



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO REGIONAL
Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira



AMANDA VITORIA EVANGELISTA DA SILVA

SIMULAÇÃO DA DESTILAÇÃO EXTRATIVA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO: INFLUÊNCIA DO TEOR DE LÍQUIDO IÔNICO [EMIN][Ac] EM MISTURA COM ETILENOGLICOL SOBRE O DESEMPENHO ENERGÉTICO DO PROCESSO

João Pessoa
Setembro/2025

AMANDA VITORIA EVANGELISTA DA SILVA

SIMULAÇÃO DA DESTILAÇÃO EXTRATIVA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO: INFLUÊNCIA DO TEOR DE LÍQUIDO IÔNICO [EMIN][Ac] EM MISTURA COM ETILENOGLICOL SOBRE O DESEMPENHO ENERGÉTICO DO PROCESSO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Tecnologia Sucroalcooleira da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Produção Sucroalcooleira

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Angela Lucínia Urtiga Vasconcelos

João Pessoa
Setembro/2025

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S586s Silva, Amanda Vitoria Evangelista da.

Simulação da destilação extrativa para produção de etanol anidro: influência do teor de líquido iônico [EMIN][Ac] em mistura com etilenoglicol sobre o desempenho energético do processo / Amanda Vitoria Evangelista da Silva. - João Pessoa, 2025.

42 f. : il.

Orientação: Angela Lucinia Urtiga Vasconcelos.
TCC (Graduação) - UFPB/CTDR.

1. Etanol Anidro. 2. Etilenoglicol. 3. Azeótropo. 4. Líquido iônico. I. Vasconcelos, Angela Lucinia Urtiga. II. Título.

UFPB/CTDR

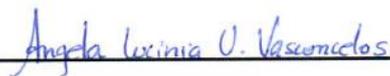
CDU 661.722

SIMULAÇÃO DA DESTILAÇÃO EXTRATIVA PARA PRODUÇÃO DE ETANOL ANIDRO: INFLUÊNCIA DO TEOR DE LÍQUIDO IÔNICO [EMIN][Ac] EM MISTURA COM ETILENOGLICOL SOBRE O DESEMPENHO ENERGÉTICO DO PROCESSO

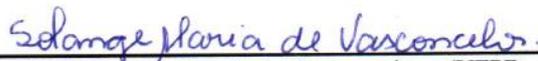
AMANDA VITORIA EVANGELISTA DA SIVA

TCC aprovado em 29/09/2025 como requisito para a conclusão do curso de Tecnologia em Produção Sucroalcooleira da Universidade Federal Da Paraíba.

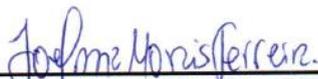
BANCA EXAMINADORA:



Profª Drª. Angela Lucinia Urtiga Vasconcelos - (UFPB – Orientador)



Profª Drª. Solange Maria de Vasconcelos - (UFPB – Membro interno)



Profª Drª. Joeline Morais Ferreira - (UFPB – Membro interno)

João Pessoa, 29 de Setembro de 2025.

Dedico este trabalho a todas as
pessoas que se esforçam por um
futuro melhor, e a todos que me
ajudaram a não desistir de tudo.

AGRADECIMENTO

Começar agradecendo primeiramente a Deus que me sustentou e me chegar até esta etapa final, a minha mãe que sempre me aconselhou e apoiou, e aos meus amigos que me acompanharam durante todo esse processo.

E aos todos os professores que me fizeram evoluir e me desenvolver como pessoa, colaborando com meu crescimento pessoal e profissional, e minha orientadora Angela que por mais que tivéssemos um tempo reduzido aceito me orientar e auxiliar para que tudo desse certo até aqui.

RESUMO

A destilação extrativa é uma técnica amplamente utilizada para superar as limitações impostas pelos azeótropos, como no caso do sistema etanol-água, cuja mistura apresenta comportamento azeotrópico que impede a obtenção de etanol anidro apenas por destilação simples. Tradicionalmente, o etilenoglicol tem sido empregado como agente de arraste (entrainer) nesse processo, devido à sua alta seletividade e capacidade de alterar a volatilidade relativa entre etanol e água. No entanto, o uso do etilenoglicol apresenta desvantagens significativas, incluindo alto ponto de ebulição, maior consumo energético para recuperação do solvente, potencial toxicidade ambiental e dificuldades de manuseio e descarte. Os líquidos iônicos se enquadram como alternativas promissoras para a destilação extrativa. Esses compostos apresentam baixa pressão de vapor, alta estabilidade térmica e podem ser projetados para oferecer seletividade adequada, reduzindo emissões e impactos ambientais. Assim, este trabalho tem como objetivo na metodologia, foi desenvolvido um modelo de simulação no Aspen Plus, adotando o modelo termodinâmico NRTL para representar o comportamento de sistemas não ideais. A partir dele, foram analisados diferentes cenários, alterando-se a proporção entre etilenoglicol e o líquido iônico [EMIM][Ac]. Os resultados indicaram que a concentração de 20% de [EMIM][Ac] e 80% de etilenoglicol apresentaram um melhor desempenho representado no caso 3 ou seja, quantidades moderadas do líquido iônico proporcionaram maior pureza do etanol e menor consumo específico de energia (SEC).

Palavras-chave: Etanol Anidro, Etilenoglicol, Azeótropo, Líquido Iônico.

ABSTRACT

A destilação extrativa é uma técnica amplamente utilizada para superar as limitações impostas pelos azeótropos, como no caso do sistema etanol-água, cuja mistura apresenta comportamento azeotrópico que impede a obtenção de etanol anidro apenas por destilação simples. Tradicionalmente, o etilenoglicol tem sido empregado como agente de arraste (entrainer) nesse processo, devido à sua alta seletividade e capacidade de alterar a volatilidade relativa entre etanol e água. No entanto, o uso do etilenoglicol apresenta desvantagens significativas, incluindo alto ponto de ebulição, maior consumo energético para recuperação do solvente, potencial toxicidade ambiental e dificuldades de manuseio e descarte. Os líquidos iônicos se enquadram como alternativas promissoras para a destilação extrativa. Esses compostos apresentam baixa pressão de vapor, alta estabilidade térmica e podem ser projetados para oferecer seletividade adequada, reduzindo emissões e impactos ambientais. Assim, este trabalho tem como objetivo na metodologia, foi desenvolvido um modelo de simulação no Aspen Plus, adotando o modelo termodinâmico NRTL para representar o comportamento de sistemas não ideais. A partir dele, foram analisados diferentes cenários, alterando-se a proporção entre etilenoglicol e o líquido iônico [EMIM][Ac]. Os resultados indicaram que a concentração de 20% de [EMIM][Ac] e 80% de etilenoglicol apresentaram um melhor desempenho representado no caso 3 ou seja, quantidades moderadas do líquido iônico proporcionaram maior pureza do etanol e menor consumo específico de energia (SEC).

Keywords: Anhydrous Ethanol, Ethylene Glycol, Azeotrope, Ionic Liquid.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Fluxograma do processo de destilação extrativa	23
FIGURA 2: Grafico de fração mássica do etanol anidro.....	27
FIGURA 3: Grafico de carga térmica do refeedor da coluna EDC	28
FIGURA 4: Grafico de carga térmica do condensador da coluna EDC.....	29
FIGURA 5:Grafico de carga térmica do refeedor da coluna RDC	30
FIGURA 6: Grafico de carga térmica do condensador da coluna RDC.....	31
FIGURA 7: Grafico de carga térmica total dos refeedores do processo	32
FIGURA 8: Grafico de carga térmica total dos condensadores do processo	33
FIGURA 9: Consumo específico de energia	33

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Componentes do processo produtivo adicionados a simulação.....	22
TABELA 2: Condições operacionais dos equipamentos do processo	24
TABELA 3 :Especificações das correntes de alimentação do processo	25
TABELA 4: Vazões mássicas de [EMIM][AC] e etilenoglicol	25
TABELA 5: Resultados da simulação de cada caso.....	26

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo geral	12
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Fundamentos Da Separação Azeotrópica Etanol-Água	13
2.2 Propriedades Físico-químicas Do Sistema Etanol-Água.....	13
2.3 Limitações da destilação simples para separação azeotrópica.....	14
2.4 Técnicas alternativas de separação (extração, pervaporação, uso de zeólitas, etc.)	14
2.4.1 Pervaporação	14
2.4.2 Peneira Molecular	15
2.5 Destilação extrativa	16
2.5.1 Destilação extrativa: princípios, aplicações e solventes extrativos	
convencionais	16
2.6 Líquidos iônicos como solventes extrativos alternativos sustentáveis	16
2.7 Conceito de líquido iônico.....	17
2.8 Impactos ambientais dos solventes tradicionais (ex: etilenoglicol, ciclo-hexano)	17
2.9 Vantagens dos líquidos iônicos como solventes (baixa volatilidade, não	18
inflamabilidade, etc.).....	18
2.10 Critérios de seleção de solventes (seletividade, capacidade, biodegradabilidade)	18
2.11 Líquido Iônico [EMIM][AC] Propriedades Gerais.....	18
2.12 Ferramentas computacionais para simulação de processos	19
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	20
3.1 Pesquisa Bibliográfica.....	20
3.2 Definição dos componentes do processo	20
3.3 Escolha dos modelos termodinâmicos adequados	20
3.4 Construção do fluxograma do processo	21
3.5 Definição das condições operacionais dos equipamentos e especificação das	
correntes de alimentação	21
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1 Definição dos componentes do processo	22
4.2 Escolha do modelo termodinâmico adequado	23
4.3 Construção do fluxograma do processo	23
4.4 Definição das condições operacionais dos equipamentos e especificação das	
correntes de alimentação	24
4.5 Resultados dos casos simulados	26
4.6 Resultados gráficos do processo no simulador	27

5. CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

O etanol tem se destacado como uma das principais alternativas renováveis aos combustíveis fósseis, tanto por sua característica sustentável quanto pelo potencial de redução das emissões de gases poluentes. No entanto, a produção de etanol em alta pureza apresenta um desafio tecnológico importante: a mistura etanol-água forma um azeótropo em 95,6% de etanol em massa, o que inviabiliza sua completa purificação apenas por destilação convencional. Para aplicações como combustível automotivo, é necessário o etanol anidro, definido como aquele com teor de água inferior a 0,5% (Moraes; Zanin, 2012).

O sistema etanol-água é bastante estudado devido à sua relevância industrial, sobretudo nos processos de destilação, fermentação e produção de biocombustíveis. A mistura apresenta comportamento azeotrópico, miscibilidade total, e propriedades físico-químicas que variam conforme a concentração de etanol e temperatura (Nova Cana, 2025; Wikipedia, 2025).

O etanol anidro é produzido a partir do etanol hidratado, obtido pela fermentação alcoólica de açúcares presentes na cana-de-açúcar, milho ou outras biomassas. Após a fermentação, o etanol é purificado por destilação fracionada, atingindo concentrações próximas de 95,6% em massa, limite imposto pela formação do azeótropo etanol-água (Moraes; Zanin, 2012).

Para uso como combustível automotivo no Brasil, o etanol anidro deve apresentar pureza mínima de 99,3 % em massa para ser utilizado como combustível, correspondendo a um teor máximo de água de 0,7 %, conforme estabelecido pela Resolução ANP nº 19/2015” (ANP, 2015)

A destilação extrativa é uma técnica empregada para superar as limitações impostas pela presença de azeótropos, como no caso da mistura etanol-água. Nesse processo, adiciona-se um agente de arraste que altera as interações moleculares e a volatilidade relativa, permitindo a separação além do ponto azeotrópico (Seader; Henley; Roper, 2011)

O líquido iônico [EMIM][Ac] é composto pelo cátion 1-etil-3-metilimidazólio ([EMIM]⁺) e pelo ânion acetato ([Ac]⁻). Esse tipo de composto pertence à classe dos líquidos iônicos imidazólicos, caracterizados por apresentar baixa pressão de vapor, alta estabilidade térmica, não inflamabilidade e forte capacidade de solvatação (Zhang et al., 2006).

1.1 Objetivo geral

Avaliar, por modelagem e simulação, como a variação do teor do líquido iônico [EMIM][Ac] na mistura com o etilenoglicol influencia no consumo energético e na pureza de etanol anidro obtido pelo processo de destilação extrativa.

1.2 Objetivos específicos

- Fazer o levantamento, na literatura, dos dados necessários para desenvolver o modelo do processo de destilação extrativa da mistura etanol/água no simulador;
- Construir o modelo do processo de destilação extrativa da mistura etanol/água no simulador;
- Avaliar o efeito da variação do teor do líquido iônico [EMIM][Ac] na mistura com o etilenoglicol sobre o desempenho energético do processo e pureza do etanol anidro;
- Determinar qual a composição da mistura do líquido iônico [EMIM][Ac] com etilenoglicol que apresenta o melhor desempenho energético e o menor consumo específico de energia (SEC).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fundamentos Da Separação Azeotrópica Etanol-Água

Segundo Perry e Green (2008) as pesquisas sobre separação de misturas azeotrópicas iniciaram desde o século XIX, quando os primeiros estudos sobre destilação fracionada foram publicados. A partir disso, várias outras estratégias tem sido buscada e propostas, desde a destilação azeotrópica até tecnologias mais atuais como pervaporação e a utilização de peneiras moleculares.

A mistura água-etanol apresenta um comportamento peculiar durante sua vaporização, onde o ponto de ebulição permanece constante e a composição da fase vapor passa a se igualar a da fase líquida que a originou. Essa característica é definida como azeotropia e não permite a separação dos componentes por uma destilação simples. Esse fato limita a pureza máxima adquirida por meio de destilação fracionada simples. E para ultrapassar essa limitação é necessário buscar técnicas mais precisas para ocorrer uma destilação que deixe o componente no máximo da pureza esperada.

“A presença do azeótropo etanol-água em cerca de 95,6% em massa de etanol limita a obtenção de etanol anidro por destilação simples, sendo necessária a aplicação de técnicas alternativas para superar essa barreira” (Renan, 2010)

O etanol anidro (99,5%) é indispensável como combustível automotivo, aditivo de gasolina e insumo químico. A indústria sucroalcooleira e de biocombustíveis depende da quebra do azeótropo para atender especificações normativas (Brasil, 2015).

2.2 Propriedades Físico-químicas Do Sistema Etanol-Água

Segundo Resa et al. (2006), o sistema etanol-água apresenta características particulares que o tornam fundamental tanto em estudos acadêmicos quanto em aplicações industriais. Um dos pontos mais importantes é a formação de azeótropo.

O calor específico e a entalpia de vaporização variam com a composição; misturas com alta fração de etanol exigem maior energia para mudança de fase, impactando o consumo energético do processo de desidratação (Seader; Henley; Roper, 2011)

2.3 Limitações da destilação simples para separação azeotrópica

Em destilação simples existem limitações pois em um ponto azeotrópico, o vapor e o líquido da mistura apresentam as mesmas composições de forma que a destilação simples não pode ultrapassar esse limite de pureza (RÍOS et al., 2018, p. 3).

Quando a volatilidade relativa entre os componentes é próxima de 1, a destilação simples não tem a mesma eficiência que a destilação extrativa, exigindo um número maior de pratos e um refluxo elevado, o que aumenta consideravelmente o consumo de energia utilizada durante todo o processo (VAN DER VYVER et al, 2024, p. 6).

Essas limitações encontradas na destilação simples fazem com que ocorra buscas por processos mais eficazes com custos melhores para a indústria.

2.4 Técnicas alternativas de separação (extração, pervaporação, uso de zeólitas, etc.)

2.4.1 Pervaporação

Segundo Mulder (1996) a pervaporação é uma técnica de separação contínua não cromatográfica que se constitui, em uma única etapa, os processos de evaporação e difusão gasosa. Essa tecnologia pode ser facilmente incluída a um módulo contínuo, o que favorece a simplificação e a miniaturização de operações preliminares, especialmente em situações onde é necessário melhorar o controle de qualidade e a aumentar produtividade. Com isso como não há contato direto entre a amostra e a membrana, a pervaporação torna-se particularmente benéfica para análises de amostras complexas, como fluidos biológicos, meios de fermentação industrial ou ambiental.

A pervaporação é um processo que funciona através da separação de membranas onde misturas líquidas são fracionadas devido à vaporização parcial através de uma membrana não porosa. A força motriz para a transferência de massa no processo é a diferença na pressão de vapor dos solutos. (Mulder, 1996)

A eficiência pode ser ajustada pela escolha correta da membrana utilizada, das condições experimentais e das características do módulo de pervaporação.

Através da versatilidade e eficácia na sua transferência de massa rápida e precisa, esse processo é mencionado como alternativa eficaz para análises de rotina e acompanhamento e monitoramento de processos em inúmeras áreas.

2.4.2 Peneira Molecular

Etanol concentrado é fabricado habitualmente por meio de três possibilidades: destilação extrativa; azeotrópica e adsorção via peneira molecular. No etanol anidro feito por meio de peneira molecular não é necessário a adição de insumos durante se processo. Tendo vantagens no custo operacional visto que o consumo de vapor aproxima-se de 30% menor que na destilação azeotrópica (Renuka do Brasil, 2015).

O etanol anidro produzido através de peneira molecular faz uso de vasos de colunas com rígidos controles de pressão e temperatura compostos por partículas chamadas de zeólitas, a habilidade de adsorção seletiva, segurando as partículas de água e liberando passagem para as de etanol. Alguns fatores de extrema importância e tem grande influência na adsorção é a temperatura, íons no zeólito, pressão e a concentração possui esse domínio no processo (Roelofsen, 1972).

