



**Politécnico
Castelo Branco**

Escola Superior
de Tecnologia

Contribuição para o estudo da viabilidade do sorgo-grão na produção de bioetanol

Hugo Miguel Silva Pereira

20220388

Orientador

Professor Adjunto José Sarreira Tomás Monteiro, *PhD*

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia das Energias Renováveis, realizada sob a orientação científica do Professor Adjunto Doutor José Sarreira Tomás Monteiro, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

julho 2025

Composição do júri

Presidente do júri

Doutor José Pereira Ribeiro Coutinho
Professor Adjunto da ESA/IPCB

Vogais

Doutor António Maria dos Santos Ramos
Professor Coordenador da ESA/IPCB

José Sarreira Tomás Monteiro, *PhD*
Professor Adjunto da ESA/IPCB

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu reconhecimento a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste projeto.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais e ao meu irmão, pelo apoio constante, pelos sacrifícios e pela motivação que me deram ao longo de todo o meu percurso académico. Sem o vosso suporte, esta etapa não teria sido possível.

À minha namorada deixo um agradecimento especial, pela paciência, compreensão e incentivo que me proporcionou durante este processo, ajudando-me a manter o foco e a determinação.

Aos meus professores, agradeço a dedicação e o conhecimento partilhado, que foram essenciais para o meu desenvolvimento académico e pessoal.

Um agradecimento particular ao meu orientador, Professor José Sarreira Tomás Monteiro, pela orientação, disponibilidade e aconselhamento que foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Quero deixar também um agradecimento à Técnica Superior do Laboratório de Química da ESA/IPCB, Mestre Cecília Gouveia, pela ajuda e estímulo que tantas vezes me deu durante os trabalhos de laboratório.

Aos meus colegas de turma, agradeço a colaboração e o espírito de entreajuda que tornaram esta fase mais leve e produtiva.

Por fim, agradeço ao Instituto Politécnico de Castelo Branco (IPCB) pelos recursos e condições proporcionados, que foram essenciais para o desenvolvimento deste projeto.

Resumo

O presente trabalho visa estudar a viabilidade do sorgo-grão (*Sorghum bicolor* L. Moench) como matéria-prima alternativa para a produção de etanol, numa perspectiva de sustentabilidade energética e agrícola. Face à crescente necessidade de diversificar as fontes energéticas e reduzir a dependência de combustíveis fósseis, o sorgo-grão surge como uma cultura promissora, dada a sua elevada tolerância à seca, baixa exigência hídrica, capacidade de adaptação a solos pobres e potencial energético associado ao seu elevado teor de amido.

A nossa investigação iniciou-se com uma caracterização agronómica e económica da cultura do sorgo, destacando a sua origem, distribuição geográfica, importância socioeconómica, práticas agrícolas atuais e perspectivas futuras. Foram analisadas as vantagens do sorgo face a outras culturas amiláceas, como o milho, sobretudo em regiões com escassez de água.

Seguiu-se o estudo do processo de produção de etanol a partir de matérias-primas amiláceas, com destaque para as fases de pré-tratamento, hidrólise e sacarificação enzimática do amido, fermentação alcoólica e destilação. Este processo foi aplicado a duas variedades de sorgo-grão (branco e vermelho), sujeitas a ensaios laboratoriais que incluíram a trituração dos grãos, cozimento/gelatinização, adição de enzimas específicas (alfa-amilase e glucosidase), fermentação com leveduras e posterior destilação do mosto fermentado.

Através da medição do dióxido de carbono libertado durante a fermentação e da avaliação da graduação alcoólica, foi possível calcular o rendimento em etanol de cada variedade, bem como a potencial produção de grãos secos de destilaria com sólidos solúveis, ou *Distillers Dried Grains with Solubles* (DDGS).

Palavras-chave

Sorgo-grão, bioetanol, energias renováveis, fermentação alcoólica, culturas energéticas.

Abstract

This study is an approach to the viability of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) as an alternative raw material for ethanol production, from an energy and agricultural sustainability perspective. Given the growing need to diversify energy sources and to reduce dependence on fossil fuels, grain sorghum has emerged as a promising crop, given its high drought tolerance, low water demand, ability to adapt to poor soils and energy potential associated with its high starch content.

The research began with an agronomic and economic characterization of the sorghum crop, highlighting its origin, geographical distribution, socio-economic importance, current agricultural practices and future prospects. The advantages of sorghum over other starchy crops, such as maize, were analysed, especially in water-scarce regions.

This was followed by a study of the process of producing ethanol from starch raw materials, with emphasis on pre-treatment, hydrolysis and enzymatic saccharification of starch, alcoholic fermentation and distillation phases. This process was applied to two varieties of grain sorghum (white and red), which were subjected to laboratory tests that included crushing the grains, cooking/gelatinization, the addition of specific enzymes (alpha-amylase and glucosidase), fermentation with yeasts and subsequent distillation of the fermented mash.

By measuring the carbon dioxide released during fermentation and determining the alcoholic strength by weight, it was possible to calculate the ethanol yield of each variety, as well as the potential Distillers Dried Grains with Solubles (or DDGS) production.

Keywords

Grain sorghum, bioethanol, renewable energies, alcoholic fermentation, energy crops.

Índice geral

1.	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2.	Motivação	2
1.3.	Objetivos	3
1.4.	Estrutura do Trabalho	3
2.	A Cultura do Sorgo	5
2.1	Origem e distribuição geográfica	5
2.2	Importância económica.....	6
2.3	Modo de cultivo atual e perspectivas futuras	6
2.4	Necessidades de água.....	7
2.5	Vantagens e desvantagens da cultura face a outros cereais	7
3.	O processo de produção de bioetanol a partir de matérias-primas amiláceas	9
3.1	Pré-tratamento das matérias-primas.....	9
3.2	Hidrólise e sacarificação do amido.....	10
3.3	Fermentação alcoólica	11
3.4	Destilação e processos complementares.....	12
4.	Ensaio de avaliação do potencial de produção de bioetanol	15
4.1	Variedades de sorgo-grão utilizadas	15
4.2	Pré-tratamento, hidrólise, sacarificação e fermentação.....	16
4.3	Destilação.....	20
4.4	Avaliação da produção de álcool etílico.....	22
4.5	Avaliação do rendimento em coprodutos – CO ₂ e DDGS.....	23
5.	Análise dos resultados e conclusões.....	25
5.1	Análise crítica dos resultados obtidos.....	25
5.2	Algumas conclusões.....	30
	Referências Bibliográficas.....	33
	Anexos.....	37

Índice de figuras

Figura 1 – Grãos de Sorgo	2
Figura 2 – Gravura representando mulheres a esmagar sorgo numa aldeia da Tanzânia, África	5
Figura 3 – Colheita mecânica do sorgo	7
Figura 4 – Panículas de plantas de sorgo	8
Figura 5 – Erlenmeyer com fermentação de Sorgo em curso	12
Figura 6 – Aspeto do Grão de Sorgo Vermelho	16
Figura 7 – Aspeto do Grão de Sorgo Branco	16
Figura 8 – Vista superior dos copos de precipitação em banho termostaticado	17
Figura 9 – Medição do pH	18
Figura 10 – Copos de precipitação depois de receberem a enzima	18
Figura 11 – Erlenmeyers em fermentação no banho maria	20
Figura 12 – Aditivo utilizado	20
Figura 13 – Pesagem da levedura utilizada	20
Figura 14 – Sistema de destilação fracionada com refluxo utilizado no ensaio	21
Figura 15 – Registo da temperatura com termómetro durante o processo de destilação	21

Lista de tabelas

Tabela 1- Caracterização do destilado (bioetanol hidratado) e do etanol absoluto obtido em cada biorreator (mL) e por tonelada de grão (L/t).	26
Tabela 2 Rendimento do processo de produção de etanol absoluto por cada biorreator (%).	27
Tabela 3 Perda total de massa sob a forma de CO ₂ , em gramas, acumulada no final da fermentação.	28
Tabela 4- Massa de resíduos sólidos da vinhaça após secagem (g de MS/biorreator).	29
Tabela 5- Rendimento em resíduos sólidos (% de matéria seca) por tonelada de grão de sorgo.	29

Lista de siglas/acrónimos

DDGS – Distillers Dried Grains with Solubles (Grãos Secos de Destilação com Sólidos Solúveis)

V/V – volume em volume

VDestil_B – Volume de etanol hidratado destilado a partir do Sorgo Branco

VDestil_V – Volume de etanol hidratado destilado a partir do Sorgo Vermelho

GrauAlc_B - Grau alcoólico do destilado do Sorgo Branco

GrauAlc_V - Grau alcoólico do destilado do Sorgo Vermelho

VEtAbs_B - Volume de etanol absoluto produzido a partir do Sorgo Branco

VEtAbs_V - Volume de etanol absoluto produzido a partir do Sorgo Vermelho

RP_EtAb_B- Rendimento de produção a partir do Sorgo Branco

RP_EtAb_V- Rendimento de produção a partir do Sorgo Vermelho

CO2_B – Produção de CO2 a partir do Sorgo Branco

CO2_V – Produção de CO2 a partir do Sorgo Vermelho

RS_g_B - Produção de resíduo seco a partir do Sorgo Branco

RS_g_V - Produção de resíduo seco a partir do Sorgo Vermelho

RP_mm_B - Rendimento da produção de resíduo seco do Sorgo Branco

RP_mm_V - Rendimento da produção de resíduo seco do Sorgo Vermelho

1. Introdução

1.1 Contexto

A crescente preocupação com a sustentabilidade ambiental, a volatilidade dos preços dos combustíveis fósseis e a urgência de reduzir a dependência energética de fontes não renováveis têm incentivado a procura por alternativas mais sustentáveis, nomeadamente os biocombustíveis. Entre estes, o bioetanol destaca-se como uma opção viável, com menores impactos ambientais e potencial para integrar, de forma gradual, o mercado de combustíveis líquidos (Jeswani, Chilvers e Azapagic, 2020).

