



CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

PROCESSOS E ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA FABRICAÇÃO DE ETANOL

LEANDRO SANTOS VILELA

**Morrinhos, GO
2017**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO – CAMPUS MORRINHOS**

CURSO DE LICENCIATURA EM QUÍMICA

**PROCESSOS E ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA
FABRICAÇÃO DE ETANOL**

LEANDRO SANTOS VILELA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como exigência para
obtenção do grau de Licenciado em
Química pelo Instituto Federal Goiano.

Orientador(a): Cinthia Maria Felício

Morrinhos - GO
Outubro, 2017

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

VL437p Vilela, Leandro Santos
PROCESSOS E ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS NA
FABRICAÇÃO DE ETANOL / Leandro Santos
Vilela;orientadora Cinthia Maria Felício. --
Morrinhos, 2017.
57 p.

Monografia (Graduação em Licenciatura em Química) --
Instituto Federal Goiano, Câmpus Morrinhos, 2017.

1. cana de açúcar. 2. fermentação. 3. destilação. 4.
qualificação profissional . I. Maria Felício, Cinthia
, orient. II. Título.



ATA DE DEFESA DE TC

Ao(s) 20 dia(s) do mês de Outubro do ano de dois mil e dezenove, em sessão pública na sala 01 da prédio licenciatura do Instituto Federal Goiano - Campus Morrinhos, foi realizada a arguição do projeto referente ao Trabalho de Curso (TC) do Curso de Licenciatura em Química, conforme descrito a seguir:

Aluno(a): Alexandro Santos Vilela

Título do Trabalho: Processo e análise físico-química na fabricação de etanol.

Orientador(a): Cynthia Maria Felício

Co-orientador(a): _____

A banca examinadora foi composta pelos seguintes membros: (Assinatura)

Cynthia Maria Felício
Prof.ª Dr.ª Cynthia Maria Felício - Orientadora

Bruna Luana Marcial
Prof.ª Dr.ª Bruna Luana Marcial

Reginaldo João de Oliveira
Prof. Esp. Reginaldo João de Oliveira

Após a arguição o trabalho foi: aprovado;
 aprovado com alterações;
 encaminhado para reformulação/reavaliação;
 reprovado.

A banca examinadora conferiu Nota: 08,06 (oito vírgula zero seis.....).

Observações:

11

As versões impressa e digital corrigidas (com ciência do orientador) deverão ser entregues no prazo estabelecido pelo professor responsável pela disciplina para que a nota seja validada no sistema acadêmico.

A sessão foi presidida pelo(a) professor(a) Cynthia Maria Felício

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho a minha esposa Verônica Cristina, aos meus pais Anilton Vilela e Rosidelma Vilela, e a minha irmã Juliana por todo apoio que recebi. Muito obrigado.

RESUMO

VILELA, L.S. **Processos e análises físico-químicas na fabricação de etanol**. 2017. 57p. Monografia (Curso de Licenciatura em Química). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Morrinhos, Morrinhos, GO, 2017.

Devido ao constante aumento na demanda de etanol como combustível alternativo, o setor sucroalcooleiro tem requerido profissionais mais qualificados e que compreendam o processo de produção. Na unidade sucroalcooleira, conhecer bem os processos físico-químicos e ter habilidades técnicas são importantes para melhorias, seja na qualidade ou no rendimento do produto final. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de auxiliar profissionais nas tomadas de decisão e adequações no processo de produção. Foi descrito o fluxograma com as etapas de produção e as reações físico-químicas envolvidas: cana-de-açúcar, pesagem, amostragem da cana, moagem, tratamento de caldo, evaporação, fermentação, centrifugação, destilação e produção do etanol. Assim, esse guia técnico poderá esclarecer melhor, subsidiar e fundamentar as atividades que já são realizadas, além de poder contribuir com o aprimoramento da aprendizagem de futuros profissionais ligados à área de químicas e afins, que já estejam exercendo profissões vinculadas a esta área e estudantes que se interessam pelo conteúdo abordado. Ou mesmo professores que a partir do conhecimento deste desejem a partir dos processos envolvidos contextualizar o seu ensino, ou até mesmo trabalhar por meio da educação CTS.

Palavras-chave: cana de açúcar, fermentação, destilação, qualificação profissional.

ABSTRACT

VILELA, L.S. **Physicochemical processes and analysis in the manufacture of ethanol.** 2017. 57p. Monography (Course of Degree in Chemistry). Federal Institute of Education, Science and Technology Goiano – Campus Morrinhos, Morrinhos, GO. 2017.

Due to the constant increase in the demand for ethanol as an alternative fuel, the sugar and alcohol industry requires professionals who understand more the productions process. The sugar-alcohol unit need professionals that know well how that physical-chemical processes are important to help for a better quality and yield of this produce. This work has an intention to guide in the decision-making and adjustments in the production process. Flowchart with production stages and physicochemical reactions involved: sugar cane, weighing, cane sampling, milling, broth treatment, evaporation, fermentation, centrifugation, distillation and produced ethanol are described. Thus, this technical guide can clarify, subsidize and substantiate the activities that are already carried out, besides being able to contribute to the improvement of the learning of future professionals related to the area of chemistry and the like, who are already practicing professions in this area and students who are interested to know more the content presented here. Another possibility, it is good subjects for teachers prepare their students by STEM during high school.

Keywords: sugar cane, fermentation, distillation, professional qualification, STEM.

ÍNDICE DE ABREVIACÕES

AEHC	Álcool Etílico Hidratado Carburante
AEAC	Álcool Etílico Anidro Carburante
ATP	Trifosfato de Adenosina
ART	Açúcares Redutores Totais
ATR	Açúcar Total Recuperável
BRIX	Sólidos Solúveis em Solução
CDPA	Comissão de Defesa da Produção do Açúcar
CENAL	Comissão Executiva Nacional do Álcool
CNAL	Produção do Conselho Nacional do Álcool
CONSECANA	Conselho de Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Etanol do Estado de São Paulo
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
CTS	Ciência, Tecnologia e Sociedade
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	Gases do Efeito Estufa
°GL	Grau Gay-Lussac
IAA	Instituto do Açúcar e do Álcool
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia
INPM	Instituto Nacional de Pesos e Medidas
IP	Índice de Preparo
MME	Ministério de Minas e Energia
NADH	Dinucleótido de nicotinamida e adenina
PCC	Pol % Cana
PCTS	Pagamento de cana por Teor de Sacarose
pH	Potencial Hidrogeniônico
Pol	Porcentagem de oligossacarídeos

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cana-de-açúcar	16
Figura 2. Mapa da área plantada de cana de açúcar em Goiás	18
Figura 3. Fluxograma de produção do etanol.....	24
Figura 4. Processo global do PCTS.....	25
Figura 5. Divisão dos caldos no processo de extração	27
Figura 6. Chegada do caldo no tratamento de caldo	28
Figura 7. Processo de caleação.....	29
Figura 8. Aquecedores em operação	30
Figura 9. Sistema de flasheamento em funcionamento	30
Figura 10. Decantador de caldo.....	31
Figura 11. Peneiras estáticas em funcionamento.....	32
Figura 12. Evaporadores em funcionamento em usina de etanol	33
Figura 13. Dornas	37
Figura 14. Tratamento do fermento na cuba	39
Figura 15. Aparelho de destilação do etanol	40
Figura 16. pHmetro para medição de pH	43
Figura 17. Equipamentos para análise de acidez.....	44
Figura 18. Refratômetro medidor de Brix	45
Figura 19. Sacarímetro	46
Figura 20. Redutec para determinação do ART	48
Figura 21. Centrífuga para determinação de concentrações.....	49
Figura 22. Microdestilador de Kjeldahl	50
Figura 23. pHmetro para etanol com vaso termostatizado	51
Figura 24. pHmetro para etanol com vaso termostatizado	52
Figura 25. Densímetro digital.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química da cana-de-açúcar	17
Tabela 2. Os estados brasileiros e suas respectivas áreas de plantio de cana-de-açúcar	17
Tabela 3. Composição da matriz energética mundial em 2005 (continua)	20
Tabela 4. Composição química média da vinhaça com diferentes mostos	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Cenário da produção de álcool no país de 1975 a 2015 (continua).....	19
Quadro 2. Especificações do etanol hidratado carburante.....	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Origem da Cana-de-Açúcar.....	15
2.2 Características e Composição Química da Planta.....	15
2.3 Estimativa da Área Cultivada.....	17
2.4 Produções de Etanol no Brasil.....	18
2.5 Vantagens do Uso de Biocombustíveis.....	20
3 OBJETIVOS.....	21
3.1 Objetivos Específicos.....	21
4 JUSTIFICATIVA.....	22
5 PERCURSO METODOLÓGICO.....	22
6 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ETANOL.....	23
6.1 Pesagem da Cana.....	24
6.2 Amostragem e Análise da Cana.....	25
6.3 Moagem da Cana.....	26
6.4 Tratamento de Caldo.....	28
6.5 Evaporação.....	33
6.6 Fabricação de Etanol.....	34
6.6.1 Mosto.....	34
6.6.2 Leveduras.....	34
6.6.3 Fermentação.....	36
6.6.4 Destilação.....	39
6.6.5 Etanol.....	39
6.6.6 Subprodutos na produção de etanol.....	41
7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS.....	42
7.1 Potencial Hidrogeniônico (pH).....	43
7.2 Acidez.....	44
7.3 Brix Refratométrico.....	45
7.4 Pol e Pureza.....	45
7.5 Teor Alcoólico em Mosto.....	46
7.6 Açúcares Redutores Totais (ART) em Mosto.....	47
7.7 Impurezas do Mosto.....	48

7.8 Concentração de Fermento (%) em Cuba, Dorna e Centrifuga.....	48
7.9 Teor Alcoólico de Cuba, Dorna, CO ₂ e Vinho Volante	49
7.10 Teor Alcoólico de Vinhaça e Flegmaça	50
7.11 Potencial Hidrogeniônico (pH) no Etanol Produzido.....	50
7.12 Condutividade do Etanol	51
7.13 Acidez Total e Alcalinidade no Etanol Produzido	52
7.14 Teor Alcoólico (INPM) no Etanol.....	52
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a cultura da cana-de-açúcar vem ganhando espaço considerável no cenário agrícola, uma vez que, com o aumento populacional a demanda por combustíveis e energia tem aumentado muito. A cana-de-açúcar possui grande importância econômica para o Brasil, pois é utilizada para produção de açúcar para consumo interno e exportação, e ainda a mesma também é utilizada na produção de biocombustíveis, que apresentam vantagens ambientais em relação aos outros combustíveis derivados do petróleo, por serem renováveis.

O tema biocombustíveis vem sendo bastante discutido, uma vez que, o preço do petróleo tem tanto efeito econômico, como gera impactos ambientais decorrentes de sua utilização, entre outros. Com isto, surge um aumento na demanda por estudos para viabilização de mudanças da matriz energética, não somente no Brasil, mas em todo mundo (MOTA et. al, 2009). São inúmeras as demandas e vantagens nacionais para a utilização de biocombustíveis, uma vez que os mesmos podem diminuir a dependência externa de petróleo, minimizar emissões veiculares principalmente nos grandes centros urbanos e ainda, minimizar a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera.

De maneira crescente, a atenção de pesquisadores, empresários industriais e governo tem se voltado em relação à produção do etanol, uma vez que esta apresenta uma série de vantagens para produção de biocombustíveis em larga escala no mundo. E deve ser vista como uma questão estratégica de desenvolvimento pelo governo, pois o país pretende atender a demanda internacional do produto, favorecendo sua comercialização, através da exportação dos combustíveis renováveis, produzidos internamente (MASIERO & LOPES. 2008).

No Brasil, o etanol vem sendo utilizado como combustível desde 1920, mas só a partir do movimento Proálcool, em 1975, (que foi concebido para garantir o fornecimento de energia, e apoiar a indústria açucareira pela diversificação da produção, depois da queda do preço do açúcar em 1974), que a longo prazo definiu seu papel, permitindo investimentos do setor privado na produção (LEITE & LEAL, 2007).