Segundo Dyer (1988) a formação de zeólitos naturais ocorre a partir de uma modificação hidrotérmica da lava vulcânica, pela ação da água em elevadas temperaturas. Na sintetização de zeólitos artificiais busca reproduzir seus requisitos naturais. Nas peneiras moleculares são utilizados zeólitos artificiais.

No caso da peneira molecular, onde tem sua funcionalidade semelhante à de um “filtro molecular”, tendo sólidos porosos com diâmetros de poro uniformes na escala nanométrica, exemplificando moléculas com tamanhos menores conseguem entrar nos poros e moléculas com uma estrutura maior ficam de fora dos poros (DYER, 1988).

2.5 Destilação extrativa

2.5.1 Destilação extrativa: princípios, aplicações e solventes extrativos convencionais

Em casos de misturas azeotrópicas, a destilação extrativa é amplamente aplicada. E consiste em utilizar um solvente que alimentado na coluna e interage com a mistura a ser separada. Em uma segunda coluna, o solvente é regenerado. Normalmente o solvente tem uma afinidade preferencial por um dos componentes usados na destilação, alterando assim a volatilidade relativa da mistura e possivelmente “quebrando” um azeotrópo. (Sprakel et al., 2018).

A destilação extrativa é, por exemplo, aplicada para separar etanol-água usando etilenoglicol como agente de arraste, ou utilizando líquidos iônicos como agentes de arraste.” (Sprakel et al., 2018).

Os glicóis possuem propriedades físicas que favorecem a ‘o rompimento’ do azeotrope, influenciando positivamente na curva de equilíbrio líquido-vapor. Entre os glicóis utilizados destaca-se o glicerol, etilenoglicol e propilenoglicol; visto que os glicóis são mais utilizados neste processo de destilação. (Deboçam et al., 2019)

2.6 Líquidos iônicos como solventes extrativos alternativos sustentáveis

O uso de líquidos iônicos como agentes de arraste mostra vantagens em relação aos glicóis porque eles não contaminam o destilado com impurezas voláteis e permitem maior pureza do etanol. (Gutierrez; Meindersma; De haan, 2013)

Além disso, os Líquidos iônicos apresentam a vantagem de poderem ser projetados quimicamente, com diferentes combinações de cátions e ânions, permitindo ajustar suas propriedades ao sistema de interesse. Essa flexibilidade estrutural contribui para que substituam solventes tóxicos ou inflamáveis, reduzindo riscos ambientais e ocupacionais. Pereiro et al. (2012) afirmam que “a incorporação de líquidos iônicos em separações azeotrópicas é atraente devido à sua flexibilidade de projeto e à possibilidade de substituir solventes voláteis tóxicos”

2.7 Conceito de líquido iônico

“Os líquidos iônicos são sais compostos inteiramente por íons que permanecem líquidos abaixo de 100 °C” (Wasserscheid; Welton, 2008)

Compostos por cátions orgânicos volumosos e ânions inorgânicos ou orgânicos, cujas interações impedem a cristalização.

Líquidos Iônicos são sais formados apenas por íons, mas que apresentam comportamento líquido em condições próximas à temperatura ambiente, devido ao baixo ponto de fusão. Como pontuam Plechkova e Seddon (2008) “os líquidos iônicos diferem dos sais inorgânicos tradicionais, como o cloreto de sódio, por possuírem cátions orgânicos volumosos que impedem o empacotamento eficiente, reduzindo a tendência de cristalização”.

2.8 Impactos ambientais dos solventes tradicionais (ex: etilenoglicol, ciclo-hexano)

Segundo Staples et al. (2001) o etilenoglicol sofre degradação rápida tanto em ambientes aeróbicos quanto anaeróbicos, podendo ser removido quase completamente ($\approx 100\%$) em períodos de 24 horas a 28 dias. Em corpos d'água, solos ou águas subterrâneas ele não é persistente, apresenta baixa bioacumulação e toxicidade aguda relativamente baixa para peixes e invertebrados aquáticos”

Apesar de biodegradável o etilenoglicol ainda é nocivo e seu uso requer cuidados com sistemas adequados de coleta e tratamento para evitar contaminações.

De acordo com Merck Millipore (2025) “O ciclo-hexano é um solvente orgânico volátil, inflamável, com densidade de vapor maior que o ar, que pode se dispersar facilmente na atmosfera. A exposição aguda a altas concentrações pode causar efeitos sobre o sistema nervoso central, como tontura, dor de cabeça e sonolência, além de irritação ocular e toxicidade moderada para organismos aquáticos em exposições crônicas”.

2.9 Vantagens dos líquidos iônicos como solventes (baixa volatilidade, não inflamabilidade, etc.)

“Os líquidos iônicos surgem como uma alternativa promissora aos solventes convencionais devido às suas propriedades singulares: baixa volatilidade, não inflamabilidade, alta estabilidade térmica e possibilidade de ajuste estrutural de acordo com a necessidade da separação.” (MALIK et al., 2023).

Podendo ser projetados de forma a ajustar a interação com componentes específicos da mistura, os líquidos iônicos atuam como solventes seletivos e ao mesmo tempo apresentando vantagens ambientais, pois substituem solventes orgânicos voláteis.” (MALIK et al., 2023).

2.10 Critérios de seleção de solventes (seletividade, capacidade, biodegradabilidade)

A seletividade induzida pelo solvente deve atingir uma volatilidade relativa mínima de aproximadamente 3 em função da razão solvente/alimentação. Outro critério importante para a pré-seleção do solvente é a facilidade de recuperação, exigindo que o seu ponto de ebulição seja pelo menos 40–50 °C maior que o componente mais volátil” (BROUWER et al., 2021).

“Em geral, solventes com alta seletividade tendem a apresentar menor capacidade; por isso, busca-se um equilíbrio entre elevado grau de separação e boa solubilidade, evitando a formação de uma segunda fase líquida” (HERNANDEZ, 2013).

A biodegradabilidade do solvente é um critério ambiental crucial, pois solventes prontamente biodegradáveis apresentam menor impacto em caso de perdas ou descarte inadequado” (Penido, 2025).

2.11 Líquido Iônico [EMIM][Ac] Propriedades Gerais.

Segundo Zhang et al. (2021) [EMIM] sigla para 1-etil-3-metilimidazólio [(1-ethyl-3-methylimidazolium)] e [Ac] Acetato (CH_3COO^-), acetato de 1-etil-3-metilimidazólio é um líquido iônico hidrofílico, bastante utilizado como solvente verde, possuindo baixa pressão de vapor, com uma boa condutividade iônica e mantendo uma alta estabilidade térmica. Um benefício essencial e importante no [EMIM] [Ac] é a miscibilidade com água, apesar de apresentar fortes interações de hidrogênio devido ao ânion acetato.

Algumas aplicações de grande importância do [EMIM] [Ac] é na separação etanol-água utilizado como agente extrator (entrainer) da destilação extrativa ou pervaporação, pois ajuda a “romper” o azeótropo etanol-água. (Xia et al., 2020)

Utilizado também em catalise verde que é aplicado em síntese orgânica, sobretudo em reações que exigem solventes mais sustentáveis ambientalmente. Este líquido também tem uma eficiência considerável para dissolver celulose e lignina, assim mostrando bons resultados em quase todas as suas formas empregadas. (Li, X., et al., 2025)

2.12 Ferramentas computacionais para simulação de processos

Segundo AspenTech (2025), o Aspen Plus é amplamente utilizado para simulação de processos químicos em estado estacionário, oferecendo vasta biblioteca de pacotes termodinâmicos e integração com ferramentas de otimização e análise energética. Ele é indicado para projetar colunas de destilação, realizar balanços de massa e energia e avaliar integração térmica em indústrias químicas e petroquímicas.

Aspen Plus é o simulador comercial mais amplamente utilizado para processos de destilação, incorporando diversos modelos termodinâmicos para destilação azeotrópica e extrativa (Seader; Henley; Roper, 2011)

Simuladores de processo como Aspen Plus, HYSYS e PRO/II são ferramentas essenciais na engenharia química moderna, permitindo o projeto e a otimização confiável de processos de separação” (Towler; Sinnott, 2013)

Segundo Wankat (2011), o modelo NRTL (Non-Random Two-Liquid) é recomendado para ser utilizado em simulações de destilação extrativa azeotrópica de misturas de composições não ideais, pois descreve com precisão os coeficientes de atividade e antecipa a ocorrência de azeótropos, levando em conta interações moleculares não aleatórias em nível local, principalmente em sistemas com ligações de hidrogênio, como em misturas de solventes polares.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa foi feita em diversos meios de informações acadêmicas e livros digitais disponíveis na internet, foi buscado informações em artigos de origem segura, além de dissertações com bases apropriadas para discorrer o assunto. Um dos artigos utilizado como base foi o de Malik (2023), as pesquisas para procura de demais artigos científicos foram realizadas no google acadêmico no próprio google habitual e periódicos capes.