Até ao momento, culturas como o milho e a cana-de-açúcar têm sido amplamente utilizadas para a produção de bioetanol. No entanto, a sua utilização intensiva levanta preocupações relacionadas com a competição entre a produção de energia e a segurança alimentar. Por outro lado, os custos de produção têm aumentado significativamente em algumas regiões do planeta, em virtude do agravamento dos preços dos fertilizantes e dos produtos fitossanitários. Neste sentido, torna-se necessário estudar novas matérias-primas agrícolas que não comprometam o abastecimento alimentar e que apresentem características favoráveis à produção de bioetanol.

O sorgo-grão (*Sorghum bicolor* L. Moench) surge como uma alternativa promissora. Trata-se de uma cultura com elevada adaptabilidade a condições climáticas adversas, boa tolerância à seca, baixo consumo hídrico, necessidades de adubação mais baixas e bons níveis de produtividade, mesmo em solos com

fertilidade limitada. Estas características tornam o sorgo particularmente interessante para regiões com restrições hídricas e condições agronómicas desfavoráveis (Xiao, *et al.*, 2021). Para além disso, o elevado teor de amido nos seus grãos confere-lhe um potencial considerável para a produção de bioetanol por via fermentativa.

O presente trabalho tem como principal objetivo contribuir para o estudo da viabilidade do sorgo-grão como cultura destinada à produção de bioetanol, avaliando o seu rendimento energético e o seu potencial de valorização no contexto da produção de biocombustíveis.



Figura 1 – Grãos de Sorgo (@Flávia Alves, <https://casapino.com.br/>, 2018)

1.2. Motivação

O objetivo que presidiu à realização deste trabalho assenta na necessidade de identificar alternativas viáveis, sustentáveis e adaptadas à realidade agrícola nacional para a produção de bioetanol. Perante os desafios colocados pelas alterações climáticas, pela escassez de recursos e pelas exigências ambientais, é fundamental diversificar as matérias-primas disponíveis para a produção de energia renovável.

Estudar o sorgo-grão como possível cultura energética representa uma oportunidade para valorizar uma espécie ainda pouco explorada em Portugal, com potencial para responder simultaneamente a preocupações energéticas, agrícolas e ambientais. Ao contribuir para o conhecimento técnico-científico sobre o aproveitamento energético desta cultura, este trabalho procura apoiar decisões futuras na área dos biocombustíveis e, ao mesmo tempo, dar um contributo, ainda que indireto, para o crescimento da agricultura sustentável.

1.3. Objetivos

Caracterizar o sorgo-grão enquanto cultura agrícola. Analisar a composição dos grãos, com ênfase no teor de amido, para determinar o seu potencial como matéria-prima para produção de bioetanol. Identificar vantagens e limitações associadas à utilização do sorgo-grão na produção de bioetanol e de alguns coprodutos característicos de sistemas de produção de bioetanol a partir de matérias-primas amiláceas.

1.4. Estrutura do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em cinco capítulos principais, seguidos pelas referências bibliográficas e pelos anexos, com o intuito de proporcionar uma abordagem clara, estruturada e coerente do tema em estudo.

O Capítulo 1 – Introdução enquadra o tema, apresentando o contexto em que se insere, a motivação que conduziu à sua seleção e os objetivos que orientaram o desenvolvimento do trabalho.

No Capítulo 2 – A Cultura do Sorgo, procede-se a uma caracterização da cultura do sorgo, abordando a sua origem e distribuição geográfica, a sua importância económica, os métodos de cultivo atualmente utilizados e as perspetivas de evolução futura.

O Capítulo 3 – O Processo de Produção de Bioetanol a partir de Matérias-Primas Amiláceas descreve, de forma detalhada, as etapas tecnológicas envolvidas na produção de bioetanol, nomeadamente o pré-tratamento das matérias-primas, a hidrólise e sacarificação do amido das mesmas, a fermentação alcoólica e os processos de destilação e tratamentos complementares.

O Capítulo 4 – Ensaio de Avaliação do Potencial de Produção de Bioetanol apresenta o trabalho experimental desenvolvido, incluindo a seleção das variedades de sorgo-grão utilizadas, bem como os procedimentos adotados nas fases de pré-tratamento, hidrólise, sacarificação, fermentação e destilação. Este capítulo contempla ainda a avaliação do rendimento em álcool etílico e a quantificação dos coprodutos obtidos, nomeadamente CO₂ e DDGS.

No Capítulo 5 – Análise dos Resultados e Conclusões, procede-se a uma análise crítica dos resultados obtidos, com base nos dados experimentais recolhidos, culminando com um conjunto de conclusões finais sobre o potencial do sorgo como matéria-prima para a produção sustentável de bioetanol.

O trabalho termina com a apresentação das Referências Bibliográficas, que fundamentam teoricamente os conteúdos abordados, e dos Anexos, onde se reúnem elementos complementares relevantes para uma compreensão mais aprofundada do estudo.

2. A Cultura do Sorgo

2.1 Origem e distribuição geográfica

O sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é uma planta cerealífera originária do continente africano, mais especificamente da região do Sahel, onde foi domesticada há milhares de anos. Desde então, tem vindo a expandir a sua área de cultivo, conquistando regiões com climas tropicais e subtropicais em todo o mundo. Atualmente, o sorgo é cultivado em continentes como a África, Ásia, América e até mesmo em algumas partes da Europa, devido à sua capacidade de adaptação a ambientes onde outras culturas agrícolas apresentam dificuldades. No contexto global, a sua presença é particularmente significativa em países com escassez de água, pois é reconhecido pela sua resistência à seca e elevada tolerância ao calor, características que o tornam ideal para zonas semiáridas e mediterrânicas, como algumas regiões do sul da Europa (Ruas *et al.*, s.d.).



Figura 2 – Gravura representando mulheres a esmagar sorgo numa aldeia da Tanzânia, África (<https://www.alamy.com/>, s.d.).

2.2 Importância económica

O sorgo assume um papel relevante no contexto económico, especialmente em países em desenvolvimento, onde é uma cultura essencial para a alimentação humana e animal. O grão é utilizado na produção de farinhas, pães e bebidas tradicionais, enquanto a sua biomassa serve de alimento para gado. Nos últimos anos, o sorgo-grão tem vindo a ganhar importância crescente como matéria-prima para a produção de bioetanol, destacando-se como uma alternativa sustentável e economicamente viável face a outros cereais, como o milho. Esta aplicação contribui para a diversificação da matriz energética e para o desenvolvimento rural, oferecendo oportunidades de rendimento a pequenos e médios produtores, principalmente em zonas onde a cana-de-açúcar ou o milho apresentam limitações de cultivo (FAO, 2020).

2.3 Modo de cultivo atual e perspectivas futuras

Modo atual do cultivo

O sorgo é uma cultura anual que se adapta bem a climas quentes e secos, sendo normalmente cultivado em zonas com pouca disponibilidade de água. A sementeira é feita no final da primavera ou início do verão, quando o solo já apresenta temperaturas adequadas à instalação da cultura. As práticas de cultivo são simples e não exigem grandes preparações do terreno, o que torna o sorgo uma boa opção para explorações agrícolas com poucos recursos.

A adubação é feita conforme as condições do solo, dando mais importância ao azoto e ao fósforo. O controlo das ervas daninhas é mais necessário nas primeiras semanas após a sementeira, podendo ser feito com máquinas ou produtos químicos apropriados. Embora o sorgo seja, em geral, resistente a pragas e doenças (Cherlinka, 2025), se necessário poderão ser realizados alguns tratamentos fitossanitários.

Perspetivas futuras

As perspectivas para o cultivo do sorgo são favoráveis, sobretudo no contexto das alterações climáticas e da necessidade de sistemas agrícolas mais resilientes. A investigação agronómica tem vindo a desenvolver génotipos com maior

produtividade e eficiência no uso da água. Paralelamente, o interesse crescente na produção de bioetanol a partir de sorgo-grão poderá estimular a sua integração em novas cadeias de valor, desde que suportada por políticas públicas, incentivos à inovação e investimentos na indústria de transformação (Hossain *et al.*, 2022).



Figura 3 – Colheita mecânica do sorgo (<https://www.brevant.com.br/>, s.d.).

2.4 Necessidades de água

Uma das principais vantagens do sorgo reside na sua elevada tolerância à seca, o que o diferencia de outros cereais, como o milho e o trigo. O sorgo necessita, em média, de 380 a 600 mm de água durante o seu ciclo de cultivo, dependendo da variedade e das condições ambientais, valor significativamente inferior ao requerido por outras culturas similares, mais exigentes em termos hídricos. Esta eficiência hídrica resulta da sua capacidade fisiológica de reduzir a perda de água por evapotranspiração, adaptando-se a solos secos e climas quentes. Embora o regadio possa aumentar substancialmente a produtividade do sorgo, a sua principal aptidão está precisamente na produção em condições de sequeiro, tornando-o uma cultura estratégica para regiões com restrições no recurso hídrico (Coelho *et al.*, 2022).