Atualmente, a tecnologia de produção de etanol no Brasil está desenvolvida e se consolida a cada dia, o potencial do biocombustível produzido pelo país fortifica a sua posição como potência regional com influência global. Com isso, pode-se afirmar que a produção de etanol no Brasil está sendo aprimorada, pois o país ocupa uma posição destacada na produção mundial de etanol, confirmando a tradição na cultura de cana-de-açúcar (KOHLHEPP, 2010).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Origem da Cana-de-Açúcar

O primeiro contato com uma planta que seria associada à essência de doçura, a cana-de-açúcar, foi na Nova Guiné, que mais tarde seria levada para a Índia, à região do Golfo de Bengala, onde têm-se os mais antigos registros de sua existência (MACHADO, 2015).

Os escribas comentaram que, quando Alexandre “o Grande” invadiu a Índia por volta de 327 a.C., os nativos daquela região mascavam uma cana magnífica, que parecia uma espécie de mel produzido sem ajuda das abelhas. Da Pérsia, a cana foi levada pelos árabes para a Espanha, Sicília, Marrocos, Egito e outras regiões mediterrâneas. Com a expansão do plantio da cana-de-açúcar na região do Mar Mediterrâneo, o consumo da mesma espalhou-se pela Europa no início do século XIII (FILHO, 2009).

As primeiras mudas de cana-de-açúcar foram trazidas da Ilha da Madeira, em Portugal, por Martim Affonso de Souza ao Brasil em 1532, e começou a cultivá-las na Capitania de São Vicente, onde se construiu o primeiro engenho de açúcar. Muitos outros engenhos ganharam força no Brasil, contudo foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e Bahia, onde os engenhos de açúcar se expandiram e multiplicaram (MACHADO, 2015).

2.2 Características e Composição Química da Planta

A cana-de-açúcar é uma gramínea perene, pertencente à família das gramíneas, que contém mais de 5.000 espécies de plantas, que perfilha de maneira abundante na fase inicial do desenvolvimento. As características de diferentes variedades definem o número de colmos por planta, a altura e o diâmetro do colmo, o comprimento e a largura das folhas e a arquitetura da parte aérea, sendo a expressão destes caracteres muito influenciados pelo clima, manejo e práticas culturais utilizadas (RODRIGUES, 1995).

A mesma pode atingir de 2 a 5 metros de altura, apresentando diferentes tonalidades de cor, sendo composta por água, açúcares que se encontram nos colmos, sendo a sacarose, o carboidrato predominante. São também abundantes e distribuídas por todo o vegetal, as fibras, com predominância nas partes mais duras. A composição química da cana é bastante variável quanto à proporção dos elementos, porém, quantitativa e qualitativamente, exibe regularidades em todas as variedades (SCHLITTLER, 2006).

Figura 1. Cana-de-açúcar



Fonte: Autor

As atuais variedades da cana-de-açúcar são híbridas e interespecíficas, onde em suas constituições genéticas podem ser encontradas as espécies de *Saccharium officinarum*, *Saccharium spontaneum*, *Saccharium sinense*, *Saccharium barberi*, *Saccharium robustum* e *Saccharium edule*, ou seja, 6 (seis) espécies do gênero *Saccharium*. A cana apresenta reprodução sexuada, no entanto, quando as plantas são cultivadas comercialmente, a forma de multiplicação é assexuada, através da propagação vegetativa. No sistema de reprodução de forma assexuada a fase de crescimento das mudas é lenta, semelhante aos de grãos de cereais com precoce crescimento, a partir de gemas-tronco. (HEINZ, 1987) No entanto, uma vez que a fase de crescimento adulto é estabelecida as plantas produzidas por esses dois métodos (sexuada e assexuada) são praticamente indistinguíveis (GALON et. al., 2009).

Sua composição química depende de diversos fatores que a influenciam, sendo eles a variedade do clima, do solo (levando em consideração suas propriedades físicas, químicas e microbiológicas), adubação, irrigação, sanidade da cultura, tratos culturais, florescimento, sistema de despalha, intensidade do desponte, tempo decorrido da última colheita, condições e tempo de armazenamento, etc. (OLIVEIRA, 2012). A Figura 2 evidencia os principais componentes da cana-de-açúcar.

Tabela 1. Composição química da cana-de-açúcar

Componente	Porcentagem
Fibra	10 – 16
Caldo	84 – 90
Caldo	
Água	75 – 92
Sólidos Solúveis	18 – 25
Sólidos Solúveis	
Açúcares	15,5 – 24
Não Açúcares	1,2 – 2,5
Açúcares	
Sacarose	14,5 – 24
Glicose	0,2 – 1,0
Frutose	0,0 – 0,5
Não Açúcares	
Orgânicos	0,8 – 1,8
Inorgânicos	0,2 – 0,7

Fonte: (OLIVEIRA, 2012, p.5)

2.3 Estimativa da Área Cultivada

O Brasil produziu 665,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar na safra 2015/2016, um aumento de cerca de 4,9% em relação à safra passada. A área destinada às atividades sucroalcooleiras durante esta safra foi de 8.654,2 mil hectares. Oito estados são responsáveis por 94,9% da produção nacional, conforme pode ser visto na tabela a seguir.

Tabela 2. Os estados brasileiros e suas respectivas áreas de plantio de cana-de-açúcar

Estado	Hectare	Porcentagem
São Paulo	4 498,3 mil	52%
Goiás	885,5 mil	10,4%
Minas Gerais	866,5 mil	10,1%
Mato Grosso do Sul	596,8 mil	7%
Paraná	515,7 mil	6%
Alagoas	323,6 mil	3,7%,
Pernambuco	254,2 mil	3%
Mato Grosso	232,8 mil	2,7%

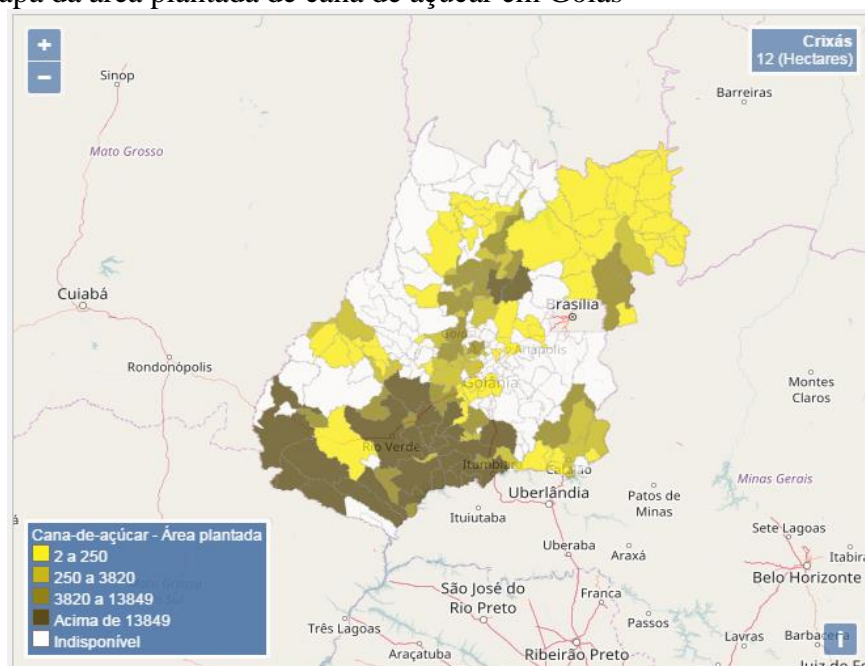
Fonte: (CONAB, 2016)

Perfazendo 5,1% da área nacional total, outros 14 estados possuem áreas inferiores a 1% (CONAB, 2016).

Nos últimos anos a produção de cana de açúcar vem ampliando novas fronteiras, em especial em Goiás, por apresentar infraestrutura vinculadas a produção de grãos, grandes áreas cultiváveis e a participação de políticas públicas que incentivam a implementação de unidades produtoras de etanol, conforme afirma Lima & Garcia (2011).

A Figura 3 apresenta a expansão do plantio de cana de açúcar em Goiás a partir dos levantamentos do IBGE de 2015, onde pode ser verificado uma intensificação na região de Morrinhos.

Figura 2. Mapa da área plantada de cana de açúcar em Goiás



Fonte: IBGE (2015)

2.4 Produções de Etanol no Brasil

No século XX, a produção brasileira teve um grande estímulo por ocasião da I Guerra Mundial, devido à destruição da indústria europeia de açúcar de beterraba. Em 1931, foi criada a Comissão de Defesa da Produção de Açúcar (CDPA), com a finalidade de comprar os excedentes de produção e manter o preço fixo. Em 1933, a CDPA foi extinta e foi criado o Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), como órgão controlador da produção, comercialização e distribuição da indústria açucareira e alcooleira do Brasil (FILHO, 2005).

A expansão dos biocombustíveis no Brasil data do início do século XX, quando começaram as primeiras experiências com a produção de energia a partir do açúcar. Com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), em 1933, apontava-se para o crescente desenvolvimento dessa tecnologia. Mas foi a partir da criação do Proálcool – Programa Nacional do Alcool, pelo Governo Federal, em 1975, que o Brasil se tornou responsável pelo

desenvolvimento pioneiro na área de biocombustíveis, com produção do etanol a partir da cana-de-açúcar (RODRIGUES, 2010).

O programa Proálcool passou por duas fases distintas: A primeira entre 1975 e 1979, tinha como foco produzir álcool para ser acrescentado à gasolina. A segunda fase a partir de 1980 teve por objetivo o abastecimento veicular dos motores movidos a este combustível, atendendo as demandas do país (FERNANDEZ et al., 1997).

Os avanços na produção deste combustível a partir do Programa Proálcool podem ser observados no quadro abaixo, desde seu lançamento no país até 2015:

Quadro 1. Cenário da produção de álcool no país de 1975 a 2015 (continua)

1975	Lançamento do programa, cujo empenho inicial era produzir etanol para adição na gasolina. Participação de grupos políticos, militares, industriais, acadêmicos e da mídia.
1978	Produção do Conselho Nacional de Álcool (CNAL) e da Comissão Executiva Nacional do Álcool (CENAL), para agilizar o programa. Proporção de carros produzidos no Brasil aumentaria de 0,46 para 26,8 em 1980 atingindo 76,1 em 1986.
1980	Subsídios governamentais expandiram a capacidade de usinas produtoras de etanol e instalação de usinas autônomas.
1984	Aproximadamente 94% dos veículos de passageiros foram abastecidos com Álcool, começo da crise do Proálcool devido à combinação de vários fatores como a estabilização dos preços de álcool, incerteza política, incremento na produção interna de diesel, mudanças políticas internacionais e o colapso da URSS.
1988	Queda significativa nos preços do petróleo coincide com escassez de recursos para subsidiar programas de estímulo aos energéticos alternativos.
1990	Crise do Proálcool com uma produção de 11,7 Bilhões de litros em 372 destilarias.
1993	A Lei n. 8.732 obriga uso de álcool anidro com aditivo da gasolina na faixa de 20 a 25%.

Quadro 1. Continuação

2003	A Volkswagen lança o motor flex fuel (biocombustível), com sistema desenvolvido pela Bosch. A popularização da tecnologia eleva o consumo de etanol.
2006	Vendidos cerca de 1,4 milhões de carros flex, 79% do total comercializado. Em 2007, essa participação sobe para 85,6%.
2008	25 bilhões de litros produzidos em 448 unidades. 5,16 bilhões destinados para exportação, 2 vezes a exportação da gasolina.
2010	Goiás se torna o segundo maior produtor de etanol do país e terceiro maior produtor de cana-de-açúcar.
2012	Goiás se torna o segundo maior produtor de cana de açúcar do país e se isolando como segundo maior produtor de etanol com 13,7% da produção do país.
2014	A produção de etanol no Brasil atinge a marca de 28,48 bilhões de litros de etanol sendo Goiás representado por 14,78% do total produzido.
2015	O percentual obrigatório do etanol anidro na gasolina passa a 27%. A produção de etanol no Brasil atingiu 30,5 bilhões de litros de etanol, sendo Goiás responsável por 15,4% do total.

