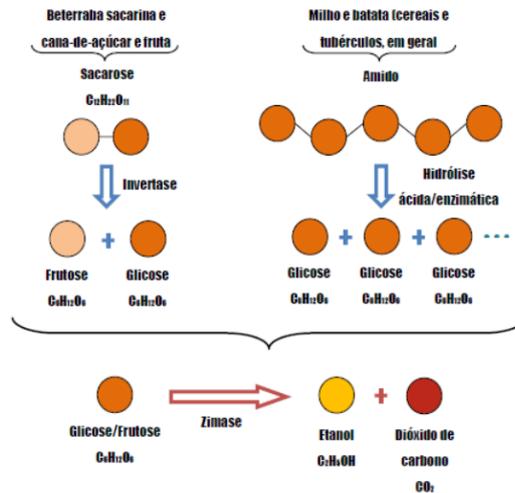
Segundo Lima *et al.*(2002), o etanol poder ser produzido por via destilatória, por via sintética ou por via fermentativa, sendo a última a mais importante para a obtenção do álcool etílico no Brasil.

A conversão da matéria-prima em etanol ocorre por processo fermentativo, sendo realizado por leveduras, como por exemplo, a *Saccharomyces cerevisiae* e para que a fermentação tenha sucesso é necessária quantidade suficiente de leveduras (ALCADE, 2015). A Equação 2 representa a equação química da formação do etanol, através do processo fermentativo:



A Figura 3 mostra um esquema do processo fermentativo que ocorre pela utilização de diferentes matérias-primas e as etapas do processo. Em materiais ricos em açúcares primeiro ocorre, por ação da invertase, a hidrólise da sacarose para posterior conversão dos açúcares redutores em etanol e dióxido de carbono. Já em materiais ricos em amido primeiro ocorre a hidrólise ácida ou enzimática em glicose para em seguida ser realizada a fermentação alcoólica.

Figura 3 – Esquema do processo fermentativo

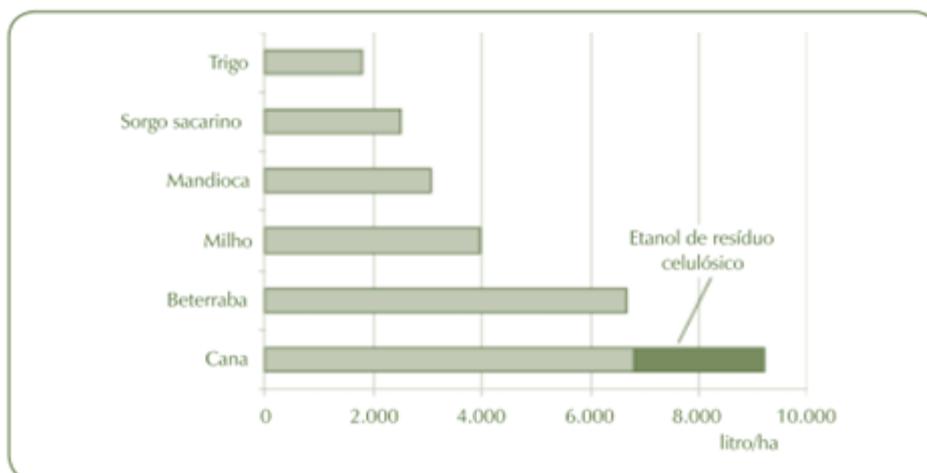


Fonte: Gupta; Demirbas (2010)

2.2.2 Matérias-primas

Qualquer matéria prima com suficiente teor de açúcar ou amido pode ser convertida em etanol, conforme mostra a Figura 4. Além disso, como no caso da cana-de-açúcar pode-se gerar também etanol de segunda geração com os resíduos das palhas e outros resíduos celulósicos.

Figura 4 – Produtividade média de etanol por área para diferentes culturas



Fonte: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008, . 71)

2.2.2.1 CANA-DE-AÇÚCAR

Segundo o Ministério Da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil é destinado, em sua maior parte, à produção de açúcar e de etanol, porém, em menor escala, também contribui para a alimentação animal e fabricação de aguardente.