2.5 Vantagens e desvantagens da cultura face a outros cereais

O sorgo apresenta diversas vantagens competitivas quando comparado com outros cereais utilizados na produção de bioetanol e na alimentação:

Vantagens:

- Elevada resistência à seca e a temperaturas elevadas, permitindo o cultivo em áreas marginalizadas para outras culturas.
- Adaptabilidade a solos com baixa fertilidade, reduzindo a necessidade de insumos e os custos de produção.
- Versatilidade no aproveitamento, pois pode ser utilizado tanto para a produção de grãos como de biomassa, para bioenergia.
- Menor impacto ambiental devido à sua eficiência no uso de água e menor necessidade de fertilizantes.

Desvantagens:

- Mesmo em condições ótimas de cultivo, o rendimento em grão pode ser inferior ao do milho, o que pode limitar a competitividade económica em determinadas regiões.
- A qualidade do grão para a produção de bioetanol pode variar, exigindo processos industriais mais específicos, para otimizar a conversão.
- Existência de pragas e doenças específicas que, embora controláveis, requerem monitorização constante.
- Infraestruturas de processamento e cadeia logística ainda pouco desenvolvidas em muitos países, incluindo Portugal, dificultando a sua valorização económica (Salvati, 2023).



Figura 4 – Panículas de plantas de sorgo (<https://jaminealimentos.com/>, 2017).

3. O processo de produção de bioetanol a partir de matérias-primas amiláceas

3.1 Pré-tratamento das matérias-primas

O pré-tratamento tem como finalidade preparar as matérias-primas amiláceas para uma conversão mais eficiente do amido em açúcares fermentáveis. Trata-se de uma etapa essencial para maximizar a eficiência do processo, reduzir o consumo energético nas etapas seguintes e evitar danos em equipamentos.

Limpeza

Antes de qualquer transformação, a matéria-prima bruta é sujeita a processos de limpeza, com vista à remoção de impurezas, tais como areia, palhas, grãos de outras espécies e outras substâncias estranhas. Esta operação é fundamental para prevenir o desgaste ou entupimento de sistemas mecânicos e assegurar a qualidade microbiológica do produto final.

Moagem ou trituração

De seguida, procede-se à redução do tamanho das partículas da matéria-prima, numa etapa designada por moagem ou trituração. Este processo é essencial para a otimização das fases subsequentes da transformação industrial e consiste na

fragmentação mecânica dos materiais, normalmente através de equipamentos como trituradores, moinhos de martelos, de rolos ou de facas, consoante a natureza da matéria-prima.

O principal objetivo desta operação é o de aumentar a área de superfície específica do amido presente no material, o que favorece uma interação mais eficaz com a água e o calor nas etapas seguintes, em particular durante a gelatinização (Barros, *et al.*, 2023). A trituração promove, assim, uma hidrólise mais eficiente, contribuindo para a modificação da estrutura do amido, tornando-o mais acessível e funcional nos processos tecnológicos subsequentes.

Para além disso, a uniformização do tamanho das partículas permite uma maior homogeneidade da mistura, melhorando o controlo de qualidade, o desempenho térmico e a consistência do produto final. Este cuidado com a preparação da matéria-prima é determinante para assegurar a eficácia global do processo produtivo e a obtenção de resultados de elevada qualidade.

Hidratação e gelatinização

Em certas configurações industriais, pode ser necessário efetuar uma etapa de pré-cozimento ou hidratação térmica da pasta de amido (Wang, *et al.*, 2021). Este aquecimento em meio aquoso conduz à gelatinização do amido, fenómeno pelo qual os grânulos amiláceos absorvem água, incham e rompem. Este passo é particularmente importante para matérias-primas com elevada densidade amilácea e estrutura celular resistente.

3.2 Hidrólise e sacarificação do amido

Hidrólise do Amido

A hidrólise do amido consiste na quebra das ligações glicosídicas entre as unidades de glicose, sendo esta conversão fundamental para transformar o amido em açúcares mais simples, como glicose, maltose ou dextrinas. Este processo pode ser realizado por via ácida, térmica ou enzimática. No presente trabalho, recorreu-se à hidrólise enzimática, por ser mais específica, eficiente e ambientalmente sustentável.

Antes da hidrólise enzimática, o amido do sorgo foi sujeito a uma etapa de gelatinização, realizada através do aquecimento em meio aquoso. Esta etapa

promove a rutura da estrutura granular do amido, tornando-o mais acessível à ação das enzimas (Busic, 2018).

Sacarificação do Amido

A sacarificação do amido do sorgo é uma etapa crucial no processo de conversão de biomassa amilácea em açúcares fermentáveis, sobretudo quando o objetivo é a produção de bioetanol, xaropes ou outros derivados industriais. Este processo consiste na hidrólise do amido — um polissacarídeo de reserva presente em abundância nos grãos de sorgo — em açúcares simples, principalmente glucose e, em alguns casos, maltose (Najiah, *et al.*, 2017).

Como já mencionado anteriormente, a sacarificação ocorre geralmente após a gelatinização do amido, que envolve a aplicação de calor e água, promovendo a rutura das ligações intermoleculares e o inchaço dos grânulos de amido. Esta prévia modificação física torna o amido mais acessível à ação enzimática.

No sorgo, a presença de compostos fenólicos, como os taninos, pode interferir com a atividade enzimática, sendo por vezes necessário aplicar tratamentos adicionais para aumentar a eficiência do processo.

Em suma, a sacarificação do amido do sorgo representa um passo fundamental para a valorização desta cultura como matéria-prima renovável em processos industriais sustentáveis (Busic, 2018).

3.3 Fermentação alcoólica

A fermentação alcoólica do sorgo é um processo biológico, no qual os açúcares presentes na planta são convertidos em etanol e dióxido de carbono, através da ação de leveduras e/ou bactérias. Esse processo acontece na ausência de oxigénio.

O sorgo pode ser utilizado na sua forma sacarina (onde se extrai o sumo do caule, rico em açúcares) ou na forma granífera (onde, como já referido, os grãos ricos em amido requerem uma etapa de hidrólise para transformar o amido em açúcares fermentáveis). Após a obtenção dos açúcares, estes são submetidos ao processo de fermentação, geralmente a uma temperatura entre 30 °C e 35 °C, e com um pH em torno de 5.

Durante a fermentação, os açúcares são transformados principalmente em etanol (álcool etílico) e dióxido de carbono.

Este processo normalmente demora, em regra, entre 24 e 72 horas.

O sorgo destaca-se como matéria-prima não só pela sua resistência climática, mas também pelo bom rendimento em açúcares fermentáveis (Thatiyamanee, *et al.*, 2025).

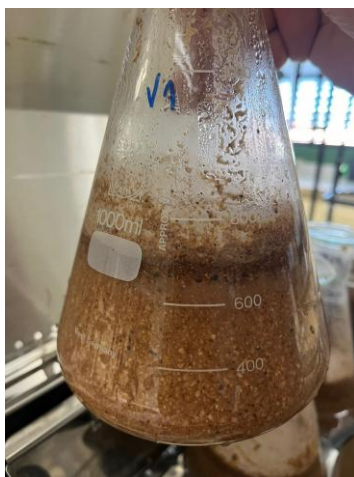


Figura 5 – Erlenmeyer com fermentação de Sorgo em curso (imagem do autor).

3.4 Destilação e processos complementares

Concluída a etapa de fermentação alcoólica do sorgo, o produto assim obtido, conhecido como mosto fermentado, contém etanol misturado com água, resíduos celulares, sais, ácidos orgânicos, entre outros componentes. Para a separação do etanol com fins energéticos ou industriais, recorre-se à técnica da destilação, processo fundamental na purificação do álcool produzido.

A destilação baseia-se na diferença dos pontos de ebulição dos componentes da mistura. O etanol possui um ponto de ebulição de aproximadamente 78,4 °C, inferior ao da água (100 °C), o que permite a sua separação por vaporização, seguida de condensação. Em sistemas laboratoriais de pequena escala, utiliza-se frequentemente a destilação simples, mas, em contexto industrial, são aplicadas colunas de destilação fracionada, muitas vezes em regime contínuo, o que permite maior eficiência energética e melhor separação dos componentes (MAYER, *et al.*, 2014).

O etanol obtido após a destilação, que, em ambiente industrial, atinge teores que podem variar entre 92% e 96% volume em volume (V/V), é designado como

etanol hidratado. Para aplicações que exigem maior pureza, como o uso como biocombustível em motores térmicos ou em certos processos químicos, é necessária uma fase adicional de desidratação, a fim de remover a água residual.

Paralelamente à destilação, importa considerar um conjunto de processos complementares que contribuem para a valorização integral da matéria-prima e a minimização de impactos ambientais. Um dos principais subprodutos da fermentação é a vinhaça, um efluente líquido com elevada carga orgânica. A sua gestão deve ser cuidadosamente estudada, sendo comum a sua utilização como fertilizante ou como substrato em digestores anaeróbios, para produção de biogás. Mas, à semelhança do que acontece na produção de etanol de milho, a utilização mais comum deste resíduo consiste na sua transformação num co-produto utilizado como componente em rações animais, devido ao seu teor em fibras, proteína e outros nutrientes residuais – constituindo os chamados *DDGS*.

