INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TRIÂNGULO MINEIRO – *CAMPUS* UBERABA
MESTRADO PROFISSIONAL EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS

THIAGO DOS SANTOS NUNES

ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS E DETECÇÃO DE INTERFERENTES NA EVAPORAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR VHP

UBERABA - MG
2025

THIAGO DOS SANTOS NUNES

ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS E DETECÇÃO DE INTERFERENTES NA EVAPORAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR VHP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Linha de Pesquisa: Segurança Alimentar

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Scalon Cunha

Coorientadora: Profa. Dra. Gislaine Fernandes

UBERABA - MG
2025

Ficha Catalográfica elaborada pelo Setor de Referência do IFTM – *C*ampus Uberaba-MG

Nunes, Thiago dos Santos
N922e Estudos físico-químicos e detecção de interferentes na evaporação para a produção de açúcar VHP / Thiago dos Santos Nunes – 2025.
92 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Scalon Cunha.
Coorientação: Profª Dr.ª Gislaine Fernandes.
Dissertação (Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Instituto Federal do Triângulo Mineiro- *C*ampus Uberaba-MG, 2025.

1. Evaporadores. 2. Múltiplos efeitos. 3. Sacarose. 4. Cromatografia. 5. Eynon-Lane. I. Cunha, Luís Carlos Scalon. II. Fernandes, Gislaine. III. Título.

CDD 664.07

THIAGO DOS SANTOS NUNES

ESTUDOS FÍSICO-QUÍMICOS E DETECÇÃO DE INTERFERENTES NA EVAPORAÇÃO PARA A PRODUÇÃO DE AÇÚCAR VHP

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Uberaba, 13 junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luís Carlos Scalon Cunha
(IFTM- Orientador)

Prof. Dr. Lucas Arantes Pereira
(IFTM – Membro Interno)

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer
(UNIUBE – Membro Externo)

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO TRIÂNGULO MINEIRO

THIAGO DOS SANTOS NUNES

""Estudos físico-químicos e detecção de interferentes na evaporação para a produção de açúcar VHP""

FOLHA DE APROVAÇÃO – DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Data da aprovação: 13/06/2025

MEMBROS COMPONENTES DA BANCA EXAMINADORA:

Presidente e Orientador(a):	**Prof. Dr. Luís Carlos Scalon Cunha** IFTM - Campus Uberaba
Membro Titular	**Prof. Dr. Lucas Arantes Pereira** IFTM - Campus Uberaba
Membro Titular	**Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer** UNIUBE - Universidade de Uberaba

Local: Agroindústria IFTM Campus Uberaba

LUIS CARLOS SCALON CUNHA
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO

Documento assinado eletronicamente por LUIS CARLOS SCALON CUNHA, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 13/06/2025, às 20:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

LUCAS ARANTES PEREIRA
PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO

Documento assinado eletronicamente por LUCAS ARANTES PEREIRA, PROFESSOR DO ENSINO BÁSICO, TÉCNICO E TECNOLÓGICO, em 13/06/2025, às 22:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

JOSÉ ROBERTO DELALIBERA FINZER
MEMBRO EXTERNO DE BANCAS DE QUALIFICAÇÃO E DEFESA DE MESTRADO / DOUTORADO

INSTITUTO FEDERAL
Triângulo Mineiro

Documento assinado eletronicamente por JOSÉ ROBERTO DELALIBERA FINZER, MEMBRO EXTERNO DE BANCAS DE QUALIFICAÇÃO E DEFESA DE MESTRADO / DOUTORADO, em 15/06/2025, às 22:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 4º, § 3º, do Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://iftm.edu.br/autenticacao/ informando o código verificador **43EBA9A** e o código CRC **2242FCF6**.

Referência: NUP: 23200.007572/2025-25 DOCS nº 0000722108

Dedico ao meu pai, João, por me despertar para os números, e a minha mãe, Márcia, por despertar meu lado mais humano. A minha esposa, Maytê, por estar sempre ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, o Criador dos Céus e da Terra, por tudo que já fez na minha vida e por tudo mais que ainda fará. Até aqui me ajudou o Senhor.