Fonte: IBGE (2009); ÚNICA (2011, 2013, 2015, 2016); CONAB (2016)

2.5 Vantagens do Uso de Biocombustíveis

O esgotamento dos combustíveis de origem fóssil é algo cada vez mais preocupante, uma vez que, as mesmas possuem um peso de 80% na matriz energética mundial, sendo 35% de petróleo, 23% de carvão e 21% de gás natural, conforme a Tabela 2, apresentada a seguir:

Tabela 3. Composição da matriz energética mundial em 2005 (continua)

Fonte	Mundo (%)	Brasil (%)
Petróleo	35,3	43,1
Carvão Mineral	23,2	6,0
Gás Natural	21,1	7,5
Biomassa tradicional	9,5	8,5
Nuclear	6,5	1,8

Tabela 3. Continuação

Hidrelétrica	2,2	14,0
Biomassa moderna	1,7	23,0
Outras renováveis	0,5	0,1

Fonte: EMBRAPA (2006)

O uso moderno de fontes renováveis oferece um leque amplo de possibilidades para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuir emissões de gases de efeito estufa e promover desenvolvimento econômico sustentável. Neste sentido, foi o Brasil o pioneiro no uso de biocombustível em veículos automotores, tanto do tipo álcool etílico hidratado, para veículos projetados para seu uso, como álcool etílico tipo anidro, usado na mistura com a gasolina em proporções que variam entre 20 a 25% (KOHLHEPP, 2010).

Segundo a Environmental Protection Agency (EPA), em 2010, o etanol proveniente da cana-de-açúcar foi denominado biocombustível avançado, capaz de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) em no mínimo 61% se comparado com a gasolina. Para poder ser classificado como um combustível renovável, avançado, celulósico ou biodiesel de biomassa, os combustíveis devem alcançar percentuais ínfimos de redução de emissões de GEE ao longo de seus ciclos de vida, quando comparados com as emissões da gasolina e do diesel (RODRIGUES, 2011).

3 OBJETIVOS

Conhecer e compreender a importância dos processos físico-químicos na produção de etanol e o papel do controle analítico para a qualidade do produto final.

3.1 Objetivos Específicos

- Conhecer as etapas do processo de fabricação do etanol e os processos físico-químicos utilizados;
- Elaborar um guia técnico que possa ser utilizado como norteador na compreensão dos processos envolvidos na produção de etanol;
- Fornecer parâmetros que possam auxiliar em tomadas de decisões para a realização de adequações no processo de produção de etanol.

4 JUSTIFICATIVA

Diante da necessidade emergencial de minimizar a emissão de gases poluentes que provocam o efeito estufa, surgiram movimentos de políticas públicas que estimularam o uso de biocombustíveis, gerando uma crescente demanda por etanol, combustível 100% renovável, podendo ser hidratado, para uso direto como combustível, e o anidro, para mistura com a gasolina. Devido à demanda gerou um acréscimo de unidades produtoras de etanol nos últimos anos no Brasil, especialmente no estado de Goiás. Dentre outros, o município de Morrinhos foi selecionado como local pra instalação de uma usina de açúcar e etanol, muito pela logística e pelo potencial em relação à vasta área com fertilidade para atividade agropecuária. Nas unidades produtoras de etanol são usados processo físico-químicos que conferem qualidade ao produto final. Este trabalho busca refletir sobre os conhecimentos envolvidos no processo de produção do etanol, bem como características da produção e possíveis consequências desta atividade na região, fornecendo ao leitor conhecimento técnico sobre o etanol e sua produção.

Dessa forma, o presente trabalho apresenta informações importantes sobre o processo de produção de uma fonte energética renovável e menos poluente, apresentando reflexões e orientações importantes para a qualidade do produto final, podendo servir como um guia técnico básico sobre a produção de etanol que pode contribuir com o aprimoramento da aprendizagem de futuros profissionais ligados a área de química e afim, que possam ingressar na carreira sucroalcooleira, que já estejam exercendo profissões vinculadas a esta área ou ainda estudantes que se interessam no conteúdo abordado.

5 PERCURSO METODOLÓGICO

Este trabalho foi elaborado para servir de orientação nos processos de fabricação de etanol, contemplando todos os estágios, que se inicia na pesagem da cana, no qual se quantifica o peso da cana até o produto final, o etanol.

Todo processo segue o seguinte fluxograma das etapas de produção do etanol: Cana de Açúcar – Pesagem – Amostragem da Cana – Moagem – Tratamento de Caldo – Evaporação – Fermentação – Centrifugação – Destilação – Etanol Produzido.

Logo após a pesagem é realizado a amostragem da cana e sua análise de açúcar (ART), assim com o peso e a análise onde é possível quantificar o açúcar na cana que será determinante no rendimento e qualidade do produto final.

O primeiro processo físico que a cana recebe é a moagem, no qual passa por ternos onde é extraído o caldo da fibra. Após a extração, o caldo é direcionado ao Tratamento de

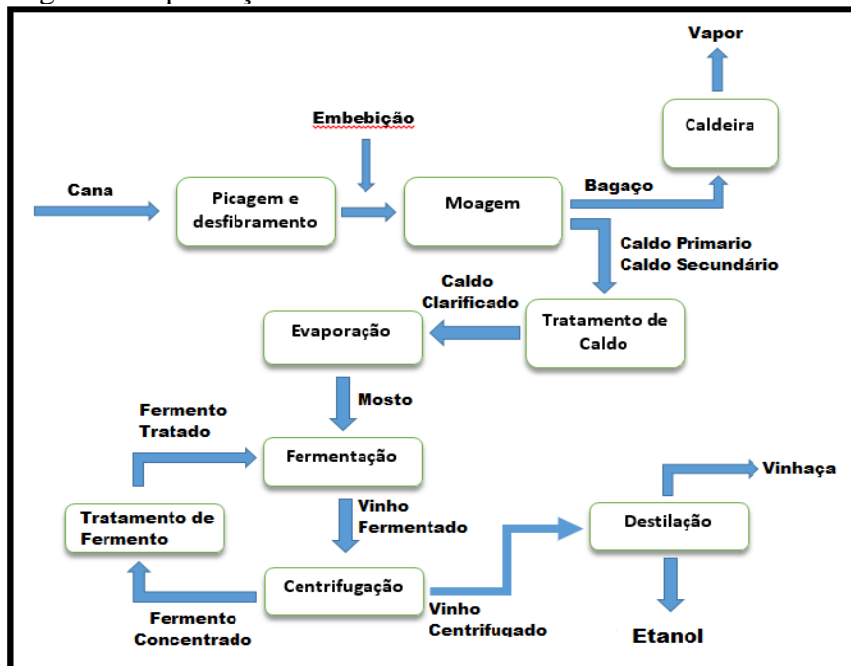
Caldo, onde recebe processos físicos e químicos, afim de clarifica-lo, extraindo suas impurezas para direcionamento a evaporação, onde se evapora a água contida no caldo, concentrando-o, e a partir desse momento ganhando a denominação de mosto, substrato para o fermento nas dornas, onde ocorre a fermentação. Após esse processo, denomina-se de vinho bruto, que é centrifugado, separando o fermento do vinho, onde o vinho é enviado para o aparelho de destilação, extraindo o etanol. Durante todo o processo são realizadas análises químicas laboratoriais para condução das etapas de produção e tendo elevada importância.

6 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ETANOL

A qualidade da matéria prima, cana-de-açúcar, é sem dúvida a questão mais importante para atingir produtividade e rendimentos industriais esperados. Essa característica da matéria prima procede em redução de custo com insumos, aumento da eficiência industrial e produtos finais de boa qualidade. Todo processo de fabricação de açúcar e álcool começa ainda na lavoura, pois o intervalo de tempo entre o corte e a moagem pode ocasionar em deteriorações da matéria prima, aumentando os níveis de dextrana, açúcares redutores e diminuindo os açúcares recuperáveis. As condições ambientais são fatores determinantes para o grau de deterioração, pois amentam em períodos quentes e úmidos, e menores em secos e frios. Portanto, é importante o sincronismo entre a colheita e o transporte para evitar fenômenos danosos à matéria prima (ALBUQUERQUE, 2011).

Abaixo está ilustrado o fluxograma da fabricação do etanol e descritos os procedimentos desde a chegada da cana-de-açúcar na indústria para início dos processos químicos, até a obtenção do produto final, o etanol.

Figura 3. Fluxograma de produção do etanol



Fonte: Autor

6.1 Pesagem da Cana

A quantificação da cana que adentra na indústria é de extrema importância e realizada através de balança tipo plataforma (rodoviária), que deve ter sua exatidão conferida anualmente por sistemas de calibração e certificada de acordo com as normas do INMETRO (CTC, 2005).

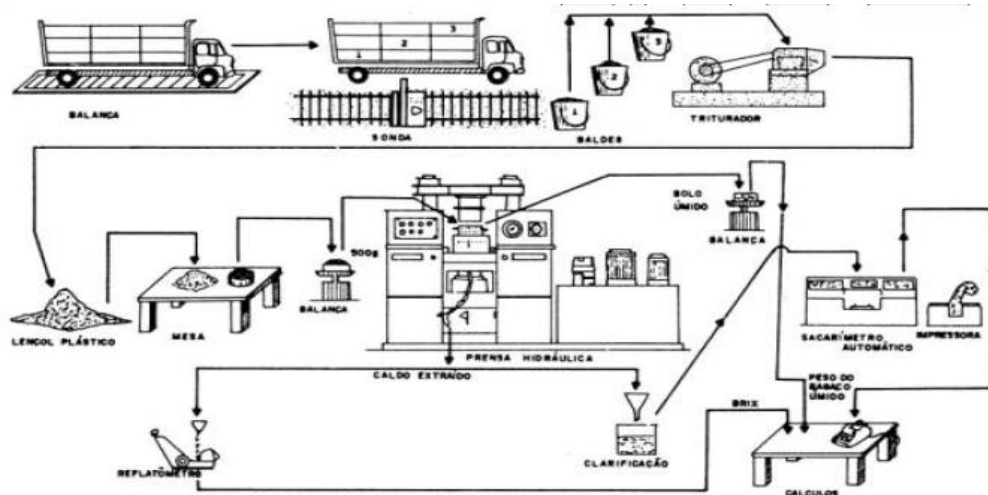
Neste tipo de medição, a precisão é um fator importante, e para que a mesma faça parte do processo, cuidados devem ser tomados no projeto quanto na instalação e/ou manutenção dessas esteiras, podendo-se mencionar a necessidade de esticador gravimétrico, o perfeito alinhamento dos roletes da balança com os roletes de esteira, etc. Além disso, deve-se esperar que a empresa fornecedora tenha em seu sistema os últimos avanços de tecnologia eletrônica com funcionamento comprovado (CTC, 2005).

Com a modernização do corte e carregamento mecânico da cana de açúcar, ampliou a quantidade de matéria estranha que chega à indústria e é pesada como cana de açúcar, trazendo efeitos negativos no processo de fabricação de açúcar e álcool. Essas impurezas podem ser folhas, cepas, raízes, terra entre outros, e podem ser classificadas em impurezas minerais e vegetais, que além de alterarem a composição da cana, induz a uma errada avaliação de qualidade no teor de ATR. Todas essas impurezas são quantificadas pelo PCTS (ALBUQUERQUE, 2011).

6.2 Amostragem e Análise da Cana

Após a pesagem, este é o primeiro processo analítico sofrido pela cana-de-açúcar ao entrar na indústria e todo resultado obtido no setor sucroalcooleiro é alcançado através das amostras coletadas no campo ou durante o processo industrial. Durante a amostragem, são selecionados os caminhões de acordo com a norma de Pagamento de Cana pelo teor de Sacarose (PCTS) do Consecana - São Paulo (FERNANDES, 2011).

Figura 4. Processo global do PCTS



Fonte: FERMENTEC, 2003

Neste sentido, a amostragem é feita com sonda horizontal, onde perfura-se em 3 níveis, ascendentes e descendentes, 3 fúeros. Ao se tratar de sonda amostradora oblíqua, onde é retirada na linha horizontal e central da parte superior do carregamento, a amostra é retirada somente em 1 (uma) posição, durante duas etapas na mesma perfuração, retirando e descarregando as sub-amostras de cada etapa. A amostragem obtida através da sonda não deverá ser inferior a 10 kg da amostra final (CONSECANA, 2006).

Em aparelhos desintegradores possuidores de facas, contra-facas e martelos, o resultante da mistura das amostras simples deverá ser preparado. As facas e as contra-facas deverão estar sempre afiadas, para uma melhor execução do processo. O material desintegrado deverá conter partículas pequenas e homogêneas, que forneçam um Índice de Preparo (IP) de 90%, com uma tolerância de até 2%. Logo em seguida, a amostra será homogeneizada em betoneiras com raspador, com o intuito de impedir a retenção da amostra no fundo do tambor (CONSECANA, 2006).