A integração destes processos de produção de etanol e de *DDGS*, numa abordagem de biorefinaria, permite uma utilização mais eficiente dos recursos, contribuindo para a sustentabilidade económica, energética e ambiental da cadeia produtiva do etanol a partir do sorgo (Weinwurm, *et al.* 2013). Para além da produção de combustível, a indústria pode ainda explorar a obtenção de compostos de valor acrescentado, como ácidos orgânicos, proteínas, pigmentos naturais ou extratos fenólicos, presentes em menores concentrações na biomassa residual.

Em suma, a destilação, associada aos processos complementares de valorização e tratamento de resíduos, representa uma fase crítica na cadeia de produção do etanol a partir do sorgo. A sua otimização técnica e ambiental é essencial para garantir a viabilidade desta alternativa energética, especialmente em regiões onde o sorgo se apresenta como uma cultura adaptada e sustentável (Chen. *et al.*, 2021).

4. Ensaio de avaliação do potencial de produção de bioetanol

4.1 Variedades de sorgo-grão utilizadas

No âmbito deste trabalho, foram utilizados dois tipos de sorgo-grão: o sorgo vermelho e o sorgo branco. Esta escolha não foi aleatória, mas sim orientada pelo interesse crescente na sua utilização para a produção de bioetanol, bem como pelas suas diferenças em termos de composição química e comportamento industrial e agronómico.

O sorgo vermelho é conhecido pelo seu elevado teor de compostos fenólicos, nomeadamente taninos, que lhe conferem a coloração escura característica. Estes compostos, embora possam reduzir a digestibilidade quando o grão é destinado à alimentação animal, não representam um obstáculo significativo na produção de bioetanol (Impa, *et al.*, 2023). A sua boa resistência a condições ambientais adversas – como a seca, solos pobres e variações de temperatura – torna-o particularmente vantajoso em regiões com recursos hídricos limitados. Além disso, a sua estabilidade produtiva e adaptabilidade contribuem para o seu interesse enquanto matéria-prima para fins energéticos (Xiao, *et al.*, 2021).

Já o sorgo branco apresenta um perfil bastante diferente. Com baixos teores de taninos e uma elevada concentração de amido fermentável, esta variedade revela-se especialmente eficaz na produção de bioetanol (Ramírez, Ferrari, Lareo, 2016). O processamento industrial do sorgo branco tende a ser mais simples e eficiente, uma vez que a ausência de inibidores naturais favorece a atividade das leveduras

durante a fermentação alcoólica. Além disso, o seu grão claro e de sabor neutro tem uso frequente na alimentação humana e na indústria alimentar.

A utilização destas duas variedades neste estudo teve como principal objetivo analisar o seu comportamento e desempenho no contexto da produção de bioetanol. Esta abordagem permite compreender quais os materiais genéticos mais adequados para fins energéticos, tendo em conta, não apenas o rendimento em açúcares fermentáveis, mas também a eficiência do processo de conversão alcoólica, não esquecendo a produtividade agrícola e os custos de cultivo.



Figura 7 – Aspeto do Grão de Sorgo Vermelho (<https://www.mercadolivre.com.br/,s.d.>).



Figura 6 – Aspeto do Grão de Sorgo Branco (<https://www.naturitas.pt/,s.d.>).

4.2 Pré-tratamento, hidrólise, sacarificação e fermentação

Pré-tratamento

No início da experiência, procedeu-se à remoção manual de impurezas visíveis presentes nos grãos de sorgo, tais como fragmentos de milho e outros materiais estranhos, de forma a garantir a pureza e uniformidade das amostras a utilizar. Esta etapa foi fundamental para evitar interferências nos processos posteriores de trituração, hidrólise e fermentação.

Foram selecionadas seis amostras no total: três amostras de sorgo branco e três amostras de sorgo vermelho, sendo que cada uma continha 400 gramas de grão integral limpo.

Em seguida, todas as amostras foram sujeitas a trituração mecânica durante 5 minutos, utilizando a velocidade 8 (de um máximo de 10) de um processador de alimentos, até que o material moído apresentasse uma textura suficientemente fina para passar por um crivo de 2 mm. Esta trituração foi realizada individualmente para cada amostra, assegurando a sua correta identificação e separação.

Após a moagem, foram pesadas 320 gramas de cada amostra triturada, as quais foram transferidas para seis copos de precipitação, um para cada amostra. Foram de seguida adicionados 680 ml de água destilada a cada copo, totalizando 1 kg de mistura por amostra (assumindo a densidade da água destilada como 1 kg/L). Esta mistura tinha, pois, uma concentração de sólidos de 32% (ou 0,32).

Posteriormente, os seis copos de precipitação foram colocados num banho-maria termostaticado, à temperatura constante de 85 °C, onde permaneceram durante cerca de 4 horas. Durante este período, as amostras foram sujeitas a agitação contínua (por movimento de translação), permitindo a ocorrência do processo de gelatinização do amido. Este fenómeno ocorre quando, sob o efeito combinado do calor e da água, a estrutura cristalina dos grânulos de amido se rompe, tornando os polissacarídeos mais acessíveis à ação enzimática na etapa seguinte.

Este pré-tratamento teve como principal objetivo preparar as amostras para a hidrólise enzimática, aumentando a disponibilidade do amido.



Figura 8 – Vista superior dos copos de precipitação em banho termostaticado (imagem do autor).

Hidrólise e Sacarificação

Nesta etapa, começámos por adicionar 1 ml da enzima alfa-amilase a cada copo de precipitação. A enzima utilizada é da marca DSM, com o nome comercial Mats L Classic, sendo uma α -amilase que se apresenta na forma líquida e com uma atividade enzimática igual ou superior a 7400 unidades por grama. A alfa-amilase tem uma temperatura ideal de funcionamento entre os 70 e os 100 graus Celsius, e optámos por trabalhar a 85 °C, que é um valor dentro deste intervalo ótimo. Mantivemos esta temperatura durante 60 minutos, para que a enzima pudesse atuar eficientemente, quebrando as ligações glucosídicas do tipo α -1,4 da amilose,

características das cadeias lineares do amido em moléculas mais pequenas, facilitando a sua posterior transformação.

Após esta primeira fase, deixámos a solução arrefecer até cerca de 60 °C, temperatura mais adequada para o funcionamento da próxima enzima que iríamos adicionar. Medimos o pH da mistura e verificámos que o mesmo apresentava valores em torno de 5,6, um valor que se situa dentro da faixa adequada para o funcionamento da segunda enzima.

De seguida, acrescentámos 7 ml da enzima glucosidase, por meio do produto comercial Amigase Mega L, também da marca DSM. Esta enzima é também conhecida como glucan-1,4- α -glucosidase, e no caso deste produto comercial tem uma atividade mínima de 3600 unidades por grama. Esta enzima tem como função principal converter os oligossacarídeos resultantes da ação da alfa-amilase em glucose livre (ligações α -1,4), mas atua também sobre as ligações ramificadas da amilopectina (α -1,6), nos pontos de ramificação das cadeias de amido. Para garantir a sua melhor atuação, mantivemos a temperatura a 60 °C durante duas horas.

Este processo em duas etapas, envolvendo a alfa-amilase e a glucosidase, permitiu transformar o amido em açúcares simples e outros oligossacarídeos de baixo peso molecular, que poderão ser usados em processos posteriores, como a fermentação. O controlo da temperatura e do pH mostrou-se fundamental para o sucesso do processo, já que cada enzima tem condições ótimas específicas para atuar.



Figura 10 – Medição do pH (imagem do autor).

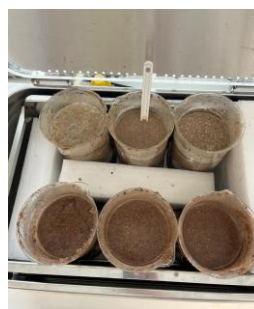


Figura 9 – Copos de precipitação depois de receberem a enzima (imagem do autor).

Fermentação

Continuando o processo de transformação bioquímica do amido do sorgo, passámos à etapa de fermentação alcoólica, com o objetivo de transformar os açúcares obtidos na sacarificação em etanol, através da ação de leveduras.

Continuando a trabalhar com as duas variedades de sorgo grão, vermelha e branca, começámos por preparar dois inóculos, um para cada tipo de sorgo. Para

isso, em dois copos de precipitação, colocámos 150 ml de água destilada em cada um. De seguida, adicionámos 150 ml de mosto sacarificado a cada copo — no primeiro, mosto (grão sacarificado) proveniente de Sorgo Branco, e no segundo, de Sorgo Vermelho. Estes 150 ml foram constituídos por 50 ml de cada uma das três amostras preparadas anteriormente, assegurando uma representação equilibrada nos inóculos de cada variedade utilizada.

Após esta preparação base, adicionámos 3 gramas de levedura seca (BYOSAL HS 1, da marca Enartis; www.enartis.com) a cada copo de precipitação, para garantir o início do processo fermentativo, e 3 gramas de aditivo (BYOSAL HS 2, também da Enartis), com uma composição de 61,8% de sulfato de amoníaco, 38% de fosfato de amónio e 0,2% vitamina B1 em cada um dos inóculos. Este aditivo teve como função melhorar as condições de multiplicação e desenvolvimento das células de levedura, fornecendo nutrientes adicionais, produzindo um inóculo adequado e otimizando a fermentação.

Com os ingredientes assim combinados, procedemos à agitação de cada inóculo durante aproximadamente um minuto, utilizando uma placa de aquecimento com agitação magnética, à velocidade de cerca de 500 rotações por minuto (rpm). Esta agitação permitiu uma homogeneização eficiente, assegurando a correta mistura da levedura e dissolução do aditivo na mistura de água e mosto.