3.2 Definição dos componentes do processo

Para obtermos os parâmetros corretos e seguros para o andamento da simulação foi necessário fazer buscas e pesquisas em artigos acadêmicos acessíveis na literatura, através dessas pesquisas foi possível dar seguimento para a próxima etapa, a de escolhas dos componentes específicos utilizados para ser feita a simulação.

O etanol e a água já se encontravam disponível no banco de dados do Aspen Plus assim como o Monoetilenoglicol estava presente na lista do simulador.

Tornou-se necessário criar componentes hipotéticos no simulador, inserindo propriedades químicas essenciais, por exemplo: estado físico, fórmula molecular, densidade, massa molar, ponto de ebulição, pressão e temperatura crítica, volume crítico e fator excêntrico para permitir a execução adequada da simulação (MALIK et al ,2023).

3.3 Escolha do modelo termodinâmico adequado

O modelo termodinâmico foi escolhido através de pesquisas em assuntos relacionados ao tema e que se enquadra ao trabalho feito no simulador, de sistemas não ideais, como misturas azeotrópicas e soluções polares.

A escolha certa do modelo termodinâmico trás confiabilidade aos resultados obtidos do processo de simulação.

O modelo NRTL é um modelo de coeficiente de atividade para a fase líquida, bastante usado para prever equilíbrio líquido-vapor (ELV) de misturas não ideais. Ele leva em conta que a distribuição local de moléculas ao redor de uma molécula não é aleatória (daí “Non-Random”), ou seja, moléculas diferentes interagem de formas

distintas, e essas interações afetam a entropia de mistura e a energia livre de Gibbs de excesso (Smith; Van ness; Abbott, 2007).

3.4 Construção do fluxograma do processo

Com os equipamentos disponíveis no Aspen Plus e com o auxílio das pesquisas feitas na literatura e artigos científicos, iniciou-se a montagem do fluxograma semelhante a um processo de uma indústria detalhando o processo de destilação extrativa.

Foi seguindo uma sequência lógica de cada etapa de produção que se desenvolveu o fluxograma, apresentando correntes de entrada e saída com sua ordem de processo e por onde passava cada composição, podendo perceber onde se localiza cada coluna e qual sua finalidade.

3.5 Definição das condições operacionais dos equipamentos e especificação das correntes de alimentação

Logo em seguida com a ajuda dos procedimentos e parâmetros especificamos temperatura, pressão, vazão e composição das correntes de entrada do processo e condições operacionais dos equipamentos, condições essas que são exigidas para o bom funcionamento do processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definição dos componentes do processo

A princípio foi estudado por meio de artigo científico como seria feita a utilização desses componentes no simulador e suas quantidades necessárias para cada simulação de destilação extrativa e o modelo termodinâmico para calcular as propriedades. Os componentes necessários para a realização desse processo de separação etanol-água, foram definidos para chegar ao objetivo utilizando o critério de melhor pureza da composição, o solvente escolhido foi o (etilenoglicol) juntamente com líquido iônico o ([EMIM][Ac]).

No Aspen Plus foi selecionado os componentes presentes no banco de dados a água, etanol e o monoetilenoglicol ($C_2H_6O_2$), já o líquido iônico ([EMIM][Ac]) como agente de arraste para separação etanol/água foi necessário adicionar, e foi selecionado o modelo termodinâmico NRTL usando a temperatura em Kelvin. A seguir na tabela 1 é possível observar os componentes utilizados.

Tabela 1: Componentes do processo produtivo adicionados a simulação

Componente químico	Nome do componente em inglês	Fórmula	Tipo
Água	Water	H-O-H	Convencional
Etanol	Ethanol	CH ₃ -CH ₂ -OH	Convencional
Monoetilenoglicol	Ethylene Glycol	HOCH ₂ CH ₂ OH	Convencional
Acetato de 1-Etil-3-Metilimidazólio (EMIM-Ac)	1-Ethyl-3-Methylimidazolium	C ₈ H ₁₄ N ₂ O ₂	Convencional

Fonte: Autor 2025

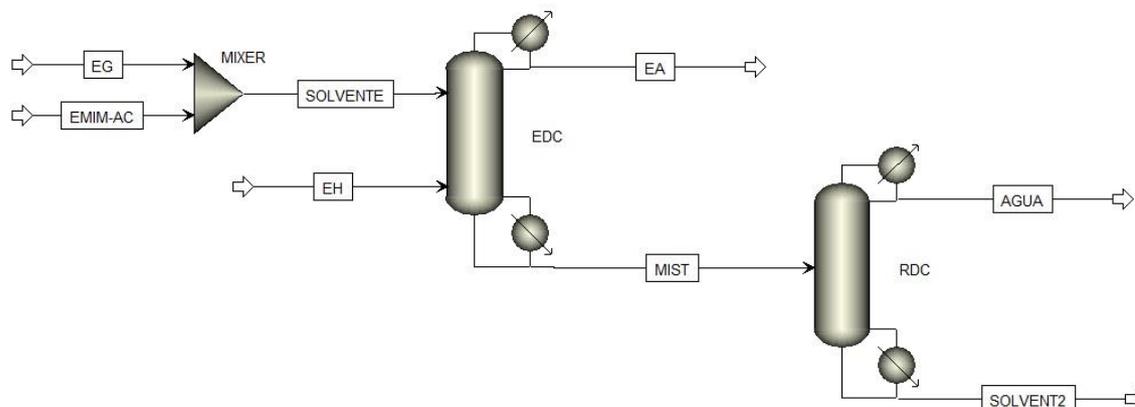
4.2 Escolha do modelo termodinâmico adequado

Segundo Wankat (2011), o modelo NRTL (Non-Random Two-Liquid) é recomendado para ser utilizado em simulações de destilação extrativa azeotrópica de misturas de composições não ideais, pois descreve com precisão os coeficientes de atividade e antecipa a ocorrência de azeótropos, levando em conta interações moleculares não aleatórias em nível local, principalmente em sistemas com ligações de hidrogênio, como em misturas de solventes polares.

4.3 Construção do fluxograma do processo

Após adicionar todos os valores necessários de cada componente, logo em seguida foi construído o fluxograma do processo de destilação extrativa. Com os equipamentos fornecidos pelo Aspen Plus foi selecionado as ferramentas corretas similares ao da indústria, para formar correntes de entrada e saída como pode ser percebido na Figura 1.

Figura 1: Fluxograma do processo Destilação Extrativa.



Fonte: Autor 2025

Conforme a imagem da Figura 1 pode-se observar a forma como foi elaborado o fluxograma do processo de destilação extrativa. Foi necessário a utilização de 3 equipamentos: um misturador denominado de (MIXER), uma coluna de destilação extrativa chamada de EDC e uma coluna de recuperação do solvente, RDC.

No fluxograma é possível ver duas correntes de entrada de alimentação ligadas ao (MIXER), em uma dessas correntes entra o etilenoglicol (EG) e na outra corrente temos

o líquido iônico Acetato de 1-Etil-3-Metilimidazólio (EMIM-Ac), esses dois componentes são misturados no (MIXER) formando o solvente combinado que aumenta a eficiência de extração da água no processo da destilação, seguindo esse raciocínio temos outra corrente saindo do misturador (MIXER) e se conectando a primeira coluna chamada de (EDC). Nesta mesma coluna podemos ver a presença de uma nova corrente de alimentação, a de Etanol Hidratado (EH). Então após a junção do etanol ao solvente temos o processo da destilação extrativa na coluna (EDC). No topo é extraído o Etanol Anidro pela corrente de saída (EA), enquanto na parte de baixo fica retido água e solvente.

Essa mistura composta por água e solvente é levado para coluna de Recuperação (RDC) por uma corrente identificada como (MIST), nesta etapa ocorre a fase final de todo esse processo que é a separação da água e do solvente, na parte superior da coluna é retirada a água e na parte inferior é recuperado o solvente, que tem possibilidade de ser reutilizado como reciclo para a coluna EDC, assim reduzindo os custo operacionais e a geração de resíduos .

4.4 Definição das condições operacionais dos equipamentos e especificação das correntes de alimentação

Aqui é onde definimos parâmetros através de pesquisa feita na literatura a forma de operar cada equipamento e identificamos os componentes utilizados no processo de modo geral representado na Tabela 1. Na Tabela 2 podemos perceber os parâmetros e condições operacionais para o desenvolvimento da destilação, foram especificados também cada equipamento no fluxograma.

Tabela 2: Condições operacionais dos equipamentos do processo

Especificação	Coluna Extrativa (EDC)	Coluna de Retificação (RDC)
Número de Estágios	15	6
Vazão de destilado (kg/h)	93,2	6,8
Razão de refluxo (mássica)	1	2
Pressão (atm)	1	0,5

Estágio de alimentação:

EH	11	-
SOLVENTE	3	-
MIST	-	3

Fonte: autor 2025

Na tabela 3 estão apresentadas as especificações da corrente de alimentação de cada componente do processo conforme foi estudado na literatura.

