



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**SIMULAÇÃO (ChemSep-COCO) E PRODUÇÃO DE ETANOL A
PARTIR DE AGUARDENTE OBTIDO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Autor:

Camilo De Helénio Manuel Cossa

Supervisor:

Prof. Doutor António José Cumbane, Eng^o.

Maputo, Junho de 2022



FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE LICENCIATURA EM ENGENHARIA QUÍMICA

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**SIMULAÇÃO (ChemSep-COCO) E PRODUÇÃO DE ETANOL
A PARTIR DE AGUARDENTE OBTIDO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Autor:

Camilo De Helénio Manuel Cossa

Supervisor:

Prof. Doutor António José Cumbane, Eng^o.

Maputo, Junho de 2022

TERMO DE ENTREGA DO RELATÓRIO

Declaro que o estudante Camilo De Helénio Manuel Cossa entregou no dia ___/___/20___ as ___ cópias do relatório do seu trabalho licenciatura intitulado:

SIMULAÇÃO (ChemSep-COCO) E PRODUÇÃO DE ETANOL A PARTIR DE AGUARDENTE OBTIDO DA CANA-DE-AÇÚCAR.

Maputo, ___ de _____ de 2022

A Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Camilo De Helénio Manuel Cossa, declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é da minha autoria e fruto da minha pesquisa, as experiências realizadas, o tratamento estatístico e interpretação dos resultados foi por mim efectuada. E não foi submetido nesta e em outras instituições do ensino superior para obtenção de qualquer grau académico. Todas as formulações e conceitos utilizados quer adoptados literalmente ou a partir das suas ocorrências originais encontram-se devidamente citados e identificados.

(Camilo De Helénio Manuel Cossa)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais (Manuel e Helena), avós (Jorge e Quelita), Irmãos (Valdo e Helman), que me apoiaram nesta importante missão. E a Deus, Ser superior que deu-me forças e incutiu-me o espírito de vencedor, Para que eu fizesse esta pesquisa com tanta dedicação.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, que deu-me vida e sempre conduziu-me com as devidas lições de amor, compaixão, e fez com que meus objectivos fossem alcançados durante todos os meus anos de estudo.

Aos meus pais e irmãos, pelo apoio incondicional, pelos momentos de alegria por eles proporcionados, pelo incentivo nos momentos difíceis. Aos meus Tios: Lucas, Inês, Rosalina Alfeu, Sr. Langa, Olga, em especial Micas Sambo e Pedro Maló, pelo suporte e motivação.

Ao Prof. Dr. Eng^o. António Cumbane, pela oportunidade, pela confiança em mim depositada, pela mentoria, por ter apoiado na aquisição dos recursos necessários para a realização do trabalho, pelos momentos de gargalhadas na qual tivemos, pelos ensinamentos e pela visão de inteligência a mim ensinados, o meu muito obrigado.

Ao Prof. Dr. Eng^o. João Chidamoio, pelo espírito motivacional e perseverança durante as aulas de Termodinâmica Química, e por termos coincido com os mesmos *slogans* motivacionais “**No Pain No Gain**”.

Ao Departamento de Engenharia Química da Universidade Eduardo Mondlane, pela oportunidade de aprendizagem, através do excelente corpo docente, pela assistência durante a realização do trabalho de licenciatura.

A turma de Licenciatura em Engenharia Química do ano 2017. Aos meus colegas e amigos, em especial: Mboa, Microsse, Eric, Jones, Óscar, João Matos, Gonçalo, Chiziane, Tandane, Ferreira, Afonso, Mauro, Douglas, Arone, Timóteo, Stélio, Lewis, Nélio, Dívan, Salé, Tijú, Kevin, Elísio, Félix, Luís, Filipe, pelos momentos difíceis e incríveis que passamos juntos, ao grupo de capoeira e aos mestres que ensinaram-me artes marciais e a acreditar no meu potencial: José, Dito, Chande.

A todos que aqui não foram citados, mas que de maneira directa ou indirecta, contribuíram na minha formação e na realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

EPÍGRAFE

“Engenheiros químicos não são pessoas comedidas,
gostam de altas temperaturas e pressões elevadas”.

Steve LeBlane

RESUMO

No contexto actual de crescentes preocupações no sector da saúde, cresce a procura de etanol para o uso como anti-séptico. A valorização de rejeitos agro-industriais para a produção de bio-produtos a partir de fontes renováveis são temas de grande interesse. No caso da produção de etanol de fonte biológica, os processos convencionais apresentam baixos custos de produção, com base no desenvolvimento socioeconómico em Moçambique, surge a iniciativa de se reaproveitar a aguardente para a produção de etanol a partir da matéria-prima abundante no país que é a cana-de-açúcar. Neste âmbito este projecto é conduzido com objectivo de gerar informação tecnológica efectuando a simulação e produção de aguardente de cana-de-açúcar por meio da destilação fraccionada. Onde construiu-se uma coluna de destilação fraccionada cuja figura e as dimensões da coluna são apresentadas no anexo, após a construção deu-se início a fase de testes com água, onde realizou-se a evaporação, que consistia em eliminar as fugas ou perdas presentes na coluna de destilação. Referente a produção, as amostras de aguardente são provenientes da açucareira da Maragra, no distrito da Manhica, na província de Maputo. Fez-se a caracterização física das amostras antes e depois da operação de destilação com vista a analisar a influência entre o teor alcoólico e a densidade no etanol e registou-se o consumo de energia para cada ensaio, com intuito de fazer-se uma comparação com a parte simulada. Uma parte do trabalho foi conduzida com auxílio de um simulador comercial ChemSep-COCO (CAPE OPEN to CAPE OPEN). Foram analisadas oito (8) amostras de aguardente através de análise física e posteriormente estabelecidas relações entre elas. Com os resultados obtidos dos ensaios, a produção de etanol na parte experimental obteve-se em média um teor alcoólico de 87.4°GL e um consumo energético de 1.5107 kW. O resultado da simulação do processo apresentou em média 94.26°GL e um consumo energético de 3.2935 kW. Constatou-se a necessidade de optimização da operação de destilação e das demais operações que compõem o processo de produção de etanol.

Palavras-chave: Cana-de-açúcar, Etanol, Aguardente, Destilação, Simulação.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
EPÍGRAFE	iii
RESUMO	iv
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS.....	vii
LISTA DE GRÁFICOS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xi
CAPITULO I	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJECTIVOS	2
1.2. JUSTIFICATIVA.....	3
1.3. METODOLOGIA.....	4
CAPITULO II	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. HISTÓRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	5
2.2. HISTÓRIA DO ETANOL.....	6
2.3. IMPORTÂNCIA DO ETANOL E SANEAMENTO EM MOÇAMBIQUE NO ÂMBITO DA COVID 19.....	11
2.4. FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA	11
2.5. DESTILAÇÃO	14
2.6. PLANEJAMENTO FACTORIAL.....	25
2.7. SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	26
CAPITULO III	29
3. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	29
3.1. MATERIAIS.....	29
3.2. MÉTODOS	30
3.3. DESTILAÇÃO	31

CAPITULO IV.....	51
4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO	51
4.1. COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ALIMENTAÇÃO	52
4.2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO	52
4.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	53
4.3.2. COMPARAÇÃO DO TEOR ALCOÓLICO ENTRE A PARTE EXPERIMENTAL E SIMULADA	55
CAPITULO V.....	56
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	56
5.1. CONCLUSÕES.....	56
5.2. RECOMENDAÇÕES	57
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
ANEXOS	1
APÊNDICES	10

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

COCO- CAPE OPEN to CAPE OPEN

INPM- Instituto Nacional de Pesos e Medidas

°GL- Grau Gay Lussac

% (v/v) - Percentagem volume/volume

% (p/p) - Percentagem peso/peso

°C- Graus Centigrados

C₂H₆O- Etanol

C₆H₁₂O₆- Glicose

C₁₂H₂₂O₁₁- Sacarose

H₂O- Água

CO₂- Dióxido de Carbono

EPACS- Engenharia de Processos, Ambiente, Consultoria e Serviços

g/mol- grama/mole

g/cm³- grama/centímetro cúbicos

LISTA DE GRÁFICOS

CAPITULO II

Gráfico 2.1-Curva da composição líquido/vapor para uma mistura binária.....	16
Gráfico 2.2-Curvas da Composição líquido/vapor em função do valor da volatilidade K.....	16
Gráfico 2.3-Curva da composição líquido-vapor com forte assimetria.....	17

CAPITULO III

Gráfico 3.1-Variação do teor alcoólico para cada amostra num volume do destilado.....	38
Gráfico 3.2-Variação das densidades para cada amostra num volume do destilado...39	
Gráfico 3.3-Relação do teor alcoólico em relação a densidade relativa.....	39
Gráfico 3.4-Variação da energia consumida a cada meia hora para primeira experiência realizada.....	41
Gráfico 3.5-Curva da Temperatura em função do tempo para a primeira experiência.....	41
Gráfico 3.6-Variação da energia consumida a cada meia hora para segunda experiência.....	42
Gráfico 3.7-Curva da Temperatura em função do tempo para a segunda experiência.....	42
Gráfico 3.8-Variação da energia consumida a cada meia hora para terceira experiência realizada.....	43
Gráfico 3.9-Curva da Temperatura em função do tempo para a terceira experiência.....	43

Gráfico 3.10-Variação da energia consumida a cada meia hora para quarta experiência realizada.....	44
Gráfico 3.11-Curva da Temperatura em função do tempo para a quarta experiência.....	44
Gráfico 3.12-Variação da energia consumida a cada meia hora para quinta experiência.....	45
Gráfico 3.13-Curva da Temperatura em função do tempo para a quinta experiência.....	45
Gráfico 3.14-Variação da energia consumida a cada uma hora para sexta experiência.....	46
Gráfico 3.15-Curva da Temperatura em função do tempo para a sexta experiência.....	46
Gráfico 3.16-Variação da energia consumida a cada uma hora para sétima experiência.....	47
Gráfico 3.17-Curva da Temperatura em função do tempo para a sétima experiência.....	47
Gráfico 3.18-Variação da energia consumida a cada uma hora para oitava experiência.....	48
Gráfico 3.19-Curva da Temperatura em função do tempo para a oitava experiência.....	48
Gráfico 3.20- Curvas da fracção, energia consumida em função do teor alcoólico inicial.....	50

CAPITULO IV

Gráfico 4.1-Curva de equilíbrio do ensaio E8 resultante da simulação... ..	54
Gráfico 4.2-Relação do consumo energético entre parte experimental e simulada.....	56

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO II

Figura 2.1-Illustração da planta de cana-de-açúcar.....	5
Figura 2.2-Diagrama esquemático de uma planta industrial sucroálcooleira com as principais etapas da produção de açúcar, etanol e energia eléctrica.....	9
Figura 2.3-Via metabólica da fermentação de etanol com o microorganismo <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	12
Figura 2.7-ilustração de um processo usado para destilação simples em escala laboratorial.....	18
Figura 2.8-Illustração de um sistema de destilação fraccionada em escala laboratorial.....	19
Figura 2.9-Illustração de um sistema de destilação a vapor em escala laboratorial.....	20
Figura 2.10-Illustração de um sistema de destilação a vácuo em escala laboratorial.....	20
Figura 2.11-Representação esquemática de um estágio genérico.....	21
Figura 2.12-Representação de uma coluna de pratos (Fraccionamento)	23
Figura 2.13-Representação da secção de enriquecimento e os respectivos balanços.....	24
Figura 2.14-Representação da secção de esgotamento e os respectivos balanços.....	25

CAPITULO IV

Figura 4.1-Configuração da coluna de destilação simulada pelo ChemSep-COCO para produção de álcool.....	52
Figura 4.2- condições de operação da configuração do processo de destilação.....	54

LISTA DE TABELAS

CAPITULO II

Tabela 2.1-Propriedades físicas e químicas do etanol.....	10
Tabela 2.2-Principais Simuladores usados nas industriais químicas.....	28
Tabela 3.1-Resultados das amostras antes da operação de destilação.....	31
Tabela 3.2-Resultados das amostras do destilado após a operação de destilação.....	32
Tabela 3.3-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 1.....	32
Tabela 3.4-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 2.....	33
Tabela 3.5-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 3.....	33
Tabela 3.6-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 4.....	33
Tabela 3.7-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 5.....	34
Tabela 3.8-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 6.....	35
Tabela 3.9-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 7.....	35
Tabela 3.10-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 8.....	36
Tabela 3.11-Relação da composição, volume e consumo da energia eléctrica.....	50

CAPITULO IV

Tabela 4.1-Características da alimentação.....53

Tabela 4.2-Relatório do balanço mássico do ensaio E8 da simulação do processo de destilação.....54

Tabela 4.4-Resultado da comparação do teor alcoólico apresentado em média.....55

Tabela 4.3-Resultado da comparação do consumo energético apresentado em média.....56

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO

Moçambique apresenta um forte potencial para a expansão da cultura canavieira, especificamente na produção de açúcar. Mas apresenta um grande desafio relacionado com o não aproveitamento de subproduto da cana-de-açúcar para produção do etanol (Ramos Miguel, 2017).

A destilação é um processo que admite a separação de misturas de líquidos em seus componentes puros ou próximos da pureza, por meio de evaporação e condensação dos componentes em questão (Seron, 2010).

O etanol, também conhecido como álcool etílico (C_2H_6O), é produzido desde os tempos antigos pela fermentação de açúcares presentes em produtos vegetais, tais como cereais, beterraba, batata e cana, sendo a fabricação de bebidas alcoólicas, na verdade, tão antiga quanto a civilização humana. A produção de etanol puro começa no século XII, juntamente com melhorias na “arte da destilação”. Durante a Idade Média, o álcool foi usado principalmente para a elaboração de medicamentos e para a fabricação de pigmentos (ROEHR, 2001).

Simuladores de processos como o COCO, são bastante usados para averiguar problemas operacionais através do cálculo do balanço de massa e energia do sistema. Com esta ferramenta, é possível confrontar processos, analisar possibilidades de melhorias, minimizar o uso de energia, entre outras aplicações. Entre as principais vantagens da simulação temos a sua rapidez de gerar as informações e a exactidão dos dados do projecto.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objectivo Simular e Produzir etanol a partir de aguardente obtido da cana-de-açúcar. Visto que é de extrema importância pois ela apresenta uma vasta gama de aplicações das quais a mais relevante é o uso do etanol como um agente desinfectante, o que contribui bastante para redução de contaminações e infecções.

1.1. OBJECTIVOS

1.1.1. OBJECTIVO GERAL

- Simular e Produzir etanol a partir do aguardente obtido da cana-de-açúcar.

1.1.2. OBJECTIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar fisicamente as amostras de aguardente e do etanol obtido;
- Produzir etanol;
- Avaliar a relação entre o teor alcoólico e a densidade do etanol;
- Simular o processo de produção do etanol;
- Comparar o consumo de energia e o teor alcoólico da parte experimental e simulada.

1.2. JUSTIFICATIVA

A COVID-19 é uma doença infecciosa de alta contagiosidade causada pelo novo coronavírus (SARS-CoV-2). Devido à actual indisponibilidade de uma linha terapêutica específica cientificamente validada para o tratamento, são adoptadas medidas preventivas pontuais como forma de conter a sua propagação (Chissico et al. 2021).

Doenças causadas por infecções bacterianas, fúngicas e virais constituem um problema de saúde pública. A adopção de medidas básicas de prevenção para a redução da incidência de infecções, como a higienização das mãos usando cinza e sabão (Santos et al. 2002; Tiyo et al. 2009) e descontaminação de superfícies através da técnica de fervura de água por 15 minutos (MISAU, 2020), além de baixo custo é bastante relevante na interrupção de transmissão de infecções.

O etanol tem uma importância ambiental muito relevante, pois além de ser produzido a partir de uma matéria-prima renovável, gerar empregos na cadeia sucroalcooleira e novas oportunidades de negócios (SEBRAE,2016).

Entretanto por meio da destilação fraccionada fez-se a destilação de aguardente para a produção de etanol, que por sua vez está entre os anti-sépticos mais seguros, não só por possuir baixíssima toxicidade, mas também pelo seu efeito microbicida rápido e pela fácil aplicação. Neste âmbito surgiu a necessidade de produzir-se localmente o etanol, que por ser economicamente viável é também de alto interesse cultural e económico no país, na qual consiste num dos motivos da escolha do tema em causa.

1.3. METODOLOGIA

A realização deste trabalho seguiu a seguinte metodologia:

1.3.1. PESQUISAS BIBLIOGRÁFICAS

A pesquisa bibliográfica estava relacionada com:

- Sistematização de informações sobre a produção de etanol em Moçambique;
- Trabalhos de licenciatura e dissertações de mestrado relacionados com o tema em causa;
- Trabalho Laboratorial para a produção de etanol;
- Tratamento estatístico e organização dos dados experimentais;
- Simulação do processo de produção de etanol;
- Tratamento, análise, discussão dos resultados obtidos e elaboração do relatório final.

1.3.2. PARTE EXPERIMENTAL E LOCAL DA REALIZAÇÃO

A parte experimental seguiu atentamente os procedimentos descritos na descrição do trabalho, as experiências foram realizadas no laboratório da empresa EPACS.

1.3.3. ELABORAÇÃO DO RELATÓRIO FINAL

A elaboração do relatório final consiste num dossier de informações que seguiu os procedimentos supracitados na metodologia do trabalho, na qual realizou-se tratamento, análise e discussão de dados experimentais obtidos.

CAPITULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. HISTÓRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é originária das regiões tropicais do Sul e do Sudeste da Ásia, Diferentes espécies provavelmente tiveram origem em locais diferentes (Sharpe, 1998). Cana-de-açúcar é um grupo de espécies de gramíneas perenes altas do género *Saccharum*, tribo *Andropogoneae*, utilizadas principalmente para a produção de açúcar e etanol. Tem caules robustos, fibrosos e articulados que são ricos em sacarose. A planta tem entre dois e seis metros de altura.

Os primeiros agricultores no sudeste da Ásia e em outros lugares também podem ter fervido o suco, transformando-o em uma massa viscosa para facilitar o transporte, mas a primeira produção conhecida de açúcar cristalino começou no norte da Índia. A data exacta da primeira produção de açúcar de cana não é clara. Os primeiros indícios de produção de açúcar vêm de antigos textos em sânscrito e pali (George,Watt. et all,1893).

Classificação científica

Reino: Plantae

Divisão: Magnoliophyta

Classe: Liliopsida

Ordem: Poales

Família: Poaceae

Gênero: *Saccharum*

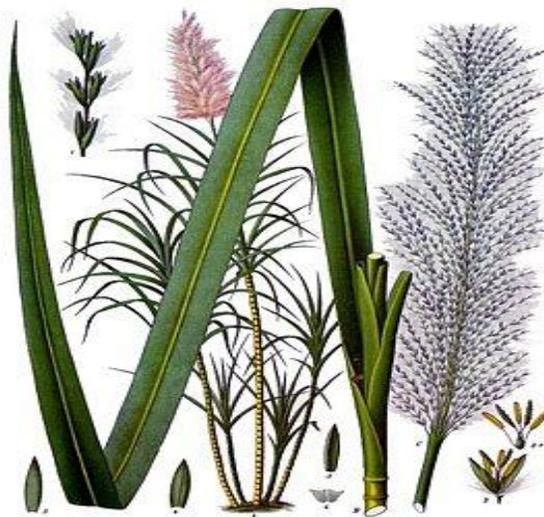


Figura 2.1-Illustração da planta de cana-de-açúcar. Fonte: Köhler, 1897.

2.2. HISTÓRIA DO ETANOL

O etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ou $\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$), também chamado álcool etílico e, na linguagem corrente, simplesmente álcool, é uma substância orgânica obtida da fermentação de açúcares, hidratação do etileno ou redução de acetaldeído, encontrado em bebidas como cerveja, vinho e aguardente, bem como na indústria de perfumaria.

O etanol é o mais comum dos álcoois. Os álcoois são compostos que têm grupos hidroxilo ligados a átomos de carbono (ou seja, cadeias carbônicas saturadas). Podem ser vistos como derivados orgânicos da água em que um dos hidrogénios foi substituído por um grupo orgânico. As técnicas de produção do álcool, na Antiguidade apenas restritas à fermentação natural ou espontânea de alguns produtos vegetais, como açúcares, começaram a se expandir a partir da descoberta da destilação. Mais tarde, já no século XIX, fenómenos como a industrialização expandem ainda mais este mercado, que alcança um protagonismo definitivo, ao mesmo ritmo em que se vai desenvolvendo a sociedade de consumo no século XX. O seu uso é vasto: em bebidas alcoólicas, na indústria farmacêutica, como solvente químico, como combustível ou ainda com antídoto (Rosane, V. 2009).

O etanol é muito importante no meio médico, onde é utilizado, bem como outros álcoois também são, no extermínio de vida microbiana nociva, que poderia piorar o estado dos doentes já que o etanol mata os organismos desnaturando suas proteínas e dissolvendo os lípidos sendo eficaz contra a maioria das bactérias, fungos, e vários tipos de vírus, mas é ineficaz contra os esporos bacterianos (McDonnel G. Russell AD. 1999).