Após a homogeneização, uma amostra de cerca de 1,5 a 2,0 kg é conduzida ao laboratório, onde dará origem a amostra final de 500g que será analisada. Em seguida, serão realizadas as leituras de Brix, que é o parâmetro que expressa a porcentagem peso / peso dos sólidos solúveis contidos em uma solução de pura sacarose, obtido por refratômetros, e de Pol que é expressa em porcentagem de cana, através do cálculo fibra % cana em relação massa / massa, sendo o principal indicador da qualidade da cana-de-açúcar para o processo industrial (FERNANDES, 2011).

As leituras referentes à extração do caldo, pesagem do bagaço úmido, juntamente com Brix e Pol devem ocorrer imediatamente após a desintegração e homogeneização da amostra. O caldo da cana é extraído através de uma prensa hidráulica com pressão constante a 24,5 Mpa, o que corresponde a 250kgf/cm^2 , durante cerca de 1 minuto. O peso do bagaço úmido é utilizado para o cálculo da fibra da cana, que, é a matéria insolúvel em água, presente na cana-de-açúcar. Na fibra PCTS, os valores encontrados são obtidos através da estimativa em função do peso de bagaço úmido da prensa (CTC, 2005).

Essas análises são essenciais para o cálculo do ATR (açúcar total recuperável) e PCC (Pol % cana) para fins de cálculos de rendimentos industriais.

6.3 Moagem da Cana

Após a amostragem, dá-se início a moagem da cana, que constitui um processo contínuo iniciado na mesa alimentadora, onde a cana passa por um conjunto de picador e desfibrador, e em seguida por rolos, denominados ternos com o processo de embebição com água e esmagamento do bagaço. Depois do último terno e o caldo é direcionado para o tratamento. O caldo de cana-de-açúcar é composto pela água e todos os sólidos solúveis presentes no colmo. Embora se trate de cana, a composição química dos caldos dependerá do tipo de extração utilizada, difusor ou moenda, e também do tratamento químico empregado. A moenda é o meio mais utilizado pelas usinas brasileiras (FERNANDES, 2011).

Albuquerque (2011) define moenda como equipamento de extração do caldo da fibra com sucessivas pressões à medida que a cana passa pelos ternos, e difusor como equipamento no qual se extrai o açúcar da cana por meio de processos químicos denominados difusão, sendo que na separação do caldo e da fibra, o caldo é deslocado da cana desintegrada por um fluxo em contracorrente de água ao invés de ser expelido.

Hugot (1969) descreve que para extrair a maior quantidade possível do açúcar contido no bagaço, recorre-se a um artifício: substituir seu constituinte, o caldo pela água. Tal artifício

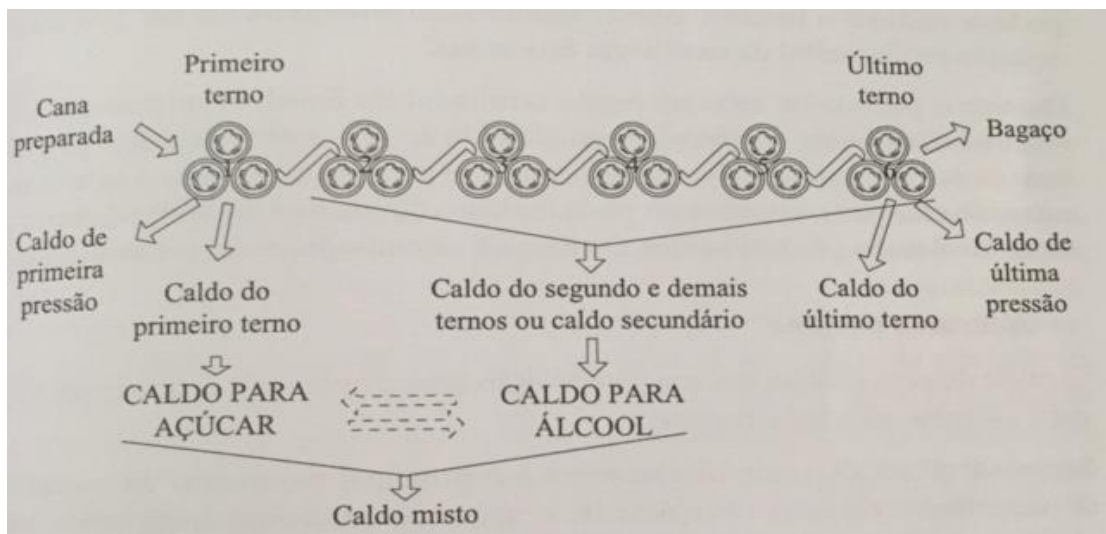
é denominado de embebição e deve ser realizada com água em torno de 70°C, controlada de acordo com as perdas no bagaço, concluindo em uma melhor extração.

A extração é o resultado de maior relevância, pois permite acompanhar a moagem e quantificar a eficiência da moenda que pode ser expressa em porcentagem de Pol ou porcentagem de ART, dependendo da metodologia adotada pela empresa. A extração de bagaço pela moenda deve ficar acima de 95% podendo chegar a 97,5% de acordo com a qualidade da moagem (CTC, 2005).

Albuquerque (2011) afirma que o caldo começa a ser separado no tandem de moagem, sendo o primeiro terno, mais rico em açúcar e de maior pureza, enviado para produção de açúcar e o caldo dos demais ternos para a destilaria, ou destinados em sua totalidade para a destilaria, no caso de usinas que produzem apenas etanol.

Abaixo temos uma representação esquemática da moenda e os caldos que podem ser produzidos.

Figura 5. Divisão dos caldos no processo de extração



Fonte: ALBUQUERQUE (2011)

O bagaço é o principal veículo de perda de açúcar na moagem, ainda que possam ocorrer perdas substanciais de açúcar em lavagem de cana, sendo esse processo não empregado em todas as usinas de cana de açúcar. É uma combinação de caldo e fibra, formado também de sólidos dissolvidos (Brix). As análises físico-químicas de umidade e Pol fazem parte desse processo, uma vez que, todo processo de moagem é controlado pelo bagaço, e o teor de perdas de açúcar deve ser mantido em níveis satisfatórios e sua umidade em condições ideais para queima nas caldeiras, seu destino final (CTC, 2005).

O esquema abaixo demonstra a quantificação da extração e perda no bagaço em relação à moagem:

$$\% \text{ Extração} + \% \text{ Perda no Bagaço} = 100\% \text{ Moagem}$$

$$\text{Ex: } 96,5\% \text{ Extração} + 3,5\% \text{ Perda no Bagaço} = 100\% \text{ Moagem}$$

6.4 Tratamento de Caldo

Assim que encerrado o processo de extração, o caldo é separado da fibra, sendo eles primário e misto, e direcionados a etapa seguinte, que tem a função de tratamento químico e físico, já o bagaço enviado para queima nas caldeiras. Esses tratamentos são de extrema importância para a qualidade do produto final, seja ele açúcar ou álcool. Sendo assim, o objetivo desta etapa visa a eliminação de não açúcares, eliminação de coloides, baixar turbidez, máxima taxa de sedimentação, volume mínimo de lodo e pH adequado para evitar inversão da sacarose (ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 6. Chegada do caldo no tratamento de caldo



Fonte: Autor

Iniciado o processo, pelo fato de que a embebição realizada é a quente, o caldo chega ao tratamento com temperatura entre 50 a 60° C. O caldo extraído da moenda é depositado em dois tanques, sendo o caldo primário extraído durante o primeiro terno e usado para a produção de açúcar, e o caldo misto extraído durante os demais ternos, sendo posteriormente enviado a destilaria. A partir daí o caldo misto é então direcionado a uma caixa onde recebe a caleação. No processo de caleação ocorre, então, a adição de hidróxido de cálcio que possui como função elevar o pH do caldo a valores satisfatórios para que ocorra a decantação (FERNANDES, 2011).

O hidróxido de cálcio, também chamada de leite de cal, é produzido através da hidratação da cal virgem (Óxido de Cálcio), sendo direcionado para tanques armazenadores, onde é utilizado para clarificação do caldo, sendo também eficaz na separação de compostos coloridos de natureza insolúvel.

O hidróxido de cálcio é ligeiramente solúvel em água e a sacarose incrementa bastante sua solubilidade, sendo utilizada com o intuito de neutralizar os ácidos orgânicos contidos no caldo sendo importante por desempenhar papel clarificante. Atualmente, é empregada devido a sua eficiência, fácil obtenção e baixo custo. Utiliza-se a concentração do hidróxido de cálcio na unidade de medida Baomé, onde é adicionado ao caldo através de dosadores a pH próximos a 7,0 (ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 7. Processo de caleação



Fonte: Autor

Assim que concluído o sistema de caleação o caldo é direcionado a pré-aquecedores, elevando a temperatura a 105°C. Esse aquecimento visa a eliminação dos micro-organismos por esterilização, completar reações químicas com o agente alcalinizante, no caso o hidróxido de cálcio, coagular, flocular as impurezas insolúveis e remover gases presentes. Durante esse aquecimento ocorre a desnaturação de proteínas presentes no caldo, reduzindo a solubilidade, provocando a precipitação de materiais macromoleculares. Como decorrência do aumento da temperatura, a velocidade das reações é acelerada, e outro efeito é a redução da viscosidade do caldo (ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 8. Aquecedores em operação



Fonte: Autor

Em seguida ao aquecimento, o caldo é enviado a um balão flash, que realiza o fenômeno conhecido por flasheamento, que consiste na queda de temperatura causada pela exposição a um determinado líquido, que antes se encontrava a uma pressão maior, para outro ambiente de menor pressão e cujo ponto de ebulição é menor do que a temperatura que o líquido se encontrava na condição inicial. O objetivo deste processo é eliminar o ar dissolvido no caldo que arrastaria para o caldo clarificado as partículas de fibra do bagaço (bagacilho) que é leve e de difícil decantação e possuindo temperatura variando entre 105 a 110° C (ALBUQUERQUE, 2011).

A figura a seguir apresenta o balão flash, onde acontece a variação da pressão para que os fenômenos descritos acima aconteçam.

Figura 9. Sistema de flasheamento em funcionamento



Fonte: Autor

Ao passar pelo balão flash o caldo passa a uma caixa e recebe a adição de polímero (floculante) sendo diluído em água isenta de sólidos em suspensão e sais minerais, e sua ação depende de fatores como grau de hidrólise, peso molecular, carga elétrica, quantidade empregada na clarificação e cuidados na preparação. Os polímeros com máximo grau de hidrólise conseguem uma redução na turbidez do caldo e são compostos de copolímeros da acrilamida e acrilato de sódio em proporções variáveis. No caldo, há prevalência de cargas negativas em sua superfície, ou seja, partículas aniônicas. Atualmente, os polímeros mais utilizados na indústria sulcro-alcooleira são os aniônicos, possuidores da mesma carga que as partículas em suspensão no caldo (ALBUQUERQUE, 2011).

Posteriormente o caldo é conduzido ao decantador, um tanque de sedimentação, no qual ocorre a separação por ação físico-mecânica do lodo, impurezas sedimentadas, do caldo clarificado a uma temperatura de 95°C, submetido a velocidades baixas de vazão. Os materiais insolúveis se precipitam por decantação, formando um “lodo” na parte inferior e o caldo clarificado fica localizado na parte superior. A capacidade de um decantador é determinada pelo tempo de retenção necessário para permitir uma boa sedimentação do “lodo”. Durante a saída pelo decantador, o caldo clarificado deve ser peneirado para remoção do bagacilho não retirado com o “lodo” do decantador, portanto, são utilizadas peneiras estáticas, com aberturas médias de 200 Mesh. Os bagacilhos são frações de partículas de fibra muito finas separada do bagaço (ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 10. Decantador de caldo



Fonte: Autor

A figura abaixo apresenta o peneiramento do caldo clarificado, após a saída do decantador, para a remoção de impurezas do caldo.

Figura 11. Peneiras estáticas em funcionamento



Fonte: Autor

O caldo é então bombeado para uma caixa de caldo clarificado para ser enviado a pré- evaporadores posteriormente. O “lodo” sedimentado no decantador contém de 5 a 10% de sólidos insolúveis e é enviado aos filtros pra remover o máximo possível do material insolúvel. É importante o uso do bagacilho como auxiliar de filtração, captação, transporte, sendo a mistura lodo e bagacilho demanda equipamentos e operações adequadas, pois a qualidade e quantidade de bagacilho são fatores decisivos, afim de reter o máximo de matérias contidas no lodo (ALBUQUERQUE, 2011).