Ao professor Luís Carlos Scalon Cunha por todo o suporte, pelo empenho nas atividades que se envolve, pela celeridade, pela incrível disponibilidade, por sanar as dúvidas, pelas recomendações, pela paciência e compreensão.

Ao professor doutor José Roberto Delalibera Finzer pelo incentivo, confiança e contribuições no trabalho.

Aos meus pais João e Márcia que sempre buscaram proporcionar o melhor para seus filhos: eu e minhas irmãs Michele e Jéssica. E que sempre tiveram a percepção que a educação oriunda dos bancos escolares deveria ser perseguida e alcançada.

Aos meus avós, José Nogueira, Maria Berenice, Sebastiana (in memoriam). Vocês foram e são muito importantes para mim.

Aos meus filhos, Erick, Pedro, Luis, Luisa e Cecília, é por vocês que me esforço dia a dia; meus sobrinhos, Letícia, João Victor, Enzo, e meu netinho, Anthony pelas alegrias.

Aos vários colegas com os quais estudei e que de inúmeras maneiras em algum período me ajudaram, desde uma palavra de estímulo às horas de estudos juntos fazendo os trabalhos.

Aos diversos professores com os quais convivi no mestrado e que me enriqueceram imaterialmente de alguma forma.

À professora doutora Gislaine Fernandes, pela coorientação e pelas contribuições para que eu vivenciasse este instante.

Ao professor doutor Lucas Arantes Pereira pelas contribuições na banca de defesa.

À doutora Luciene Lacerda Costa, ao doutor Frederico Alves Lima e a doutora Amanda Carmelo da Rocha pelas contribuições nas análises de cromatografia líquida de alta eficiência.

À Usina Vale do Tijuco – CMAA, pela oportunidade de realizar as análises no laboratório da indústria.

À Engenheira e Coordenadora da Qualidade Nayara Cavallari pela ajuda com as análises e os cálculos.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, cooperaram para que este objetivo fosse atingido e que este ciclo de vida fosse concluído.

“O Senhor é o meu Pastor e nada me faltará’ (Salmos 23, 1).

” Tá escrito” (Grupo Revelação. 2009).

RESUMO

A concentração do caldo da cana-de-açúcar é uma operação realizada nas usinas sucroalcooleiras durante a produção de etanol e açúcar. Para concentrar o caldo, são utilizados evaporadores de múltiplos efeitos, os quais evaporam a água presente no caldo visando aumentar a concentração de sacarose. Existem diversos tipos de evaporadores com diferentes configurações de construção e características de operação e, nas usinas brasileiras, o tipo mais utilizado é o evaporador Robert. Este trabalho teve como objetivos monitorar o processo e parâmetros do sistema de evaporação de uma usina sucroalcooleira de Minas Gerais por meio dos balanços e análises realizadas por polarimetria, titulometria e cromatografia. Análises físico-químicas de brix, pol, pureza, pH, açúcares redutores, açúcar redutores totais e cromatografia líquida de alta eficiência foram realizadas em amostras de caldo coletadas em treze diferentes pontos dos evaporadores do setor de evaporação. Além disso, cálculos de vazão, quantidade de água evaporada, taxa de evaporação, recuperação de fábrica, perda de açúcar em sacas e em reais foram também realizadas para monitorar o setor e verificar possíveis interferentes no processo. Em relação aos parâmetros pH, brix, pol e pureza, o caldo clarificado (CC) coletado na entrada do primeiro evaporador apresentou valores de 6,47, 14,21, 11,90 % e 83,74 %, respectivamente. Ao longo do processo de evaporação foram observadas discretas diminuições do pH chegando a 5,82 no caldo evaporado coletado na saída do último evaporador (CE12 – Xarope destinado à produção de açúcar). A diferença encontrada entre o pH inicial e final pode indicar uma possível degradação do caldo. A pureza do caldo apresentou reduções, chegando a 77,77% no penúltimo evaporador (CE11) e em seguida, retornou para 82,75 % em C12. Os valores de brix e pol aumentaram durante o processo atingindo os valores de 68,16 e 56,40, respectivamente no xarope final. Os resultados de brix e pH dos vapores condensados indicaram que não houve significativo arraste de açúcar. Os resultados das análises de sacarose (g/L) e pol (% m/m) realizadas por cromatografia líquida e por polarimetria foram comparados e apresentaram diferenças ao longo do processo, entretanto, seguiram a mesma tendência atingindo resultados próximos com o caldo em CE12 (CLAE – CE12: Sacarose 817,67 g/L e pol 56,03 % m/m; Polarimetria - CE12: Sacarose 822,93 g/L e pol 56,40 % m/m). O monitoramento dos açúcares redutores (AR) também evidenciou diferenças nos dados obtidos das amostras de caldo quando analisadas por CLAE e por titulometria – método Eynon-Lane (CLAE - CC: 0,554 g/100 mL → CE12: 3,12 g/100 mL / Titulometria - CC: 0,93 g/100 mL → CE12: 2,49 g/100 mL). Os açúcares redutores totais (ART) indicaram maior diferença entre as metodologias sendo que as concentrações por CLAE e titulometria (Eynon-Lane) no xarope final foram respectivamente 58,17 e 43,95 % m/m. Por ambas as técnicas utilizadas, foi evidenciada a mesma tendência dos resultados ao longo do setor evaporativo. Entretanto, a CLAE é uma técnica mais precisa, na qual os analitos são quantificados separadamente fornecendo resultados mais confiáveis. Os cálculos teóricos de vazão dos evaporadores estiveram próximos daqueles indicados nos sensores dos evaporadores. Os dados da quantidade de água evaporada e a taxa evaporativa indicaram diminuição desses parâmetros em um dos evaporadores. O valor encontrado para o rendimento da fábrica foi de 70 %. As análises realizadas neste estudo permitiram verificar em alguns pontos do setor evaporativo, possíveis perdas no processo. Os resultados obtidos podem indicar possíveis melhorias no setor de evaporação da usina, evitando perdas, elevando a produtividade e lucratividade por meio da redução dos custos de produção.