A cana-de-açúcar é uma cultura plurianual com colheita anual, economicamente produtiva por três anos consecutivos, admitindo-se a média de rendimento agrícola de até 100 toneladas por hectare por ano. Através da moagem se obtém o caldo, que contém de 78 a 86% de água, 10 a 20% de sacarose, 0,1 a 2% de açúcares redutores (principalmente, glicose e frutose), 0,3 a 0,5% de cinzas e 0,5 a 1,0% de compostos nitrogenados, com a faixa de pH 5,2 a 6,8. Enquanto ainda seja possível fazer a fermentação com o caldo bruto, normalmente o mesmo é clarificado por meio de aquecimento, decantação e filtração, transformando-se em um mosto mais limpo, que fermenta melhor, espuma menos e suja menos as colunas de destilação. (LIMA *et al.*, 2002).

Segundo Oliveira *et al.* (2001), se for empregado o manejo apropriado do cultivo é possível alcançar uma produtividade maior que 150 toneladas de matéria natural por hectare.

2.2.2.2 BETERRABA VERMELHA (HORTALIÇA)

De acordo com o boletim de número 210 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC, 2011) a beterraba (*Beta Vulgaris L.*) é uma hortaliça da família Chenopodiaceae, originária do sul e do leste da Europa e norte da África, com colheita anual, bianual ou tetra-anual, dependendo da variedade cultivada. É uma das principais hortaliças cultivadas no Brasil, sendo conhecida também como beterraba vermelha ou beterraba de mesa. Sua cor vermelho-arroxeadada se dá devido à presença de pigmentos hidrossolúveis, como as betalaínas. A Tabela 2 faz um levantamento das quantidades dos elementos presentes em cem gramas de beterraba vermelha, mostrando que a raiz possui um total de 87,3% de água e 9,9 gramas de carboidratos totais.

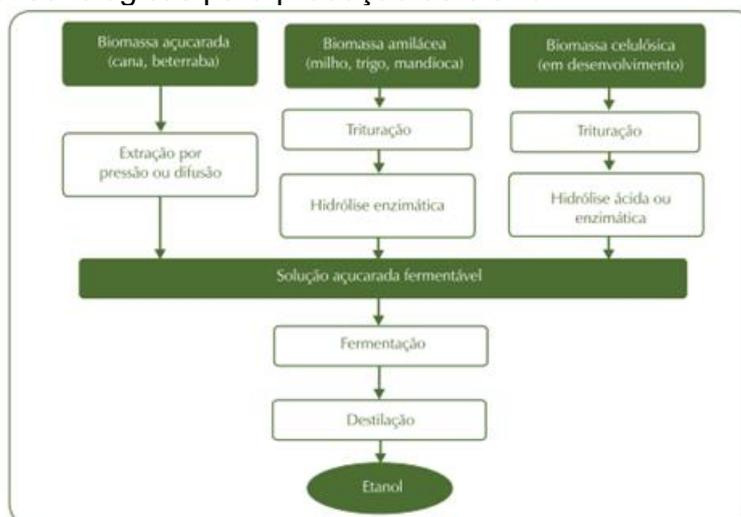
Conforme Tivelli *et al.* (2011), a beterraba hortaliça é uma planta típica de clima temperado, produzindo bem em temperaturas amenas, em torno de 20°C e

germinando entre 10°C e 15°C, podendo ser semeada durante o ano todo nas principais regiões produtoras do país, desde que se evite temperaturas maiores que 25°C. Os tipos de solo mais indicados para o cultivo da beterraba de mesa são argilo-arenosos, friáveis e bem drenados, sendo necessário o preparo adequado do solo.

Ainda de acordo com o autor supraindicado, a planta atinge o ponto de colheita de 70 a 110 dias após a semeadura, dependendo da variedade cultivada, do sistema de manejo empregado e da época de plantio, necessitando de grande número de pessoas para a operação de arranquio e corte das folhas. Sua produtividade é muito variável, normalmente chegando a atingir 30 toneladas por hectare.