Após esta etapa, distribuímos cada um dos inóculos por três Erlenmeyer com 1L de capacidade, resultando assim em três Erlenmeyer com inóculo preparado com Sorgo Branco e três com inóculo de Sorgo Vermelho, identificados como B1, B2 e B3, e V1, V2 e V3, respetivamente. Cada biorreator recebeu 100 ml do inóculo correspondente (com 50% de mosto preparado a partir do sorgo branco ou de sorgo vermelho, consoante o caso).

Posteriormente, adicionámos 600 ml de mosto de amido sacarificado a cada Erlenmeyer, correspondente ao mesmo tipo de sorgo utilizado no inóculo (Branco ou Vermelho). Como explicado anteriormente, este mosto foi preparado previamente com uma amostra de 320 gramas de farinha de sorgo por cada litro, o que significa que, nos 600 ml adicionados a cada Erlenmeyer, estavam presentes aproximadamente 192 gramas de farinha de sorgo ($600 \times 0,32 = 192$ g).

Considerando também os 100 ml de inóculo que foram adicionados, e que continham cerca de 16 gramas de farinha de sorgo ($50 \times 0,32 = 16$ g), podemos afirmar que cada Erlenmeyer, ou biorreator, continha no total aproximadamente 208 gramas de farinha de sorgo. Esta composição garantiu uma base rica em açúcares fermentáveis, ideal para suportar uma fermentação eficiente ao longo do período de duração da mesma.

Com os seis Erlenmeyers preparados (três com Sorgo Branco e três com Sorgo Vermelho), colocámo-los num banho-maria termostaticado, à temperatura constante de cerca de 35 °C, ambiente favorável ao crescimento e atividade das leveduras.

Para acompanhar a evolução da fermentação, realizámos medições periódicas de peso de cada Erlenmeyer com o objetivo de determinar a quantidade de dióxido de carbono (CO_2) libertado. A perda de massa dos frascos ao longo do tempo corresponde à libertação de CO_2 , um subproduto natural da fermentação alcoólica. Estas medições foram feitas ao longo de cinco dias consecutivos, até observarmos uma estabilização do peso dos biorreatores, sinal de que a fermentação estava a atingir o seu ponto final.

Ao fim desses cinco dias, considerámos a fermentação concluída, e os Erlenmeyers foram retirados do banho termostatizado e armazenados a uma temperatura de cerca de 4 °C, para posterior destilação.



Figura 12 – Erlenmeyers em fermentação no banho maria.



Figura 13 – Aditivo utilizado (imagem do autor).



Figura 11 – Pesagem da levedura utilizada (imagem do autor).

4.3 Destilação

1Após a conclusão do processo de fermentação, procedeu-se à separação do etanol contido na mistura fermentada através de um sistema de destilação com refluxo. Esta técnica de separação baseia-se na diferença de pontos de ebulição entre os componentes presentes na mistura líquida, neste caso, entre o etanol (com ponto de ebulição em torno de 78,4 °C) e a água (100 °C) e permite uma separação dos compostos voláteis através de múltiplos ciclos de vaporização e condensação no interior da coluna de fracionamento.

Neste contexto, foram realizadas seis destilações independentes, cada uma utilizando uma amostra de 500 mL da mistura fermentada obtida anteriormente. Em cada uma das seis destilações foram colocadas seis esferas de vidro no balão de destilação, com o objetivo de tentar obter uma ebulição mais controlada e uniforme. As esferas funcionaram como núcleos de ebulição, favorecendo a libertação contínua dos vapores e evitando a ocorrência de ebulições súbitas ou projeções

indesejadas da solução. Esta medida simples revelou-se extremamente eficaz para manter uma destilação estável ao longo de todo o processo.

O sistema consistia num balão de fundo redondo acoplado a uma Coluna de Vigreux, ligada a um condensador simples com circulação de água fria. A mistura foi aquecida, por meio de uma manta de aquecimento, de forma gradual e cuidadosamente monitorada. Observou-se o início da ebulição próxima dos 78 °C, o que indicava a volatilização preferencial do etanol. Os vapores subiam pela coluna, onde parte deles era condensada e retornava ao balão, provocando o efeito de refluxo, enquanto a fração mais volátil prosseguia até ao condensador, sendo então recolhida num Erlenmeyer apropriado. Este processo de refluxo contínuo favoreceu a obtenção de um destilado enriquecido em etanol, uma vez que os componentes com ponto de ebulição mais elevado (como a água) tendiam a permanecer na fase líquida por mais tempo.

Apesar da elevada eficiência do sistema, é importante referir que a separação completa entre etanol e água não é possível apenas com destilação, devido à formação de uma mistura azeotrópica. Esta mistura ocorre quando os componentes atingem uma composição tal que a sua vaporização ocorre como se fossem um único composto, destilando juntos a cerca de 78,2 °C. Sendo assim, o produto obtido neste processo, apesar de muito enriquecido em etanol, ainda contém alguma percentagem de água.

A realização da destilação dos seis mostos fermentados, em grupos de três (uma por cada tipo de sorgo), todas conduzidas sob as mesmas condições e com o mesmo número de esferas de vidro em cada balão de destilação, permitiu assegurar a consistência e repetibilidade dos resultados. Em todas as destilações, o destilado apresentou características semelhantes: aparência límpida e incolor, mas com uma mistura de odores, em que sobressaiu o cheiro característico de etanol. Este comportamento consistente confirma a estabilidade do método aplicado e a relativa eficácia do sistema de destilação com refluxo na separação do etanol da solução fermentada.

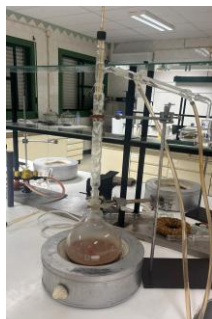


Figura 15 – Sistema de destilação fracionada com refluxo utilizado no ensaio (imagem do autor).



Figura 14 – Registo da temperatura com termómetro durante o processo de destilação (imagem do autor).

4.4 Avaliação da produção de álcool etílico

A determinação da produção de etanol foi realizada com base no registo da quantidade total de dióxido de carbono (CO₂) libertado durante a fermentação nos biorreatores B1, B2 e B3, correspondentes aos mostos preparados com sorgo branco, e nos biorreatores V1, V2 e V3, contendo mosto de sorgo vermelho. O acompanhamento da evolução do peso dos biorreatores foi feito de duas em duas horas (exceto no período noturno), ao longo da fermentação, que foi dada como concluída ao fim de 5 dias, altura em que já não se registava alteração do peso dos biorreatores.

Como é sabido, a conversão da glicose em etanol rege-se pela seguinte reação química:



A partir da massa total de CO₂ recolhida e da sua massa molar (44 g/mol), foi possível calcular o número de moles de CO₂ libertado ao longo da fermentação em cada biorreator. Assumindo a estequiometria da fermentação alcoólica, onde cada mole de CO₂ corresponde a 1 mol de C₆H₁₂O₆, determinou-se o número de moles de etanol produzidos.

Com base nestes valores, foi calculada a massa de etanol produzida, através da multiplicação daqueles pelo valor da massa molar do etanol (46 g/mol). Para obter o volume de etanol (expresso em mL), os diferentes valores de massa deste metabolito obtidos foram divididos pela densidade do etanol, que é, no caso do álcool etílico puro (e à temperatura de 20 °C), de 0,789 g/mL:

$$V_{\text{Etanol}} \text{ (mL)} = \text{Massa de etanol (g)} / \text{Densidade do etanol (g/mL)}$$

Recorde-se que, durante o processo de fermentação, cada lote de mosto foi preparado com 208 g de sorgo para 700 mL de meio de fermentação. Contudo, aquando da passagem para a fase de destilação, em que, por conveniência prática, foi empregue um volume de apenas 500 mL de mosto, apenas 160 g de sorgo foram utilizados de cada biorreator, correspondentes ao volume mais reduzido de mosto efetivamente destilado. Para estimar o volume máximo teórico de etanol produzido com esta quantidade mais reduzida massa de sorgo, foi aplicada uma correção proporcional:

$$V_{\text{Máximo de etanol corrigido}} \text{ (mL)} = (160 \text{ g}) / (208 \text{ g}) \times \text{Volume de etanol calculado}$$

Após a destilação, foi determinada a graduação alcoólica de cada biorreator com recurso a um pesa-aguardente do tipo Cartier (da marca Hebel). No entanto, uma vez que a medição foi efetuada a uma temperatura ambiente de 35 °C, e o equipamento é calibrado para 20 °C, recorreu-se à tabela oficial de correção do título alcoolométrico por efeito da temperatura, para ajustar adequadamente os valores obtidos.

Importa referir que o destilado final correspondia a uma mistura azeotrópica de etanol e água, não representando etanol puro. Para estimar o volume equivalente de etanol absoluto (100%), o grau alcoólico corrigido foi convertido da seguinte forma:

$$V_{\text{Etanol absoluto}} \text{ (mL)} = (\text{Grau alcoólico corrigido (\%)} / 100) \times \text{Volume de destilado (mL)}$$

Finalmente, o rendimento da produção de etanol foi calculado como a razão entre o volume de etanol absoluto obtido e o volume máximo teórico esperado, de acordo com a expressão:

$$\text{Rendimento da produção de etanol (\%)} = (\text{Etanol absoluto (mL)} / \text{Etanol máximo teórico (mL)}) \times 100$$

Este procedimento foi aplicado a cada um dos seis biorreatores, permitindo quantificar e comparar a eficiência da produção de etanol entre os dois tipos de sorgo utilizados.