É usado também na produção de biodiesel, onde o óleo da mamona reage com o etanol, gerando éster etílico e glicerina. Há utilização também na produção de bebidas alcoólicas e de produtos farmacêuticos e de perfumaria.

A fermentação do açúcar em etanol é uma das primeiras biotecnologias empregadas pela humanidade. Os efeitos intoxicantes do consumo de etanol já são conhecidos desde tempos antigos. O etanol tem sido utilizado pelos seres humanos desde a pré-história como o ingrediente intoxicante de bebidas alcoólicas. Resíduos secos em

cerâmica de 9 mil anos encontrada na China mostram que no Neolítico as pessoas consumiam bebidas alcoólicas (Roach, J. 2005).

2.2.1. OBTENÇÃO DO ETANOL

O etanol pode ser produzido a partir de diversas matérias-primas. De forma geral, estas podem ser classificadas da seguinte forma (CARDONA e SÁNCHEZ, 2007):

- **Matérias-primas sacaríneas:** são materiais contendo sacarose e contemplam açúcares que podem ser directamente consumidos, presentes na cana-de-açúcar, beterraba, melão e frutas;
- **Matérias-primas amiláceas:** são materiais ricos em amido, em que o polissacarídeo deve primeiro ser hidrolisado para gerarem açúcares fermentescíveis;
- **Matérias-primas lignocelulósicas:** nas biomassas lignocelulósicas (de madeira, palha, bagaço de cana, resíduos de fábricas de papel, etc.) o açúcar disponível se encontra na forma de celulose. Também podem ser convertidas em etanol, através de diferentes tratamentos que tornam possível a hidrólise dos polissacarídeos e o acesso dos microrganismos aos monossacarídeos provenientes destes materiais.

O processo industrial para a produção do etanol de cana-de-açúcar contempla as seguintes etapas (NOVA CANA, 2017).

- **Lavagem:** A cana-de-açúcar, chegando às usinas em sua forma pura, é colocada em uma esteira rolante. Lá, ela é submetida a uma lavagem que retira sua poeira, areia, terra e outros tipos de impurezas. Na sequência, a cana é picada e passa por um electroímã, que retira materiais metálicos do produto.
- **Moagem:** Nesse processo, a cana é moída por rolos trituradores, produzindo um líquido chamado melado. Cerca de 70% do produto original viram esse caldo, enquanto os 30% da parte sólida se transforma em bagaço. Do melado, continua-se o processo de fabricação do etanol, enquanto o bagaço pode ser utilizado à geração de energia na usina.

- **Eliminação de impurezas:** Para eliminar os resíduos presentes no melado (restos de bagaço, areia, etc.), o líquido passa por uma peneira. Em seguida, ele segue a um tanque para repousar, fazendo com que as impurezas se depositem ao fundo – processo chamado decantação. Depois de decantar, o melado puro é extraído e recebe o nome de caldo clarificado. O último processo de extracção de impurezas é a esterilização, em que o caldo é aquecido para eliminar os microorganismos presentes.
- **Fermentação:** Após estar completamente puro, o caldo é levado a tanques no qual é misturado e eles um fermento com leveduras (sendo mais comum a levedura de *Saccharomyces cerevisiae*). Esses microrganismos se alimentam do açúcar presente no caldo. Nesse processo, as leveduras quebram as moléculas de glicose, produzindo etanol e gás carbónico. O processo de fermentação dura diversas horas, e como resultado produz o vinho, chamado também de vinho fermentado, que possui leveduras, açúcar não fermentado e cerca de 10% de etanol.
- **Destilação:** Estando o etanol misturado ao vinho fermentado, o próximo passo é separá-lo da mistura. Nesse processo, o líquido é colocado em colunas de destilação, nas quais ele é aquecido até se evaporar. Na evaporação, seguida da condensação (transformação em líquido), é separado o vinho do etanol. Com isso, fica pronto o álcool hidratado, usado como etanol combustível, com grau alcoólico em cerca de 96%.
- **Desidratação:** Com o álcool hidratado preparado, basta retirar o restante de água contido nele para se fazer o álcool anidro. Essa é a etapa da desidratação, no qual podem ser utilizadas diversas técnicas. Uma delas é a desidratação, em que um solvente colocado ao álcool hidratado mistura-se apenas com a água, com os dois sendo evaporados juntos. Outros sistemas, chamados peneiração molecular e pré-evaporação, utilizam tipos especiais de peneiras que retêm apenas as moléculas da água. Após ser desidratado, surge o álcool anidro, com graduação alcoólica em cerca de 99,5%, utilizado misturado à gasolina como combustível.

2.2.2. PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS

Encontra-se abaixo as propriedades físicas e químicas do etanol.

Tabela 2.1-Propriedades físicas e químicas do etanol. (Fonte: Wikipédia)

Propriedade	Característica
Estado	Líquido
Cor	Incolor
Massa molecular	46.06 g/mol
Densidade	0.789 g/cm ³ a 20°C
Ponto de fusão	-114.18°C
Ponto de ebulição	78.25°C
Solubilidade em água	Miscível
Índice de refração	1.36 a 25°C
Viscosidade	1.200 a 20°C

2.2.3. CLASSIFICAÇÃO E USOS

Dentre os quais destacam-se os seguintes:

- **Anidro** - o álcool anidro é bastante caracterizado pelo teor alcoólico mínimo de 99,3° (INPM), sendo composto apenas de etanol ou álcool etílico.
Uso: É utilizado como combustível para veículos (Gasolina C) e matéria-prima na indústria de tintas, solventes e vernizes.
- **Hidratado** - é uma mistura hidroalcoólica (álcool e água) com teor alcoólico mínimo de 92,6° (INPM), composto por álcool etílico ou etanol.
Uso: O emprego de álcool hidratado é na indústria farmacêutica, alcoolquímica e de bebidas, combustível para veículos e produtos para limpeza. O etanol é também usado como matéria-prima para a produção de vinagre e ácido acético, a síntese de cloral e iodofórmio.

2.3. IMPORTÂNCIA DO ETANOL E SANEAMENTO EM MOÇAMBIQUE NO ÂMBITO DA COVID 19

Na concentração de 70% (p/p), o produto tem a quantidade exacta de água para facilitar a entrada do álcool no interior do microorganismo, seja bactéria, fungo ou vírus, como o coronavírus. Isso porque a água, além de impedir a desidratação da parede celular externa do microorganismo, retarda a evaporação do álcool permitindo maior tempo de contacto para que haja a penetração do álcool no interior do microorganismo, resultando na sua destruição. Os álcoois com concentração superior a 70%, sem a água ou com água em baixas proporções, desidratam o microorganismo sem matá-lo. É o caso, por exemplo, dos concentrados em 99,6% (absoluto) ou o 92,8%, utilizado como composição em fórmulas cosméticas ou solvente de outros produtos. São ineficazes no combate ao coronavírus porque evaporam com extrema rapidez (Fernandes, 2020).

Agora, mais do que nunca, ficou provado que bons hábitos de higiene salvam vidas. Estamos numa fase em que a prioridade de todos é parar a propagação da COVID-19 e a lavagem das mãos, associada a outras práticas de higiene, é uma das medidas de primeira linha para travar esta pandemia, 46% da população em Moçambique não tem acesso à água e, por isso, sem condições de poder lavar as mãos com frequência e da forma correcta, uma das recomendações de primeira linha para evitar a propagação da Covid-19 (Pannack, 2018).

2.4. FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA

A fermentação alcoólica ocorre no interior de microrganismos capazes de converter açúcares assimiláveis (substrato oxidado) em etanol (substrato reduzido), através de uma série de reacções bioquímicas, reguladas enzimaticamente. A oxidação parcial do substrato, gerando um composto orgânico reduzido, garante um mínimo de produção de energia para manutenção celular e o equilíbrio oxidativo.

Historicamente, os microrganismos mais comumente utilizados na fermentação alcoólica têm sido as leveduras do género *Saccharomyces* e, dentre essas, *Saccharomyces cerevisiae* a principal espécie. Leveduras do género *Saccharomyces*

também são usadas como aditivo em alimentos para consumo humano e, portanto, ideal para a produção de bebidas alcoólicas e fermento de pão.

A principal via metabólica envolvida na produção do etanol em leveduras é a via glicolítica (Embden-Meyerhof): uma sequência de reacções catalisadas por enzimas, em que cada molécula de glicose metabolizada, duas moléculas de piruvato é produzida no citoplasma da célula Figura 2.3 (BAI et al., 2008).

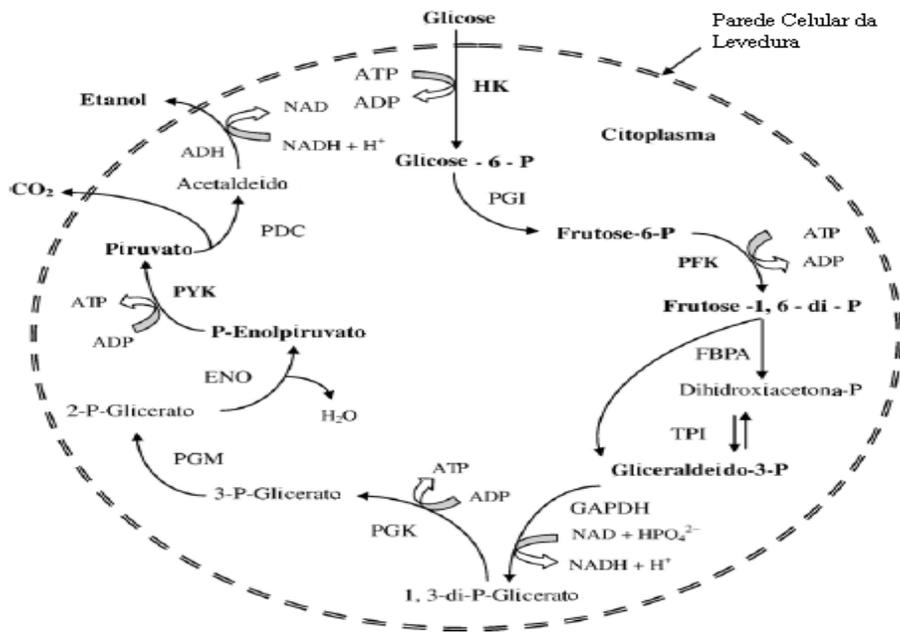


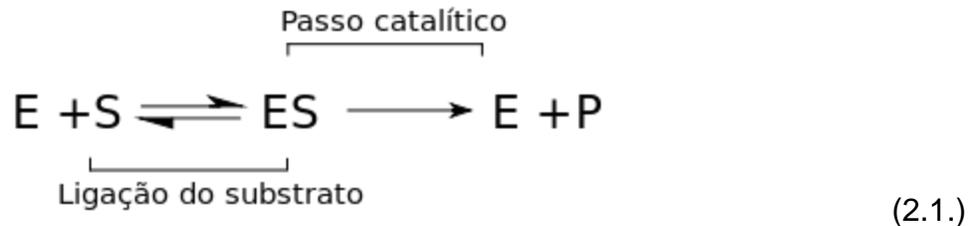
Figura 2.3-Via metabólica da fermentação de etanol com o microorganismo *Saccharomyces cerevisiae*.

Abreviações: HK: enzima hexoquinase, PGI: fosfoglucoisomerase, PFK: fosfofrutoquinase, FBPA: frutose bifosfato aldolase, TPI: triose fosfato isomerase, GAPDH: gliceraldeído-3-fosfato desidrogenase, PGK: fosfoglicerato quinase, PGM: fosfoglicomutase, ENO: enolase, Pyk: piruvato quinase, PDC: piruvato descarboxilase, e ADH: álcool desidrogenase. Fonte: BAI et al. (2008).

2.4.1. ENZIMA

São grupos de substâncias orgânicas de natureza normalmente proteica. As enzimas convertem uma substância, chamada de substrato, noutra denominada produto, e são extremamente específicas para a reacção que catalisam. Isso significa que, em geral, uma enzima catalisa um e só um tipo de reacção química. Consequentemente, o tipo

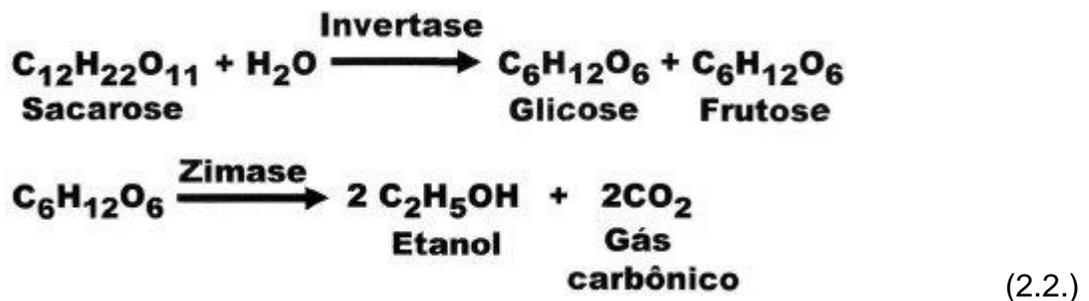
de enzimas encontradas numa célula determina o tipo de metabolismo que a célula efectua.



2.4.1.1. REACÇÃO COM ADIÇÃO DE ENZIMAS

Invertase (nome sistemático: beta-frutofuranosidase) é uma enzima (sacarase). Ela catalisa a hidrólise da sacarose em frutose mais glicose. Para o uso industrial, a invertase é comumente obtida de leveduras.

Zimase é um complexo enzimático que catalisa a fermentação do açúcar em etanol e dióxido de carbono (Harden,1905). Ocorre naturalmente em leveduras. Zimase foi isolado pela primeira vez da célula de levedura em 1897 por um químico alemão chamado Eduard Büchner, que levantou a hipótese de que as células de levedura secretam proteínas em seu ambiente para fermentar os açúcares. Posteriormente foi demonstrado que a fermentação ocorre dentro das células de levedura.



2.4.2. AGUARDENTE DE CANA-DE-AÇÚCAR

Aguardente de cana é a bebida com graduação alcoólica de 38 a 54% (v/v), obtida do destilado alcoólico simples de cana-de-açúcar ou pela destilação do mosto fermentado do caldo de cana-de-açúcar (Silva, A.P et al. 2020).

2.5. DESTILAÇÃO

A destilação é um processo que admite a separação de misturas de líquidos em seus componentes puros ou próximos da pureza, por meio de evaporação e condensação dos componentes em questão. Para sua eficiência o controle da volatilidade e do equilíbrio líquido – vapor é essencial (Seron, 2010).

O processo de produção do álcool consiste em elevar a concentração alcoólica do vinho até valores superiores a 90 °GL, ao redor de 96 °GL se o objectivo é a obtenção do denominado álcool hidratado, ou valores superiores a 99 °GL se for o álcool anidro. Durante a fermentação são produzidos, além do etanol, outros álcoois homólogos de três, quatro e cinco carbonos, aldeídos, ésteres e mais, que são designados como componentes secundários. Para se otimizar a produção de etanol exclusivamente é necessária a retirada desses componentes numa operação denominada de rectificação (Cláudio et al., 2011).

2.5.1. VOLATILIDADE

Todo material volátil, como o nome indica, emite vapor, ou seja, apresenta uma pressão de vapor, cujo valor aumenta com a temperatura. A temperatura na qual o líquido volátil apresenta uma pressão de vapor igual a da atmosfera, diz-se que ele atingiu a sua temperatura de ebulição. A volatilidade dos líquidos é directamente proporcional a sua pressão de vapor, ou seja, quanto maior a pressão de vapor, maior é a volatilidade, que é inversamente proporcional a sua temperatura de ebulição. Assim, quanto menor a temperatura de ebulição, maior é sua volatilidade (Cláudio et al., 2011).

Volatilidades relativas muito maiores ou menores do que 1 indicam que o componente pode ser separado facilmente pela destilação (Batista, 2008). A volatilidade relativa de um componente de mistura de líquidos voláteis corresponde à relação entre suas concentrações na fase vapor e na fase líquida, e é chamada de quociente de equilíbrio:

$$K = \frac{Y}{X} \rightarrow Y = K \cdot X \quad (2.4)$$

Em que:

- Y: fracção molar de um componente na fase vapor;
- X: fracção molar de um componente na fase líquida;
- K: quociente de equilíbrio.

Para o caso de uma mistura binária formada pelos componentes A e B, a volatilidade relativa do componente A pode ser escrita da seguinte forma:

$$K_A = \frac{Y_A}{X_A} \quad (2.5)$$

e a volatilidade relativa do componente B:

$$K_B = \frac{Y_B}{X_B} \quad (2.6)$$

Para uma mistura de dois componentes, cumpre-se o balanço de massa:

$$\begin{cases} X_A + X_B = 1 \\ Y_A + Y_B = 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

2.5.2. CURVAS DE COMPOSIÇÃO LÍQUIDO/VAPOR

A composição da fase vapor para misturas binárias de componentes voláteis pode ser apresentada sob a forma de uma curva em que, para cada concentração da fase líquida, teremos a composição em fracção molar da fase gasosa. Uma curva de composição líquido/vapor é construída para uma determinada pressão e possui uma conformação como visto no Gráfico 2.1.

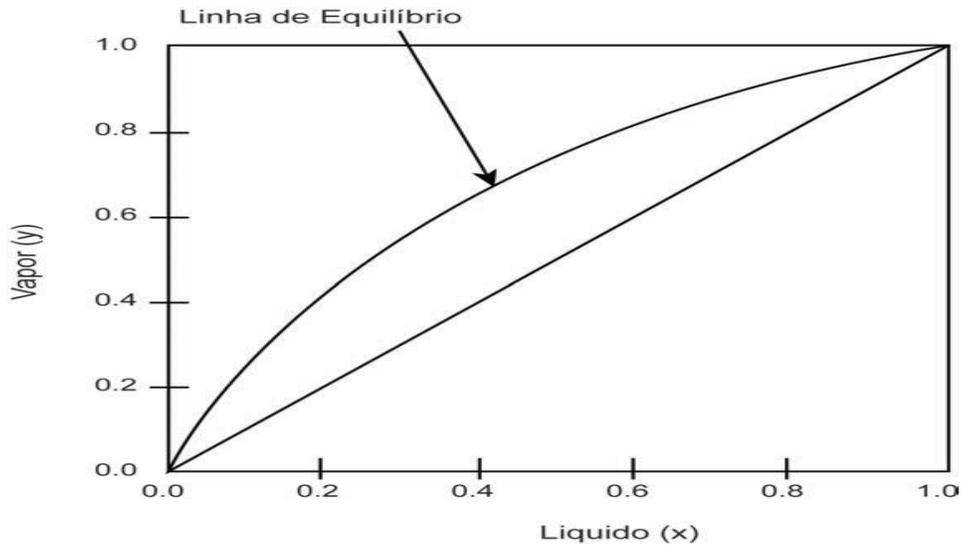


Gráfico 2.1-Curva da composição líquido/vapor para uma mistura binária. (Fonte: Cláudio et al. 2011)

O gráfico de composição líquido/vapor pode assumir diversas configurações em função do valor assumido pela volatilidade relativa, conforme o Gráfico 2.2.

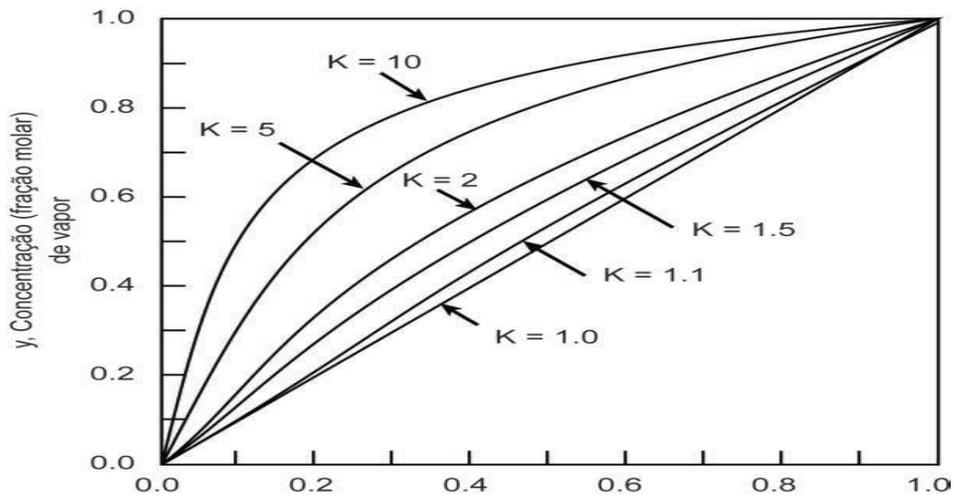


Gráfico 2.2-Curvas da Composição líquido/vapor em função do valor da volatilidade K . (Fonte: Cláudio et al. 2011)

As curvas ideais de composição apresentam o formato simétrico, como mostram os Gráficos 2.1 e 2.2. Entretanto, misturas não ideais podem apresentar uma conformação assimétrica, como pode ser visto no Gráfico 2.3.