Tabela 3 :Especificações das correntes de alimentação do processo

Especificação	EG	EMIM-Ac	EH
TEMPERATURA (C°)	78	78	78
Vazão de mássica (kg/h)	Varia do caso 1 ao 11	Varia do caso 1 ao 11	100
Pressão (atm)	1 atm	1 atm	

Fração mássica:

Água	0	0	0,068
Etanol	0	0	0,932
Etilenoglicol	1	0	0
[EMIM][Ac]	0	1	0

Fonte: autor 2025

Na Tabela 4 é possível observar os casos simulados e a quantidade de cada composição em (Kg/hr) utilizada em cada caso.

Tabela 4: Vazões mássicas de [EMIM][Ac] e etilenoglicol

Caso	Vazão de [EMIM][Ac] (Kg/hr)	Vazão de Etilenoglicol (Kg/hr)
1	0	100
2	10	90
3	20	80
4	30	70

5	40	60
6	50	50
7	60	40
8	70	30
9	80	20
10	90	10
11	100	0

Fonte: autor 2025

4.5 Resultados dos casos simulados

A Tabela 5 apresenta os resultados da simulação dos 11 casos avaliados neste trabalho.

Tabela 5: Resultados da simulação de cada caso.

Caso	Vazão de EMIM-AC (kg/hr)	Vazão de EG (kg/hr)	Fração mássica de EMIM-AC (%)	Fração mássica de etilenoglicol (%)	Fração mássica de etanol na corrente EA (%)	Vazão mássica de etanol na corrente EA (kg/hr)	Qref-EDC (kW)	Qcond-EDC (kW)	Qref-RDC (kW)	Qcond-RDC (kW)	Qref total (kW)	Qcond total (kW)	SEC (Kwh/kg)
1	0	100	0	1	0,9990	93,1031	51,4115	-44,1391	12,3608	-12,6581	63,7722	-56,7972	0,684964
2	10	90	0,1	0,9	0,9991	93,1209	50,0247	-44,1186	13,0840	-12,8993	63,1087	-57,0179	0,677707
3	20	80	0,2	0,8	0,9992	93,1299	49,1366	-44,1068	13,8074	-13,0120	62,9440	-57,1188	0,675873
4	30	70	0,3	0,7	0,9993	93,1313	48,6598	-44,1024	14,5299	-13,0580	63,1897	-57,1604	0,678501
5	40	60	0,4	0,6	0,9992	93,1251	48,5067	-44,1049	15,2537	-13,0689	63,7604	-57,1738	0,684675
6	50	50	0,5	0,5	0,9990	93,1095	48,5991	-44,1155	15,9924	-13,0578	64,5915	-57,1733	0,693715
7	60	40	0,6	0,4	0,9987	93,0806	48,8721	-44,1371	16,7772	-13,0278	65,6493	-57,1649	0,705295
8	70	30	0,7	0,3	0,9981	93,0312	49,2748	-44,1751	17,6700	-12,9747	66,9448	-57,1498	0,719595
9	80	20	0,8	0,2	0,9973	92,9487	49,7712	-44,2396	18,8139	-12,8854	68,5851	-57,1250	0,737881
10	90	10	0,9	0,1	0,9958	92,8152	50,3398	-44,3445	20,7458	-12,7373	71,0856	-57,0818	0,765883
11	100	0	1	0	0,9936	92,6046	50,9746	-44,5105	28,0914	-12,2848	79,0660	-56,7953	0,853802

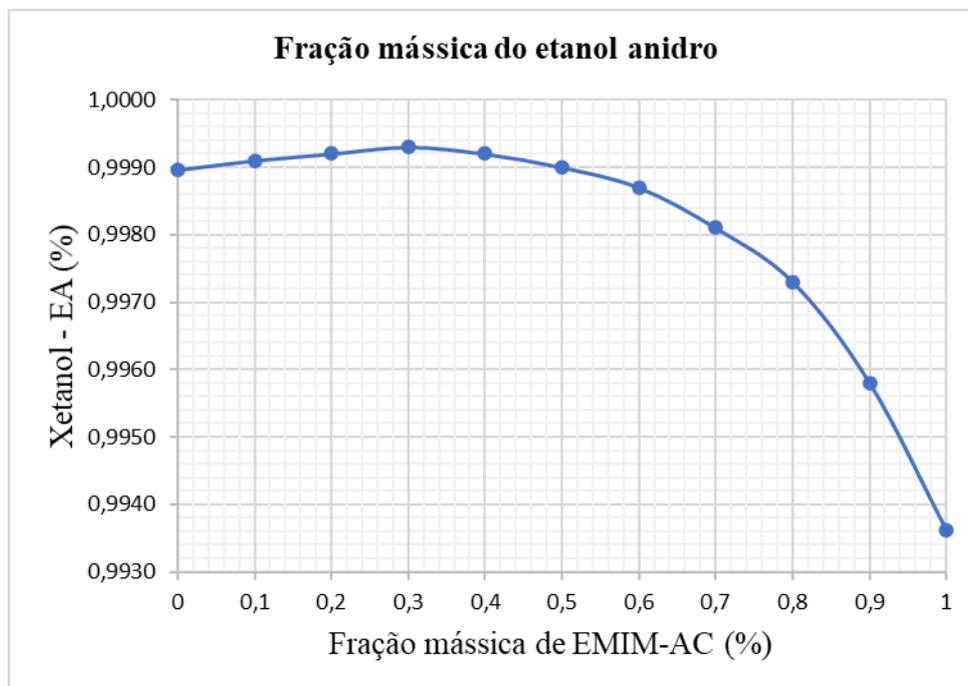
Fonte: autor 2025

A partir da Tabela 5 é possível observar que o caso que apresentou a menor carga térmica total e o menor consumo específico de energia foi o caso 3, onde foi utilizado 20% de líquido iônico [EMIM][Ac] e 80% de etilenoglicol, demonstrando melhores resultados no processo de destilação.

4.6 Resultados gráficos do processo no simulador

A Figura 2 mostra o comportamento da fração de etanol na corrente de destilado EA.

Figura 2: Gráfico de fração mássica do etanol anidro

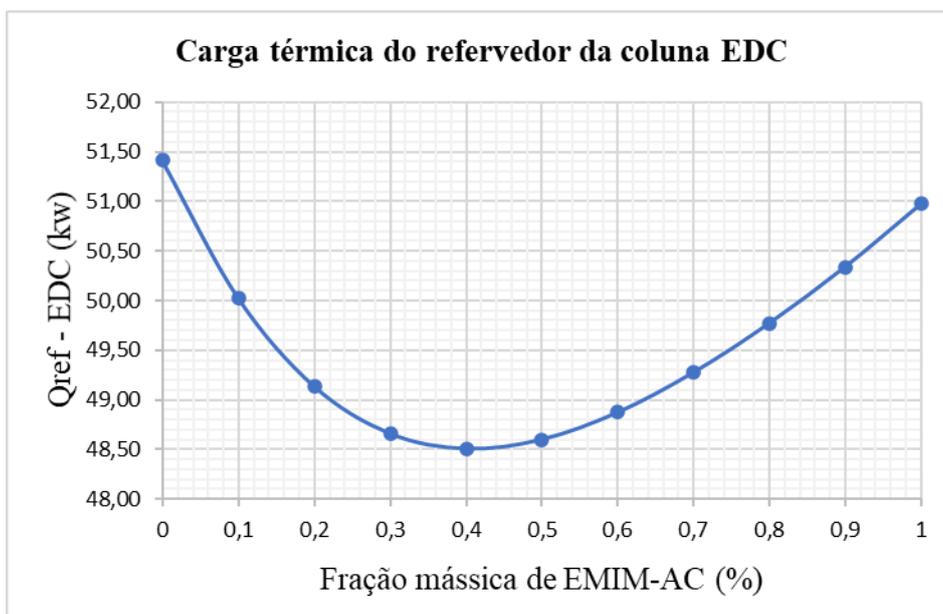


Fonte: autor 2025

A Figura 2 mostra que a pureza do etanol anidro permanece elevada com pequenas variações para baixas frações mássicas de EMIM-AC, atingindo um leve máximo próximo a 30 %. Entretanto, frações mais altas do agente de separação resultam em decréscimo da pureza, evidenciando a importância do controle da proporção de solvente na destilação extrativa.

A Figura 3, a seguir, mostra o comportamento da carga térmica do refeedor da coluna EDC à medida que a fração mássica do EMIM-AC varia entre os 11 casos analisados.