Palavras-chave: evaporadores; múltiplos efeitos; sacarose, cromatografia; Eynon-Lane.

ABSTRACT

The concentration of sugarcane juice is an operation carried out in sugar and alcohol plants during the production of ethanol and sugar. To concentrate the broth, multiple effect evaporators are used, which evaporate the water present in the broth in order to increase the sucrose concentration. There are several types of evaporators with different construction configurations and operating characteristics and, in Brazilian plants, the most used type is the Robert evaporator. This work aimed to monitor the process and parameters of the evaporation system of a sugar and alcohol plant in Minas Gerais through balances and analyses performed by polarimetry, titrimetry and chromatography. Physicochemical analyses of brix, pol, purity, pH, reducing sugars, total reducing sugars and high-performance liquid chromatography were performed on broth samples collected at thirteen different points in the evaporation sector. In addition, calculations of flow, amount of evaporated water, evaporation rate, factory recovery, loss of sugar in bags and in reais were also carried out to monitor the sector and check for possible interference in the process. Regarding the pH, brix, pol and purity parameters, the clarified broth (CC) collected at the inlet of the first evaporator presented values of 6.47, 14.21, 11.90% and 83.74%, respectively. Throughout the evaporation process, slight decreases in pH were observed, reaching 5.82 in the evaporated broth collected at the outlet of the last evaporator (CE12 – Syrup intended for sugar production). The difference found between the initial and final pH may indicate possible degradation of the broth. The purity of the broth showed reductions, reaching 77.77% in the penultimate evaporator (CE11) and then returning to 82.75% in C12. The brix and pol values increased during the process, reaching values of 68.16 and 56.40, respectively, in the final syrup. The brix and pH results of the condensed vapors indicated that there was no significant sugar carryover. The results of the sucrose (g/L) and pol (% m/m) performed by liquid chromatography and polarimetry were compared and showed differences throughout the process; however, they followed the same trend, reaching similar results with the broth in CE12 (HPLC – CE12: Sucrose 817.67 g/L and pol 56.03 % m/m; Polarimetry - CE12: Sucrose 822.93 g/L and pol 56.40 % m/m). Monitoring of reducing sugars (RS) also showed differences in the data obtained from the broth samples when analyzed by HPLC and titrimetry – Eynon-Lane method (HPLC - CC: 0.554 g/100 mL → CE12: 3.12 g/100 mL / Titrimetry - CC: 0.93 g/100 mL → CE12: 2.49 g/100 mL). Total reducing sugars (TRS) showed the greatest difference between the methodologies, with the concentrations by HPLC and titrimetry (Eynon-Lane) in the final syrup being 58.17 and 43.95% m/m. Using both techniques, the same trend of results was evidenced throughout the evaporative sector. However, HPLC is a more precise technique, in which the analytes are quantified separately, providing more reliable results. The theoretical flow calculations of the evaporators were close to those indicated by the evaporator sensors. The data on the amount of water evaporated and the evaporation rate indicated a decrease in these parameters in one of the evaporators. The value found for the factory's yield was 70%. The analyses carried out in this study allowed us to verify possible losses in the process at some points in the evaporative sector. The results obtained may indicate possible improvements in the plant's evaporation sector, avoiding losses, increasing productivity and profitability by reducing production costs.