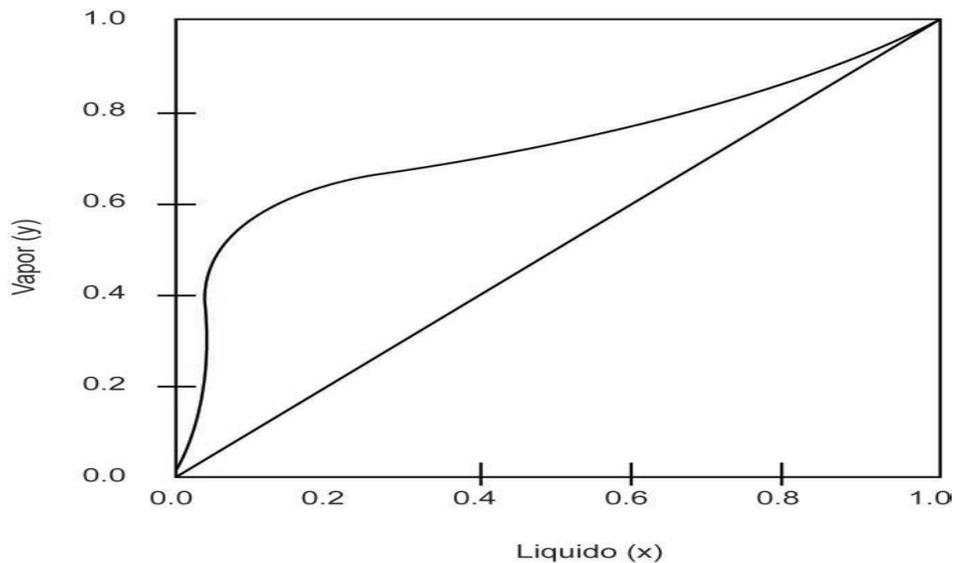


Gráfico 2.3-Curva da composição líquido-vapor com forte assimetria. (Fonte: Cláudio et al. 2011).

2.5.3. TIPOS DE DESTILAÇÃO

O processo de destilação é baseado na separação que ocorre através do fenômeno de equilíbrio líquido-vapor da mistura em questão, através da diferença de volatilidade entre os componentes da mistura, neste âmbito seguem-se os seguintes tipos de destilação.

2.5.3.1. DESTILAÇÃO SIMPLES

A destilação simples consiste no processo de separação de uma mistura homogênea (que possui uma única fase), onde um soluto está disperso ou dissolvido em um solvente (no estado líquido). Basicamente, a destilação simples atua com a evaporação do solvente presente na mistura, através de aquecimento, possibilitando a quantificação do resíduo sólido, após a completa vaporização da parte líquida (Quevedo, 2016).

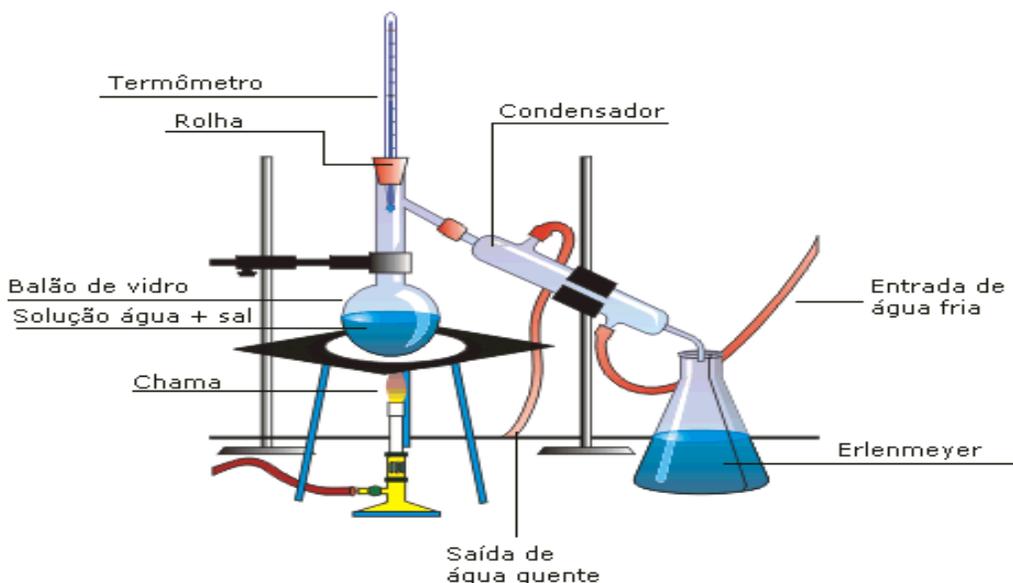


Figura 2.7-ilustração de um processo usado para destilação simples em escala laboratorial. Fonte: <http://www.infoescola.com/files/2009/08/destilacao-simples.gif> (acessado em 24/11/2021)

2.5.3.2. DESTILAÇÃO FRACCIONADA

É o processo de separação onde se utiliza uma coluna de fracionamento na qual é possível realizar separação de diferentes componentes que apresentam propriedades físicas distintas, como o ponto de ebulição. Este é um processo de separação e agrupamento dos produtos da mistura que é empregue quando os pontos de ebulição dos componentes de uma mistura são próximos e não é possível realizar uma destilação simples. Um aparelho mais complexo e exige um pouco mais de tempo no processo.

Neste processo existe uma coluna de fracionamento que cria várias regiões de equilíbrio líquido-vapor, levando a uma série de micro destilações simples sucessivas, enriquecendo a fracção do componente mais volátil da mistura na fase de vaporização (Holmyard, 1990).

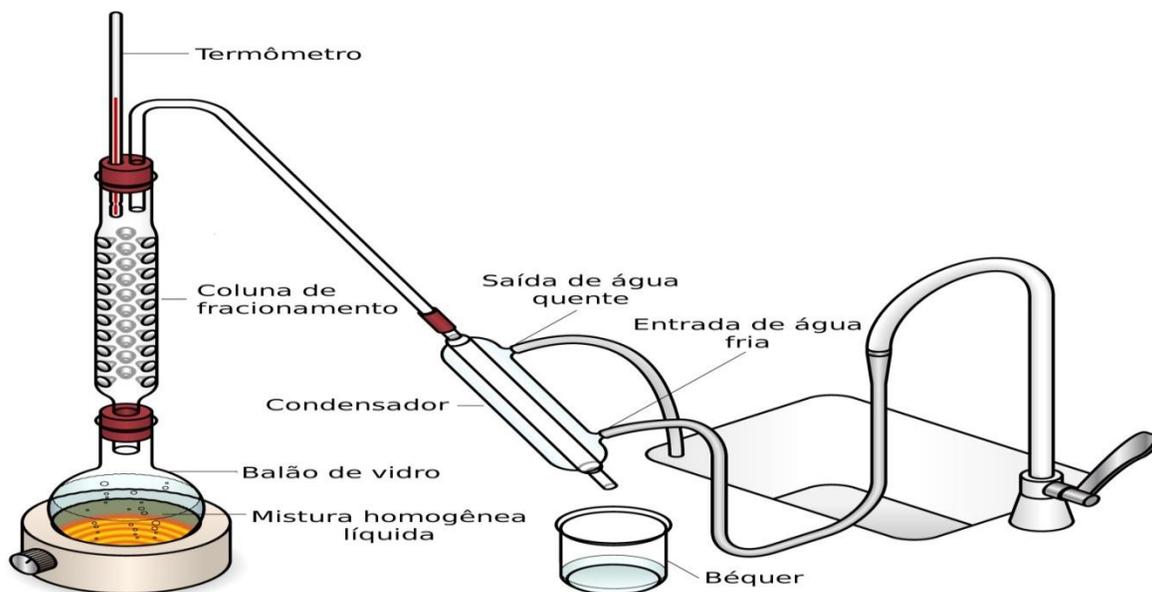


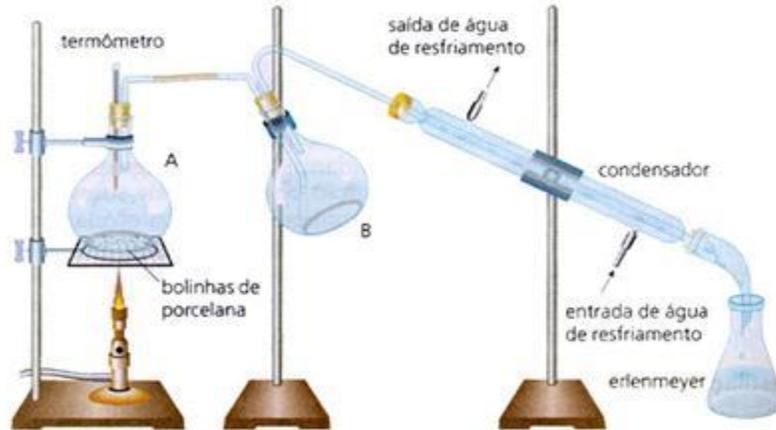
Figura 2.8-Illustração de um sistema de destilação fracionada em escala laboratorial. Fonte: www.infoescola.com (adaptado por Zern Liew).

2.5.3.3. DESTILAÇÃO POR ARRASTE DE VAPOR OU A VAPOR

A destilação a vapor ou destilação por arraste de vapor é uma destilação que usa vapor de água em substâncias imiscíveis, em geral compostos orgânicos, tendo como vantagem o fato da mistura a ser destilada entrar em ebulição abaixo de 100°C.

- **Princípio**

Misturas imiscíveis não se comportam como soluções, mantendo suas pressões de vapor constantes, como se estivessem puros no sistema. Assim, seguindo a lei de Dalton, onde a pressão total de vapor do sistema é a soma das pressões de vapor de cada substância pura, elas evaporam a temperaturas menores do que se estivessem sozinhas, pois a pressão de vapor da mistura será sempre mais alta que a de seus constituintes puros. Por isso, uma mistura de um composto de alto ponto de ebulição e água poderá ser destilada à temperatura menor que 100°C a 760 mmHg (Soares et al., 1988).



*Figura 2.9-Illustração de um sistema de destilação a vapor em escala laboratorial.
Fonte: Wikipédia.*

2.5.3.4. DESTILAÇÃO A VÁCUO

A destilação a vácuo é um processo de separação de dois ou mais componentes voláteis com diferentes pontos de ebulição. Nos processos químicos, o vácuo é aplicado para evitar a polimerização, as reacções indesejáveis e a degradação térmica. O vácuo também melhora a separação, diminuindo os custos operacionais e de energia ao mesmo tempo em que aumenta a recuperação do produto.



*Figura 2.10-Illustração de um sistema de destilação a vácuo em escala laboratorial.
Fonte: Wikipédia.*

2.5.4. MODELAGEM DE COLUNAS DE DESTILAÇÃO EM REGIME ESTACIONÁRIO

O modelo matemático clássico para uma coluna de destilação inclui equações básicas: balanço de massa (M), relações de equilíbrio (E), o somatório das fracções molares (S) e o balanço de energia (H). Essas equações são normalmente designadas de equações MESH (BRITO, 1997).

A figura 2.11 mostra a representação esquemática de um prato, onde o número de estágios foi numerado da base para o topo da coluna. Seguindo a estrutura desenvolvida por Naphtali e Sandholm (1971), são mostradas as funções discrepâncias, D1, D2 e D3 (que se aproximam de zero quando o método numérico converge), obtidas através do balanço e das relações de equilíbrio.

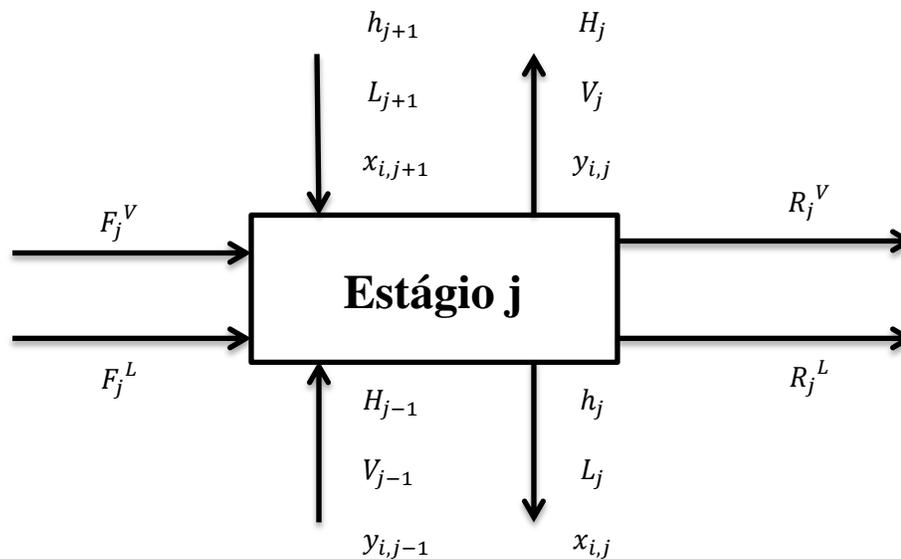


Figura 2.11-Representação esquemática de um estágio genérico.

Onde:

F é a alimentação, L é a vazão de líquido, V é a vazão de vapor, R é a vazão de retirada lateral, H é a entalpia do vapor, h é a entalpia do líquido, x é a fracção molar do componente i no líquido, y é a fracção molar do componente i no vapor.

- Balanço de massa para o componente i no estágio j:

$$D1_{i,j} = L_{i,j+1} \cdot x_{i,j+1} + V_{i,j-1} \cdot y_{j-1} + F_j^L \cdot x_{i,j}^F + F_j^V \cdot y_{i,j}^F - L_{i,j} \cdot x_{i,j} - V_{i,j} \cdot y_{i,j} - R_{i,j}^L \cdot x_{i,j} - R_{i,j}^V \cdot y_{i,j} = 0 \quad (2.8)$$

- Balanço global de energia no prato j:

$$D2_j = L_{i,j+1} \cdot h_{i,j+1} + V_{i,j-1} \cdot H_{j-1} + F_j^L \cdot h_{i,j} + F_j^V \cdot H_{i,j} - L_{i,j} \cdot h_{i,j} - V_{i,j} \cdot H_{i,j} - R_{i,j}^L \cdot h_{i,j} - R_{i,j}^V \cdot H_{i,j} = 0 \quad (2.9)$$

- Relações de equilíbrio

$$D3_{i,j} = y_{i,j} - K_{i,j} \cdot x_{i,j} = 0 \quad (2.10)$$

2.5.5. SECÇÕES DOS PRATOS DA COLUNA DE DESTILAÇÃO

Os processos de destilação alcoólica contínua, tanto para a produção dos diferentes tipos de álcoois, são realizados em colunas de pratos ou bandejas, contendo válvulas ou borbulhadores. Essas colunas de destilação podem ser divididas em duas regiões distintas. A primeira região, localizada entre o prato de alimentação e o topo da coluna, é conhecida como secção **enriquecedora** ou **secção rectificadora**, onde a vazão de vapor ascendente é maior que o líquido descendente, fazendo com que esse vapor seja enriquecido do (os) componente (s) mais volátil (eis). A segunda região, localizada abaixo do prato de alimentação, sem a inclusão do mesmo, é conhecida como **secção de exaustão** ou **secção de esgotamento**, onde a vazão do líquido descendente se torna maior que o vapor ascendente, concentrando o (s) elemento (s) menos volátil (eis) no líquido descendente (BATISTA, 2008).

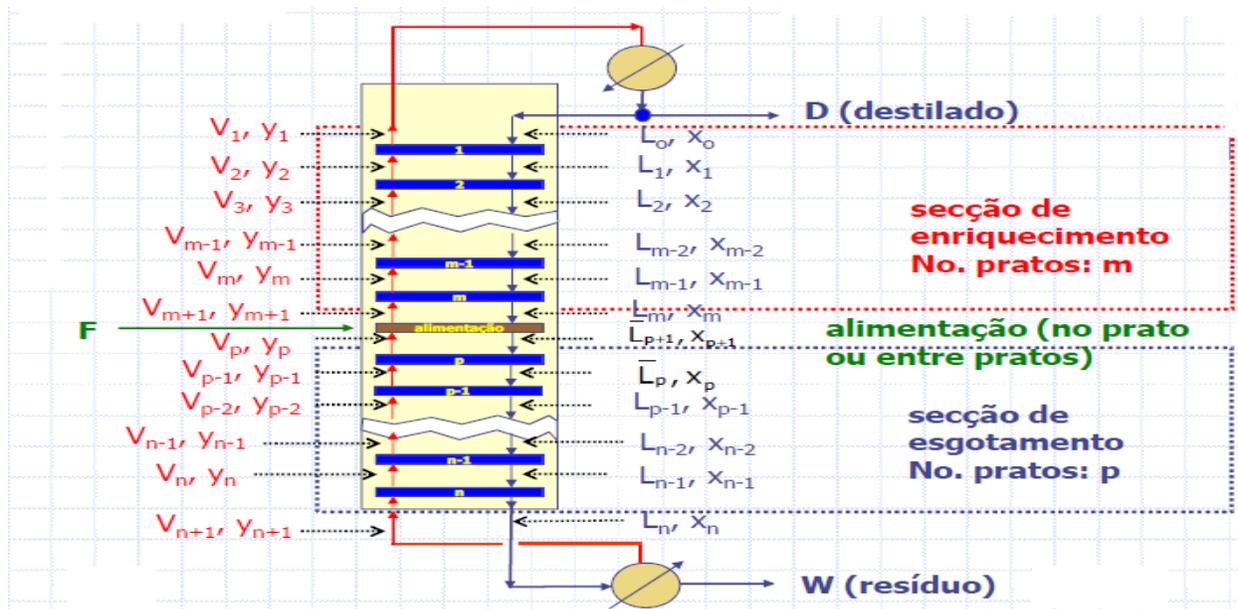


Figura 2.12-Representação de uma coluna de pratos (Fracionamento). Fonte: Adaptado de João Venâncio.

2.5.5.1. BALANÇO DE MASSA E ENERGIA

Todo processo de simulação computacional está baseado na solução de equações que representem o processo desejado. Assim, para a simulação de qualquer processo de destilação contínua, deve-se lançar mão de um modelo capaz de representar, na íntegra, os balanços globais e por estágio, de massa e energia do sistema de destilação em questão.

Esse modelo baseia-se nas equações MESH, que é um método rigoroso capaz de descrever a coluna como um conjunto de equações matemáticas (Kister, 1992). A solução dessas equações possibilita determinar as condições de operação de uma coluna. Sendo assim, as equações MESH convertem a coluna num conjunto de equações que devem ser satisfeitas para a resolução da mesma.

As variáveis independentes dessas equações MESH são frequentemente referenciadas como:

- Temperatura do estágio;
- Vazão interna de líquido e vapor;
- Composição do estágio ou vazão por componentes de líquido e vapor;

A seguir serão apresentadas as equações MESH que regem uma coluna de destilação, admitindo a idealidade dos estágios

a) EQUAÇÃO DA SOMATÓRIA

A equação da somatória nada mais é que a soma das fracções molares de cada componente em cada estágio da coluna. Portanto ela nos diz que a soma das fracções molares de líquido e vapor em cada estágio deve ser igual à unidade.

Assim temos:

- Para o líquido

$$\sum_{i=1}^C x_{ij} - 1 = 0 \quad (2.11)$$

- Para o vapor

$$\sum_{i=1}^C y_{ij} - 1 = 0 \quad (2.12)$$

Onde o índice i representa um determinado elemento da mistura, o índice j representa o estágio analisado, x a fracção molar do líquido, y a fracção molar do vapor.

b) BALANÇO GLOBAL E DE COMPONENTES

- Secção de Enriquecimento

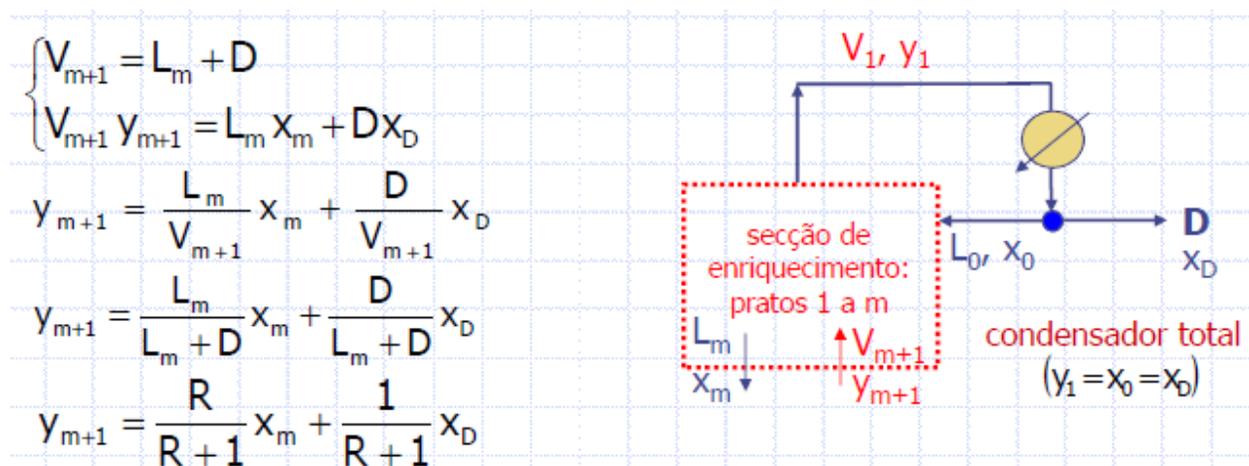


Figura 2.13-Representação da secção de enriquecimento e os respectivos balanços.
Fonte: Adaptado de João Venâncio.