Figura 3: Gráfico de carga térmica do refeedor da coluna EDC

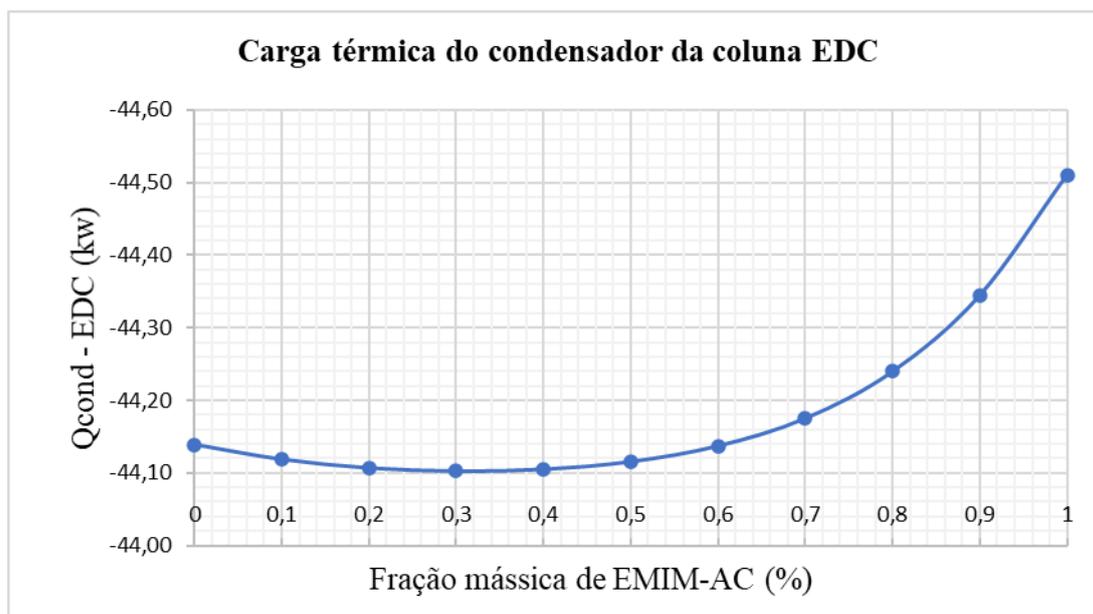


Fonte: autor 2025

Observa-se na Figura 3 que a carga térmica do refeedor da coluna EDC diminui rapidamente de cerca de 51,5 kW para próximo de **50 kW**, mostrando que pequenas quantidades de EMIM-AC já aumentam a eficiência energética. A curva continua caindo até atingir um mínimo em torno de 48,5 kW, por volta de 40% EMIM-AC. Este é o ponto de operação em que o sistema consome menos energia para manter a separação.

A Figura 4 mostra como a carga térmica do condensador da coluna EDC varia a partir da variação da fração mássica do líquido iônico EMIM-AC.

Figura 4: Gráfico de carga térmica do condensador da coluna EDC

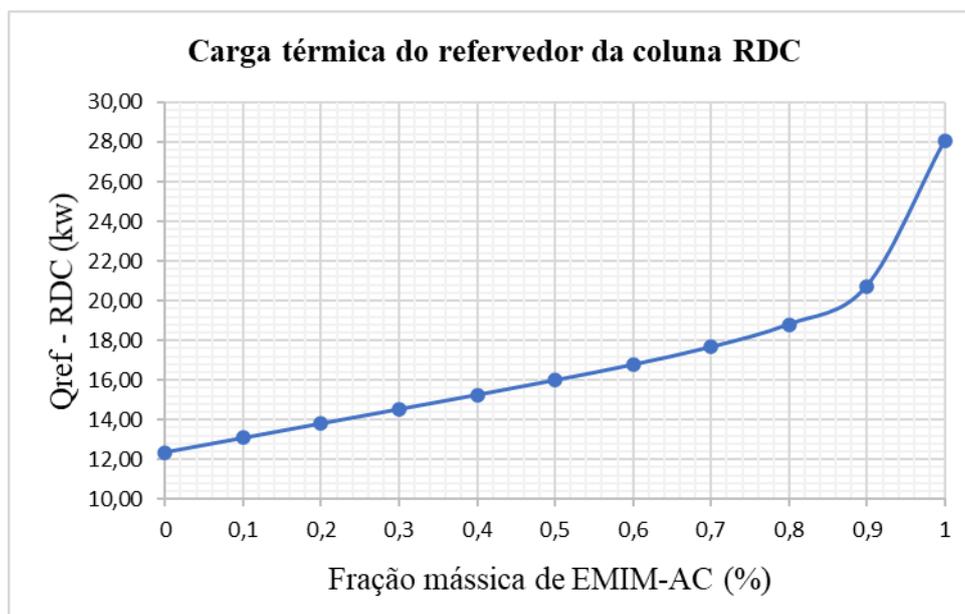


Fonte: autor 2025

Na Figura 4, é perceptível que quando temos 0% de líquido iônico e conforme a fração mássica do líquido vai aumentando percebemos uma mudança no comportamento, onde temos uma pequena queda até a fração 0,3 de líquido iônico, apresentando a diminuição na carga térmica removida no condensador. Quando se adiciona mais frações do líquido a curva vai mudando o seu sentido e subindo até -44,50, demonstrando uma sobrecarga da carga térmica.

A Figura 5 mostra como a carga térmica do refeedor da coluna RDC varia a partir da variação da fração mássica do líquido iônico EMIM-AC.

Figura 5: Gráfico de carga térmica do refeedor da coluna RDC

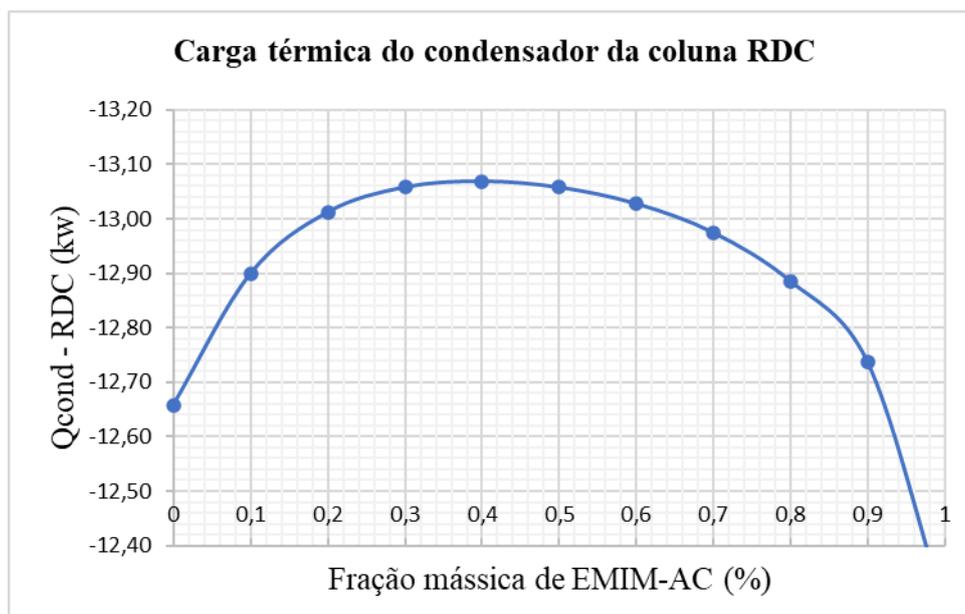


Fonte: autor 2025

Na Figura 5, a carga térmica aumenta gradualmente a cada fração adicionada de uma forma um pouco controlada até chegar à fração 0,9 do no líquido iônico EMIM-AC, após esse valor é possível notar um aumento brusco de consumo saindo de aproximadamente 21kw e chegando ao 28 kw. Assim indicando um comportamento claro do efeito de cada fração da mistura do etilenoglicol e do EMIM-Ac.

A Figura 6 mostra como a carga térmica do condensador da coluna RDC varia a partir da variação da fração mássica do líquido iônico EMIM-AC.

Figura 6: Gráfico de carga térmica do condensador da coluna RDC

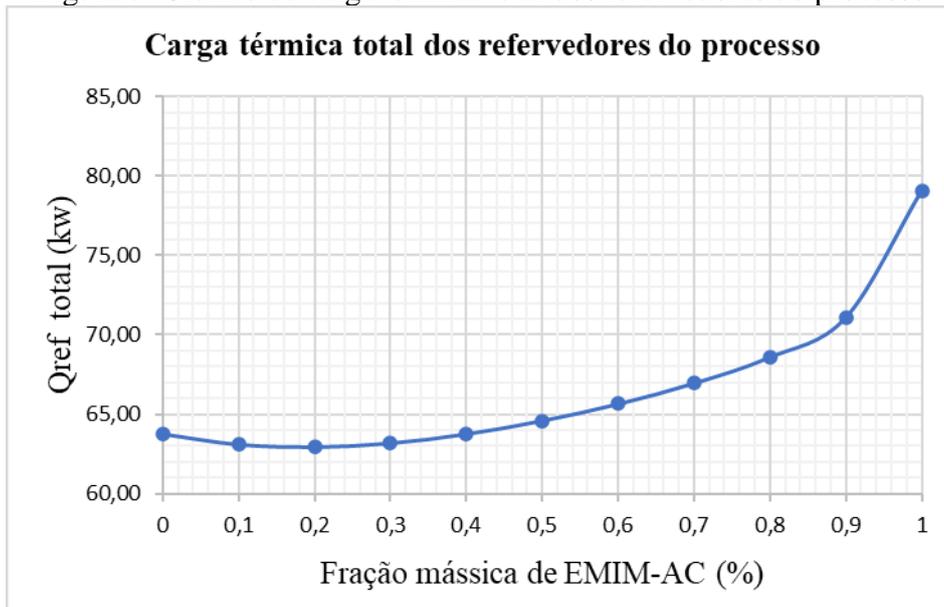


Fonte: autor 2025

Na Figura 6 é possível notar um comportamento diferente dos outros gráficos apresentados, a cada adição de fração do líquido iônico a carga térmica vai aumentando de forma significativa até chegar ao seu pico máximo, localizado na composição 0,4% de líquido iônico, após esse pico é possível notar o decaimento gradativo da curva até chegar ao valor mais baixo na fração de 100% de EMIM-AC.