Keywords: evaporators; multiple effects; sucrose, chromatography; Eynon-Lane.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma geral de uma usina de cana-de-açúcar 24
Figura 2- Balança de pesagem de cana 25
Figura 3- Sonda coletando cana 25
Figura 4- Desintegrador e homogeneizador 26
Figura 5- Moenda 26
Figura 6- Caldeiras 27
Figura 7- Bagaço estocado 27
Figura 8- Estação de Tratamento de Água 28
Figura 9- Tratamento de caldo para açúcar 29
Figura 10- Pré-evaporadores 29
Figura 11- Caixas evaporativas 30
Figura 12- Cozimento 31
Figura 13- Armazém de açúcar 31
Figura 14- Fermentação 32
Figura 15- Destilaria 33
Figura 16- Peneira molecular 34
Figura 17- Tanques de armazenamento de álcool 34
Figura 18- Evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra 35
Figura 19- Pré-evaporação 39
Figura 20- Etapa de múltiplos efeitos 40
Figura 21- Refratômetro digital 43
Figura 22- Sacarímetro 44
Figura 23- Peagâmetro 45
Figura 24- Açúcar VHP 45
Figura 25- Redutec 49
Figura 26- Cromatógrafo líquido de alta eficiência 50

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Valores de pH obtidos nas amostras de caldo 57
Gráfico 2- Valores de pureza obtidos nas amostras de caldo 58
Gráfico 3- Valores de brix obtidos nas amostras de caldo 58
Gráfico 4- Cromatograma com os tempos de retenção da sacarose, glicose e frutose 62
Gráfico 5- Valores de pol (%) obtidos nas amostras de caldo 63
Gráfico 6- Açúcares redutores por CLAE e titulometria 65
Gráfico 7- Relação sacarose/brix 70

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Parâmetros da tela do supervisório da evaporação 41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Vazão de entrada e saída em massa de caldo dos evaporadores 54
Tabela 2- Resultados da quantidade de água evaporada e a taxa evaporativa 55
Tabela 3- Resultados das análises de pH, brix, pol e pureza dos caldos 56
Tabela 4- Resultados das análises de pH e brix dos vapores condensados 59
Tabela 5- Resultados das análises para determinar o rendimento da fábrica de açúcar 59
Tabela 6- Resultados da proporção em concentração dos brix, da glicose e da frutose 60
Tabela 7- Perda de açúcar em sacas e em reais 61
Tabela 8- Concentrações de sacarose obtidas por CLAE e polarimetria 63
Tabela 9- Concentrações de glicose e frutose obtidas por CLAE e de açúcares redutores obtidos por titulometria 66
Tabela 10- Concentração de açúcares redutores totais nas amostras de caldo 68
Tabela 11- Relação sacarose/brix determinado por CLAE e polarimetria 69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Açúcar Redutor
ART	Açúcar Redutor Total
Bxentrada	Brix do caldo na entrada do evaporador
Bxsaída	Brix do caldo na saída do evaporador
CC	Caldo Clarificado
CE1	Caldo Evaporado 1
CE2	Caldo Evaporado 2
CE3	Caldo Evaporado 3
CE4	Caldo Evaporado 4
CE5	Caldo Evaporado 5
CE6	Caldo Evaporado 6
CE7	Caldo Evaporado 7
CE8	Caldo Evaporado 8
CE9	Caldo Evaporado 9
CE10	Caldo Evaporado 10
CE11	Caldo Evaporado 11
CE12	Caldo Evaporado 12
CLAE	Cromatografia Líquida de Alta Eficiência