- **Secção de Esgotamento**

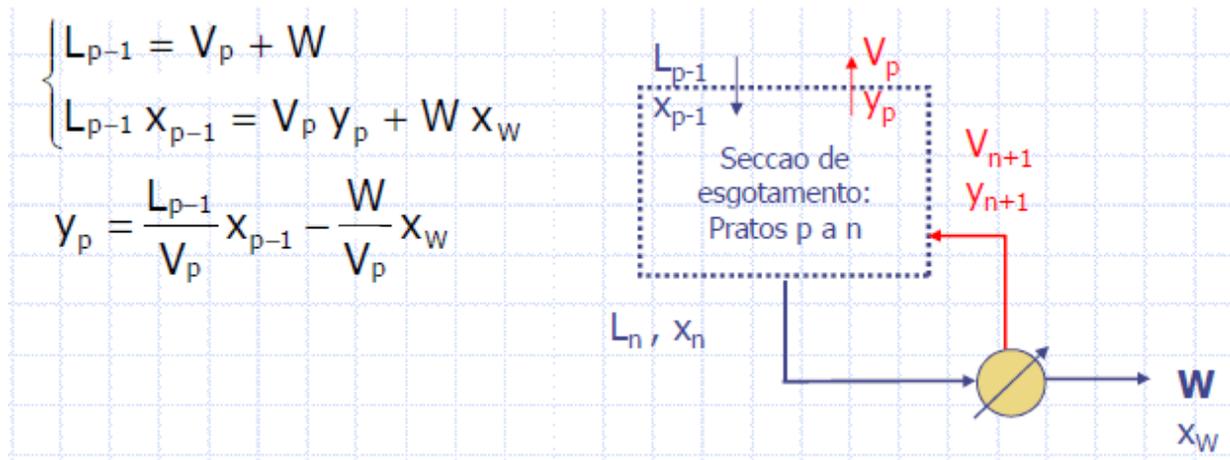


Figura 2.14-Representação da secção de esgotamento e os respectivos balanços. Fonte: Adaptado de João Venâncio.

2.5.6. CARACTERÍSTICAS DAS FRACÇÕES DO DESTILADO

O processo de destilação é etapa que também está relacionada com a qualidade da bebida. Nesta etapa, ocorre a concentração do etanol presente no vinho e dos componentes do vinho (etanol, água e congéneres, como ácidos, álcoois, ésteres, compostos carbonílicos, acetais, fenóis, hidrocarbonetos, compostos nitrogenados, compostos sulfurados e açúcar), que apresentam diferentes graus de volatilidade. Assim, é possível realizar a separação por destilação, onde esses compostos serão concentrados, caracterizando e qualificando a bebida. Os compostos mais voláteis são destilados na primeira fracção da destilação, denominada de “cabeça”; em seguida, tem-se a fracção “coração” e os compostos menos voláteis saem na última fracção da destilação denominada de “cauda” ou “água fraca” (SCANAVINI; CERIANI; MEIRELLES, 2012; CARDOSO, 2013).

2.6. PLANEJAMENTO FACTORIAL

O avanço computacional vem permitindo que, a análise de processos por simulação, possibilite o estudo e a optimização dos mesmos sem grandes custos ou, pelo menos, com uma grande redução desses. Porém, estudos por simulação, normalmente envolvem um grande número de variáveis, além da necessidade de avaliar a influência

de cada uma delas sobre o processo, bem como qual será o resultado da interacção das mesmas sobre este mesmo processo (Batista, 2001).

Diversas vantagens podem ser listadas para justificar o uso do planeamento experimental como estratégia para optimização ou desenvolvimento de um novo processo e/ou produto, Rodrigues e Lemma (2005) ressaltam que:

- É possível a redução do número de experimentos ou repetições melhorando a qualidade da informação obtida. Isso significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e custo final.
- Os factores são analisados simultaneamente. Assim, podemos verificar e quantificar efeitos sinérgicos e antagónicos entre os factores de interesse.
- É possível optimizar mais de uma resposta ao mesmo tempo. Esta é uma das grandes vantagens do planeamento factorial. Podemos maximizar variáveis como rendimento, produtividade e pureza, e/ou minimizar variáveis como custo, contaminação, entre outras, de maneira individual ou simultânea.

2.7. SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

A simulação computacional de processos vem sendo usada com cada vez mais frequência tanto na indústria, pois permite a determinação, ainda que teórica, de dados muito difíceis de serem obtidos na planta de processamento, como no meio académico, com o objectivo de possibilitar um conhecimento mais aprofundado do processo em questão.

Essa ferramenta permite o estudo de alternativas de processamento, possibilitando ajustes de entradas, das condições de operação e do projecto de equipamento que não poderiam ser feitos em escala industrial, pois, pequenas variações nas condições de operação, poderiam gerar alterações indesejáveis à rentabilidade do processo na planta de processamento (Scanavini et al., 2005).

2.7.1. BENEFÍCIOS DA SIMULAÇÃO DE PROCESSOS

Devido à complexidade dos processos de engenharia, o uso de simulações, tanto para o conhecimento do funcionamento de plantas já existentes, quanto para os projectos de novas plantas, podem trazer inúmeros benefícios como (Himmelblau & Bischoff, 1968):

- Economia de experimentos, permitindo o estudo de processos já existentes de forma mais rápida e económica do que na planta real;
- Extrapolação, pois, com o uso de ferramentas matemáticas é possível testar condições extremas de operação, difíceis de serem testadas numa planta real;
- Estudo da estabilidade do sistema, uma vez que é possível avaliar a resposta do sistema a distúrbios;
- Estudo da comutabilidade e determinação de políticas alternativas, sendo possível à introdução ou remoção de novos elementos no sistema, enquanto o mesmo é examinado.

2.7.2. CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Para o estudo do processo de destilação, a simulação computacional torna-se uma excelente ferramenta uma vez que, essa operação unitária, possui um grande número de variáveis envolvidas no seu funcionamento. Portanto, com o aumento da disponibilidade de ferramentas computacionais, bem como com o crescimento da importância dos processos de simulação no campo industrial e académico, um grande número de artigos presentes na literatura, vem ampliando o conhecimento sobre o uso dessas ferramentas.

Os modelos de simulação podem ser classificados em estacionários ou dinâmicos. Descreve-se a seguir cada um deles (Smith, 2016):

- **Modelos de simulação estacionários:** é a representação de uma operação que já tenha atingido o estado estacionário. O tempo não influencia os resultados obtidos na simulação. O modelo representa o estágio do processo em que tenha atingido o estado de equilíbrio.
- **Modelos de simulação dinâmicos:** é a representação de uma operação que evolui com o tempo, como por exemplo no “start-up” e “shutdown” da instalação, sob condições transientes.

Existe hoje no mercado uma grande quantidade de softwares para simulação de processos. Para a simulação de processos de produção, destilação e mais, encontram-se listados na tabela 2.2.

Tabela 2.2-Principais Simuladores usados nas industriais químicas.

Simulador	Desenvolvedor	Website
Aspen HYSYS	Aspen Technology, Inc	www.aspentech.com
Aspen Plus	Aspen Technology, Inc	www.aspentech.com
AnyLogic PLE	The AnyLogic Company	www.anylogic.com
EMSO Simulator	The ALSOC Project	www.enq.ufrgs.br/trac/alsoc/wiki/EMSO
ChemSep- (COCO)	CAPE OPEN TO CAPE OPEN	www.cocosimulator.org.com
MATLAB	MathWorks	www.mathworks.com

Dentre eles podemos citar o *ChemSep- (COCO)*, criado por “Ross Taylor e Harry Kooijman”, que é o *software* usado neste trabalho. Esses *softwares* vêm sendo empregados na investigação de muitos processos industriais na indústria de alimentos (bebidas, recuperação de aromas) e na indústria química (produção de etanol, destilações extractivas).

CAPITULO III

3. MATERIAIS E METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. MATERIAIS

Foram estudadas 8 amostras de aguardente proveniente da Maragra, Localizada na província de Maputo, no distrito da Manhiça. Pretendia-se com isso determinar-se o Teor alcoólico, Densidade relativa contida numa certa quantidade de amostras de aguardente.

Para o tratamento sequencial das amostras foram designadas como A1 a A8, e para os ensaios foram designadas como E1 a E8. Foi usado um Software denominado *ChemSep* da *CAPE OPEN to CAPE OPEN* para realização das simulações para prever possíveis resultados das experiencias.

3.1.1. EQUIPAMENTOS

Segue-se abaixo a relação dos equipamentos utilizados para o desenvolvimento trabalho.

- Uma coluna de destilação fraccionada;
- Uma manta térmica com as seguintes características, (NAME: JAYMET; S.NO: 18606; SIZE: 50 LTR; VOLTS: 230/415; WATTS: 6*600).

3.1.2. INSTRUMENTAÇÃO E VIDRARIA

Segue-se abaixo a relação dos instrumentos e vidrarias utilizados para o desenvolvimento dos testes experimentais:

3.1.2.1. ALCOÔMETRO CENTISIMAL DE GAY LUSSAC

O alcoómetro utilizado durante os procedimentos experimentais consiste num dispositivo para determinação do grau alcoólico, constituído por um corpo cilíndrico de vidro oco, com um pequeno apêndice inferior cheio de chumbo ou mercúrio que serve de lastro para manter o alcoómetro sempre na posição vertical durante a flutuação. Na parte superior detém de uma haste de vidro, na qual pode se ver a escala que indica o grau alcoólico da mistura hidroalcoólica.

3.1.2.2. DENSÍMETRO

É um aparato que tem por objectivo medir a massa específica (também chamada densidade) de líquidos.

3.1.2.3. TERMÔMETRO DIGITAL

É um instrumento que mede quantitativamente a temperatura de um sistema. E apresenta as seguintes características, (NAME: FLUKE; J-TYPE (IRON-CONSTANTAN), K-TYPE (CHROMEL-ALUMEL); NEDA 16049 V 6F 229 V 006P; S.NO: 5234094).

3.1.2.4. PROVETA

Foi utilizada uma proveta graduada de 100 ml, a qual serviu para medir a produção do álcool e para fazer-se a leitura da graduação alcoólica.

3.1.2.5. CRONÔMETRO

É um relógio projectado para medir a quantidade de tempo que decorre entre sua activação e desactivação.

Encontram-se anexados todos equipamentos citados acima (Anexo A.3).

3.2. MÉTODOS

3.2.1. PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Devido a diferença do teor alcoólico nas amostras, surgiu a necessidade de fazer a medição do teor alcoólico, densidade e temperatura do mesmo. Para melhor controlo das possíveis quantidades a se destilar durante o processo. As amostras são contidas num recipiente de 25 litros tendo em conta a capacidade máxima do balão volumétrico que são de 50 litros que serão usadas para destilação. Portanto, as amostras que continham menor teor alcoólico eram adicionadas uma quantidade de líquido da amostra que continha 40-50 % de teor alcoólico contido num recipiente de 5 litros para aumentar o seu teor alcoólico.

3.3. DESTILAÇÃO

A operação unitária que consiste no aquecimento do líquido para fase de vapor seguido de condensação que é dada pela diferença de ponto de ebulição é denominada destilação. Neste âmbito, registou-se as Temperaturas, o Tempo, a Potência consumida a cada 30 e 60 minutos para posteriores análises.

3.3.1. CRITÉRIO DE MONITORIZAÇÃO DAS AMOSTRAS

A tabela a seguir ilustra os dados iniciais das amostras de aguardente antes da operação de destilação.

Tabela 3.1-Resultados das amostras antes da operação de destilação.

Amostra	Teor alcoólico (%)	Densidade relativa	Temperatura do líquido (°C)
1	33	0.967	27.5
2	16	0.98	24.6
3	13	0.96	25.4
4	30	0.975	24.5
5	14	0.985	34.4
6	30	0.97	25.1
7	27	0.97	26.7
8	20	0.975	28.6

A tabela a seguir ilustra os dados monitorados no fim da operação de destilação.

Tabela 3.2-Resultados das amostras do destilado após a operação de destilação.

Destilado	Teor alcoólico (%)	Densidade relativa	Temperatura do líquido (°C)
1	92	0.83	28.5
2	82	0.865	30.3
3	77	0.87	32.5
4	90	0.835	24.9
5	83	0.86	30.1
6	90	0.84	25.2
7	91	0.835	27.5
8	94	0.825	28.5

3.3.2. REGISTO DA TEMPERATURA, TEMPO E ENERGIA

3.3.2.1. EXPERIÊNCIA 1

Na primeira experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.3.

Tabela 3.3-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 1.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	112.93	27
2	30	110.33	34.2
3	60	109.48	51.3
4	90	108.6	68.9
5	120	107.78	82.3
6	150	107.12	85.6
7	180	105.59	86
8	210	103.19	86.4
9	240	102.74	86.9
10	270	102.38	87.4
11	300	102.07	87.5
12	330	101.49	84.5
13	360	100.91	84.7
14	390	100.31	85.2
15	420	99.87	85.4

3.3.2.2. EXPERIÊNCIA 2

Na segunda experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.4.

Tabela 3.4-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 2.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	65.47	24.6
2	30	63.79	50.2
3	60	62.58	81.2

4	90	62.03	89.3
5	120	61.48	89.9
6	150	60.85	89.8
7	180	60.16	89.5

3.3.2.3. EXPERIÊNCIA 3

Na terceira experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.5.

Tabela 3.5-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 3.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	56.53	25.4
2	30	55.05	58.2
3	60	54.43	87.7
4	90	53.85	93.5
5	120	52.88	92.5

3.3.2.4. EXPERIÊNCIA 4

Na quarta experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.6.

Tabela 3.6-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 4.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	47.9	24.5
2	30	47.02	37.4
3	60	46.23	52.2
4	90	45.48	70.8
5	120	44.82	85.7
6	150	44.15	86.3
7	180	43.55	86.6
8	210	42.93	86.7
9	240	42.55	86.8
10	270	42.16	86.7

11	300	41.73	87.4
12	330	41.15	87.9
13	360	40.5	88.3
14	390	39.64	88.7
15	420	38.88	89.8
16	450	38.3	90.5

3.3.2.5. EXPERIÊNCIA 5

Na quinta experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.7.

Tabela 3.7-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 5.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	35.8	34.4
2	30	34.97	48.6
3	60	34.34	64.5
4	90	33.62	81
5	120	33.02	91.5
6	150	32.55	92.1
7	180	32.05	92.8
8	210	31.44	93.8
9	240	30.93	94.3
10	270	30.27	95.3
11	300	29.61	96.3
12	330	28.96	97.2
13	360	28.41	97.9
14	390	27.57	98.8

3.3.2.6. EXPERIÊNCIA 6

Na sexta experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.8.

Tabela 3.8-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 6.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	17.53	25.1
2	60	16.09	46
3	120	14.53	84
4	180	13.2	86.8
5	240	11.97	87.9
6	300	10.72	89.4
7	360	9.45	91.3

3.3.2.7. EXPERIÊNCIA 7

Na sétima experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.9.

Tabela 3.9-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 7.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	92.18	26.7
2	60	90.36	50.3
3	120	88.67	79.5
4	180	87.51	86.2
5	240	86.25	86.6
6	300	85.15	87.1
7	360	83.57	88

3.3.2.8. EXPERIÊNCIA 8

Na oitava experiência foram registadas as variações da temperatura, tempo e o consumo de energia. Conforme ilustra a tabela 3.10.

Tabela 3.10-Registo das variações da temperatura, tempo e consumo de energia da experiência 8.

Ordem	Tempo (min)	Leitura do Contador (kWh)	Temperatura do Ebulidor (°C)
1	0	78.82	28.6
2	60	76.28	74.5
3	120	75.26	87.6
4	180	74.44	88.1

5	240	73.43	88.7
6	300	72.41	89.5
7	360	71.44	90
8	420	70.12	91.3
9	480	68.44	94.1

3.3.3. RESULTADOS DA DESTILAÇÃO

3.3.3.1. VARIAÇÃO DO TEOR ALCOÓLICO EM RELAÇÃO A DENSIDADE

Durante a operação de destilação foi-se anotando valores correspondentes a variações da temperatura como sendo um dos factores que tem uma influência directa na operação de destilação, e com o decorrer do tempo foram registadas as variações do consumo da potência. Neste âmbito para o registo e medição do teor alcoólico e a densidade foram recolhidas uma amostra de destilado num recipiente e introduzidas numa proveta graduada que perfazem um volume de 100 ml, após a introdução do destilado leu-se a temperatura e de seguida leu-se o teor alcoólico e a densidade com ajuda do alcoolímetro e densímetro de *Gay-Lussac*.

Para o primeiro ensaio a amostra 1 (A1) continha inicialmente um teor alcoólico de 33% (v/v) com uma densidade relativa de 0,967 lida a uma temperatura de 27 °C, a amostra estava contida num recipiente com um volume de 25 L, após o processo de destilação anotou-se o valor do primeiro destilado (D1) que continha um teor alcoólico de 92% (v/v) e uma densidade relativa de 0.830, destilou-se um volume de aproximadamente 3 L, num intervalo de tempo de 6 a 7 horas.

A amostra (A2) continha inicialmente um teor alcoólico de 16% (v/v) e uma densidade relativa de 0.98 lidas a uma temperatura de 24.6 °C, o processo de destilação parou-se no tempo t_6 onde recolheu-se uma quantidade de destilado (D1) que continha um teor alcoólico de 92% (v/v) e uma densidade relativa de 0.830, para a optimização do processo optou-se em fazer-se um incremento da temperatura operando na faixa de 91.0 a 92.3°C, nessas condições levou-se menos tempo para adquirir-se uma quantidade de volume desejável do destilado o que fez com que o teor alcoólico decresce-se. Então após o termino do processo de destilação anoutou-se um teor

alcoólico de 82 % (v/v) e uma densidade relativa de 0.865, e recolheu-se o destilado (D2) que perfaziam um volume de aproximadamente 1.1 L.

A amostra (A3) continha inicialmente um teor alcoólico de 13% (v/v) e uma densidade relativa de 0.96 lidos a 25.4°C. Após a destilação recolheu-se 500 mL de destilado (D1) e anotou-se um teor alcoólico de 85% e uma densidade relativa de 0.860. a temperaturas elevadas na faixa de 92.0-95.2°C o teor alcoólico reduz significativamente e a destilação ocorre em menos tempo, recolheu-se um volume de 650 mL do destilado (D2) que apresentou um teor alcoólico de 72% (v/v) e densidade relativa de 0.890 e levou menos tempo. A mistura de volumes dos destilados D1 e D2, resultou numa quantidade de volume de 1150 mL que continham por sua vez um teor alcoólico de 77% (v/v) e uma densidade relativa de 0.870.

A amostra (A4) continha inicialmente um teor alcoólico de 30% (v/v) e densidade relativa de 0.975 lidos a 24.5°C, a condensação iniciou no tempo (t_5). A temperatura ajustada no equipamento “Aquecedor” foi: no nível de cima- off; no nível intermédio- 15°C e no nível baixo- 40°C.

Recolheu um volume de aproximadamente 2 L de destilado (D1) no tempo t_9 que continham um teor alcoólico de 90% (v/v), operou-se um pouco acima de 86.7°C para retirar-se o que havia sobrado na cauda, na cauda continha um teor alcoólico de 18% e densidade relativa de 0.975. com o incremento da temperatura operou-se na faixa de 87.5 a 87.9°C, esse aumento não criou nenhuma variação do teor alcoólico, isto é, continuou-se a recolher 90% de teor alcoólico e densidade relativa de 0.835 num volume de 2 L de destilado (D2), totalizando em 7 horas de tempo destilou-se 4 L de álcool.

A amostra (A5) inicialmente continha 14% de teor alcoólico e 0.985 de densidade relativa, lido a 34°C. Durante o processo de destilação recolheu-se 1 L de destilado (D1) contendo 86% de álcool, e no fim recolheu-se 1L de destilado (D2) contendo 80% de teor alcoólico, isso deve-se ao aumento da temperatura a medida que o tempo progride, então adicionou-se os dois destilados e perfizeram um volume total de 2 L de destilado, o que alterou a graduação alcoólica e a densidade relativa para 83% e 0.86.

a partir do tempo t_{11} , iniciou-se um processo de teste para verificar-se a influencia do aumento da temperatura no teor alcoólico e conclui-se que enquanto o processo de destilação decorria com o aumento da temperatura registou-se uma ligeira queda do teor alcoólico.