A Figura 7 mostra como a carga térmica total dos refeedores das colunas EDC e RDC varia a partir da variação da fração mássica do líquido iônico EMIM-AC.

Figura 7: Gráfico de carga térmica total dos refeedores do processo

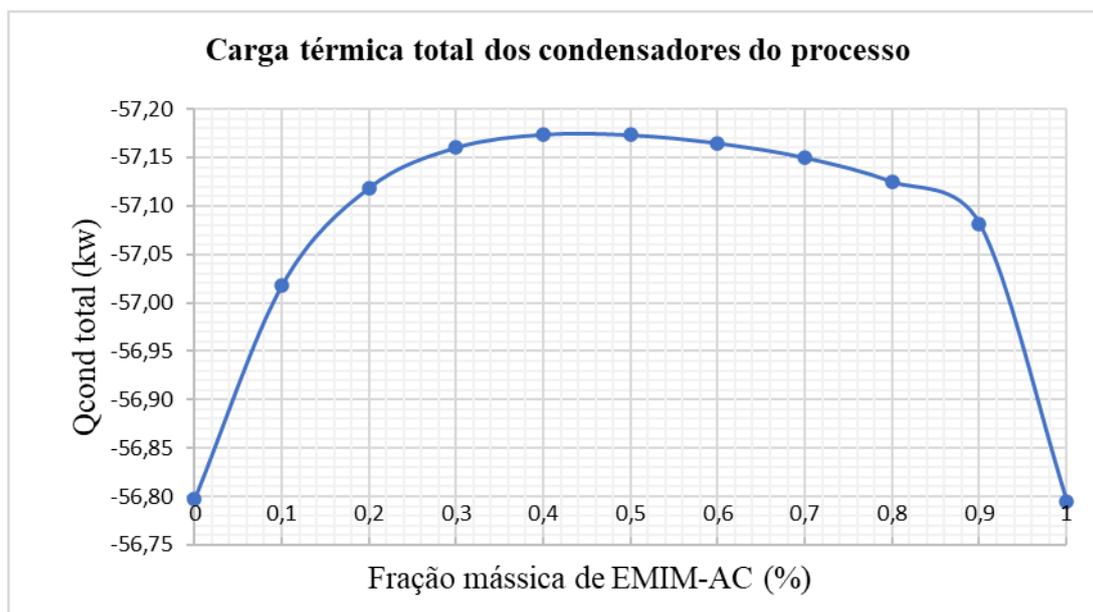


Fonte: autor 2025

Na carga térmica total na Figura 7, podemos notar que entre 0 e 0,2 temos uma leve declínio, mas logo após a fração 0,2 a carga térmica total dos refeedores começa se modificar tendo um aumento considerável, e na fração 0,7 é perceptível o aumento brusco da carga térmica total até a fração 0,9 e logo em seguida na fração 1, mostrando um comportamento instável do consumo da carga aumentando os custos de produção.

A Figura 8 mostra como a carga térmica total dos condensadores das colunas EDC e RDC varia a partir da variação da fração mássica do líquido iônico EMIM-AC.

Figura 8: Gráfico de carga térmica total dos condensadores do processo

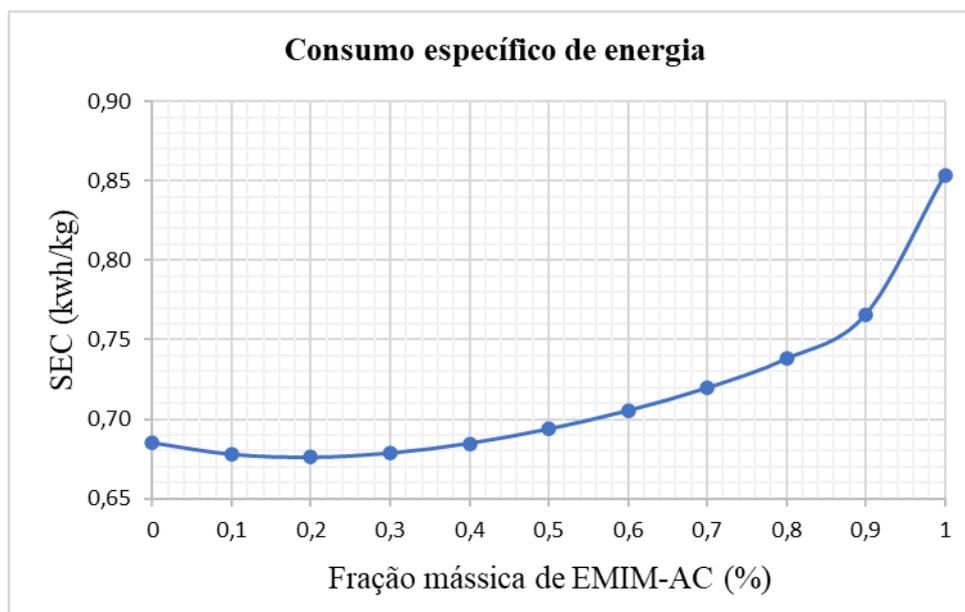


Fonte: autor 2025

Neste gráfico representado na Figura 8 temos uma curva bem irregular onde mostra a carga térmica dos condensadores, observa-se um aumento bem significativo da fração 0% até o pico máximo da curva na fração 0,4%, e cada vez que se aumenta a composição de líquido iônico a carga térmica apresenta uma diminuição no seu comportamento, até demonstrar uma segunda alteração entre a fração 0,8% e 0,9%, e logo em seguida esse consumo da carga térmica apresenta uma redução considerável.

A Figura 9 mostra como o consumo específico de energia (SEC) varia a partir da variação da fração mássica do líquido iônico EMIM-AC.

Figura 9: Consumo específico de energia



Fonte: autor 2025

Neste último gráfico representado na Figura 9, percebe-se que de 0 até 0,2 o consumo específico de energia demonstrou uma leve redução, mas logo em seguida há uma variação na curva apresentando um acréscimo contínuo até a fração 0,9 onde se tem uma mudança com grande variação até a fração de 1 de líquido iônico.

Através dos gráficos apresentados podemos afirmar que, chega um ponto em que a composição apresenta uma curva onde se tem menor consumo de energia com a variação da carga térmica. E conforme se modifica a quantidade de porcentagens utilizada no processo podemos ter um resultado melhor com um baixo custo ou o contrário.

5. CONCLUSÃO

Ao longo deste trabalho de simulação, foi possível explorar em detalhe todos os parâmetros envolvidos e compreender melhor o comportamento do processo de destilação extrativa. A análise mostrou que a combinação de etilenoglicol e [EMIM][Ac], é capaz de alcançar alta eficiência de separação com menor consumo energético em comparação a outras misturas testadas, isso foi perceptível fazendo um estudo de simulação com 11 casos modificando a quantidade de cada componente na mistura.

A análise do efeito da variação do teor de [EMIM][Ac] misturado ao etilenoglicol mostrou que o controle adequado da quantidade de líquido iônico tem um impacto direto e relevante tanto no consumo de energia quanto na pureza do etanol anidro produzido. Notou-se que, em concentrações menores de líquido iônico [EMIM][Ac] melhora a diferença de volatilidade entre o etanol e a água, permitindo alcançar purezas mais elevadas e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo específico de energia (SEC).

O objetivo de promover a “quebra” do azeótropo etanol-água foi plenamente atingido, resultando em um etanol anidro de elevado grau de pureza. Os dados gerados forneceram uma visão detalhada da carga térmica em cada coluna, permitindo avaliar com precisão o desempenho energético do processo. De forma geral, os resultados reforçam que o uso combinado de etilenoglicol e [EMIM][Ac] é uma alternativa promissora para otimizar a destilação extrativa. E por meio deste trabalho obtivemos o resultado onde a composição de 20% de [EMIM][Ac] e 80% de etilenoglicol apresentou-se como a condição ideal, alcançando o menor SEC e a melhor pureza da fração de etanol no segundo caso, melhor desempenho energético dentre os cenários simulados, equilibrando eficiência de separação e economia de energia.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Resolução ANP nº 19, de 15 de abril de 2015*. Estabelece especificações para o etanol anidro combustível. Disponível em: <https://www.gov.br/anp>. Acesso em: 19 set. 2025.