LISTA DE SÍMBOLOS

h	hora
inHg	polegada de mercúrio
J (Juice)	Pureza do xarope
kgf/cm	kilograma força por centímetro
M (Molasses)	Pureza do mel final
pH	Potencial Hidrogeniônico
S (Sugar)	Pol do açúcar
scs	scs – sacas
t	tonelada
TE	Taxa de Evaporação
Va	Volume da amostra, (Médias dos volumes gastos nas titulações)
VHP	Very High Polarization, (significa polarização muito alta)
Vp	Volume padrão, (volume gasto nas titulações da solução padrão trabalho deaçúcar invertido a 0,25 %)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 19
2 OBJETIVOS 22
2.1 Objetivos gerais 22
2.2 Objetivos específicos 22
3 REVISÃO DA LITERATURA 23
3.1 Breve histórico da cana-de-açúcar 23
3.2 Processamento industrial da cana-de-açúcar 24
3.3 Fabricação de açúcar 28
3.4 Fabricação de etanol 32
3.5 Evaporadores de tubos verticais tipo calandra, padrão ou Roberts 35
3.6 Açúcares redutores 36
3.7 Açúcares redutores totais 36
3.8 Brix, pol, pureza e pH 36
3.9 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE) 37
4 MATERIAL E MÉTODOS 39
4.1 Área de coleta das amostras 39
4.2 Cálculo da vazão de caldo nos evaporadores 40
4.3 Cálculo da quantidade de água evaporada em cada evaporador 41
4.4 Cálculo da taxa de evaporação (TE) 42
4.5 Análises físico-químicas 43
4.5.1 Análise de brix 43
4.5.2 Análise de pol e pureza dos caldos 44
4.5.3 Análise de pH 44
4.6 Análise de pol do açúcar 45
4.7 Análise de pol e pureza do xarope e do mel final 46
4.8 Análise de Açúcares Redutores (AR) pelo método (Eynon-Lane) 46
4.9 Análise de Açúcares Redutores Totais (ART) pelo método (Eynon Lane) 47
4.10 Análises por Cromatografia Líquida de Alta Eficiente (CLAE) 50
4.11 Cálculo de recuperação da fábrica (SJM) 51
4.12 Cálculo da relação sacarose/brix 51
4.13 Proporção de glicose e frutose 51
4.14 Cálculo da perda de açúcar em sacas e em reais 52
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 54

5.1. Resultados calculados para determinar a vazão dos evaporadores.....54
5.2 Quantidade de água a ser evaporada e a taxa de evaporação em cada evaporador 55
5.3 Resultados das análises por polarimetria.....56
5.4 Resultados das análises dos vapores condensados 59
5.5 Resultado do rendimento encontrado na fábrica de açúcar 59
5.6 Resultados da proporção de concentração dos brix e de glicose e frutose 60
5.7 Resultados da perda de açúcar em sacas e em reais 61
5.8 Resultados das curvas analíticas e cromatogramas obtidos por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE).....61
5.9 Concentrações de glicose e frutose obtidas por CLAE e de açúcares redutores obtidos por titulometria 65
5.10 Concentração de açúcares redutores totais obtidos por CLAE e por titulometria.....67
5.11 Resultados da relação sacarose/brix determinado por CLAE e polarimetria 69
6 CONCLUSÃO.....71
REFERÊNCIAS 73
APÊNDICE A- SISTEMA DE OPERAÇÃO DOS PRÉ-EVAPORADORES......80
APÊNDICE B- SISTEMA DE OPERAÇÃO DAS CAIXAS EVAPORATIVAS.....81
APÊNDICE C- CURVAS ANALÍTICAS.....82
APÊNDICE D- CROMATOGRAMAS.....84

1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar representa uma importante parcela na agroindústria do Brasil devido às expressivas produções e exportações de açúcar, produção de etanol e cogeração de energia pelo bagaço (EMBRAPA, 2022).