A amostra (A6) inicialmente continha 30% de teor alcoólico e 0.970 de densidade relativa, lido a 25.1°C. recolheu-se um volume de aproximadamente 4.5 L de destilado (D1) que continham um teor alcoólico de 90% e densidade relativa de 0.84,

A amostra (A7) inicialmente continha 27% de teor alcoólico e 0.970 de densidade relativa, lido a 26.7°C. recolheu-se um volume de aproximadamente 3.5 L de destilado que continham um teor alcoólico de 91% e densidade relativa de 0.835.

A amostra (A8) inicialmente continha 20% de teor alcoólico e 0.975 de densidade relativa, lido a 28.6°C. recolheu-se um volume de 1035 mL de destilado (D1) que continham um teor alcoólico de 94% e densidade relativa de 0.825, a medida que o tempo passava a temperatura aumentava e fazia com que o teor alcoólico baixa-se para 86% e 80% recolhido num volume de 400mL de destilado (D2) e 430 mL para destilado (D3) operando na faixa de 93.5 a 94°C.

Os gráficos a seguir ilustram a variação do teor alcoólico em relação a densidade.

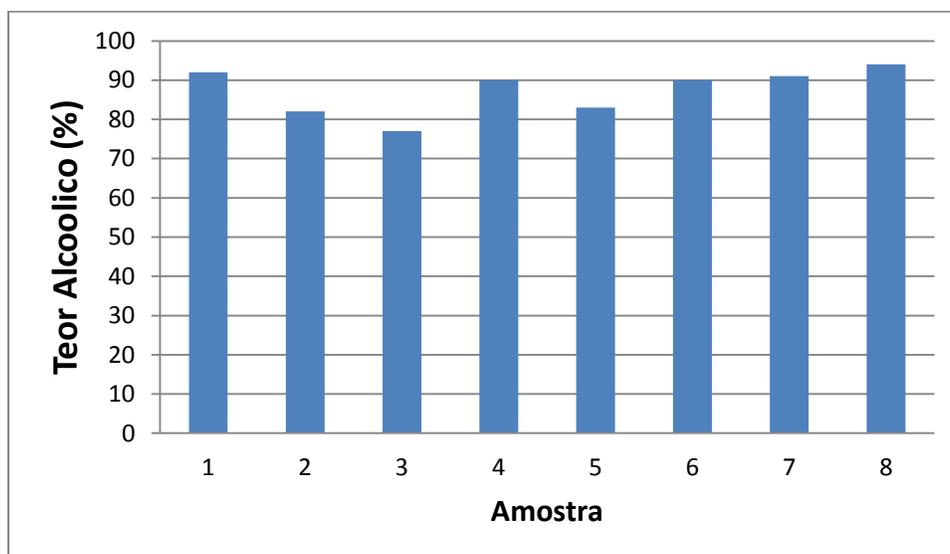


Gráfico 3.1-Variação do teor alcoólico para cada amostra num volume do destilado.

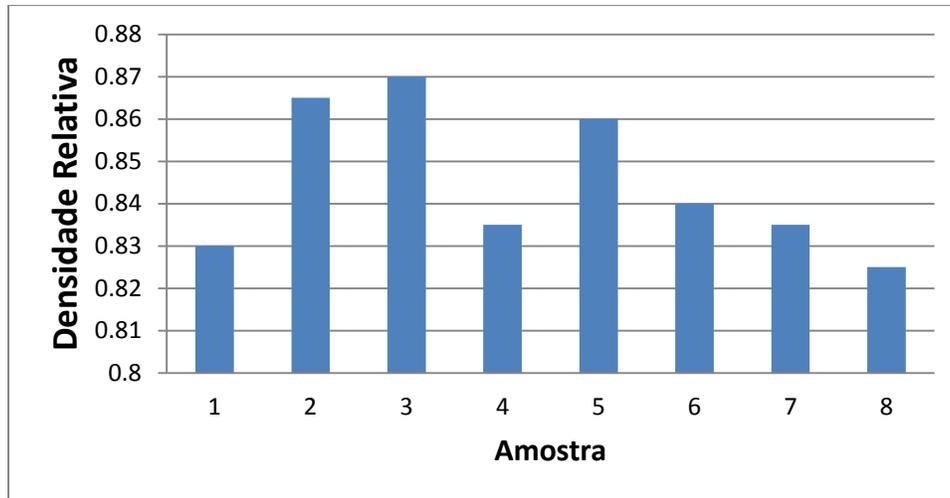


Gráfico 3.2-Variação das densidades para cada amostra num volume do destilado.

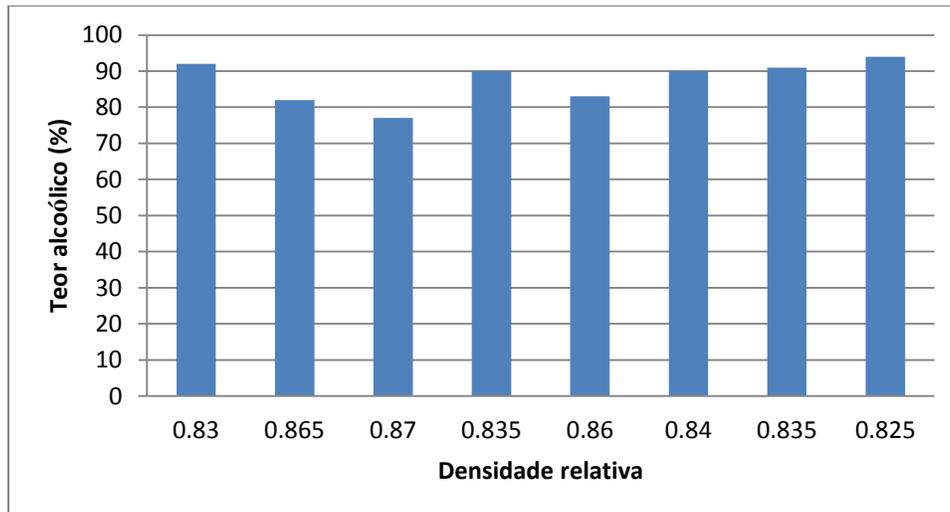


Gráfico 3.3-Relação do teor alcoólico em relação a densidade relativa.

No entanto registou-se para o ensaio E8 um grau alcoólico de 94 %(v/v) superior ao ensaio E1 que apresentava um grau alcoólico de 92 %(v/v), conseqüentemente o ensaio E8 apresentava uma densidade relativa de 0.825 inferior ao ensaio E1 que apresentava uma densidade relativa de 0.830;

Não obstante dos resultados obteve-se em média um teor alcoólico de 87.4°GL e uma densidade relativa de 0.845. No estudo feito por (Lourenço et al., 2020) obtiveram teor alcoólico de 87°GL e uma densidade relativa de 0,828. No estudo realizado por (Santos

et al., 2019) não obstante dos resultados obteve 88.26^oGL. Neste âmbito de pesquisa para a parte experimental considera-se os valores acima encontrados aceitáveis.

3.3.3.2. EFEITO DA VARIAÇÃO DE CONSUMO DE ENERGIA EM RELAÇÃO AO TEMPO, TEMPERATURA E VOLUME.

A grandeza física usada para calcular a taxa de variação da quantidade de energia cedida ou consumida num sistema por unidade de tempo, é denominada Potência.

Para a experiência 1, antes de iniciar-se a operação da amostra A1, registou-se inicialmente o valor da energia no tempo inicial $t_1=0$ min e leu-se $E_1 =112.93$ kWh e $T_1=27^{\circ}\text{C}$. A medida que o tempo progredia anotava-se os valores respectivos da energia consumida a cada 30 min, neste âmbito notou-se uma grande variação de consumo aproximadamente 3 kWh de energia em meia hora para uma variação da temperatura na faixa de 27 a 34.2^oC, a destilação iniciou no tempo t_5 na qual verificou-se uma grande variação de consumo de 5.2 kWh de energia em 2 h para uma variação de temperatura de 27 a 82.3^oC. após o início da destilação o consumo da energia foi reduzindo para uma variação de 0.5 kWh a cada meia hora que se passava, isso por que a medida que a temperatura se estabilizava, isto é, não criava uma alteração muito grande no valor, o que reduzia o consumo da energia. Em 7h de tempo consumiu-se 13.06 kWh de energia.

Os gráficos a seguir ilustram a variação da energia consumida diariamente e da Temperatura com o tempo para cada experiência.

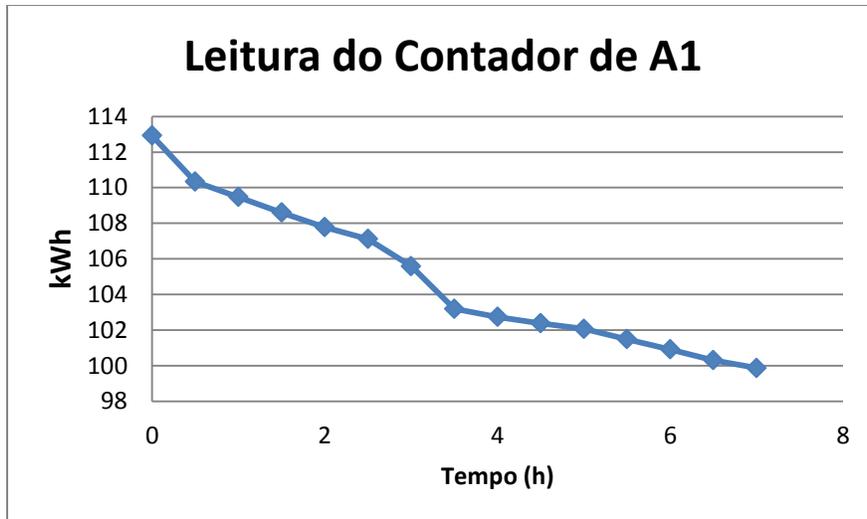


Gráfico 3.4-Variação da energia consumida a cada meia hora para primeira experiência realizada.

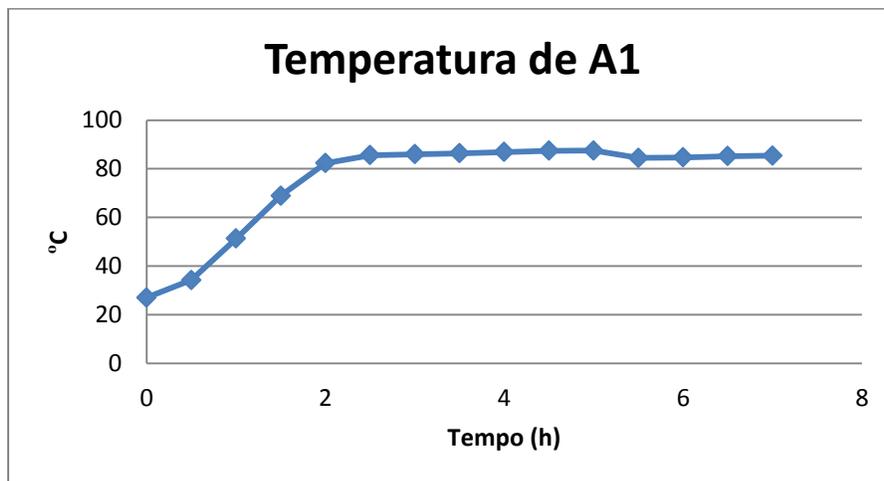


Gráfico 3.5-Curva da Temperatura em função do tempo para a primeira experiência.

Na experiência 2, registou-se inicialmente para amostra A2 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=65.47$ Kwh. Nesta experiencia a destilação iniciou no intervalo de tempo t_3 a t_4 , registou-se a consumo de energia a cada 30 min. Até iniciar-se a destilação a variação de consumo era de aproximadamente 3 kWh, a medida que o tempo passava a temperatura aumentava e a energia era consumida, chegando um tempo em que a temperatura estabilizava-se o consumo de energia era reduzido, na qual registou-se uma variação de 0.63 kWh a cada meia hora. Em 3h registou-se um consumo diário de 5.31 kWh.

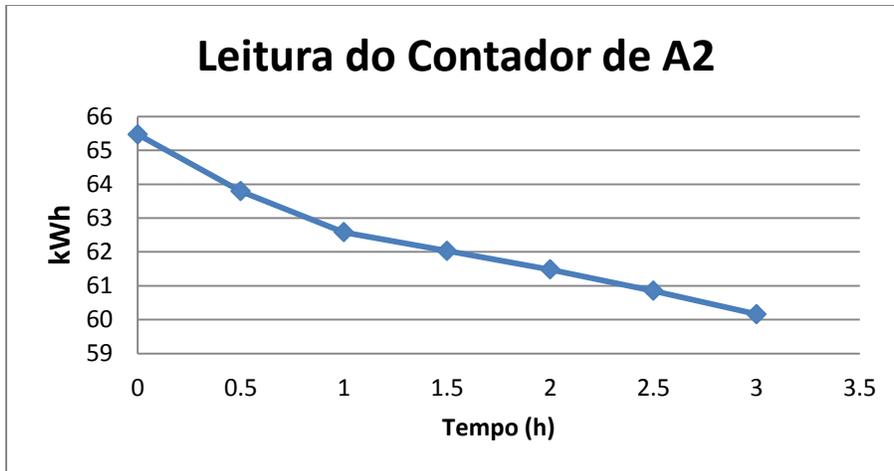


Gráfico 3.6-Variação da energia consumida a cada meia hora para segunda experiência.

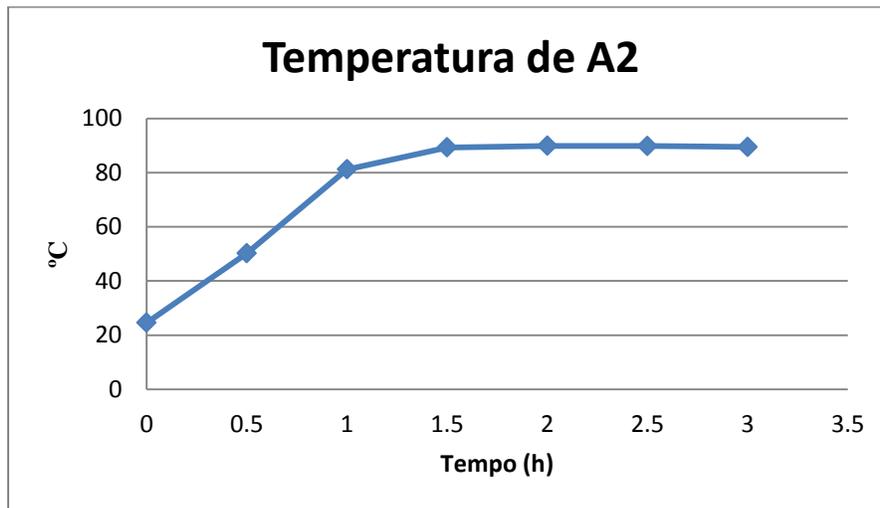


Gráfico 3.7-Curva da Temperatura em função do tempo para a segunda experiência.

Na experiência 3, registou-se inicialmente para amostra A3 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=56.53$ Kwh e $T_1=25.4^\circ\text{C}$. Nesta experiência a destilação iniciou no intervalo de tempo t_2 a t_3 , registou-se a consumo de energia a cada 30 min. Até iniciar-se a destilação a variação de consumo era de aproximadamente 2 kWh, operou-se em grandes faixas de temperatura o que reduziu o tempo de destilação, em cada 30 min registou para ordem 2, $E_2= 55.05$ kWh e $T_2=58.02^\circ\text{C}$. neste ensaio levou-se menos tempo para destilar-se o aguardente visto que apresentava menor teor alcoólico. Finda a destilação em 2h registou-se um consumo diário de 3.65 kWh de energia.

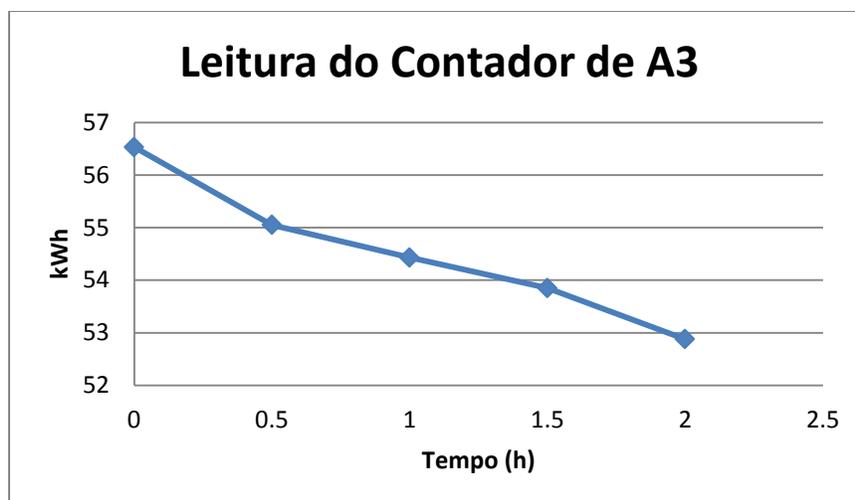


Gráfico 3.8-Variação da energia consumida a cada meia hora para terceira experiência realizada.

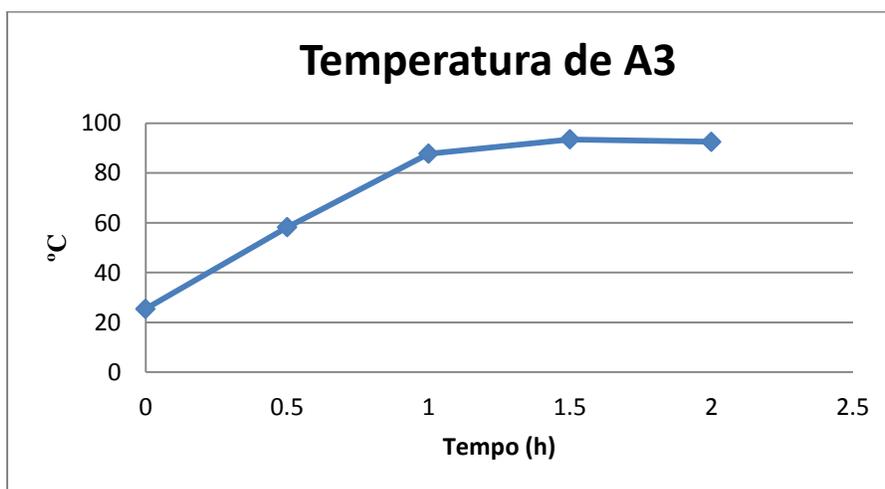


Gráfico 3.9-Curva da Temperatura em função do tempo para a terceira experiência.

Na experiência 4, registou-se inicialmente para amostra A4 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=47.9$ Kwh e $T_1=24.5^\circ\text{C}$. Nesta experiência a destilação iniciou no intervalo de tempo t_4 a t_5 , registou-se a variação consumo de energia a cada 30 min. Até iniciar-se a destilação a variação de consumo era de aproximadamente 3 kWh, durante o processo de destilação a temperatura não alterava bastante o que proporcionou o consumo reduzido da energia, na qual registou-se uma variação de 0.6 kWh. Finda a destilação em 7h e 30 min registou-se um consumo diário de 9.6 kWh.

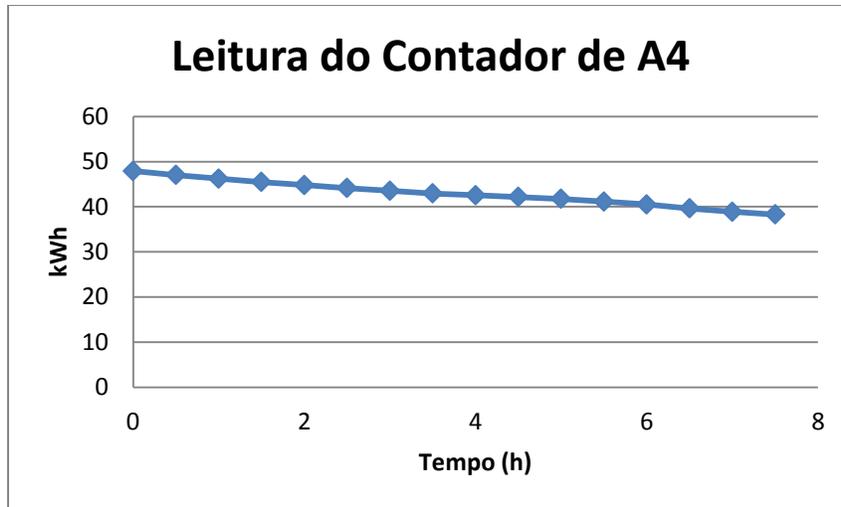


Gráfico 3.10-Variação da energia consumida a cada meia hora para quarta experiência realizada.