ASPENTECH. *Aspen Plus — Leading Process Simulation Software*. Disponível em: <https://www.aspentech.com/en/products/engineering/aspen-plus>. Acesso em: 19 set. 2025.

BAADENHUIJSEN, SEUREN-JACOBS. Continuous separation techniques in flow injection analysis. *Clinical Chemistry*, v.25, p.443-448, 1979.

BRASIL. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). *Especificações para o Etanol Combustível*. Resolução ANP nº 19, de 15 abr. 2015.

BROUWER, T. Solvent pre-selection for extractive distillation using infinite dilution activity coefficients. *Separation and Purification Technology*, v. 278, p. 119–130, 2021.

DCCEEW. *Cyclohexane – Fact Sheet*. Austrália: Department of Climate Change, Energy, Environment and Water, 2024. Disponível em: <https://www.dcceew.gov.au/environment/protection/npi/substances/fact-sheets/cyclohexane>. Acesso em: 19 set. 2025.

DEBOÇAM, GORANDOW, RANDOW, SILVA, MOREIRA,. **Engenharia de Operações e Processos da Indústria Química**. Juiz de Fora: Editar, 2019.

DYER, A. *An Introduction to Zeolite Molecular Sieves*. Chichester: John Wiley & Sons, 1988.

FATE, EFFECTS AND POTENTIAL ENVIRONMENTAL RISKS OF ETHYLENE GLYCOL: A REVIEW. *Chemosphere*, v. 43, n. 3, p. 377-383, 2001. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11302583/>. Acesso em: 19 set. 2025.

GUTIERREZ, J.P.; MEINDERSMA, G.W.; DE HAAN, A.B. *Extractive Distillation of Ethanol-Water Using Ionic Liquids as Entrainers*. 2013. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338986390_Extractive_Distillation_of_Ethanol-Water_Using_Ionic_Liquids_as_Entrainers. Acesso em: 17 out. 2025.

HERNANDEZ, J. *Extractive distillation with ionic liquids as solvents*. Eindhoven University of Technology, 2013. Disponível em: <https://research.tue.nl/files/3600593/751728.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

HICKEY. Pervaporation: principles and applications. *Separation and Purification Methods*, v.19, p.93-130, 1990.

HUANG, R. Y. M. (Ed.). *Pervaporation membrane separation processes*. Amsterdam: Elsevier, 1991.

Li, X., et al. *A Review: Using Ionic Liquids for Lignin Extraction from Lignocellulose*. *Frontiers in Chemistry*, v. 13, p. 12196028, 2025. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12196028/>. Acesso em: 17 out. 2025.

MALIK, KHAN, SHAH, AHMAD, KHAN, AL-KAHTANI, A.; SILLANPÄÄ. Triagem de líquidos iônicos como entrainers verdes para separação etanol-água por destilação extrativa: predição COSMO-RS e simulação no Aspen Plus. *Journal of Molecular Liquids*, [S. l.], v. 380, p. 121802, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121802>. Acesso em: 17 set. 2025.

MATTOS, QUEIROZ. Pervaporação: uma técnica de separação contínua não cromatográfica. *Química Nova*, v.21, n.2, p.202-205, 1998.

MERCK MILLIPORE. *Ficha de Dados de Segurança: Ciclo-hexano*. Disponível em: https://www.merckmillipore.com/Web-JP-Site/ja_JP/-/JPY/ShowDocument-File?Country=BR&DocumentId=102832_SDS_BR_Z9.PDF&DocumentType=MSD&DocumentUID=324495&Language=Z9&Origin=PDP&ProductSKU=MDA_CHEM-102832. Acesso em: 19 out. 2025.

MORAES, ZANIN. Produção de etanol anidro: uma revisão. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 1, n. 1, p. 44-58, 2012.

MORAES, Bruno S.; ZANIN, Gisella M. Produção de etanol anidro: uma revisão. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 1, n. 1, p. 44-58, 2012.

MULDER, M. *Basic Principles of Membrane Technology*. 2nd ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996.

NOVACANA.COM. **Propriedades físico-químicas do etanol**. Disponível em: <https://www.novacana.com/etanol/propriedades-fisico-quimicas>. Acesso em: 17 set. 2025.

PENIDO, R. G. Solventes sustentáveis para a hidroformilação. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/83608/1/Solventes%20sustent%C3%A1veis%20para%20a%20hidroformila%C3%A7%C3%A3o.pdf>. Acesso em: 17 out. 2025.

PEREIRO, ARAÚJO, MARTINS, PENA, PÁDUA, REBELO . Ionic liquids in separations of azeotropic systems – A review. *Journal of Chemical Thermodynamics*, v. 46, p. 2-28, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jct.2011.05.014> Acesso em: 16 set. 2025.

PERRY, GREEN, (ed.). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

Plechkova, Seddon . Applications of ionic liquids in the chemical industry. *Chemical Society Reviews*, v. 37, n. 1, p. 123–150, 2008.

RENAN. *Estudo da destilação extrativa salina em coluna recheada para produção de etanol*. 2010. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

RENUKA DO BRASIL S/A. Peneira molecular. Disponível em: <http://www.renukadobrasil.com.br>. 2015. Acesso em: 17 set. 2025.

RESA, GOENAGA, GONZÁLEZ-OLMOS, IGLESIAS, Measurement and modelling of phase equilibria for ethanol + water + methanol at isobaric condition. *Journal of Chemical and Engineering Data*, Washington, v. 51, n. 6, p. 2114-2120, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/jc0602521>. Acesso em: 17 set. 2025.

ROELOFSEN, R. *Molecular Sieves*. London: Society of Chemical Industry, 1972.

RÍOS, SOSA, FERNÁNDEZ, ORTEGA . *Azeotropy: A Limiting Factor in Separation Operations in Chemical Engineering*. IntechOpen, 2018. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/60924>. Acesso em: 17 set. 2025.

SEADER, HENLEY, ROPER. *Separation Process Principles: Chemical and Biochemical Operations*. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

SEADER, J. D.; HENLEY, E. J.; ROPER, D. K. *Separation process principles: chemical and biochemical operations*. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2011.

SMITH, VAN NESS. ABBOTT, Michael M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

SPRAKEL, KAMPHUIS, NIKOLOVA, SCHUUR. Desenvolvimento de processos de destilação extrativa para sistemas polares de pontos de ebulição próximos. *Chemical Engineering Transactions*, v. 69, p. 529-534, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3303/CET1869089>. Acesso em: 17 set. 2025.

TOWLER, SINNOTT. *Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013.

UNIUBE (Universidade de Uberaba). **Desempenho de peneira molecular na desidratação de álcool etílico**. Uberaba, MG: Universidade de Uberaba, [ano de publicação]. Disponível em: <http://dspace.uniube.br:8080/jspui/bitstream/123456789/530/1/DESEMPENHO%20DE%20PENEIRA%20MOLECULAR%20NA%20DESIDRATA%20c3%87%20c3%83%20DE%20c3%81LCOOL%20ET%20c3%8dLICO.pdf>. Acesso em: 17 set. 2025.

VALCÁRCEL, LUQUE DE CASTRO, TENA. Non-chromatographic continuous separation techniques. *Analytical Proceedings*, v.30, p.276-280, 1993.

VAN DER VYVER. *An evaluation of extractive and azeotropic distillation for separation of 1-octene from oxygenates typically produced during Fischer-Tropsch synthesis*. Stellenbosch University, 2024. Disponível em: <https://scholar.sun.ac.za/items/dc926b5b-16a2-4e0e-a9ac-995d78fea421>. Acesso em: 17 set. 2025.

WANKAT, P. C. *Engenharia das operações de separação: com análise de transferência de massa*. 2. ed. Tradução de Fulano de Tal. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

WASSERSCHIED, WELTON. (ed.). *Ionic liquids in synthesis*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.

WIKIPEDIA. **Propriedades físico-químicas da água.** Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Propriedades_f%C3%ADsico-qu%C3%ADmicas_da_%C3%A1gua. Acesso em: 17 set. 2025.

Xia, Z. *Processing and valorization of cellulose, lignin, and lignocellulose using ionic liquids.* *Green Chemistry*, v. 22, p. 1-21, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2369969820300591>. Acesso em: 17 out. 2025.

ZAGATTO. Gas diffusion in flow analysis: principles and applications. *Analytica Chimica Acta*, v.109, p.45-52, 1979.

ZHANG, S.; SUN, N.; HE, X.; LU, X.; ZHANG, X. *Physical properties of ionic liquids: Database and evaluation.* **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 35, n. 4, p. 1475–1517, 2006.