Previamente a entrada nos filtros, o lodo é direcionado a uma caixa onde é adicionado o bagacilho, proveniente do último terno da moenda, que passa por agitação e recebe dosagem de polímero aniônico e é enviado aos filtros que podem ser rotativos ou prensas para extração de açúcares presente no lodo. Os filtros prensas conseguem uma melhor extração de sacarose, por este motivo são mais utilizados, refletindo em um caldo filtrado mais limpo, maior produtividade e menor quantidade de torta (FERNANDES, 2011).

Após o lodo passar pelo filtro prensa há separação de dois materiais, o caldo e a torta. A torta é um resíduo sólido com umidade variando de 65 a 75% que sai dos filtros prensas como resultante do processo de recuperação do açúcar retido no lodo dos decantadores, onde

é carregado por caminhões e enviado para a lavoura e utilizado como adubo orgânico. O caldo ainda com um pequeno teor de açúcar é enviado à caixa de caldo misto, passando por todo o tratamento de caldo novamente. A torta é o principal veículo de perda no tratamento de caldo e uma forma de controle é uma adequada operação do filtro prensa, sendo como desejável perdas menores que 1,5 de Pol (FERNANDES, 2011).

6.5 Evaporação

Logo em seguida a clarificação, o caldo é então encaminhado para o processo de evaporação, que possui a função de eliminar água contida no caldo clarificado, principalmente proveniente da embebição ocorrida no processo da moagem. Durante a evaporação ocorre a geração de vapor, usado em outras etapas na indústria, como água de alimentação das caldeiras. Na evaporação, com a perda de água, concentra-se o caldo ao °Brix desejado. Pode ocorrer arraste de líquido com o vapor nos pré-evaporadores, resultando em perda de açúcar e causando contaminação da água condensada que vai para as caldeiras. Na evaporação é produzido o xarope, que atinge de 60 a 70% de °Brix, que é o caldo direcionado para a produção de açúcar, e o caldo direcionado a fermentação passa a se chamar de mosto que deve estar em valores próximos a 20% de °Brix (FERNANDES, 2011).

A partir desse momento o processo é dividido, parte do caldo vai para a fabricação do açúcar e parte para a fabricação do etanol.

Figura 12. Evaporadores em funcionamento em usina de etanol



Fonte: Autor

6.6 Fabricação de Etanol

O álcool pode ser produzido por diferentes maneiras, entre elas, química ou fermentativa. A via química é pouco aplicada no Brasil, e é efetuada a partir de hidrocarbonetos não saturados, de gases do petróleo e de hulha. Já a via fermentativa, é a mais utilizada no país para obtenção etanol. A fabricação de etanol compreende então três etapas principais, sendo elas: o preparo do substrato (mosto), a fermentação e a destilação (LIMA et al, 2001).

6.6.1 Mosto

É definido como um líquido açucarado pronto para ser fermentado sendo classificado de três formas distintas: caldo, melação e misto (caldo e melação). O melação é um subproduto obtido através da fabricação de açúcar, possui densidade variando entre 1,4 a 1,5 g/mL e é produzido à razão de 40Kg/t cana, sendo um líquido denso, viscoso, de cor parda escura, rico em açúcares, e com baixo percentual de água. Possui também outras designações como: melação, mel esgotado e mel final (VASCONCELOS, 2010).

De acordo com Vasconcelos (2010) o controle e preparação do mosto são necessários por alguns fatores, sendo eles:

- Mostos que possuem baixas concentrações de açúcares conduzem a fermentação mais rápida, pois o açúcar presente é fermentado com maior facilidade, porém com menor teor alcóolico no vinho; favorecendo então o crescimento celular, pelo fato de menores quantidades de açúcares induzem a multiplicação do fermento, desviando o principal objetivo que é a produção de etanol; aumentando o consumo de vapor e água e ainda proporcionando maior volume de dornas e vinhaça.

- Mostos abundantemente concentrados acarretam em fermentações incompletas e/ou demoradas, com perdas de açúcares, que favorecem incrustações nos aparelhos de destilação,

resultando na queda de eficiência da destilação e menores quantidades de vinhaça.

Ao iniciar o processo de fermentação o mosto é o substrato de alimentação das leveduras para ocorrência da fermentação.

6.6.2 Leveduras

Após lentas e constantes incorporações de novos conhecimentos, chegou-se a concepção de fermentação alcoólica. Esse processo é baseado em um fenômeno biológico, cujo principal agente é a levedura (FERMENTEC, 2005).

As leveduras são seres heterotróficos, unicelulares, aclorofilados e que podem ser aeróbios ou anaeróbios. Na natureza podem ser facilmente encontrados como, no solo, em pó e em frutos em geral, podendo também ser transportados facilmente pelo vento e por insetos. Dependendo do meio de cultivo as leveduras apresentam dimensões variadas. As leveduras podem apresentar dimensões variadas, com formas que podem ser ovóides, esféricas ou elipsoidais e isso vai depender do meio de cultivo (VASCONELOS, 2010).

As leveduras mais utilizadas para a fabricação do álcool são as cepas, cujos nomes científicos são, *Saccharomyces cerevisiae* e *Schizosaccharomices pombe*. Elas são capazes de transformar em seu principal alimento, os açúcares, mas na sua ausência utilizam ácidos orgânicos e, até mesmo, o próprio etanol. Esses micro-organismos utilizam-se do açúcar para obter energia para exercerem suas funções vitais, e não para produzir álcool, segundo a demanda da atividade industrial. Para a levedura, a fabricação de álcool não é o alvo da fermentação, mas uma consequência desse processo. As leveduras ao metabolizar anaerobicamente o açúcar, gera energia (trifosfato de adenosina, ou ATP), que é, portanto agregada na realização da absorção, excreção e outros trabalhos, além daqueles de biossíntese, necessários à manutenção da vida, crescimento e multiplicação. O volume de álcool que o fermento processa depende do grau °Brix do mosto, e da quantidade de açúcares nele existentes. A levedura absorve a sacarose na forma de seus monossacarídeos estruturais, glicose e frutose, após a hidrólise pela exoenzima, chamada invertase (ALVES, 1994).

As leveduras utilizam o açúcar de duas maneiras distintas, inicialmente durante a respiração, com a presença de oxigênio, e posteriormente durante a fermentação, na ausência de oxigênio. Por este motivo, as leveduras são micro-organismos anaeróbios facultativos. Quando utilizada industrialmente, elas utilizam anaerobicamente seu substrato, por meio da glicólise, sendo este um processo bioquímico. É constituído de doze reações enzimáticas, a partir da sacarose, que sucede em sequência ordenada, cada qual catalisada por uma enzima específica. Estas estão confinadas no citoplasma celular, sendo nessa região da célula que se processa a fermentação alcoólica (ALVES, 1994).

As condições ambientais em que a levedura se encontra são de fundamental importância para excelência perante os produtos finais da fermentação esperados, pois uma porção do açúcar é transformada em biomassa, a maior parte é convertida em etanol e gás carbônico (ALVES, 1994).

Nas indústrias, é comum realizar uma seleção das leveduras utilizadas, que possuem tolerância a altos teores de etanol, boa velocidade de fermentação, dominância e permanência durante a safra, boa capacidade fermentativa, pequena produção de glicerol, baixa formação

de espuma, resistência à acidez e temperaturas elevadas. A resistência a elevadas concentrações de etanol é uma grande vantagem do ponto de vista industrial, pois o consumo de vapor na destilação é menor, se produz menor quantidade de vinhaça e ocorre menos perda de etanol por meio dela. A resistência à acidez é outra característica importante, vista que se adiciona ácido sulfúrico no tratamento do fermento para controlar as infecções bacterianas (VASCONELOS, 2010).

6.6.3 Fermentação

Há dois tipos de fermentação, contínua e batelada, sendo que, a fermentação contínua atualmente deixou de ser utilizada, dando espaço à fermentação batelada, que é realizada com a alimentação de uma dorna com um fluxo contínuo de substrato de concentração adequada, para dela se extrair todo o “vinho fermentado” encaminhando a dornas de espera. As destilarias brasileiras processam a fermentação sem interrupções, enchendo-se a dorna de fermentação, inoculando, fermentando-se e enviando para a centrífuga. Lava-se a dorna e é iniciado um novo processo, baseado no método batelada de Melle-Boinot, caracterizado peça recuperação de leveduras (LIMA et. al., 2001).

As leveduras são organismos acidófilos de extrema importância quando se tratam de controle de contaminação bacteriana, fermentação, formação de subprodutos, etc. No processo de fermentação por batelada, essas leveduras são de antemão tratadas com ácido sulfúrico, até atingir pH entre 2.2 a 3.0, e permanecem em repouso durante 1 a 3 horas (VASCONELOS, 2010).

Todo o processo de tratamento do fermento (leveduras) é realizado em tanques chamados cubas, e o fermento ali tratado passa a se chamar “pé de cuba” (LIMA et al, 2001). O “pé de cuba” é enviado a tanques cilíndricos, denominados dornas, dotados de sistema de resfriamento, pois é um processo exotérmico. Logo após o mosto é adicionado no “pé de cuba”, sendo esse fermento na proporção de 20 a 25%, iniciando assim a fermentação (VASCONELOS, 2010).

Figura 13. Dornas

Fonte: Autor

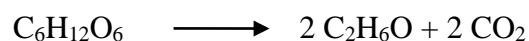
Segundo Vasconcelos (2010), a fermentação ocorre em 3 fases: preliminar, tumultuosa e complementar:

- Fase preliminar: É aquela onde ocorre o contato das leveduras com o mosto, ocasionando a multiplicação celular com liberação controlada de gás carbônico, pouca formação de espuma, e pequena formação de etanol. Esta fase é de curta duração, pois é onde ocorre a adaptação das leveduras ao meio.

- Fase principal: É a de maior duração, onde ocorre a maior produção de etanol, gás carbônico e calor. Esta fase possui a predominância de formação de espuma, aumento significativo da acidez e diminuição da densidade do meio em fermentação, como consequência da conversão dos açúcares em etanol. São utilizadas trocadores de calor de placas, com o intuito de controlar o rápido aumento da temperatura do meio durante a fermentação. A temperatura deve ser controlada em torno de 32° C.

- Fase complementar: Nesta fase, o desprendimento de CO₂ é reduzido, juntamente com a temperatura, em consequência da exaustão dos açúcares fermentescíveis. Ao término do processo, a superfície do meio apresenta-se sem agitação e livre de espuma.

No processo de fermentação ocorre a produção de uma enzima pela levedura chamada de invertase, capaz de realizar a quebra dissacarídeo sacarose e outros dois monossacarídeos, a glicose e frutose, para posterior absorção e produção de etanol e gás carbônico. A seguir a reação global da fermentação (FERREIRA, 2005):



Existem fatores que podem afetar o rendimento da fermentação, podendo ser de ordem física (temperatura e pressão osmótica), química (pH, oxigenação, nutrientes minerais e orgânicos, inibidores) e microbiológica (espécie, linhagem e concentração da levedura, além da contaminação bacteriana) (LIMA et al, 2001).

Além dos compostos citados, outros também podem ser formados durante o processo de fermentação, e são capazes de reduzir a produção de álcool, tais como o glicerol, ácidos orgânicos (succínico, acético, pirúvico e outros), álcool superiores acetaldeído, acetopina, butilenoglicol, além de outros compostos de menor significado quantitativo e do crescimento do número de leveduras, a formação de biomassa. Dentre os citados, o principal produto secundário produzido na fermentação é o glicerol, que se encontra na mesma via de síntese do etanol, como um desvio, compete com ele pela utilização do poder redutor, o NADH (Nicotinamida Adenina Dinucleotideo), sendo então, a sua produção é inversamente proporcional à de álcool (LIMA et al, 2001).

Segundo Lima et al (2001), é possível estimar que 5% do açúcar metabolizado pela levedura é desviado para gerar os produtos secundários da fermentação. Na indústria, no entanto, foram constatados diversos fatores que afetam a levedura: de 8 a 15% do açúcar processado são desviados para a formação de glicerol, ácido succínico e biomassa, além do álcool e do gás carbônico.