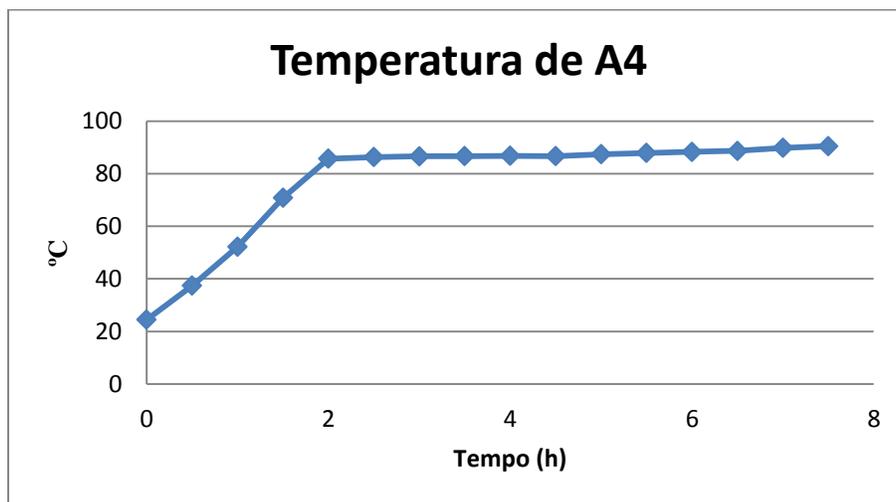


Gráfico 3.11-Curva da Temperatura em função do tempo para a quarta experiência.

Na experiência 5, registou-se inicialmente para amostra A5 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=35.8$ Kwh e $T_1=34.4^\circ\text{C}$. registou-se o consumo de energia a cada 30 min. Até iniciar-se a destilação a variação de consumo era de 2.18 kWh, após ter-se iniciado a destilação operou-se em largas escalas de variação da temperatura de 92.1 a 98.8°C. durante a destilação registou-se um consumo mínimo de 0.47 kWh. Finda a destilação em 6h e 30 min registou-se um consumo diário de 8.23 kWh.

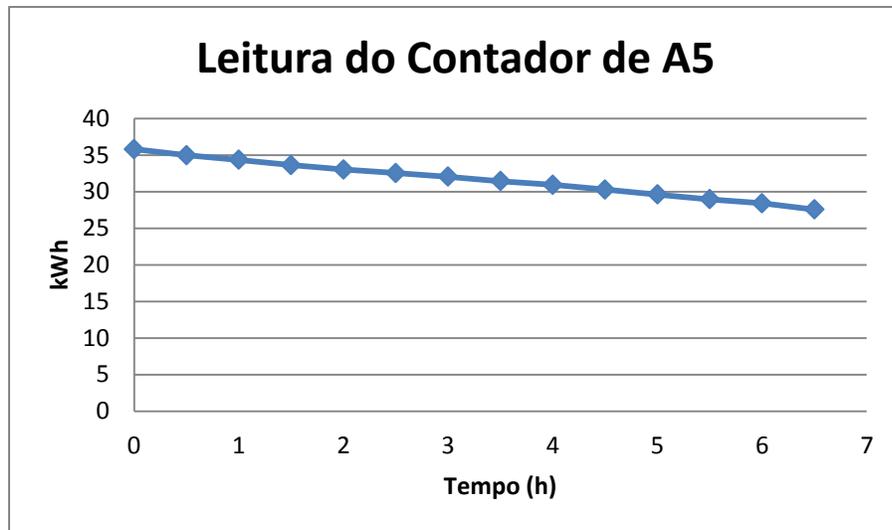


Gráfico 3.12-Variação da energia consumida a cada meia hora para quinta experiência.

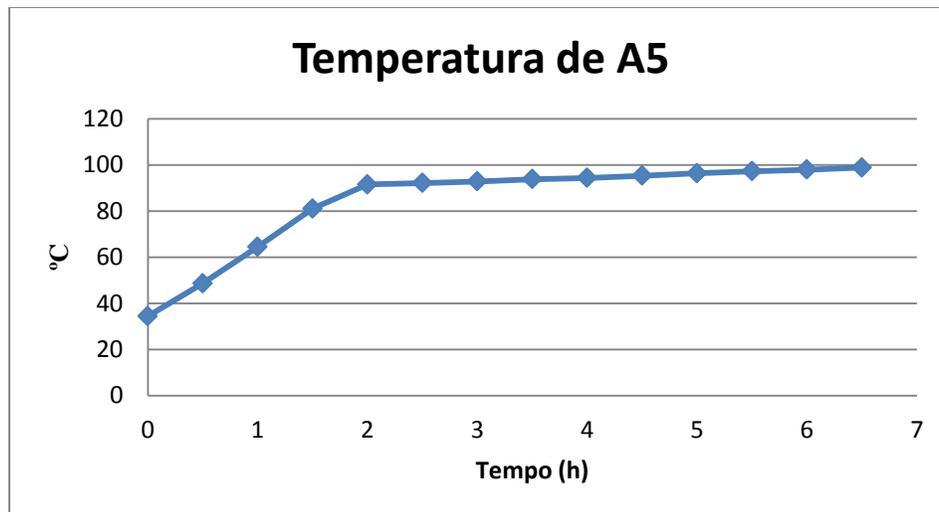


Gráfico 3.13-Curva da Temperatura em função do tempo para a quinta experiência.

Na experiência 6, registou-se inicialmente para amostra A6 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=17.53$ Kwh e $T_1=25.1^\circ\text{C}$. registou-se o consumo de energia a cada 60 min. Até iniciar-se a destilação a variação de consumo era de aproximadamente 3 kWh, durante o processo de destilação a temperatura não alterava bastante, operou-se na faixa de 86.8 a 91.3°C o que proporcionou o consumo reduzido da energia a cada 60 min, na qual registou-se uma variação de 1.25 kWh. Finda a destilação em 6h registou-se um consumo diário de 8.08 kWh.

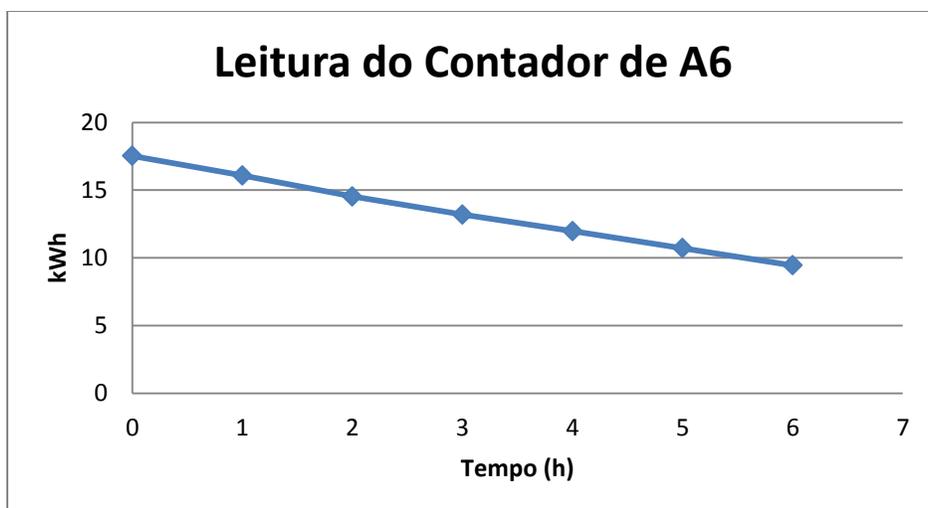


Gráfico 3.14-Variação da energia consumida a cada uma hora para sexta experiência.

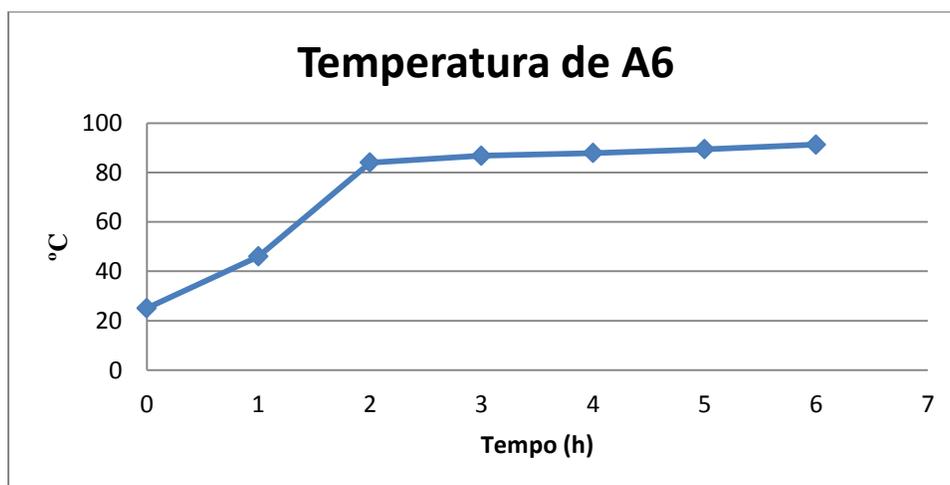


Gráfico 3.15-Curva da Temperatura em função do tempo para a sexta experiência.

Na experiência 7, registou-se inicialmente para amostra A7 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=92.18$ Kwh e $T_1=26.7^\circ\text{C}$. registou-se o consumo de energia a cada 60 min. Até iniciarse a destilação a variação de consumo era de aproximadamente 4.10 kWh, durante o processo de destilação a temperatura não alterava bastante, operou-se na faixa de 86.2 a 88°C o que proporcionou o consumo reduzido da energia a cada 60 min, na qual registou-se uma variação de 1.16 kWh. Finda a destilação em 6h registou-se um consumo diário de 8.61 kWh.

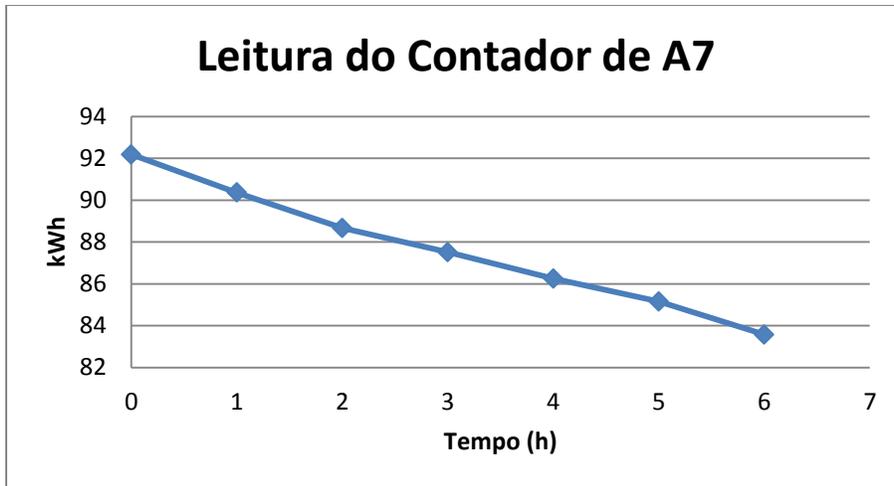


Gráfico 3.16-Variação da energia consumida a cada uma hora para sétima experiência.

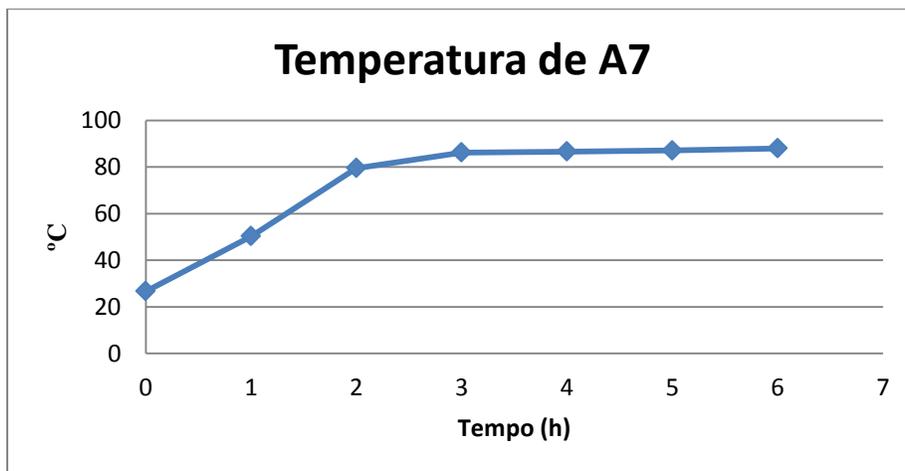


Gráfico 3.17-Curva da Temperatura em função do tempo para a sétima experiência.

Na experiência 8, registou-se inicialmente para amostra A8 no $t_1=0$ min leu-se $E_1=78.82$ kWh e $T_1=28.6^\circ\text{C}$. registou-se o consumo de energia a cada 60 min. Até iniciar-se a destilação a variação de consumo era de aproximadamente 2.82 kWh, durante o processo de destilação do tempo t_3 a t_8 a temperatura não alterava bastante, operou-se na faixa de 87.6 a 91.3°C o que proporcionou o consumo reduzido da energia a cada 60 min, na qual registou-se uma variação de 0.82 kWh. Finda a destilação em 8h registou-se um consumo diário de 10.38 kWh.

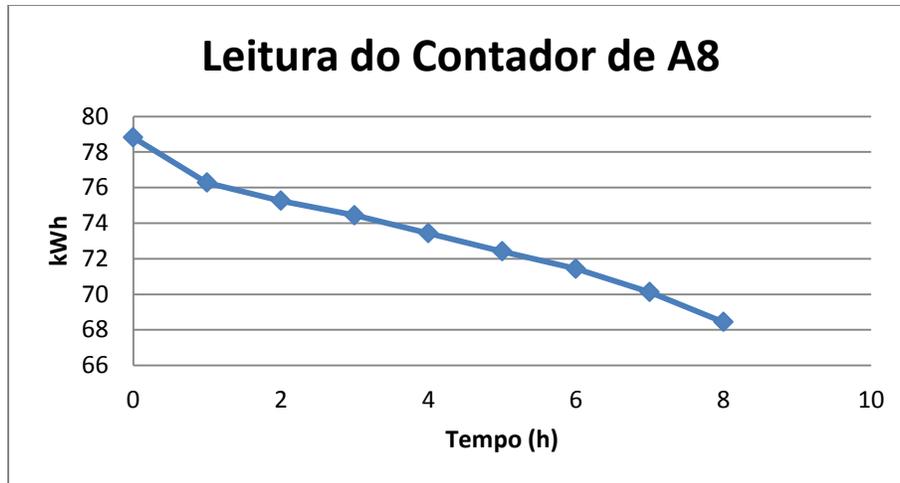


Gráfico 3.18-Variação da energia consumida a cada uma hora para oitava experiência.

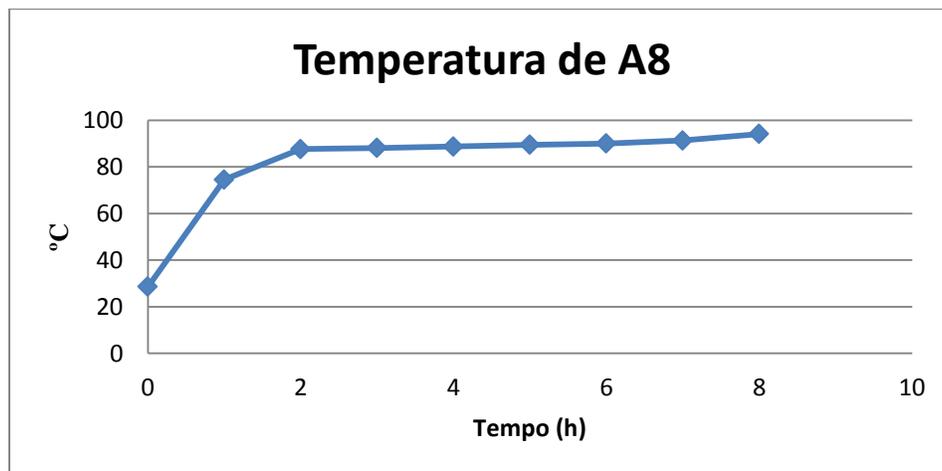


Gráfico 3.19-Curva da Temperatura em função do tempo para a oitava experiência.

3.3.3.3. RELAÇÃO DA COMPOSIÇÃO, VOLUME, FRACÇÃO E ENERGIA CONSUMIDA

O aquecedor usado apresentava uma potência de 3600 W equivalente a 3.6 KW, o aquecedor foi usado durante as experiências por um determinado período de tempo. Apresenta-se abaixo na tabela 3.11 a relação da composição, o volume do destilado obtido relativamente aos resultados da energia consumida pelo aquecedor ao ficar ligado durante o tempo de realização das experiências.

Tabela 3.11-Relação da composição, volume, fracção volumétrica e consumo da energia eléctrica.

Ensaio	Composição (%)			Volume			Fracção	Energia consumida (kWh)	Tempo (h)
	Inicial	Destilado	Fundo	Inicial (L)	Destilado (L)	Fundo (L)	% (V_d/V_f)		
1	33	92	0.5	26	3.000	20	0.15	13.06	7
2	16	82	1	25	1.100	21	0.052381	5.31	3
3	13	77	0.2	25	1.150	21	-	3.65	2
4	30	90	0.4	25	4.000	20	0.2	9.6	7.5
5	14	83	1	25	2.000	22	-	8.23	6.5
6	30	90	0	27	4.700	22	0.213636	8.08	6
7	27	91	1.5	29	3.500	24	0.145833	8.61	6
8	20	94	0.8	25	1.865	22	0.086364	10.38	8

Verificou-se que dos ensaios realizados o que apresentou condições mínimas de operação em relação ao tempo de consumo durante o processo de destilação e consumo de energia foi o ensaio (E3), isto justifica-se pelo facto da amostra (A3) apresentar um grau alcoólico relativamente baixo após a operação de destilação em relação aos demais. Comparado com o ensaio (E2) apresentou um volume relativamente maior com uma diferença de 50 ml.

O ensaio (E6) comparado aos demais, apresentou um tempo de consumo relativamente razoável, maior volume do destilado e consumo de energia relativamente razoável. E apresentou uma variação de energia menor, ou seja, um pouco aproximada do ensaio (E5 e E7).

No ensaio (E1) comparativamente aos demais registou-se maior consumo de energia, para o volume que perfazia 26 L inicialmente e destilou-se 3 L. as perdas são justificadas devido as fugas que a coluna apresentava. Consideraram-se eficazes os ensaios E4, E6 e E7 por apresentarem melhores condições de operação dado que apresentam volumes de destilados maiores que os demais ensaios, em media apresentam menores taxas de consumo de energia para uma quantidade mediana de volume inicialmente de 27 L. dependendo da especificidade do teor alcoólico, pode-se operar respeitando as condições de operação de cada ensaio.

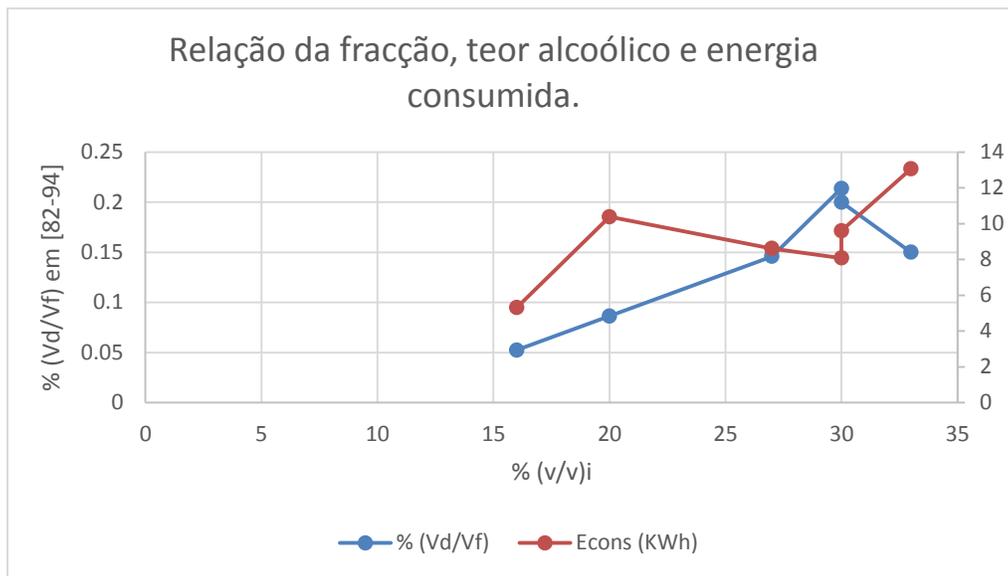


Gráfico 3.20- Curvas da fracção, energia consumida em função do teor alcoólico inicial.

Após a análise, tendo em conta que negligenciou-se os teores alcoólicos com percentagem de 13 e 14 %, constatou-se que para amostras com teores alcoólicos no intervalo de [15-20] % obtêm-se uma fracção recuperada numa faixa de [0.05-0.1] % e [5-11] kWh de energia consumida. Para teores alcoólicos no intervalo de [25-30] % obtêm-se uma fracção de [0.1-0.25] % e [8-10] kWh de energia consumida. Para teores alcoólicos de [30-35] % obtêm-se uma fracção na faixa de [0.25-0.1] % e [6-14] kWh de energia consumida.