A Figura 5 mostra as rotas tecnológicas para a produção de etanol para diferentes tipos de matérias-primas. Nela pode-se ver os diferentes processos necessários para materiais distintos.

Figura 5 – Rotas tecnológicas para produção de etanol



Fonte: Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (2008, p. 70)

3 METODOLOGIA

3.1 MATERIAIS

O material utilizado para a pesquisa proposta neste trabalho, *Beta Vulgaris*, foi comprado em supermercado local, da cidade de Bagé, Rio Grande do Sul. Foram adquiridas beterrabas maduras, da variedade Early Wonder, segundo funcionários do supermercado. A levedura empregada no processo fermentativo foi a

Saccharomyces cerevisiae. Foram utilizados também diferentes equipamentos para medição, como proveta graduada de 500 ml, balança, termômetro, refratômetro e peagâmetro digital.

3.2 MÉTODOS

Foi realizado o descascamento das beterrabas e a pesagem das amostras, medindo 5,046 kg. Após pesagem deu-se início a moagem manual do produto e posterior prensagem manual para obtenção do suco cru de beterraba.

O suco de beterraba cru foi agitado vigorosamente para homogeneizar a solução. Após foram medidos o pH, a temperatura e, com auxílio de um refratômetro portátil, o teor de sólidos solúveis contidos no líquido. O suco também foi levado ao fogo por 10 minutos para ter sua concentração de açúcares totais aumentada. O líquido foi separado em 8 amostras, sendo 4 com 225ml e 4 com 200 ml, com diferentes °Brix e diferentes quantidades de levedura para diferentes tempos de fermentação. As Tabelas 1 e 2 mostram como foi organizado o experimento.

Tabela 1 – Organização e medições das amostras (1)

	Volume (ml)	Peso (g)	Temperatura (°C)
A1	225	383	22,5
A2	225	380	22,5
A3	225	379	22,5
A4	225	382	22,5
A5	200	355	25,7
A6	200	356	25,7
A7	200	356	25,7
A8	200	356	25,7

Fonte: Autor (2021)

Tabela 2 – Organização e medições das amostras (2)

	°Brix	Tempo (h)	Levedura (g)
A1	10,175	24	5
A2	10,175	36	5
A3	10,175	24	10
A4	10,175	36	10
A5	13,415	24	5
A6	13,415	36	5
A7	13,415	24	10
A8	13,415	36	10

Fonte: Autor (2021)

Foi escolhido o método de fermentação descontínua, com biorreatores construídos com garrafas de água mineral de 500 ml, do tipo PET, adaptadas para expelir o CO₂ formado sem que oxigênio pudesse entrar no meio fermentativo, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Fermentação do mosto de beterraba hortalíça



Fonte: Autor (2021)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a fermentação ser interrompida, de acordo com os tempos de fermentação predeterminados, os vinhos foram retirados dos biorreatores e os mesmos foram filtrados com o auxílio de um tecido de algodão. Foi então realizada a medição de volume do vinho, de sua temperatura, pH e peso resultante. Os valores das medições realizadas após a fermentação das amostras pode ser conferido na Tabela 3.

Tabela 3 – Medições das amostras após a fermentação

	V (ml)	T (°C)	pH	Peso (g)
A1	222	26,1	4,8	365
A2	195	24,5	4,9	364
A3	225	26,1	4,9	370
A4	230	24,5	4,9	373
A5	180	25,6	4,6	324
A6	177	24,3	4,8	322
A7	195	25,4	4,6	340
A8	194	24,5	4,7	340

Fonte: Autor (2021)

Neste trabalho, foi assumido que a variação de massa ocorrida durante a fermentação do mosto se deu única e exclusivamente pela formação de dióxido de

carbono, expelido para a atmosfera. Assim, com o auxílio da equação química da formação de etanol via processo fermentativo (Equação 2) e, considerando que toda a sacarose presente no suco de beterraba foi convertida em açúcares fermentescíveis, pode-se fazer o cálculo estequiométrico para obter um valor aproximado de etanol produzido. A Tabela 4 mostra os valores obtidos para a variação de massa ocorrida durante a fermentação alcoólica.