4.5 Avaliação do rendimento em coprodutos – CO₂ e DDGS

A fermentação foi realizada nos seis Erlenmeyers com 700 mL de mosto, contendo 208 g de sorgo. Durante o processo fermentativo, a libertação de dióxido de carbono (CO₂) foi monitorizada através da medição da perda de massa, com pesagens feitas de duas em duas horas, exceto durante o período noturno. A perda de massa registada foi atribuída à libertação de CO₂, segundo a equação que representa a reação da fermentação alcoólica:



Após a conclusão da fermentação, o mosto fermentado foi transferido dos Erlenmeyers para os balões de destilação, de fundo redondo, de 2 L de capacidade, contendo 500 mL de mosto fermentado e, portanto, cerca de 160 g de sorgo. Em seguida foi realizada a destilação, com o objetivo de recuperar o etanol presente.

Uma vez terminado este processo, procedeu-se à separação das fases sólida e líquida da vinhaça, ou resíduo. Ambas as frações foram submetidas a secagem em estufa ventilada, embora separadamente. A fração sólida foi seca a 70 °C até peso constante, enquanto para a fração líquida foi utilizada uma temperatura de 105 °C.

Os resíduos sólidos resultantes dessas duas etapas foram posteriormente combinados, originando o coproduto final tecnicamente conhecido como Grãos Secos de Destilaria com Sólidos solúveis, ou, na sua designação comercial, *DDGS (Dried Distillers Grains with Solubles)*.

5. Análise dos resultados e conclusões

5.1 Análise crítica dos resultados obtidos

Produção de álcool etílico

Como já anteriormente mencionado, a realização deste trabalho experimental teve como principal objetivo o estudo do potencial do sorgo grão na produção de bioetanol e de alguns coprodutos.

Para tal, foram realizados ensaios em que foram utilizadas amostras de sorgo para produção de um mosto, com o objetivo de avaliar a eficiência do processo de fermentação alcoólica e de produção de bioetanol (álcool etílico), bem como quantificar os subprodutos gerados.

Em termos de destilado (bioetanol hidratado) efetivamente obtido após destilação, registaram-se os valores que constam na tabela 1.

Note-se que não foi possível obter o valor correspondente à amostra V2, devido a um incidente ocorrido durante o processo de destilação, com perda significativa de amostra do destilado.

Os valores de volume de destilado (etanol hidratado) obtidos foram sujeitos a tratamento estatístico. Uma vez que das amostras derivadas de sorgo branco tínhamos 3 resultados, enquanto das amostras de sorgo vermelho apenas foram obtidos 2 resultados, a normal Análise da Variância não foi considerado o procedimento mais correto.

Tabela 1 – Caracterização do destilado (bioetanol hidratado) e do etanol absoluto obtido em cada biorreator (mL) e por tonelada de grão (L/t).

Tipo de sorgo	Amostra	Destilado produzido (mL)	Grau alcoólico (V/V)	Etanol absoluto* (mL)	Etanol absol., médias (mL)	Bioetanol, média por t de grão (L/t)
Branco	1	52,0	89,0	44,12	36,63	229
Branco	2	41,0	84,0	32,66		
Branco	3	46,5	76,0	33,11		
Vermelho	1	42,5	92,5	37,69	32,58**	204
Vermelho	2	-	-	-		
Vermelho	3	62,0	50,0	27,46		

* - Etanol absoluto, corrigido para T = 20 °C e concentração de 100% (V/V); ** - média de apenas dois valores.

Em vez disso, foi feito um Teste F, para verificar a homogeneidade das variâncias das amostras, o que ficou comprovado (Anexo 1). De seguida, foi realizado um Teste T, para duas amostras com variâncias iguais, no sentido de saber se haveria diferenças significativas entre amostras B e V, para o nível de confiança de 95%. Deste teste resultou que não se pode afirmar que existam diferenças significativas entre os volumes de destilado correspondentes às amostras.

Logo, pelo tratamento estatístico dos dados foi possível verificar que o volume de destilado obtido nas amostras derivadas de sorgo branco (média de 46,50 mL/biorreator) não foi significativamente diferente das de sorgo vermelho (média de 52,25 mL/biorreator), pelo que a variedade de sorgo não teve influência no volume de destilado produzido.

O mesmo procedimento de análise foi seguido para o grau alcoólico das amostras de destilado (Anexo 2), tendo-se verificado que a concentração de álcool das amostras de sorgo branco (média de 83,0 % V/V) não foi significativamente diferente do das amostras de sorgo vermelho (média de 71,3 % V/V).

Também os valores do volume de etanol absoluto conseguido com cada tipo de grão (Anexo 3) foram tratados estatisticamente. A conclusão a que pudemos chegar foi semelhante à dos parâmetros anteriores, já que não se registaram diferenças significativas entre os dois tipos de sorgo, que originaram volume médios etanol absoluto de 36,63 mL/biorreator, no caso do sorgo branco, e de 32,58 mL/biorreator, para o sorgo vermelho. A partir destes valores calculámos ainda a produção média de etanol absoluto por cada tonelada de grão, para ambas as variantes utilizadas neste estudo. Assim, de acordo com os resultados destes ensaios, o potencial de produção de etanol absoluto a partir de sorgo foi de 229 e 204 L/t de grão branco e vermelho, respetivamente. Sendo um valor derivado da

produção média de cada um dos tipos de grão, estes valores também não poderão ser considerados significativamente diferentes entre si.

Contudo, estes resultados têm de ser considerados abaixo do que reporta a literatura, em termos de produtividade do sorgo grão em termos de álcool etílico. São reportados valores de rendimento em etanol da ordem dos 390 a 400 L/t (por exemplo por Serna-Saldívar, 2012, citando Chuck-Hernandez *et al.* (2009) e Pérez-Carrillo & Serna-Saldívar (2007)). A explicação para estes baixos valores poderá estar relacionada com a relativamente baixa tecnologia disponível para os ensaios, quer ao nível da fermentação, mas principalmente ao nível da destilação. Por outro lado, estes valores reportam-se em regra a etanol a 96% V/V, e não a etanol anidro.

Os resultados da produção de etanol absoluto permitiram, por outro lado, calcular o rendimento do processo de produção de etanol anidro no ensaio, com base no volume de etanol absoluto realmente obtido em relação ao valor máximo teórico, previsto pela libertação de CO₂ durante a fermentação. Assim, os rendimentos de produção, expressos em bioetanol absoluto, foram os que constam na tabela 2. Pelas razões anteriormente apresentadas, foi novamente excluída a amostra V2, por falta de dados.

Tabela 2 – Rendimento do processo de produção de etanol absoluto por cada biorreator (%).

Tipo de sorgo	Amostra	Rendimento (%)	Rendimento médio (%)
Branco	1	58,99	59,91
Branco	2	62,28	
Branco	3	58,46	
Vermelho	1	63,12	63,72*
Vermelho	2	-	
Vermelho	3	64,32	

* - Média de apenas dois valores.

Os valores de rendimento do processo em termos de etanol absoluto obtidos foram então também sujeitos a tratamento estatístico. Mais uma vez, dado que das amostras derivadas de sorgo branco foram conseguidos 3 resultados, enquanto das amostras de sorgo vermelho apenas foram obtidos 2 resultados, foi feito um Teste F, para verificar a homogeneidade das variâncias das amostras, o que ficou comprovado (Anexo 4). De seguida, foi realizado um Teste T, para duas amostras com variâncias iguais. Daqui resultou que não se pode afirmar que existam diferenças significativas entre o rendimento em etanol absoluto entre as amostras de sorgo branco e de sorgo vermelho. Portanto, pelo tratamento estatístico dos dados foi possível verificar que o rendimento do processo de produção de etanol absoluto foi, no caso do sorgo branco, em média de 59,91 %, rendimento não

significativamente diferente do sorgo vermelho (média de 63,72 %), pelo que a variedade de sorgo não teve influência neste parâmetro.

Mais uma vez, e confirmando o que foi dito a propósito do parâmetro anteriormente analisado, o rendimento foi baixo, já que, a nível industrial, os valores de rendimento da produção de etanol de sorgo são da ordem dos 90%.

De facto, todos estes valores fornecem uma referência para avaliar a eficiência dos processos conduzidos. A comparação direta entre os volumes reais obtidos e os teóricos máximos permite observar que a produção de etanol se situou, em todos os casos, abaixo do ideal. No entanto, este resultado encontra-se dentro do expectável para um processo laboratorial, no qual diversos fatores podem limitar a eficiência total. Entre esses fatores destacam-se a viabilidade das leveduras, pequenas variações nas condições ambientais, perdas naturais durante a destilação (como arrastamento de vapor ou condensação incompleta), e a não recuperação total do etanol produzido. Assim, podemos concluir que os processos utilizados, embora eficazes, não apresentaram uma eficiência absoluta, o que é comum neste tipo de ensaios.

Produção de CO₂ enquanto coproduto do processo de fermentação alcoólica.

Na tabela 3 apresentamos os valores de libertação de massa de CO₂ acumulada no final da fermentação.

Tabela 3 – Perda total de massa sob a forma de CO₂, em gramas, acumulada no final da fermentação.

Biorreator	Massa de CO₂ (g)
B1	73,29
B2	51,38
B3	55,50
V1	58,51
V2	45,18
V3	41,83

Os valores da tabela 3 foram sujeitos a uma Análise da Variância (Anexo 5), que revelou que a média dos valores obtidos das amostras produzidas a partir de sorgo branco – 60,06 g – não foram significativamente maiores que as obtidas a partir do sorgo vermelho – 48,51 g (para um nível de confiança de 95%).