CAPITULO IV

4. SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO

Para a simulação da produção do álcool, utilizou-se o *software ChemSep-COCO*, versão 1.0 conforme vem na descrição da simulação e apresenta uma configuração conforme mostrado na Figura 4.1 que é resultado do ensaio E8. Essa configuração é formada por apenas uma coluna com 10 estágios, incluindo o condensador e o refeedor, sendo o Aguardente alimentado na corrente 1. Todas as bandejas da coluna trabalham com eficiência de 100 %, sem perda de carga na coluna.

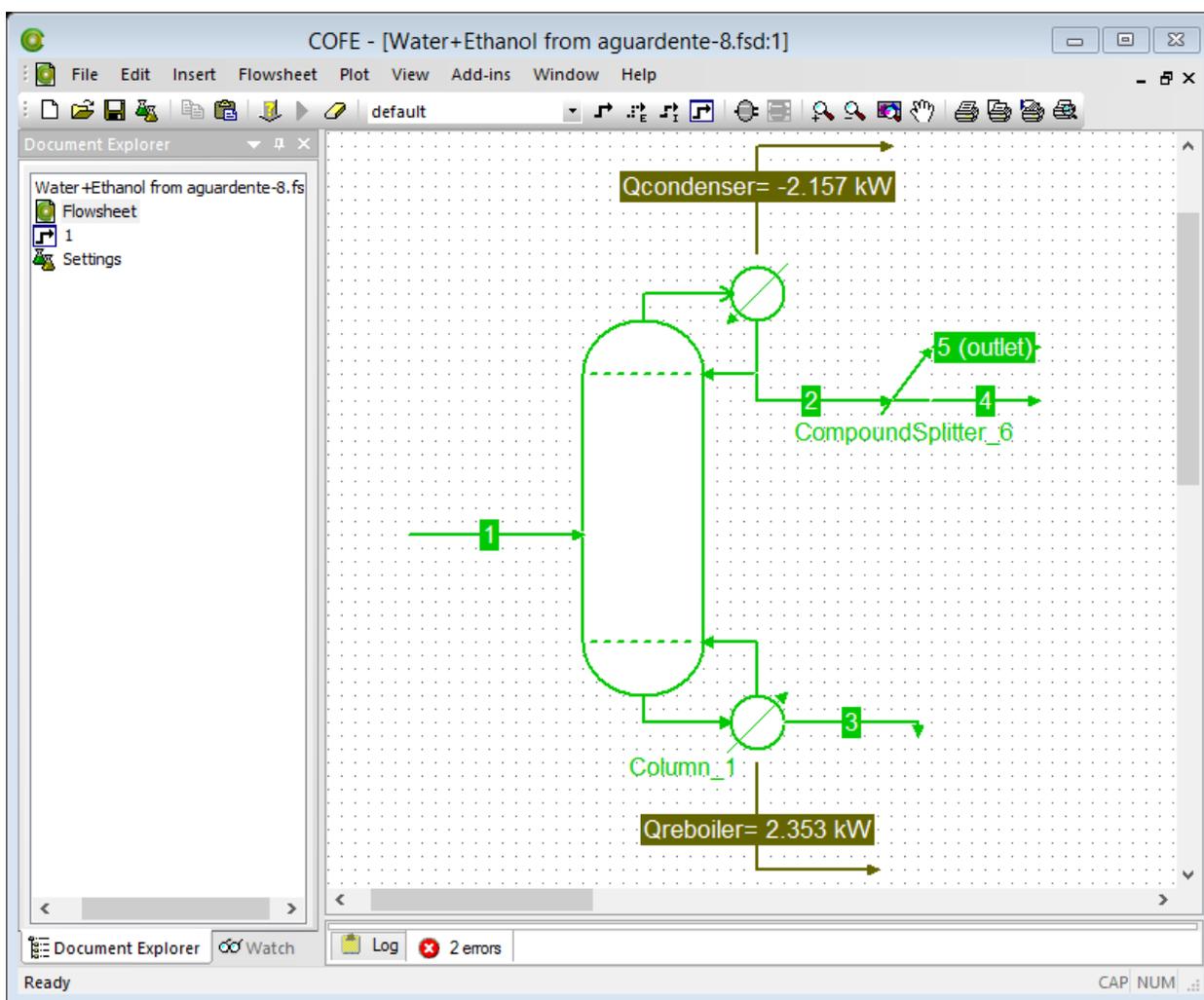


Figura 4.1-Configuração da coluna de destilação simulada pelo ChemSep-COCO para produção de etanol.

4.1. COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DA ALIMENTAÇÃO

Para corrente (1) denominada corrente de alimentação deu-se entrada com os dados da experiência (E8), as restantes simulações encontram-se nas folhas em anexo. Abaixo encontram-se as composições e características da alimentação do processo de destilação. Tendo em conta que foi calculado o valor do caudal molar para cada experiência.

Tabela 4.1- Características da alimentação.

Alimentação/Feed 1					
Composição		Temperatura (°C)	Pressão (atm)	Caudal molar (mol/s)	Viscosidade (Pa.s)
Etanol	0.2	25	1	0.0358	0.000931
Água	0.8				

4.2. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

4.2.1. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

As condições de operação para a configuração da simulação foram retiradas com base no ensaio E8 que são apresentadas conforme mostra a figura 4.2.

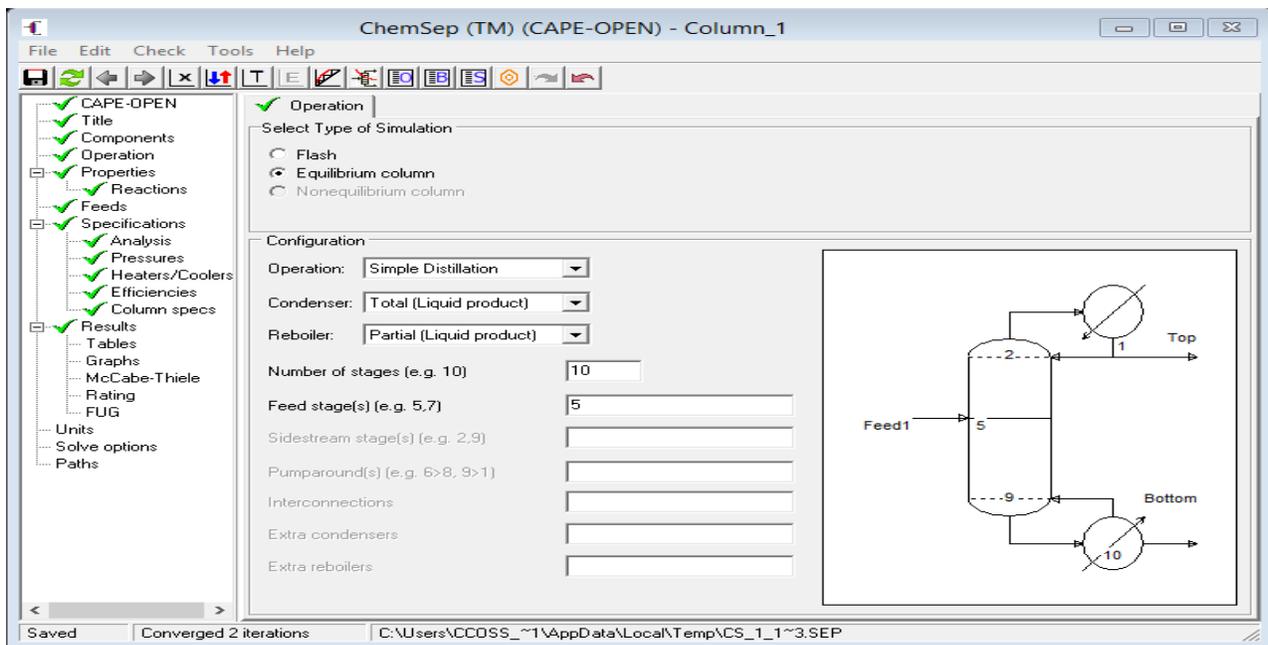


Figura 4.2- condições de operação da configuração do processo de destilação.

4.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Encontra-se abaixo os resultados da simulação representados na tabela 4.2 que reporta os dados processados no decorrer da operação.

Tabela 4.2-Relatório do balanço mássico do ensaio E8 da simulação do processo de destilação.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	80.5706	99.9821	80.5706	80.5706	°C
Flow rate	0.0358	0.0179	0.0179	0.0105968	0.00730319	mol / s
Mole frac Water	0.8	0.6	1	0.972973	0.0588236	
Mole frac Ethanol	0.2	0.4	4.56361e-07	0.027027	0.941176	
BubblePointTemperature	83.0663	80.5706	99.9821	94.155	78.4614	°C
Volume	2.5667e-05	3.5797e-05	1.90064e-05	1.98133e-05	0.0290254	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.11704e-05	1.23973e-05		1.05997e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000930878	0.000375358	0.00027803	0.000348053		Pa s

Encontra-se a seguir no gráfico 4.1 a curva de equilíbrio do ensaio E8 resultante da simulação do processo de destilação.

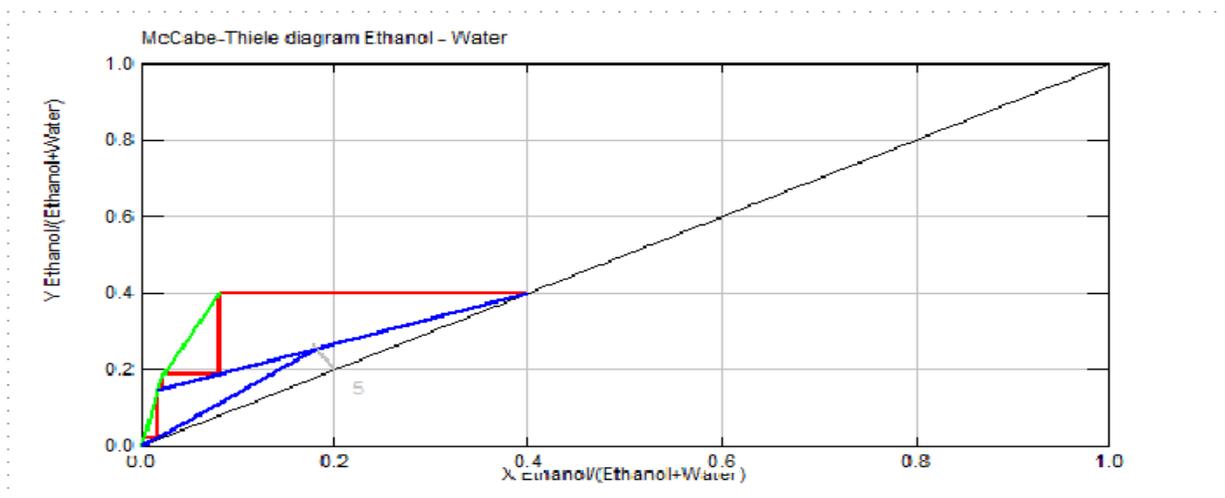


Gráfico 4.1-Curva de equilíbrio do ensaio E8 resultante da simulação.

4.3.1. COMPARAÇÃO DO CONSUMO ENERGÉTICO ENTRE A PARTE EXPERIMENTAL E SIMULADA

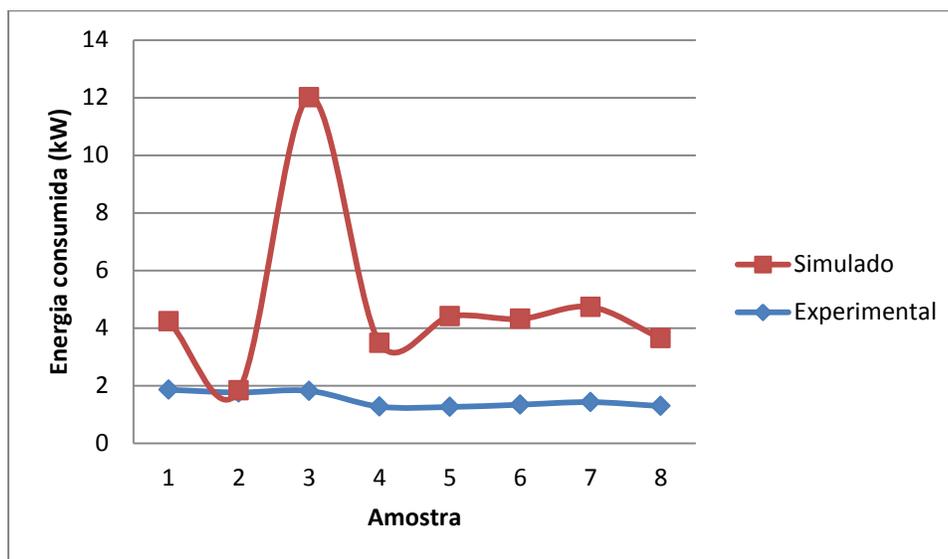


Gráfico 4.2-Relação do consumo energético entre parte experimental e simulada.

Tabela 4.3-Resultado da comparação do consumo energético apresentado em média.

ORDEM	CONSUMO ENERGÉTICO (kW)	
	EXPERIMENTAL	SIMULADO
MÉDIA	1.5107	3.2935

Registou-se em média 1.5107 kW de energia consumida no processo de destilação na parte experimental e 3.2935 kW de energia na simulação, constatou-se que os valores alcançados apresentam uma discrepância, devido a alguns factores da parte experimental que fizeram com que não se alcançassem valores próximos aos da simulação. Um dos factores que diferencia é que a coluna de destilação é composta por partículas sólidas ou seja é uma coluna de enchimento de partículas sólidas (vidro) denominadas anéis de rushing, enquanto que, a coluna do simulador é contida por uma disposição de pratos ao longo da coluna.

Batista 2008 afirma que, maior número de pratos para a realização do processo ou um aumento substancial da razão de refluxo, conduz o processo a um alto consumo energético. 4 a 6 bandejas proporcionam uma coluna de enriquecimento responsável

por concentrar o etanol até os níveis desejados. A separação dos dois componentes em menos estágios e menores razões de refluxo numa destilação fraccionada simples, proporciona menos energia (PURGATTO et al. 2016).

4.3.2. COMPARAÇÃO DO TEOR ALCOÓLICO ENTRE A PARTE EXPERIMENTAL E SIMULADA

Tabela 4.4-Resultado da comparação do teor alcoólico apresentado em média.

ORDEM	TEOR ALCOÓLICO (°GL)	
	EXPERIMENTAL	SIMULADO
MÉDIA	87.4	94.26

Registou-se em média para a parte experimental do estudo em causa um teor alcoólico de 87.4°GL e para a parte simulada um teor alcoólico de 94.26°GL, esta variação justifica-se devido as condições operacionais e a eficiência da coluna no simulador, visto que para a parte experimental tinha uma coluna de enchimento com algumas partículas solidas denominadas anéis de rushing.

Cláudio et al. (2011) afirma que, o processo de produção do álcool consiste em elevar a concentração alcoólica do vinho até valores superiores a 90°GL, ao redor de 96°GL se o objectivo é a obtenção do denominado álcool hidratado. Neste âmbito para o problema em estudo pode-se considerar aceitável o teor alcoólico encontrado na simulação.

CAPITULO V

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1. CONCLUSÕES

Portanto após a conclusão do relatório pode-se concluir que alcançou-se o objectivo principal do trabalho, tendo-se constatado o seguinte:

- O aguardente usado como matéria-prima no processo de destilação fraccionada mostrou-se eficiente para produção de etanol, visto que este apresentou em média um teor alcoólico dentro dos intervalos esperados;
- Após a análise constatou-se que o teor alcoólico e a densidade apresentam uma relação inversamente proporcional, ou seja, quanto maior for o teor alcoólico menor será a densidade;
- No início da operação durante o processo de aquecimento da máquina a energia era consumida com alto índice, após a estabilização da temperatura o consumo da energia tornou-se moderado;
- Baseado em literaturas foi encontrada uma boa concordância entre os resultados simulados e experimentais em relação ao teor alcoólico;
- Na parte experimental para uma base de cálculo, verificou-se que para 1 litro de destilado consome-se cerca de 2.4 kWh de energia para amostras contendo 30% de teor alcoólico e para baixos teores alcoólicos (13, 14 e 16%) consome-se cerca de 3.1 a 4.8 kWh de energia;
- Não obstante dos resultados para a comparação realizada em relação ao consumo energético da parte experimental e simulada, os resultados não foram esperados porque o simulador apresentou valores altos de consumo em relação a parte experimental o que tornou a comparação não favorável.

5.2. RECOMENDAÇÕES

Para ocasiões futuras, recomenda-se:

- Fazer-se um planeamento experimental adequado, de modo a determinar o modelo adequado para o trabalho em causa;
- Calcular o rendimento do processo de destilação, de modo a saber a capacidade de conversão da coluna de destilação;
- Fazer-se um estudo sobre a desodorização, para remoção do cheiro que o produto apresentará;
- Usar um software adequado, que permitirá a introdução da variável volume na corrente da alimentação para prever o volume destilado e o residual.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALBARELLI, Juliana Queiroz. Produção de açúcar e etanol de primeira e segunda Geração: simulação, integração energética e análise econômica. 2013. 244 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 2013.
2. ALVES, D.M.G. Factores que afectam a produção de ácidos orgânicos bem como outros parâmetros da fermentação alcoólica. 1994. 128f. Dissertação (Mestrado em Microbiologia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.
3. AMORIM, H. V; BASSO, L. C.; ALVES, D. M. G. Processo de produção de álcool -controle e monitoramento. FERMENTEC, Piracicaba, 1996.
4. BORGES, M. T. M. R. Química Tecnológica Geral. Tecnologia Sucroalcooleira. Coleção UAB-UFSCar, São Carlos, 2009.
5. CARVALHO, J. C. M.; SATO, S. Fermentação Descontínua. Biotecnologia Industrial: Engenharia Bioquímica. Vol. 2. Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2001. p.193-204.
6. DIAS, M. O. S. Simulação do processo de produção de etanol a partir de açúcar e do bagaço visando a integração do processo de maximização da produção de energia e excedentes do bagaço. 282 p. Dissertação – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.
7. Ferreira, E. C; Montes, R.; A química da produção de bebidas alcoólicas - QUÍMICA NOVA NA ESCOLA, n. 10, novembro 1999.
8. Harden, Arthur (1905). "Zymase and Alcoholic Fermentation". *Journal of the Institute of Brewing* .11: 2–15. doi: 10.1002 /j.2050-0416.1905.tb02115.
9. KISTER, Henry Z. (1992). *Distillation Design* 1st Edition ed. [S.I.]: McGraw-Hill.
10. Kohler, Robert E. (01/09/1972). "A recepção da descoberta de Eduard Buchner da fermentação livre de células". *Jornal da História da Biologia*. 5 (2): 327– 353.
11. Koshland D. E. (1958). «Application of a Theory of Enzyme Specificity to Protein Synthesis». *Proc. Natl. Acad. Sci.* 44 (2): 98–104. PMID 16590179.
12. Lopes & Rosso; Bio: volume 1, 1. ed.; São Paulo: Saraiva, 2010.

13. Marzzoco, A. & Torres, B. B.; Bioquímica Básica, 3.ed.; Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 2007.
14. MORANDIN, M.; TOFFOLO, A.; LAZZARETTO, A.; MARÉCHAL, F.; ENSINAS, A. V.; NEBRA, S. A. *Synthesis and parameter optimization of a combined sugar and ethanol production process integrated with a CHP system. Energy*, v. 36, n. 6, p. 3675–3690, jun. 2011.
15. NAVES, R. F.; FERNANDES, F. S.; PINTO, O. G.; NAVES, P. L. F. Contaminação microbiana nas etapas do processamento e sua influência no rendimento fermentativo em usinas alcooleiras. *Enciclopédia Biosfera*, Goiânia, v.6, n.11, p.1-16, 2010.
16. PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. *Perry's chemical engineers' handbook*. New York: McGraw Hill, 1997.
17. Radzicka A, Wolfenden R. (1995). «*A proficient enzyme*.». *Science*. 6 (267): 90–931. PMID 7809611.
18. SANTOS, A. M. d. Estudo da influência da complementação de nutrientes no mosto sobre o processo de fermentação alcoólica em batelada. *Dissertação (Mestrado em Química e Biotecnologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008*.
19. SCHMIDELL, W.; FACCIOTTI, M. C. R. *Biorreatores e Processos Fermentativos. Biotecnologia Industrial: Engenharia Bioquímica. Vol. 2. Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2001. p. 179 - 192*.
20. SILVA, A. F. Caracterização genética de linhagens de *Saccharomyces cerevisiae* isolada de fermentações espontâneas de cachaças de alambique da Bahia. *Dissertação (Graduação em Biotecnologia) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Salvador, 2009*.
21. SOUSA, J. L. U.; MONTEIRO, R. A. B.. Factores interferentes na fermentação alcoólica para produção de etanol. *FAZU em Revista*, Uberaba, n.8, p.100-107, 2011.
22. SOUZA, C. S. Avaliação da produção de etanol em temperaturas elevadas por uma linhagem de *S. cerevisiae*. *Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Instituto Butantan, São Paulo, 2009*.