A produção brasileira de cana-de-açúcar na safra 2023/24 atingiu 713,2 milhões de toneladas, o que refletiu um recorde histórico. Esse volume foi 16,8 % maior que a safra anterior (2022/2023). A área colhida também apresentou um discreto aumento de 0,5 % sendo estimada em um total de 8,33 milhões de hectares. Condições climáticas favoráveis, investimentos do setor e a recuperação de produtividade no centro-sul do país foram os principais fatores relacionados com esse resultado. Nesse período, com o mercado favorável ao açúcar, a produção foi estimada em 45,68 milhões de toneladas, representando um aumento de 24,1 % em relação à safra anterior e recorde de produção (CONAB, 2024).

A safra de cana-de-açúcar do Brasil de 2024/25 está estimada em 676,96 milhões de toneladas, sinalizando uma diminuição de 5,1 % em relação à safra anterior. No entanto, este será o segundo maior volume colhido na série histórica da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. A diminuição do rendimento da produção foi relacionada com condições climáticas adversas, baixos índices pluviométricos e altas temperaturas encontradas especialmente na região centro-sul do Brasil (CONAB, 2025). Mesmo com essas variações na produtividade, o Brasil vem se consolidando nas últimas décadas como o maior produtor global de cana-de-açúcar e açúcar (UDOP, 2025).

A produção de cana-de-açúcar é um dos principais segmentos econômicos a colaborar com o dinamismo da economia brasileira neste período inicial do século XXI. É uma das culturas agrícolas mais importantes do mundo tropical, gerando centenas de milhares de empregos diretos. A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao seu potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade (Nunes, 2020).

Nas etapas de uma usina preparada para produção de açúcar, o processo inicia-se com o transporte da cana realizado predominantemente por caminhões, os quais são pesados antes e após o descarregamento. Essa pesagem é de extrema importância uma vez que possibilita o controle agrícola, o pagamento do transporte, o controle de moagem, o cálculo do rendimento

industrial e, juntamente com o teor de sacarose na cana, efetuar o pagamento da mesma (Sampaio; Alves, 2011). Posteriormente, a matéria-prima é descarregada em pátios de armazenagem ou diretamente nas mesas alimentadoras. Em algumas usinas, a cana passa por um processo de limpeza e, logo após, é conduzida para a moenda sendo esta etapa conhecida como preparo da cana. A extração do caldo é feita usualmente pelo esmagamento da cana por rolos das moendas que exercem uma forte pressão sobre a mesma. O caldo resultante da extração é peneirado para a retirada das impurezas, sulfitado com dióxido de enxofre, caleado com leite de cal e, finalmente, a mistura é aquecida com vapor de água com temperaturas de até 105 °C (Bofo, 2015).

O caldo clarificado é enviado para o setor de evaporação com uma concentração de 83% a 86 % de água. A operação consiste em retirar água do caldo a fim de se obter o xarope com o brix e temperatura adequados para início do cozimento (Delgado; Cesar; Silva, 1976). O xarope passa por uma etapa de cozimento em cristalizadores que são evaporadores de simples efeito. Na primeira fase, de cristalização da sacarose, o xarope é concentrado sob vácuo até o grau de supersaturação. A massa depois de ser cozida em faixas de temperatura de 65-70 °C é enviada para os tanques de cristalização e permanece em agitação lenta até o início da próxima etapa, o da centrifugação. Após tal processo, independentemente do tipo de açúcar, faz-se necessária a realização da secagem do açúcar de tal forma que a sua umidade seja reduzida a níveis de 0,1-0,2 %. O bagaço produzido no processo é utilizado como combustível nas caldeiras (Machado, 2012).

Ao longo das etapas da fabricação do açúcar, contaminações e perdas podem ocorrer. Por isso, os equipamentos devem ser mantidos sempre limpos e em bom estado de conservação, uma vez que por eles passam toda a matéria-prima e recebem diversos tipos de preparos e exposições da sacarose. Durante o processo, os açúcares redutores, em especial, a glicose e frutose contida no caldo de cana, não são capazes de sofrer cristalização, ou seja, em usinas açucareiras, os açúcares redutores são indesejáveis e quando em altas concentrações, podem prejudicar a qualidade do açúcar acabado, conferindo viscosidade na massa cozida ou prejudicando a coloração dos cristais (Francisco, 2020).