Produção de resíduo seco da vinhaça

As quantidades de resíduos obtidas dos vários biorreatores e, portanto, potencialmente transformáveis em *DDGS*, estão resumidas na tabela 4.

Tabela 4 – Massa de resíduos sólidos da vinhaça após secagem (g de MS/biorreator).

Tipo de sorgo	Amostra	Massa de resíduo (g de MS)	Massa média (g de MS)
Branco	1	84,33	102,57
Branco	2	112,83	
Branco	3	110,55	
Vermelho	1	109,21	114,63
Vermelho	2	111,71	
Vermelho	3	122,96	

Estes valores, em si mesmo, representam o potencial de produção de *DDGS* a partir da amostra de sorgo utilizadas nos biorreatores utilizados no ensaio. Estes valores foram sujeitos a uma Análise da Variância (Anexo 6), que revelou que a média dos valores obtidos das amostras produzidas a partir de sorgo vermelho não são significativamente diferentes das obtidas a partir do sorgo branco (para um nível de confiança de 95%).

Mas, em termos práticos, talvez mais interessante seja a conversão destes valores em termos de rendimento do grão de sorgo em *DDGS*, expresso em percentagem.

Tabela 5 – Rendimento em resíduos sólidos (% de matéria seca) por tonelada de grão de sorgo.

Tipo de sorgo	Amostra	Rendimento (%)	Valores médios (%)
Branco	1	52,71	64,11
Branco	2	70,52	
Branco	3	69,09	
Vermelho	1	68,26	71,64
Vermelho	2	69,82	
Vermelho	3	76,85	

Como é natural, também estes valores foram sujeitos a uma Análise da Variância (Anexo 7), que revelou que os valores do rendimento médio de ambos tipos de sorgo não são estatisticamente diferentes (para um nível de confiança de 95%).

Globalmente, os dados obtidos sugerem que o sorgo branco não difere do vermelho em termos de rendimento alcoólico e geração de subprodutos. As diferenças entre os valores reais e teóricos de etanol reforçam a importância da otimização dos parâmetros de fermentação e destilação, especialmente se se pretender escalar o processo para aplicação industrial. Este estudo fornece, assim, uma base a considerar para futuras investigações que visem melhorar a eficiência e a sustentabilidade na produção de bioetanol a partir de cereais como o sorgo.

5.2 Algumas conclusões

Os resultados obtidos ao longo deste estudo apontavam, inicialmente para a existência de alguma vantagem do sorgo vermelho, que aparentemente demonstrou um desempenho fermentativo ligeiramente superior ao sorgo branco, evidenciado pelos maiores rendimentos percentuais na conversão dos açúcares em etanol. Embora, em algumas amostras, o volume de etanol produzido pelo sorgo vermelho tenha sido inferior ao do sorgo branco, os rendimentos relativos indicavam uma maior eficiência na utilização do potencial fermentescível desta matéria-prima.

Contudo, o tratamento estatístico dos vários resultados acabou por evidenciar que afinal não foram registadas diferenças estatisticamente significativas entre os dois tipos de sorgo, para um nível de confiança de 95%.

Os valores de rendimento do processo de transformação do sorgo em etanol situaram-se entre 58% e 64%, o que é indicativo de uma eficácia realista dos processos de fermentação e destilação aplicados no contexto experimental, onde não se esperam eficiências da ordem dos 90 % e superiores, como acontece em ambiente industrial, devido a limitações operacionais e inerentes ao método. Esta situação é comum em trabalhos laboratoriais, onde variáveis como a homogeneidade do mosto, condições ambientais, e eficiência do equipamento influenciam diretamente os resultados.

Adicionalmente, a análise aos valores de produção de resíduos da vinhaça após secagem, diretamente proporcional ao subproduto *DDGS*, de elevado interesse na alimentação animal, revelou que o sorgo vermelho também não apresenta um rendimento mais elevado do que o sorgo branco, Tal facto parece apontar no sentido de que a utilização do sorgo, branco ou vermelho, na produção deste

coproduto, valorizando ainda mais o seu potencial na perspetiva de uma biorrefinaria, onde o aproveitamento integral da matéria-prima é fundamental para a sustentabilidade económica e ambiental do processo, parece ser interessante. Este coproduto, rico em proteína e fibra, pode constituir uma fonte de rendimento valiosa.

O acréscimo de rendimento poderá ser ainda potencialmente maior se aos *DDGS* somarmos o valor do CO₂ recuperável, de elevada pureza, com tantas utilizações com interesse económico para várias indústrias (bebidas gaseificadas, extintores de fogo, e outras), a que se juntam vantagens ambientais.

Importa também destacar que a diferença entre os valores de etanol obtidos experimentalmente. Estas etapas, embora funcionais, não alcançaram a eficácia máxima, sendo que melhorias ao nível do controlo de alguns parâmetros (temperatura e pH, por exemplo), tempo de fermentação, e recuperação do etanol podem contribuir para reduzir as perdas e aumentar o rendimento final. Esta otimização é particularmente importante para que o processo possa ser escalado e aplicado em contexto industrial, garantindo a sua viabilidade económica e operacional.

Em suma, o sorgo revelou-se uma matéria-prima promissora para a produção de etanol, apresentando um equilíbrio favorável entre rendimento alcoólico e aproveitamento de coprodutos. A sua utilização poderá contribuir para o desenvolvimento de processos bioenergéticos mais eficientes e sustentáveis, especialmente em regiões onde o cultivo de sorgo seja viável. Recomenda-se, no entanto, que futuros estudos se foquem na otimização dos processos tecnológicos envolvidos e na análise do impacto económico e ambiental da sua aplicação em larga escala.

Referências Bibliográficas

Barros *et al.*, 2023; citado em *Effect of Ball-Milling on Starch Crystalline Structure, Gelatinization Temperature, and Rheological Properties: Towards Enhanced Utilization in Thermosensitive Systems*. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2304-8158/12/15/2924>, conforme consulta de 28/06/2025.

Basic, 2018; citado por em *Bioethanol Production from Renewable Raw Materials and Its Separation and Purification: A Review*. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6233010/>, conforme consulta de: 27/06/2025

Chen. *et al.*, 2021; citado em *Valorization of sorghum distillery residue to produce bioethanol for pollution mitigation and circular economy*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0269749121007788>, conforme consulta de 01/07/2025.

Chuck-Hernandez, C., Perez-Carrillo, E. & Serna-Saldivar, S.O. (2009). *Production of bioethanol from steam-flaked sorghum and maize*, *Journal of Cereal Science*, Vol. 50, No. 1 (July 2009), pp. 131-137, ISSN 0733-5210.

Cherlinka, 2025; citado em *Growing Sorghum: Guide From Planting To Harvesting*, 2025. Disponível em: <https://eos.com/blog/growing-sorghum/> conforme consulta de: 27/06/2025.

Coelho, *et al.*, 2022; citado em *Cultivo do Sorgo*, 2015, Embrapa Milho e Sorgo. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/748777/1/Sorgo-Clima.pdf>, conforme consulta de: 26/06/2025.

EMBRAPA, s.d.; citado por Abramilho, 2023. *Curiosidades do Sorgo*. Disponível em <https://www.abramilho.org.br/curiosidades-do-sorgo/>, conforme consulta de 02/07/2025.

FAO, 2020; citado por FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em <http://www.fao.org/faostat/en/#home>, conforme consulta de 24/06/2025.

Hossain, *et al.*, 2022; citado em *Sorghum: A prospective crop for climatic vulnerability, food and nutritional security*, 2022. Disponível em: <https://eos.com/blog/growing-sorghum/> conforme consulta de: 26/06/2025.

Impa *et al.*, 2023; citado em *Comparative assessment of grain quality in tannin versus non-tannin sorghums in the sorghum association panel*. Disponível em: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20230224849> conforme consulta de 02/07/2025.

Jeswani, Chilvers e Azapagic, 2020; citado em *Environmental sustainability of biofuels: a review*. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/full/10.1098/rspa.2020.0351> conforme consulta: 27/06/2025

MAYER, *et al.*, 2014; citado em *Increasing efficiency in ethanol distillation on small scale*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/291324365_Increasing_efficiency_in_ethanol_distillation_on_small_scale, conforme consulta de 01/07/2025.

Najiah, *et al.*, 2017; citado em *Hydrolysis of Sorghum Starch for Ethanol Production*. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/270049330_Hydrolysis_of_sorghum_starch_for_ethanol_production, conforme consulta de 26/06/2025.

Perez-Carrillo, E. & Serna-Saldivar, S.O., 2007. *Effect of protease treatment before hydrolysis with alpha-amylase on the rate of starch and protein hydrolysis of maize, whole sorghum and decorticated sorghum*, *Cereal Chemistry*, Vol. 84, No. 6 (November/December 2007), pp. 607-613, ISSN 0009-0352

Ramírez, Ferrari, Lareo, 2016; citado em *Fuel ethanol production from commercial grain sorghum cultivars with different tannin content*. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0733521016300327>, conforme consulta de 02/07/2025.

Salvati, 2023; citado em Caracterização nutricional, química e bioativa de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) germinado e *in natura* e aplicação das farinhas em

produtos de panificação. Disponível em:
<https://bibliotecadigital.ipb.pt/entities/publication/0596e796-fd1c-4f9f-9e50-959617b8e929>, conforme consulta de: 28/06/2025.