O processo de fermentação pode durar de 4 a 12 horas. Ao final desse tempo, todo o açúcar já foi consumido e o processo deve ser mantido a temperatura entre 30 a 35°C, resfriando o vinho com trocadores de calor sob agitação mecânica. Se ocorrer a formação de bolhas, essas podem ser combatidas com antiespumantes durante a fermentação. A inspeção de contaminação de bactérias que prejudicam a fermentação, evidenciadas por análises microbiológicas devem ser tratadas por antibióticos. Chegando ao fim do processo de fermentação o teor médio de álcool das dornas é de 7 a 10%, recebendo o nome de vinho fermentado (VASCONELOS, 2010).

Após a fermentação, o vinho é enviado às centrifugas para recuperação do fermento. O concentrado do fermento recuperado, denominado leite ou creme, retorna a cuba onde recebe novamente o tratamento com ácido sulfúrico sob agitação, a outra parte, chamada de “vinho de levedura” ou “vinho centrifugado” é enviada a um tanque chamado “dorna volante” onde é encaminhado ao aparelho de destilação para a produção de etanol (LIMA et al, 2001).

Figura 14. Tratamento do fermento na cuba



Fonte: Autor

6.6.4 Destilação

A destilação fracionada é um processo físico de separação utilizado quando se tem misturas homogêneas, neste caso o vinho que sai das centrífugas, através da condensação após ebulição parcial da mistura que se quer separar ou melhorar a purificação.

6.6.5 Etanol

O álcool etílico é então obtido, a partir da fermentação do mosto e posteriormente a destilação. O produto final, de acordo com seus teores de impureza possui diversos fins, como, combustíveis para veículos, produção de bebidas, matéria-prima para indústrias farmacêuticas, de cosméticos e alcoolquímica.

A destilaria pode produzir tanto o álcool etílico hidratado como o álcool etílico anidro, ambos para fins carburantes. O termo comumente usado como etanol ou álcool etílico refere-se ao produto quimicamente puro de fórmula $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ou $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ (FERNANDES, 2011).

Ainda, segundo Fernandes (2011) o etanol hidratado com teor alcoólico entre 92,6% m/m a 93,8% m/m, contendo em média 93,2 kg de etanol e 6,8 kg de água por 100 kg de álcool hidratado. É também chamado de “álcool etílico hidratado carburante” (AEHC), e pode ser utilizado como combustível em veículos com motores a álcool ou flex. Vejamos abaixo as diferentes denominações recebidas pelo álcool:

- Álcool etílico anidro: Possui um teor alcoólico mínimo de 99,3% m/m, contendo 99,3 de etanol e 0,7 kg de água por 100 kg de etanol anidro. Também denominado “álcool etílico anidro carburante” (AEAC) e é misturado à gasolina e utilizado em veículos com motores a gasolina de ciclo Otto.

- Álcool etílico neutro: São comumente chamados de álcool fino e álcool extrafino. Possuem baixos teores de impurezas, sendo assim muito utilizado na indústria de bebidas, farmacêuticas, e de cosméticos. O álcool neutro pode ser obtido a partir do álcool hidratado ou, mais raramente, do álcool anidro.

- Álcool etílico industrial: Esse é o álcool produzido pra fins industriais, com o grau alcoólico e características de acordo com as particularizações do comprador.

O produto final dos processos de destilação, o etanol hidratado, é uma mistura binária entre álcool-água que atinge um teor da ordem de 96°GL. É uma mistura azeotrópica, fenômeno físico no qual os componentes não são separados pelo processo de destilação. Para obter-se o álcool anidro, o mesmo precisa passar por um processo de desidratação, podendo ser a destilação azeotrópica utilizando cicloexano, destilação extrativa utilizando Monoetileno glicol (MEG) ou desidratação por absorção utilizando peneira (BARRETO & COELHO, 2012).

Figura 15. Aparelho de destilação do etanol



Fonte: Autor

A agência Nacional do Petróleo determina os parâmetros e especificações para produção e comercialização do etanol através da resolução Nº 19 de 15 de abril de 2015 onde são estabelecidos os limites máximos e mínimos de características relacionadas ao etanol, são apresentados a seguir no Quadro 2:

Quadro 2. Especificações do etanol hidratado carburante

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	LIMITE			MÉTODO	
		EAC	EHC	EHCP	NBR	ASTM/EN/ISO
Aspecto	-	Límpido e Isento de Impurezas (LII)			Visual	
Cor	-				Visual	
Acidez total, máx. (em miligramas de ácido acético)	mg/L	30			9866 16047	ISO 17315
Condutividade elétrica, máx.	µS/m	300			10547	ISO 17308
Massa específica a 20°C.	kg/m ³	791,5 máx.	805,2 a 811,2	799,7 a 802,8	5992 15639	D4052
Teor alcoólico ⁷ .	% massa	99,3 min.	92,5 a 94,6	95,5 a 96,5	5992 15639	-
Potencial hidrogeniônico (pH)	-	-	6,0 a 8,0		10891	-
Teor de etanol, mín.	% volume	98,0	94,5	96,3	16041	D5501
Teor de água, máx. ¹⁰	% massa	0,7	7,5	4,5	15531 15888	E203 E1064
Teor de metanol, máx. ¹⁰	% volume	0,5			16041	
Resíduo por evaporação, máx.	mg/100mL	5			8644	-
Teor de hidrocarbonetos, máx. ¹²	% volume	3			13993	-
Teor de cloreto, máx.	mg/kg	1			10894	D7328 D7319
Teor de sulfato, máx.	mg/kg	4			10894	D7328 D7319
Teor de ferro, máx. ¹⁵	mg/kg	5			11331	-
Teor de sódio, máx. ¹⁵	mg/kg	2			10422	-
Teor de cobre, máx.	mg/kg	0,07	-		11331	-
Teor de enxofre, máx.	mg/kg	Anotar			-	D5453 EN 15485 EN 15486 EN 15837

Fonte: ANP (2015)

As análises como aspecto, cor, acidez, condutividade, massa específica, teor alcoólico (INPM) e pH podem ser realizadas na própria unidade sucroalcooleira, pois demanda poucos aparelhos e reagentes, já as demais necessitam de aparelhos mais específicos, e são realizadas em laboratório externo credenciados pelo INMETRO.

6.6.6 Subprodutos na produção de etanol

A partir da destilação do etanol, são originados dois subprodutos, a vinhaça e o óleo fúsel.

A vinhaça, nada mais é que, o resíduo da destilação de uma solução alcoólica chamada vinho, obtida do processo de fermentação alcoólica (ÚNICA, 2016). A cada litro de álcool é produzido em média 12 litros de vinhaça, dependendo da tecnologia empregada pela destilaria (ZOLIN et al., 2011).

As destilarias brasileiras vêm se destacando no reaproveitamento e destino final da vinhaça, que antes era problema, passando a ser solução, sendo direcionada para a irrigação do solo, a fertirrigação, uma forma de direcionamento que não requer grandes investimentos e possui um alto valor fertilizante. Como resultado da fertirrigação ocorre melhoras na qualidade físico-química do solo além de melhora na produtividade agrícola (NICOCHELLI, 2011). Na figura abaixo demonstra a constituição química da vinhaça proveniente de diferentes mostos:

Tabela 4. Composição química média da vinhaça com diferentes mostos

Elementos	Vinhaça de mosto		
	melaço	caldo	Misto
pH	4,2-5,0	3,7-4,6	4,4-4,6
Temperatura	80-100	80-100	80-100
DBO (mg L ⁻¹ O ₂)	25.000	6.000 - 16.500	19.800
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	65.000	15.000 - 33.000	45.000
Sólidos totais (mg L ⁻¹)	81.500	23.700	52.700
Sólidos voláteis (mg L ⁻¹)	60.000	20.000	40.000
Sólidos fixos (mg L ⁻¹)	21.500	3.700	12.700
N (MG L ⁻¹ N)	450 - 1.610	150 - 700	480 - 710
P ₂ O ₅ (mg L ⁻¹)	100 - 290	10 - 210	9 - 200
K ₂ O (mg L ⁻¹)	3.740 - 7.830	1.200 - 2.100	3.340 - 4.600
CaO (mg L ⁻¹)	450 - 5.180	130 - 1.540	1.330 - 4.570
MgO (mg L ⁻¹)	420 - 1.520	200 - 490	580.700
SO ₄ (mg L ⁻¹)	6.400	600 - 760	3.700 - 3.730
C (MG L ⁻¹)	11.200 - 22.900	5.700 - 13.400	8.700 - 12.100
Relação C/N	16 - 16,27	19,7 - 21,07	16,4 - 16,43
Matéria orgânica (mg L ⁻¹)	63.400	19.500	3.800
Subst. redutoras (mg L ⁻¹)	9.500	7.900	8.300

Fonte: PRADA et al. (1998)

Uma das principais impurezas do etanol, capaz de prejudicar a sua qualidade, é o óleo fusel, resultante das fermentações secundárias. É composto de álcoois amílico, isoamílico, isobutílico, isopropanol e n-propanol. É utilizado como solvente na indústria para obtenção de seus componentes puros, como também em produtos farmacêuticos. Seu volume pode variar de 0,15 a 0,85% da produção de etanol (LIMA & MARCONDES, 2002).

7 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

Durante todo o processo, a atuação do laboratório da indústria na realização de análises, direcionam o processo no objetivo de otimizar todo o procedimento de fabricação de álcool, começando pela moagem/extração, passando pelo tratamento de caldo e evaporação, terminando na fermentação/destilação. Todos os dados apresentados pelo laboratório são essenciais para um bom rendimento industrial e localização de possíveis perdas ocorridas em determinado setor. Para tanto, são utilizadas as análises seguindo manual disponibilizado pela Fermentec, empresa de pesquisa que trabalha na otimização do processo de produção de etanol.

Serão listadas a seguir as análises do controle de qualidade realizadas durante o processo de fabricação do etanol.

7.1 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O Potencial Hidrogeniônico é um método que indica acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução em meio aquoso. O pH é definido como um logaritmo negativo (na base 10) da atividade hidrogeniônica em uma solução aquosa (FERMENTEC, 2012).

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Com valores de pH em queda, indica a produção de ácidos orgânicos, como ácido acético e ácido lático. Essa queda exige a aplicação de alcalinizante, o hidróxido de cálcio, para correção dos caldos (FIGUEREDO et. al, 2008).

Todos os caldos do processo passam pelo controle de pH, os caldos da moenda, do setor de tratamento de caldo, o mosto, o fermento e o etanol. Para os caldos da moenda a faixa de pH ideal é entre 5,0 a 6,0. Logo após a chegada no tratamento de caldo os caldos são adicionados ao alcalinizante para pH 6,5 a 7,5 onde mantem-se tal valor no caldo clarificado e mosto. Os valores ideais podem variar entre pH 2,0 a 2,5.

Para determinar o pH utiliza-se um pHmetro, inserindo seu eletrodo na solução desejada e aguarda o resultado no display.

Figura 16. pHmetro para medição de pH



Fonte: Autor

7.2 Acidez

A acidez proveniente do ácido láctico é nomeada de acidez fixa, e a do ácido acético de acidez volátil, sendo a acidez total a soma das duas (HOMEM et. al, 2009).

A determinação de acidez do caldo é utilizada para indicar as consequências da deterioração de cana quando pode ocorrer formação de ácidos orgânicos fracos que causariam a tamponização do meio. Este método é baseado no processo de titulação ácido-base da amostra com uma base forte até sua neutralização e posterior correlação da quantidade gasta de titulante com a concentração equivalente em ácido sulfúrico (FERMENTEC, 2012).

Adiciona-se 20 ml de caldo em um Becker com 50 ml de água, e titula-se com Hidróxido de Sódio 0,1N em um pHmetro até obter pH 8,5.