23. STECKELBERG, C. Caracterização de leveduras de processos de fermentação alcoólica utilizando atributos de composição celular e características cinéticas. 202 p. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.
24. STEINLE, L. A. Factores que interferem na fermentação alcoólica. Monografia (Graduação em Gestão do Sector Sucreenergético) - Universidade Federal de São Carlos centro de Ciências Agrárias, Sertãozinho, 2013.
25. <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Vinagre/SistemaProducaoVinagre/fermentacao.htm> (consultado em 09 de Setembro de 2021).
26. <https://www.voaportugues.com/a/industria-acucar-crescimento-desafios-enormes-/4025706.html> (consultado em 05 de Outubro de 2021).
27. <http://blog.saude.mg.gov.br/2020/04/03/saiba-por-que-o-recomendado-e-o-alcool-70/> (consultado em 25 de fevereiro de 2022).
28. <https://www.wateraid.org/mz/covid-19-em-mocambique> (acessado em 25 de fevereiro de 2022).
29. <https://www.edm.co.mz>: (acessado em 23 de novembro de 2021)

ANEXOS

ANEXO 1. TABELAS

Tabela A1.1-Relatório do balanço mássico para o ensaio E1.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	78.9038	99.982	78.9038	78.9038	°C
Flow rate	0.0365	0.01825	0.01825	0.00643862	0.0118114	mol / s
Mole frac Water	0.67	0.340001	0.999999	0.92517	0.0210137	
Mole frac Ethanol	0.33	0.659999	1.16054e-06	0.0748296	0.978986	
BubblePointTemperature	81.2043	78.9038	99.982	88.4529	78.5718	°C
Volume	3.07579e-05	4.67509e-05	1.90065e-05	2.17849e-05	0.0288886	m ³ / mol
Enthalpy	-42914.5	-36274.1	-38208.8	-39215.9	3705.17	J / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.09364e-05	1.23973e-05		1.04823e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000953283	0.000405071	0.000278031	0.000358975		Pa s

Tabela A1.2-Relatório do balanço mássico para o ensaio E2.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	81.2877	99.9821	81.2877	81.2877	°C
Flow rate	0.001006	0.000503	0.000503	0.00033394	0.00016906	mol / s
Mole frac Water	0.84	0.678149	0.999999	0.980608	0.0807072	
Mole frac Ethanol	0.16	0.321851	5.41754e-07	0.0193916	0.919293	
BubblePointTemperature	84.0938	81.2877	99.9821	95.5313	78.4198	°C
Volume	2.41003e-05	3.24468e-05	1.90064e-05	1.95073e-05	0.0290843	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.12374e-05	1.23973e-05		1.06609e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.00092409	0.000365988	0.00027803	0.000344428		Pa s

Tabela A1.3-Relatório do balanço mássico para o ensaio E3.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	82.0298	99.9822	82.0298	82.0298	°C
Flow rate	0.1537	0.07685	0.07685	0.0553935	0.0214565	mol / s
Mole frac Water	0.87	0.74	1	0.985572	0.106017	
Mole frac Ethanol	0.13	0.26	2.62599e-07	0.0144284	0.893983	
BubblePointTemperature	85.1743	82.0298	99.9822	96.5275	78.3907	°C
Volume	2.29272e-05	2.97945e-05	1.90064e-05	1.9313e-05	0.0291452	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.12998e-05	1.23973e-05		1.07294e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000919032	0.000358013	0.00027803	0.000340949		Pa s

Tabela A1.4-Relatório do balanço mássico para o ensaio E4.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	79.2084	99.982	79.2084	79.2084	°C
Flow rate	0.034	0.017	0.017	0.00693601	0.010064	mol / s
Mole frac Water	0.7	0.400001	0.999999	0.941177	0.0270271	
Mole frac Ethanol	0.3	0.599999	8.68174e-07	0.0588233	0.972973	
BubblePointTemperature	81.5254	79.2084	99.982	89.9341	78.5508	°C
Volume	2.95851e-05	4.42632e-05	1.90065e-05	2.11185e-05	0.0289136	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.09969e-05	1.23973e-05		1.0502e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000948065	0.000398377	0.000278031	0.000356401		Pa s

Tabela A1.5-Relatório do balanço mássico para o ensaio E5.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	81.7645	99.9822	81.7645	81.7645	°C
Flow rate	0.0475	0.02375	0.02375	0.016682	0.00706799	mol / s
Mole frac Water	0.86	0.72	1	0.984055	0.0967743	
Mole frac Ethanol	0.14	0.28	2.87487e-07	0.0159453	0.903226	
BubblePointTemperature	84.7757	81.7645	99.9822	96.2138	78.399	°C
Volume	2.33179e-05	3.06515e-05	1.90064e-05	1.93718e-05	0.0291234	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.1278e-05	1.23973e-05		1.07045e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000920715	0.00036068	0.00027803	0.000342168		Pa s

Tabela A1.6-Relatório do balanço mássico para o ensaio E6.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	79.2084	99.982	79.2084	79.2084	°C
Flow rate	0.0458	0.0229	0.0229	0.00934322	0.0135568	mol / s
Mole frac Water	0.7	0.400001	0.999999	0.941177	0.0270271	
Mole frac Ethanol	0.3	0.599999	8.68174e-07	0.0588233	0.972973	
BubblePointTemperature	81.5254	79.2084	99.982	89.9341	78.5508	°C
Volume	2.95851e-05	4.42632e-05	1.90065e-05	2.11185e-05	0.0289136	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.09969e-05	1.23973e-05		1.0502e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000948065	0.000398377	0.000278031	0.000356401		Pa s

Tabela A1.7-Relatório do balanço mássico para o ensaio E7.

Stream	1	2	3	4	5 (outlet)	Unit
Pressure	1	1	1	1	1	atm
Temperature	25	79.5634	99.9821	79.5634	79.5634	°C
Flow rate	0.0507	0.02535	0.02535	0.0117421	0.0136079	mol / s
Mole frac Water	0.73	0.460001	0.999999	0.953368	0.0342773	
Mole frac Ethanol	0.27	0.539999	7.14053e-07	0.046632	0.965723	
BubblePointTemperature	81.8935	79.5634	99.9821	91.3144	78.5273	°C
Volume	2.84106e-05	4.17478e-05	1.90064e-05	2.06144e-05	0.0289428	m ³ / mol
Vapor phase						
Viscosity		1.10525e-05	1.23973e-05		1.05255e-05	Pa s
Liquid phase						
Viscosity	0.000942876	0.000391558	0.000278031	0.000353908		Pa s

ANEXO 2. GRÁFICOS

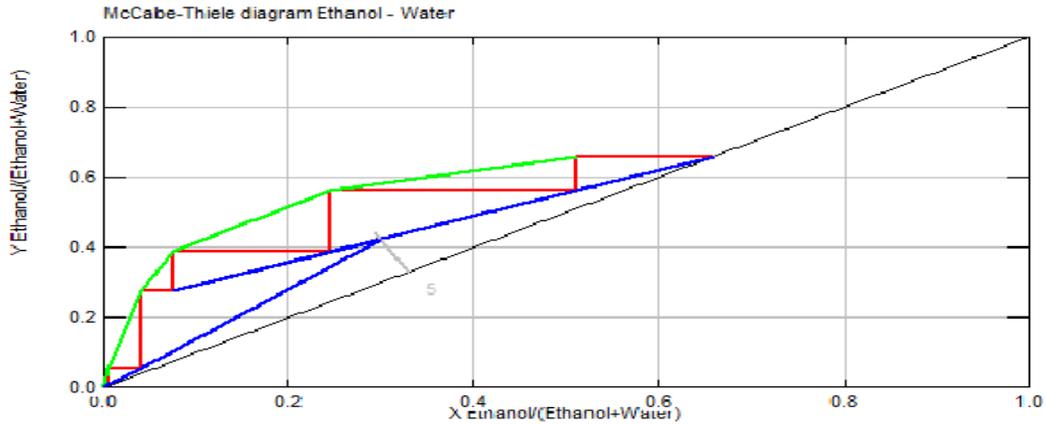


Gráfico A2.1-Curva de equilíbrio do ensaio E1 resultante da simulação.

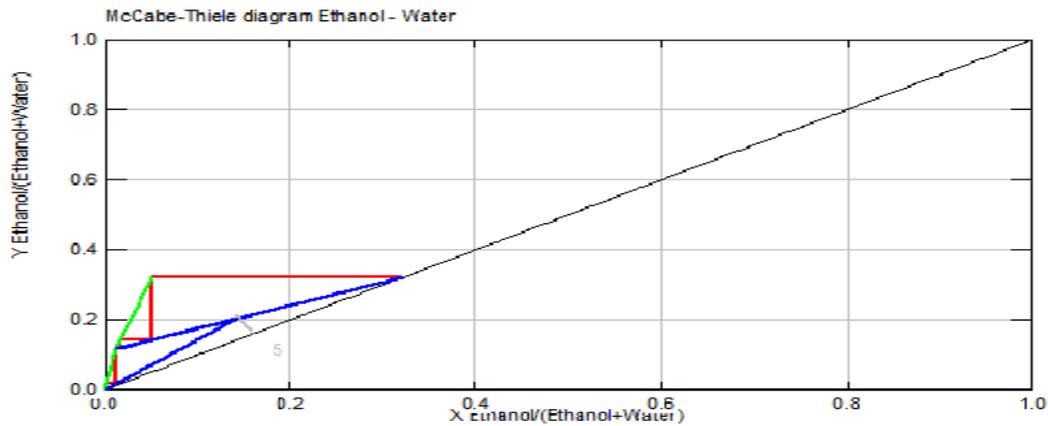


Gráfico A2.2-Curva de equilíbrio do ensaio E2 resultante da simulação.

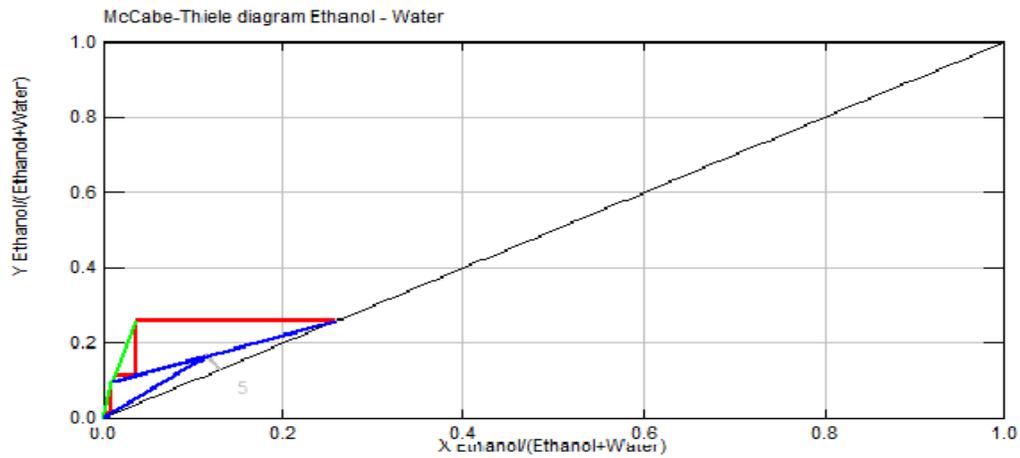


Gráfico A2.3-Curva de equilíbrio do ensaio E3 resultante da simulação.

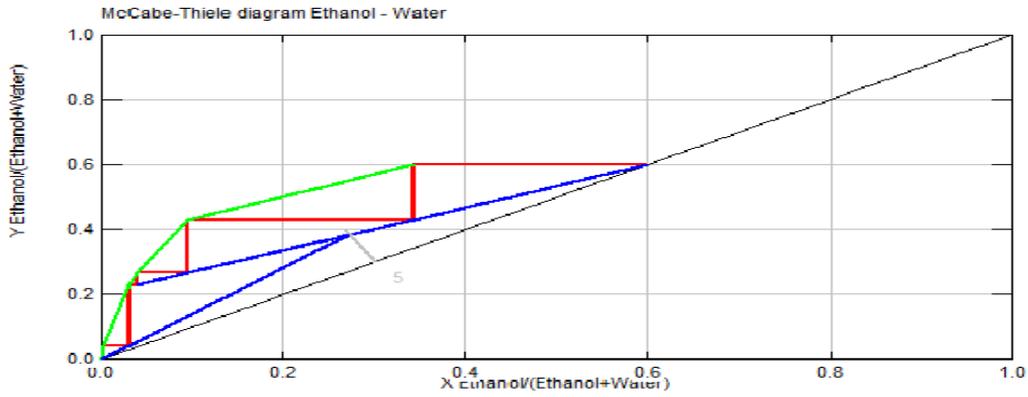


Gráfico A2.4-Curva de equilíbrio do ensaio E4 resultante da simulação.

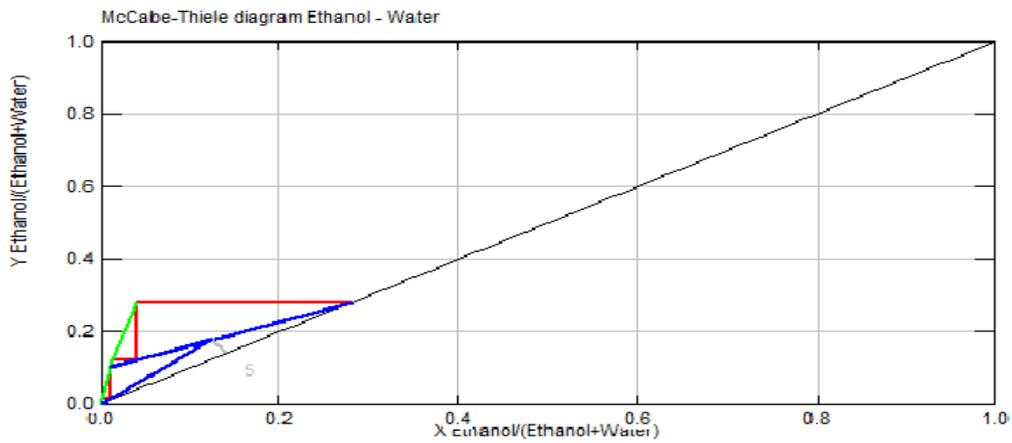


Gráfico A2.5-Curva de equilíbrio do ensaio E5 resultante da simulação.

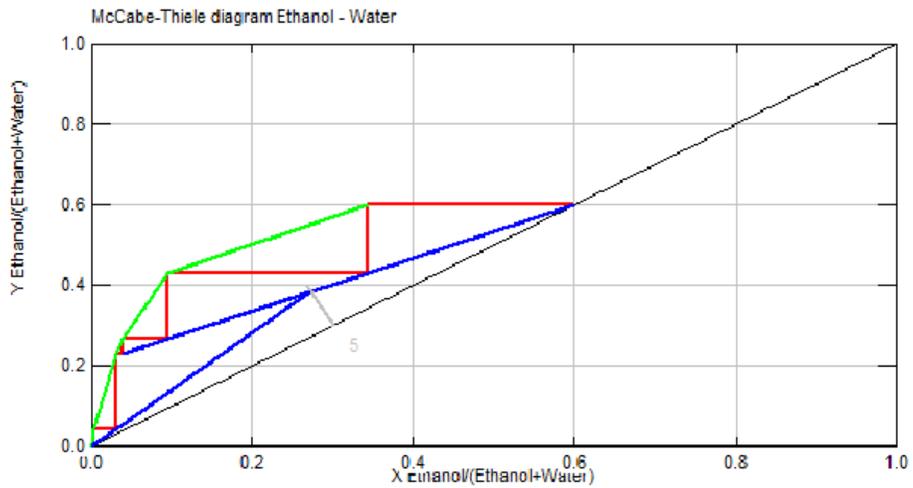


Gráfico A2.6-Curva de equilíbrio do ensaio E6 resultante da simulação.

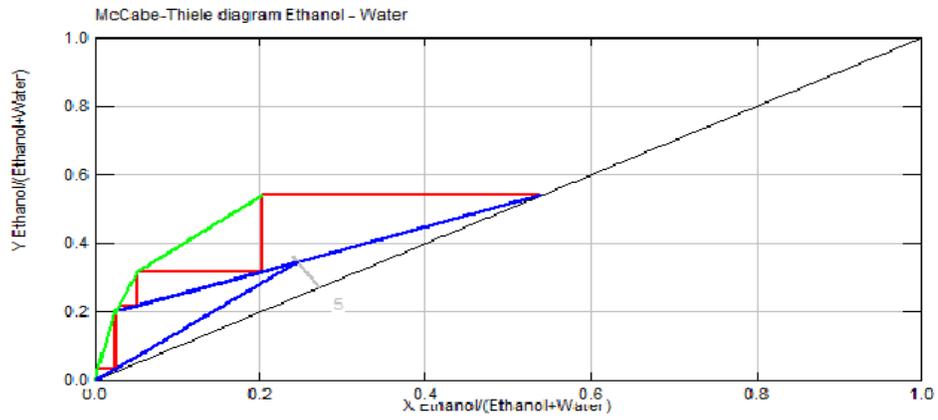


Gráfico A2.7-Curva de equilíbrio do ensaio E7 resultante da simulação.

ANEXO 3. IMAGENS



Figura A3.1-Coluna de destilação fracionada.

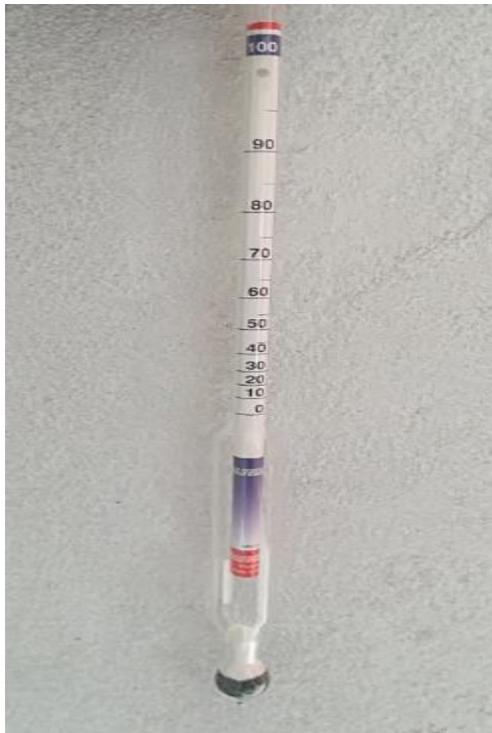


Figura A3.2-Alcoolímetro de Gay-Lussac.

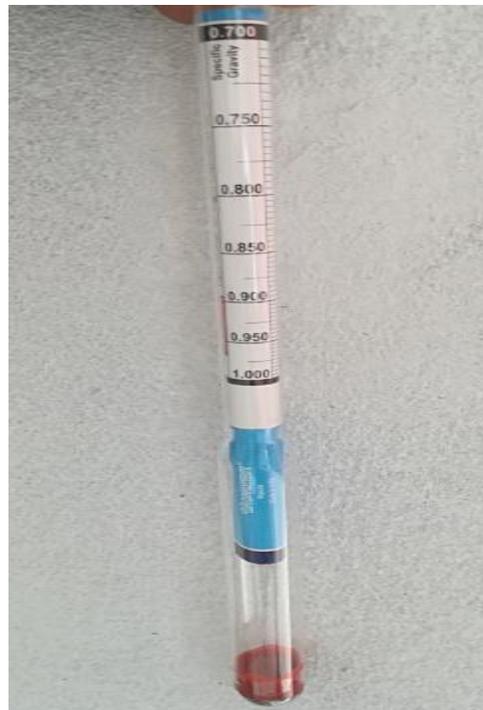


Figura A3.3-Densímetro usado para medição da densidade do etanol.



Figura A3.4-Termómetro digital usado para medição da temperatura.

APÊNDICES

Apêndice 1. Tabelas

Tabela A1. Representação dos caudais molares calculados, Potência consumida e calor fornecido ao ebulidor.

Amostra	Experimental							Simulado
	V_o (L)	t (s)	v_o (L/s)	d (g/L)	Mr (g/mol)	F_o (mol/s)	P_{cons} (kW)	Q_{reb} (kW)
1	26	25200	0.00103	967	27.27	0.0365	1.865	2.372
2	25	10800	0.00231	980	22.5	0.1006	1.77	0.0756
3	25	7200	0.00347	960	21.66	0.1537	1.825	10.19
4	25	27000	0.000925	975	26.43	0.034	1.28	2.208
5	25	23400	0.00106	985	21.94	0.0475	1.266	3.146
6	27	21600	0.00125	970	26.43	0.0458	1.347	2.975
7	29	21600	0.00134	970	25.59	0.0507	1.435	3.304
8	25	28800	0.000868	975	23.63	0.0358	1.298	2.353

Onde:

V_o (L) - Volume da alimentação;

t (s) – Tempo de operação;

v_o (L/s) – Caudal volumétrico da alimentação;

d (g/L) – Densidade;

Mr (g/mol) – Massa molar;

F_o (mol/s) – Caudal molar da alimentação;

P_{cons} (kW) – Potência consumida;

Q_{reb} (kW) – Calor fornecido.