Tabela 4 – Produção de CO₂

	Δm (g)
A1	18
A2	16
A3	9
A4	9
A5	31
A6	34
A7	16
A8	16

Fonte: Autor (2021)

Deve-se levar em consideração que, segundo o que foi observado por Pasteur, durante o processo fermentativo em torno de 5% do açúcar consumido é utilizado para produção de produtos secundários, sendo assim, foi estimado produção efetiva de 95% de etanol. A Tabela 5 mostra os valores estimados da produção de etanol, em massa e em porcentagem:

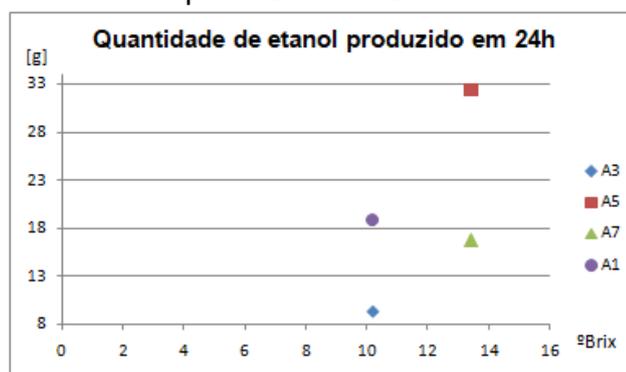
Tabela 5 – Quantidade de etanol produzida

	Quantidade de etanol produzida (g)	Porcentagem de etanol produzida (%)
A1	17,877	4,8972
A2	15,890	4,3652
A3	8,938	2,4149
A4	8,938	2,3959
A5	30,788	9,5019
A6	33,767	10,4861
A7	15,890	4,6730
A8	15,890	4,6730

Fonte: Autor (2021)

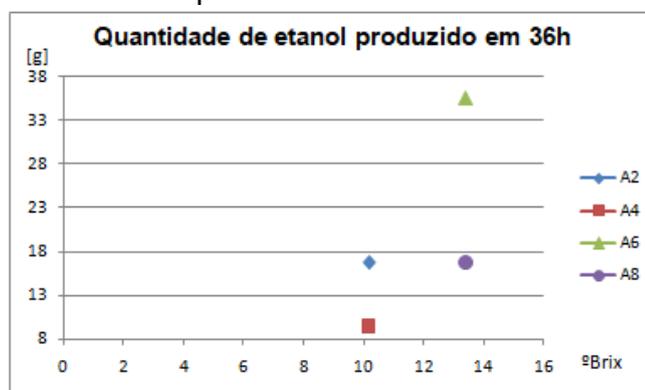
Os Gráficos 1 e 2 mostram a quantidade de etanol produzida, para diferentes teores de sólidos solúveis, em função de diferentes tempos de amostragem.

Figura 7 – Quantidade de etanol produzida em 24h



Fonte: Autor (2021)

Figura 8 – Quantidade de etanol produzida em 36h



Fonte: Autor (2021)

Sendo a massa específica do etanol (não anidro) igual a 789 kg/m^3 e, segundo as informações relativas a produtividade de beterraba (ton/ha), obtidas pelo IAC, pode-se estimar quantos litros de etanol podem ser gerados por tonelada de beterraba hortaliça por hectare cultivado. A Tabela 6 mostra os valores estimados para produtividade de etanol através da utilização da beterraba hortaliça em litros por tonelada por hectare de cultivo.