O teor de ácidos em caldos (Acidez Sulfúrica) é expresso em gramas de Ácido Sulfúrico por litro de caldo de cana ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$):

$$\text{Acidez} = Vg * 0,245 * F$$

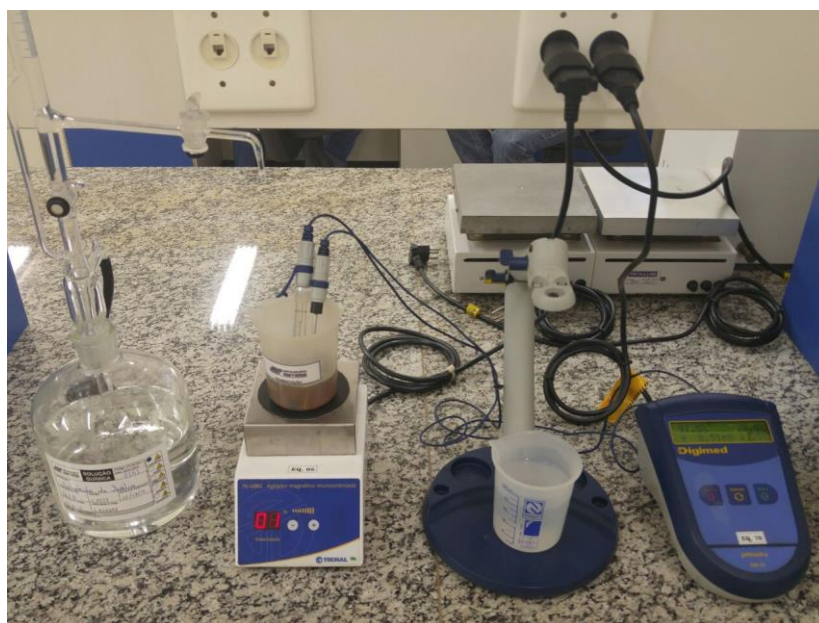
Onde:

Vg = Volume gasto da Solução de NaOH 0,1N na titulação

F = Fator de Padronização da Solução de NaOH 0,1N

É determinado a acidez nos caldos da moenda, mosto e fermento. Para caldos, indica-se acidez abaixo de 1,0 e para fermento, em razão do tratamento com ácido sulfúrico, atinge-se valores entre 4,0 a 6,0.

Figura 17. Equipamentos para análise de acidez



Fonte: Autor

7.3 Brix Refratométrico

O Brix refratométrico baseia-se na correlação entre a medida do índice de refração de uma solução açucarada e o seu teor de sólidos dissolvidos, a sacarose a 20° C. A medição ocorre em um refratômetro digital que corrige a temperatura automaticamente e demonstra a leitura em Brix % peso (FERMENTEC, 2012).

Colocar cerca de 2 ml no cristal do refratômetro e iniciar o aparelho, aguardar a leitura e coletar o resultado.

O Brix é muito importante na determinação da concentração dos caldos e no controle do mosto, parâmetro importante para alimentação do fermento.

É medido o Brix no caldo da moenda, onde pode-se variar em razão da qualidade da cana, entre 10 a 20° Brix, já no caso do mosto o ideal para produzir etanol recomenda-se valores de 18 a 23° Brix.

Figura 18. Refratômetro medidor de Brix



Fonte: Autor

7.4 Pol e Pureza

Pol é a porcentagem, em peso, de Sacarose aparente contida em uma solução açucarada, determinada pelo desvio provocado pela solução no plano da luz polarizada (FERMENTEC, 2012).

Separar 200 ml de amostra em um Becker, adicionar clarificante (Octapol®), homogeneizar e filtrar com papel filtro. Passar o filtrado no sacarímetro digital e aguardar a leitura sacarimétrica.

$$\text{Pol} = (\text{Ls} * 0,26) / d$$

Onde:

Ls: leitura sacarimétrica

d: densidade aparente

Pureza representa a relação entre a porcentagem em massa de sacarose e a de sólidos solúveis contidos em uma solução açucarada, quanto maior a pureza, maior a quantidade de açúcar disponíveis. Pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Q = (100 \times \text{Pol}) / \text{Brix}$$

Determina-se Pol e pureza de caldos e mosto. Quanto maior a pureza, melhor qualidade de caldo, podendo variar entre 70 a 90% de pureza.

Figura 19. Sacarímetro



Fonte: Autor

7.5 Teor Alcoólico em Mosto

O método baseia-se na extração do etanol presente na amostra através de arraste a vapor na destilação, quanto maior o teor alcoólico maior a presença de contaminação no mosto, pela ação de bactérias (FERMENTEC, 2012).

Adiciona-se 50 ml de amostra no microdestilador de Kjeldahl com a circulação de água aberta, eleva-se a temperatura da caldeira para entrar em ebulição e acopla-se um balão de 10 ml na saída do condensador. Ao completar o balão, retire-o do condensador, abaixe a temperatura e descarte a amostra. Em seguida, com a utilização de um densímetro digital, determinar a densidade da solução hidroalcoólica condensada e a partir desta constante física, é determinada o teor alcoólico da amostra.

O teor alcoólico em mosto é expresso em % Álcool em volume (v/v) à 20°C.

$$\% \text{ Álcool} = L_a / 5$$

Onde:

L_a = Leitura da solução destilada, em % de Álcool volume (v/v), encontrada no densímetro digital.

Valores superiores a 0,020° GL não são recomendados, indicando a presença de contaminação em algum ponto da tubulação.

7.6 Açúcares Redutores Totais (ART) em Mosto

O ART (Açúcares Redutores Totais) é a soma de todos os açúcares presentes na cana (Glicose, Frutose e Sacarose) e tem como princípio a redução do Cu^{+2} em Cu^{+1} . Uma porcentagem representativa da amostra é hidrolisada, para a transformação da sacarose (açúcar não redutor) em frutose e glicose (açúcares redutores). Após o preparo da amostra, é realizada a titulação em ebulição no reativo Fehling, precipitando o óxido cúprico de cor vermelho tijolo, determinando os açúcares redutores totais (FERMENTE, 2012).

Previamente é necessária uma diluição inicial, onde se adiciona 50ml de mosto em um balão de 250ml, completando com água, homogeneizar, transferir para um becker e adicionar 1 grama de Celite e 0,2g de Oxalato de Sódio. Filtrar e pipetar para um balão de 200ml 10 ml do filtrado. Logo em seguida adicionar 20ml de Ácido Clorídrico 0,75N e levar o balão ao banho maria por 40 minutos ou para um forno micro-ondas onde deixa-se entrar em ebulição e contar 5 segundo para tira-lo do forno. Resfriar a amostra e adicionar 3 gotas de Fenolftaleína 1%, logo em seguida neutralizar com Hidróxido de Sódio 0,75N até a aparição da coloração rosa claro. Completar o balão com água, se necessário adicionar Hidróxido de Sódio 0,1N para obtenção da coloração desejada. Agitar o balão para homogeneização, adicionar a solução de Fehling no Redutec, aumentar a temperatura da caldeira pra ebulição da solução de Fehling e titular a amostra até o disparo do display digital. Anotar o volume gasto.

O teor de Açúcares Redutores Totais (ART) do mosto é expresso em porcentagem (g/100mL).

$$\% \text{ART} = 25 * (\text{Vp} / \text{Va})$$

Onde:

Vp = Média dos volumes gastos nas titulações da solução padrão trabalho de Açúcar Invertido à 0,25%.

Va = Médias dos volumes gastos nas titulações da amostra.

Valores próximos entre 18 a 20% ART são ideais para a produção de etanol.

Figura 20. Redutec para determinação do ART



Fonte: Autor

7.7 Impurezas do Mosto

O método consiste em quantificar as impurezas presentes no mosto (argila, bagacilho, areia e outros) através da centrifugação e determinadas por leitura de tubos de centrifugas graduados (FERMENTEC, 2012).

Adiciona-se a mostra até o volume 100 do tubo, levá-lo a centrifuga e centrifuga-lo por 10 minutos a 3.000 rpm. Retirar o tubo da centrifuga e realizar a leitura, não sendo necessário efetuar cálculo, a percentagem é encontrada diretamente na graduação do tubo.

Recomenda-se haver o menor valor possível, pois o contrario evidencia-se problema nas peneiras após a saída do decantador.

7.8 Concentração de Fermento (%) em Cuba, Dorna e Centrifuga

O método consiste em quantificar o teor de levedo na amostra, separando-o por processo de centrifugação.

A determinação é equivalente ao item 7.7.

São recomendadas concentrações de cuba entre 45 a 60%, dependendo da estrutura da empresa, valores de dorna entre 8 e 10%. Já na centrifuga valores entre 70 a 80%, dependendo dos equipamentos.

Figura 21. Centrífuga para determinação de concentrações



Fonte: Autor

7.9 Teor Alcoólico de Cuba, Drona, CO₂ e Vinho Volante

O método se baseia na extração do etanol presente na amostra através de arraste a vapor na destilação, sendo determinada a densidade da solução hidroalcoólica condensada em densímetro digital. É importante na quantificação do etanol nas amostras para controle da fermentação (FERMENTEC, 2012).

Adiciona-se 25 ml de amostra no Microdestilador de Kjeldahl com a circulação de água aberta, eleva-se a temperatura da caldeira para entrar em ebulição e acopla-se um balão de 50 ml na saída do condensador. Ao completar o balão, retire-o do condensador, abaixe a temperatura e descarte a amostra. Em seguida, com a utilização de um densímetro digital determinar a densidade da solução hidroalcoólica condensada e, a partir desta constante física, é determinada o teor alcoólico da amostra.

O teor alcoólico em mosto é expresso em % Álcool em volume (v/v) à 20°C.

$$\% \text{ Álcool} = L_a \times 2$$

O etanol presente em tais amostras é responsável diretos na produção de etanol, sendo que na cuba valores de 5 a 7%, nas dornas valores de 8 a 10%, CO₂ recomenda-se 1% e vinho volante de 8 a 10% de etanol.

Figura 22. Microdestilador de Kjeldahl



Fonte: Autor

7.10 Teor Alcoólico de Vinhaça e Flegmaça

O método se baseia na extração do etanol presente na amostra através de arraste a vapor na destilação, sendo determinada a densidade da solução hidroalcoólica condensada em densímetro digital. É importante na quantificação do etanol nas amostras para controle da destilação (FERMENTEC, 2012).

A determinação é equivalente ao item 7.5.

Por ser a % álcool presente na amostra oriunda de perdas, é imprescindível o controle, pois quanto maior o álcool maior as perdas no aparelho. Valores acima de 0,020% Álcool não são recomendados.

7.11 Potencial Hidrogeniônico (pH) no Etanol Produzido

O potencial Hidrogeniônico (pH) é um termo que indica acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução em meio aquoso. O pH é definido como logaritmo (na base 10) a atividade hidrogeniônica em uma solução aquosa e pode variar de 0 a 14. O sistema de medição é realizado eletronicamente, com a utilização de um potenciômetro, um eletrodo de vidro para soluções alcoólicas de eletrólito cloreto de lítio e um termocompensador de temperatura (FERMENTEC, 2012).

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Seu valor pode variar entre 6,0 a 8,0 de pH (ANP, 2015).

Adiciona-se 200 ml de amostra no vaso termostatzado para estabilização da temperatura a 25,0° C com o eletrodo de soluções alcoólicas, aguardar a estabilização da temperatura e efetuar a leitura no pHmetro, anotando o resultado do display.

Figura 23. pHmetro para etanol com vaso termostatzado



Fonte: Autor

7.12 Condutividade do Etanol

A condutividade eletrolítica é a medição da quantidade de cargas transportadas pelos íons presentes em uma solução. A condutividade eletrolítica é um dos parâmetros estipulados em normas nacionais e internacionais para a avaliação da qualidade de etanol combustível (INMETRO, 2010). O método se baseia na medição direta da condutividade em um condutivímetro com célula de condutividade elétrica de platina não platinizada (FERMENTEC, 2012). Seu valor máximo aceitável é de 300 $\mu\text{S}/\text{m}$ (ANP, 2015).

Adiciona-se 200 ml de amostra no vaso termostatzado com o eletrodo de soluções alcoólicas, aguardar a estabilização da temperatura e efetuar a leitura no condutivímetro, anotando o resultado do display.

Figura 24. pHmetro para etanol com vaso termostatzado



Fonte: Autor

7.13 Acidez Total e Alcalinidade no Etanol Produzido

Este método se baseia na neutralização da acidez do álcool etílico por uma base forte, sendo o resultado expresso em miligramas de ácido acético por litro (FERMENTEC, 2012). Seu valor máximo permitido é de 30mg/L (ANP, 2015).

Transfere-se 50 ml de água para um erlenmeyer de 250 ml, adicionar 3 gotas de solução alcoólica indicadora de Alfa-Naftoltaleína 0,1%, e neutralizar com Hidróxido de Sódio 0,02N até a aparição da cor azul claro. Adicionar dentro do mesmo erlenmeyer 50 ml de amostra de álcool, se não houver mudança de cor, considerar alcalinidade positiva e acidez zero. Se houver mudança de cor, continuar a neutralização até a aparição da cor azul claro. Anotar o volume gasto.

A Acidez Total do álcool etílico é expressa em miligramas de Ácido Acético por litro de álcool ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$):

$$\text{Acidez} = V_g * 1200 * N$$

Onde:

V_g = Volume gasto da Solução de NaOH 0,02 N Padronizada na titulação.