Serna-Saldívar, S., Chuck-Hernández, C., Pérez-Carrillo, E. and Heredia-Olea, E. (2012). Sorghum as a Multifunctional Crop for the Production of Fuel Ethanol: Current Status and Future Trends, Bioethanol, Prof. Marco Aurelio Pinheiro Lima (Ed.), ISBN: 978-953-51-0008-9, InTech, Disponível em:
<https://www.intechopen.com/chapters/27350>, conforme consulta de 03/07/2025.

Thatiyamanee, *et al.*, 2025; citado em *Optimizing bioethanol production from sweet sorghum stem juice under very high gravity fermentation and temperature stress conditions*. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2588913324000632>, conforme consulta de: 26/06/2025

Wang, *et al.*, 2021; citado em *A review of structural transformations and properties changes in starch during thermal processing of foods*. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0268005X20329179>, conforme consulta de 29/06/2025.

Weinwurm, *et al.*, 2013; citado em *Evaluation of Sorghum Biorefinery Concepts for Bioethanol Production*. Disponível em: <https://www.aidic.it/cet/13/35/173.pdf>, conforme consulta de 02/07/2025.

Xiao, *et al.*, 2021; citado em *Sweet sorghum for phytoremediation and bioethanol production*. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1186/s42825-021-00074-z>, conforme consulta de 28/06/2025.

Anexos

Anexo 1

Volume de etanol hidratado destilado a partir de cada biorreator:

VDestil_B	VDestil_V
52,0	42,5
41,0	62,0
46,5	

Dado que numa só temos dois valores de uma das variedades, teremos de verificar se as variâncias das amostras são homogêneas (Teste F: duas amostras para variâncias). Com um valor de P maior que 0,05, as variâncias das amostras não diferem entre si. Em seguida, realizou-se um "Teste T: duas amostras com variâncias iguais", para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias das amostras B e V. O resultado foi negativo, porque o valor de P é superior a 0,05. Logo, as amostras não apresentam diferenças significativas.

Teste F: duas amostras para variâncias

	VDestil_B	VDestil_V
Média	46,5	52,25
Variância	30,25	190,125
Observações	3	2
gl	2	1
F	0,159105851	
P(F<=f) uni-caudal	0,129021532	
F crítico uni-caudal	0,05401662	

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as variâncias das amostras B e V.

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	VDestil_B	VDestil_V
Média	46,5	52,25
Variância	30,25	190,125

Observações	3	2
Variância agrupada	83,54166667	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	3	
Stat t	-0,68913911	
P(T<=t) uni-caudal	0,27012603	
t crítico uni-caudal	2,353363435	
P(T<=t) bi-caudal	0,540252059	
t crítico bi-caudal	3,182446305	

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as amostras B e V.

Anexo 2

Grau alcoólico dos destilados de cada biorreator:

GrauAlc_B	GrauAlc_V
89	92,5
84	50
76	

Dado que numa só temos dois valores de uma das variedades, teremos de verificar se as variâncias das amostras são homogêneas (Teste F: duas amostras para variâncias). Com um valor de P menor que 0,05, as variâncias das amostras diferem entre si. Em seguida, realizou-se um "Teste T: duas amostras com variâncias desiguais", para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias das amostras B e V. O resultado foi negativo, porque o valor de P é superior a 0,05. Logo, as amostras não apresentam diferenças significativas.

Teste F: duas amostras para variâncias

	<i>GrauAlc_B</i>	<i>GrauAlc_V</i>
Média	83	71,25
Variância	43	903,125
Observações	3	2
gl	2	1
F	0,047612457	
P(F<=f) uni-caudal	0,044461164	
F crítico uni-caudal	0,05401662	

P menor que 0,05; logo, há diferenças significativas entre as variâncias das amostras B e V.

Teste T: duas amostras com variâncias desiguais

	<i>GrauAlc_B</i>	<i>GrauAlc_V</i>
Média	83	71,25

Variância	43	903,125
Observações	3	2
Hipótese de diferença de média	0	
gl	1	
Stat t	0,544369085	
P(T<=t) uni-caudal	0,34131941	
t crítico uni-caudal	6,313751515	
P(T<=t) bi-caudal	0,682638821	
t crítico bi-caudal	12,70620474	

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as amostras B e V.

Anexo 3

Volume de etanol absoluto produzido por cada biorreator:

VEtAbs_B	VEtAbs_V
44,12	37,69
32,66	27,46
33,11	

Dado que numa só temos dois valores de uma das variedades, teremos de verificar se as variâncias das amostras são homogêneas (Teste F: duas amostras para variâncias). Com um valor de P maior que 0,05, as variâncias das amostras não diferem entre si. Em seguida, realizou-se um "Teste T: duas amostras com variâncias iguais", para verificar se existiam diferenças significativas entre as médias das amostras B e V. O resultado foi negativo, porque o valor de P é superior a 0,05. Logo, as amostras não apresentam diferenças significativas.

Teste F: duas amostras para variâncias

	VEtAbs_B	VEtAbs_V
Média	36,63	32,575
Variância	42,1257	52,32645
Observações	3	2
gl	2	1
F	0,805055569	
P(F<=f) uni-caudal	0,381028718	
F crítico uni-caudal	0,05401662	

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as variâncias das amostras B e V.

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	VolEtB	VolEtV
Média	36,63	32,575
Variância	42,1257	52,32645
Observações	3	2
Variância agrupada	45,52595	

Hipótese de diferença de média	0
gl	3
Stat t	0,658342622
P(T<=t) uni-caudal	0,278665537
t crítico uni-caudal	2,353363435
P(T<=t) bi-caudal	0,557331073
t crítico bi-caudal	3,182446305

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as amostras B e V.

Anexo 4

Rendimento de produção de cada biorreator:

RP_EtAb_B	RP_EtAb_V
58,99	63,12
62,28	64,32
58,46	

Teste F: duas amostras para variâncias

	<i>RP_EtAb_B</i>	<i>RP_EtAb_V</i>
Média	59,91	63,72
Variância	4,2829	0,72
Observações	3	2
gl	2	1
F	5,948472222	
P(F<=f) uni-caudal	0,278456003	
F crítico uni-caudal	199,5	

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as variâncias das amostras B e V.

Teste T: duas amostras com variâncias iguais

	<i>RP_EtAb_B</i>	<i>RP_EtAb_V</i>
Média	59,91	63,72
Variância	4,2829	0,72
Observações	3	2
Variância agrupada	3,095266667	
Hipótese de diferença de média	0	
gl	3	
Stat t	-2,37228336	
P(T<=t) uni-caudal	0,049150392	

t crítico uni-caudal	2,353363435
P(T<=t) bi-caudal	0,098300784
t crítico bi-caudal	3,182446305

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre as amostras B e V.

Anexo 5

Produção de CO2 em função das variedades B e V:

CO2_B	CO2_V
73,29	58,51
51,38	45,18
55,5	41,83

Anova: factor único

SUMÁRIO

Grupos	Contagem	Soma	Média	Variância
CO2_B	3	180,17	60,05667	135,5844
CO2_V	3	145,52	48,50667	77,85563

ANOVA

Fonte de variação	SQ	gl	MQ	F	valor P	F crítico
Entre grupos	200,10375	1	200,1038	1,875035	0,242746	7,708647
Dentro de grupos	426,8801333	4	106,72			
Total	626,9838833	5				

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre B e V.

Fcalc. < Fcrítico - Logo, não há diferenças significativas entre as variedades B e V.

Anexo 6

Produção de resíduo seco em função das variedades B e V:

RS_g_B	RS_g_V
84,33	109,21
112,83	111,71
110,55	122,96

Anova: factor único

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RS_g_B	3	307,71	102,57	250,8228
RS_g_V	3	343,88	114,6267	53,64583

ANOVA

<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	218,0448167	1	218,0448	1,432297	0,297471	7,708647
Dentro de grupos	608,9372667	4	152,2343			
Total	826,9820833	5				

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre B e V.

Fcalc. < Fcrítico - Logo, não há diferenças significativas entre as variedades B e V.

Anexo 7

Rendimento da produção de resíduo seco em função das variedades B e V:

RP_mm_B	RP_mm_V
52,71	68,26
70,52	69,82
69,09	76,85

Anova: factor
único

SUMÁRIO

<i>Grupos</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
RP_mm_B	3	192,3188	64,10625	97,97766
RP_mm_V	3	214,925	71,64167	20,9554

ANOVA







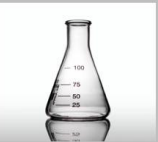











<i>Fonte de variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	85,17375651	1	85,17376	1,432297	0,297471	7,708647
Dentro de grupos	237,8661198	4	59,46653			
Total	323,0398763	5				

P maior que 0,05; logo, não há diferenças significativas entre B e V.

Fcalc. < Fcrítico - Logo, não há diferenças significativas entre as variedades B e V.

Anexo 8

Materiais e equipamentos utilizados nos ensaios

Crivo		Banho <u>Termostatzado</u>	
Proveta Volumétrica		Grão de Sorgo Branco	
Termómetro		Grão de Sorgo Vermelho	
<u>Ertenmeyer</u>		Balança	
Pipeta Volumétrica e Graduada		Caldeira Elétrica <u>Morphy Richards</u>	
Vareta de Vidro		Água Destilada	
Copo de Precipitação			
Balança			
Balão de fundo redondo			
Manta de aquecimento			
Coluna de <u>vigreux</u>			
Condensador de refluxo			
Mangueiras (para circulação de água)	