Tabela 6– Estimativa da produtividade de etanol de beterraba

	kg/ton	L/ton	L/ton/ha
A1	49,1336	62,2732	1868,199
A2	44,0189	55,7907	1673,724
A3	24,8256	31,4647	943,9425
A4	24,6309	31,2179	936,5382
A5	91,2931	115,7074	3471,222
A6	99,8465	126,5483	3796,448
A7	46,9864	59,5518	1786,557
A8	46,9864	59,5518	1786,557

Fonte: Autor (2021)

Observando os resultados obtidos neste experimento, verificou-se que o par de amostras A5 e A6 foram os que obtiveram maior produção de etanol e que não houve influência significativa no aumento de tempo de fermentação. Porém os mostos que entraram em contato com quantidade maior de leveduras apresentaram queda significativa de produtividade, como no caso das amostras A7 e A8 que apesar de possuírem maior quantidade de açúcares fermentescíveis acabaram por produzir menos etanol do que as amostras A1 e A2.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho contribuiu para evidenciar que a beterraba hortaliça pode ser também utilizada como matéria-prima para a produção de bioetanol, para trabalhar de maneira combinada com a matéria-prima cana-de-açúcar.

Acredita-se que mesmo apresentando potencial para uso a beterraba hortaliça não entraria como substituto da cana-de-açúcar, pois a segunda ainda oferece a possibilidade de geração auto-suficiente de energia térmica, necessária durante o processo de destilação. Sendo assim, seria um adicional para as áreas onde o cultivo de cana-de-açúcar é impossibilitado em decorrência das baixas temperaturas, bem como alternativa para o uso de culturas de cobertura de solo durante o inverno, gerando renda extra para os agricultores.

Apesar da impossibilidade de análises mais aprofundadas em razão da restrição de equipamentos laboratoriais foi observado que é viável a produção de etanol a partir da beterraba hortaliça, uma vez que houve a fermentação alcoólica mesmo com o teor de sólidos solúveis mais baixo, 10,175°Brix. Deve-se ainda levar em consideração que o cultivo da beterraba pode ser bianual ou tri anual, dependendo das condições disponíveis, o que aumentaria consideravelmente a produção do bioetanol de beterraba hortaliça ao longo do ano.

Sabe-se ainda que a vinhaça tem elevado potencial para geração de biogás, para utilização como biofertilizante em lavouras e ainda para a alimentação animal, agregando valor a cadeia produtiva e, desta forma, aumentando a viabilidade da utilização da beterraba hortaliça para essa finalidade.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCARDE, A. R. **Fermentação**. 2015. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_105_22122006154841.html#:~:text=Ag%C3%Aancia%20Embrapa%20de%20Informa%C3%A7%C3%A3o%20Tecnol%C3%B3gica,por%20meio%20da%20fermenta%C3%A7%C3%A3o%20alco%C3%B3lica. Acesso em: 15/03/2021
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO; CENTRO DE GESTÃO DE ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Bioetanol de cana-de-açúcar** : energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro, 2008.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora Unicamp, 2008.
- DEMIRBAS, A. Producing and using bioethanol as an automotive fuel. **Energy Sources**, Part B, 2, p. 391-401, 2007.
- LIMA, Urgel de Almeida *et al.* **Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos**. Editora Blucher, 2001.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Portaria nº 241**, de 10 de agosto de 2010. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=1377920479>. Acesso: 15/03/2021
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Manual de Métodos de Análises de Bebidas e Vinagres. Portaria nº 76**, de 26 de novembro de 1986. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/ptbr/assuntos/laboratorios/credenciamento-e-laboratorios-credenciados/legislacao-metodos-credenciados/arquivos-metodos-da-area-bev-iqa/nao-alcoolicos-08-solidos-soluveis-o-brix.pdf> Acesso em: 17/03/2021
- MINTEER, S. **Alcoholic Fuels**: an overview. CRC Press, 2016
- NETO, M. R. B.; CARVALHO, P. **Geração de Energia Elétrica** - Fundamentos. Editora Saraiva, 2012.
- OLIVEIRA, V. G. **Processos Biotecnológicos Industriais** - produção de bens de consumo com o uso de fungos e bactérias. Editora Saraiva, 2015.
- TIVELLI *et al.* **Beterraba**: do plantio à comercialização. Campinas: Instituto Agrônômico, 2011. Disponível em: <http://www.esalq.usp.br/cprural/flipbook/pb/pb53/assets/basic-html/page4.html>. Acesso: 05/03/2021