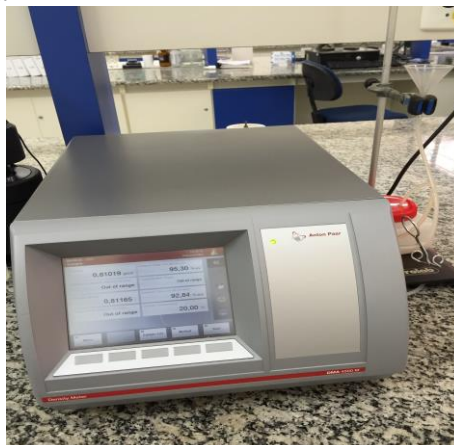
N = Concentração em normalidade da Solução de NaOH 0,02N após Padronização.

7.14 Teor Alcoólico (INPM) no Etanol

O INPM é equivalente a quantidade de gramas de etanol presente em 100 ml de uma mistura hidroalcoólica (NBR, 2008). A densidade é verificada através da medida da frequência da oscilação do tubo em U do densímetro digital, preenchido com a amostra, comparada com as frequências de oscilação quando preenchido com água pura (FERMENTEC, 2012). Seu valor aceitável deve estar entre 92,5 a 94,6 INPM (ANP, 2015).

Adiciona-se cerca de 50 ml de amostra de álcool no tubo de leitura do densímetro digital, retendo a amostra com o auxílio de uma pinça de Mohr, verificar se não há existência de bolhas no capilar, aguardar a estabilização da temperatura e anotando-se o teor alcoólico (m/m) do álcool.

Figura 25. Densímetro digital



Fonte: Autor

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do exposto torna-se imprescindível conhecer as etapas envolvidas no processo de fabricação do etanol, bem como os processos químicos e os processos físicos, pois essas são as variáveis que podem comprometer os rendimentos industriais do produto acabado.

Desta forma verifica-se que compreender os processos físico-químicos e o papel do controle analítico é de grande relevância, pois visa diagnosticar possíveis problemas de baixos rendimentos, analisando os produtos intermediários para uma melhor fermentação e destilação para obtenção do etanol.

Assim, esse guia técnico poderá auxiliar o entendimento dos processos envolvidos na obtenção do etanol e fundamentar as tomadas de decisões para a realização dos ajustes que se fizerem necessários para melhorar a eficiência dos processos físico e/ou químicos envolvidos até a obtenção do etanol com bom rendimento.

Os conceitos aqui levantados podem ser organizados para o ensino contextualizado da química, permitindo assim, auxiliar aqueles profissionais que já exercem funções relacionadas a estes processos, assim sendo, poderá servir para melhorar a qualificação profissional dos trabalhadores neste tipo de usina e auxiliá-los a melhorar a eficiência do processo.

Além de poder auxiliar os profissionais que já trabalham nesta área ou que tenham interesse em começar a trabalhar na área de controle de qualidade ou produção de etanol, assim como professores de química que desejem trabalhar o ensino de química, seja pela contextualização desta temática, ou até por meio de uma abordagem CTS, por exemplo.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBUQUERQUE, F. M. **Processo de Fabricação do Açúcar**. 3º ed., Editora Universitária da UFPE. Recife, 2011.
- ALVES, D. M. G. **Fermentação Alcoólica: um processo vivo**. Fermentec. Piracicaba – São Paulo, 1994.
- ANP – **Agência Nacional do Petróleo**. Resolução ANP nº 19 de 15/04/2015.
- BARRETO, T. V.; COELHO, A. C. Destilação. In: SANTOS, F.; BOREM, A.; CALDAS, C. (Ed.). **Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol**. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2012.
- CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira – Cana de Açúcar**, v. 2 - Safra 2015/16 n. 4 - Quarto levantamento, 2016.
- CONSECA – SP – **Manual Conselho Dos Produtores De Cana-De-Açúcar, Açúcar E Álcool Do Estado De São Paulo**. Disponível em: http://www.orplana.com.br/manual_2006.pdf. Acesso em 05 de fevereiro de 2017.
- CTC – Centro de Tecnologia Canavieira. **Manual de Controle Químico na Fabricação de Açúcar**, Piracicaba, São Paulo, 2005.
- EMPRAPA. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. 2. ed. rev. Brasília, 2006. Disponível em: http://bbeletronica.sede.embrapa.br/bibweb/bbeletronica/2006/inst/inst_11.pdf. Acesso em 01 de junho de 2017.
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Balço Energético Nacional 2015**. Rio de Janeiro, 2015.
- FERMENTEC. **Métodos Analíticos para o Controle da Produção de Açúcar e Álcool**, 3º Edição, Piracicaba, São Paulo, 2005.
- FERMENTEC. **Métodos Analíticos para o Controle da Produção de Açúcar e Álcool**, 4º Edição, Piracicaba, São Paulo, 2012.
- FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. 3º Edição. 2011.
- FERNANDEZ, V. P.; FILHO, J. G.; FIORE, A. C.; SALUM, L. E. **Álcool e Gasolina - Combustíveis do Brasil**. 5ed. São Paulo: Scipione, 72p., 1997.
- FERREIRA, E. **Contribuição para o Estudo da Otimização da Fermentação Alcoólica operando em Batelada-Alimentada**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- FIGUEIREDO, I. C.; MACIEL, B. F.; MARQUES, M. O. **A Qualidade da Cana-de-Açúcar como Matéria-Prima para Produção de Álcool**. Núcleos, Brasil, v. Especial, p.82-92, 2008.

FILHO, J. R. A. L. **Desenvolvimento da cana-de-açúcar (*Saccharum ssp.*) sob diferentes formas de colheita e de manejo do palhão.** 2009. 112f. Tese (Doutor em Ciências) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", 2009.

FILHO, J. R. A. L. **Estudo Comparativo dos Métodos de Determinação e Estimativa de Teores de Fibras e Açúcares Redutores em Cana-de-Açúcar (*Saccharum ssp.*).** 2005. 144f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", 2005.

GALON, L.; FERREIRA, E. A.; SILVA, A. F.; NOLDIN, J. A.; FREITAS, M. A. M. Competição entre plantas de arroz e biótipos de capim-arroz (*Echinochloa spp.*) resistente e suscetível ao quinclorac. **Revista Planta Daninha**, Ponta Grossa, v. 27, n. 4, p.701-709, 2009.

HOMEM, R. F. M.; JÚNIOR, L. C. T.; JÚNIOR, C. T.; MARQUES, M. O.; NETO, H. F. S.; SILVA, J. D. R. **Teores de Acidez no Caldo de Cana-de-Açúcar.** 2009. Monografia (Tecnologia em Tecnologia do Açúcar e Etanol) - Faculdade de Tecnologia, Jaboticabal, 2009.

HUGOT, Hemile. **Manual da Engenharia Açucareira.** Volume 1, Editora Mestre Jou, São Paulo, 1969.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/cartograma/mapa.php?lang=&coduf=52&codmun=521380&idtema=158&codv=v43&search=goias|morrinhos|sintese-das-informacoes-2015>. Acesso em 8 de maio de 2017.

IBGE – **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.** Disponível em: <http://www.ibge.com.br/home>. Acesso em 24 de abril de 2017.

INMETRO – **Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial - Relatório Final da Comparação Interlaboratorial de Condutividade Eletrolítica em Etanol Combustível.** Duque de Caxias - Rio de Janeiro., 2010. Disponível em: <http://inmetro.gov.br/metcientifica/pdf/ef-etanol-comb.pdf>.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos. avançados**, São Paulo, v. 24, n. 68, p.223-253, 2010.

LEITE, R. C. de C.; LEAL, M. R. L. V. O biocombustível no Brasil. **Novos estud. - CEBRAP**, São Paulo, n. 78, p.15-21, 2007.

LIMA, L. R.; MARCONDES, A. A. **Álcool Carburante: uma estratégia brasileira.** Editora UFPR: Curitiba, 2002.

LIMA, U. A.; BASSO, B. B.; AMORIM, L. V. Produção de etanol. In: ALMEIDA LIMA, u.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W. **Biotechnology industrial.** São Paulo: Edgard Blücher, v. 3, 2001.

LIMA, D. A. L. L.; GARCIA, J. R., A evolução da produção de cana-de-açúcar e o impacto no uso do solo no estado de Goiás. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 19, n. 2, p.374-403, 2011.

MASIERO, G.; LOPES, H. Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia. **Rev. bras. polít. int.**, Brasília, v. 51, n. 2, p.60-79, 2008.

MACHADO, F. B. P. **Brasil, a doce terra – História do setor**. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/historia_da_cana_000fhc62u4b02wyiv80efhb2attuk4ec.pdf> Acesso em: 20 outubro 2016.

MOTA, J. C.; Almeida, M. M. de; Alencar, V. C. de; Curi, W. F. **Impactos e Benefícios Ambientais, econômicos e sociais dos Biocombustíveis: uma visão global**. Engenharia Ambiental - Espírito Santo do Pinhal, v. 6, n. 3, p.220-242, 2009.

NBR 5992. **Norma ABNT, Álcool Etílico e suas misturas com água - Determinação da massa específica e do teor alcoólico**. Rio de Janeiro- Rio de Janeiro, 2008.

NICOHELLI, L. M.; **Sorção ao potássio de diferentes matérias submetidos à aplicação de vinhaça**. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia de Edificações e Ambiental) – Faculdade de Arquitetura, Engenharia e Tecnologia. Universidade Federal do Mato Grosso, Mato Grosso. 82p., 2011.

OLIVEIRA, E. R. **Procedimentos e Normas para Controle de Qualidade da Cana-de-açúcar**. Conselho dos Produtores de Cana-de-Açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de S. Paulo: Organização dos Plantadores de Cana-de-Açúcar da Região Centro-Sul do Brasil, 76p., 2012.

PRADA, S. M., GUEKEZIAN, M., SUÁREZ-LHA, M. E. V. Metodologia analítica para a determinação de sulfato em vinhoto. **Química Nova**, v. 21, n.3, p. 249-252, 1998.

RODRIGUES, J. A. R. Do engenho à biorrefinaria. a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustíveis. **Química Nova**, 2011.

RODRIGUES, J. D. **Fisiologia da cana-de-açúcar**. 1995. 101f. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas). Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, 1995.

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como Matéria-prima para a Produção de Biocombustíveis: Impactos Ambientais e o Zoneamento Agroecológico como Ferramenta para Mitigação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

SCHLITTLER, L. A. F. S. **Engenharia de um bioprocesso para a produção de etanol de cana-de-açúcar**. Dissertação (Mestrado), Escola de Química UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

Única – União de Indústria de Cana-de-Açúcar. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra2010/2011**. São Paulo, 2011. Disponível em :

<http://www.unicadata.com.br/pdfHPM.php?idioma=1&tipoHistorico=4&idTabela=1803&produto=&safra=2010/2011&safraIni=&safraFim=&estado=GO>. Acesso em 10 de abril de 2017.

Única – União de Indústria de Cana-de-Açúcar. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra2012/2013**. São Paulo, 2013. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/pdfHPM.php?idioma=1&tipoHistorico=4&idTabela=1803&produto=&safra=2012/2013&safraIni=&safraFim=&estado=GO>. Acesso em 10 de abril de 2017.

Única – União de Indústria de Cana-de-Açúcar. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra2014/2015**. São Paulo, 2015. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/pdfHPM.php?idioma=1&tipoHistorico=4&idTabela=1803&produto=&safra=2014/2015&safraIni=&safraFim=&estado=GO>. Acesso em 10 de abril de 2017.

Única – União de Indústria de Cana-de-Açúcar. **Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2015/2016**. São Paulo, 2016. Disponível em : <http://www.unicadata.com.br/pdfHPM.php?idioma=1&tipoHistorico=4&idTabela=1803&produto=&safra=2015/2016&safraIni=&safraFim=&estado=GO>. Acesso em 10 de abril de 2017.

VASCONCELOS, J. N. Fermentação Etanoica. In: SANTOS, F., BORÉM, A., CALDAS, C., **Cana-de-Açúcar – Bioenergia, Açúcar e Álcool**. Editora UFV, Minas Gerais, 2010.

ZOLIN, C. A. F.; PAULIN, J.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L; FOLEGATTI, M. V.; Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. I. Características do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 1, p.22-28, 2011.