Especialmente no setor de evaporação, o monitoramento de sacarose e açúcares redutores é extremamente importante, uma vez que, perdas consideráveis podem ocorrer afetando o rendimento final na produção de açúcar e ao mesmo tempo causando prejuízos à indústria. Destaca-se aqui que o açúcar *Very High Polarization* (VHP) é o tipo mais exportado pelo Brasil sendo um açúcar considerado bruto, possui alto teor de sacarose, cor mais escura e

é utilizado como matéria prima para a produção de outros tipos de açúcares como o cristal e refinado (Jambassi, 2017).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi detectar interferentes no processo de evaporação para a produção de açúcar VHP por meio de análises físico-químicas de pH, brix, pol, pureza, açúcares redutores e açúcares redutores totais de caldos açucarados e vapores condensados coletados no setor de evaporação de Usina Sucroalcooleira localizada no Triângulo Mineiro, visando a qualidade da fabricação do açúcar VHP. Análises de sacarose, glicose e frutose foram realizadas por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) para monitoramento adicional do processo. Cálculos da taxa de evaporação, de recuperação da fabricação de açúcar e perdas no setor de evaporação também foram realizados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos gerais

Monitorar o setor de evaporação de uma usina de açúcar por meio de análises físico-químicas e análises de sacarose, glicose e frutose por cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE).

Realizar cálculos sobre a taxa de evaporação, recuperação da fabricação de açúcar e perdas no setor de evaporação.

2.2 Objetivos específicos

a) calcular a vazão de caldo na entrada e saída de cada evaporador;
b) calcular a quantidade de água evaporada em cada evaporador;
c) calcular a taxa de evaporação;
d) acompanhar o desempenho de cada evaporador por meio do pH, brix, pol e pureza;
e) monitorar e comparar as concentrações de sacarose, glicose e frutose pelos métodos de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) e Eynon-Lane;
f) verificar a relação sacarose/brix;
g) calcular a perda de açúcar em sacas e em reais;
h) detectar possíveis interferentes no processo de evaporação.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Breve histórico da cana-de-açúcar

Cultivada no Brasil desde o século XVI durante o processo de colonização, a cana-de-açúcar se tornou uma das principais culturas agrícolas do nosso país. As primeiras mudas foram trazidas por Martim Afonso de Souza, fundador do primeiro engenho do Brasil no ano de 1532 em São Vicente (Lima; Marcondes, 2002).

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma planta que possui alta capacidade para realização de fotossíntese, característica de plantas com metabolismo C4, ou seja, com alto poder de concentração de CO_2 em função da redução da fotorrespiração, atingindo altas taxas de fotossíntese em elevada intensidade de radiação solar (Lucena *et al*., 2020).

No Brasil, a produção da cultura de cana-de-açúcar destina-se principalmente para a produção de açúcar e etanol, podendo ser obtidos outros produtos, tais como a cachaça artesanal, doces e forragens para tratar animais, sendo essas, realizadas em sua maioria por pequenos agricultores (Pereira *et al*., 2020). A história do Brasil se entrelaça com a história da cultura da cana-de-açúcar no país, que, por sua vez, é marcada por fatos relevantes sobre a expansão do setor sucroenergético, tais como diversos investimentos financeiros e tecnológicos na indústria sucroalcooleira e no campo em meados da década de 1970 com a criação do programa Proálcool (Matos; Marafon, 2020).

Com a demanda expressiva pelo etanol, houve grande expansão da área plantada da cultura da cana-de-açúcar, bem como o crescente número de usinas canavieiras espalhadas pelo território brasileiro no qual a região Sudeste possui cerca de duzentos e vinte e seis usinas, o Centro-Oeste oitenta e nove usinas, Nordeste setenta e quatro usinas, Sul trinta e cinco usinas e a Região Norte conta com cinco usinas instaladas, sendo ao todo um total de quatrocentos e vinte e nove usinas distribuídas no Brasil (Brumatti 2023).

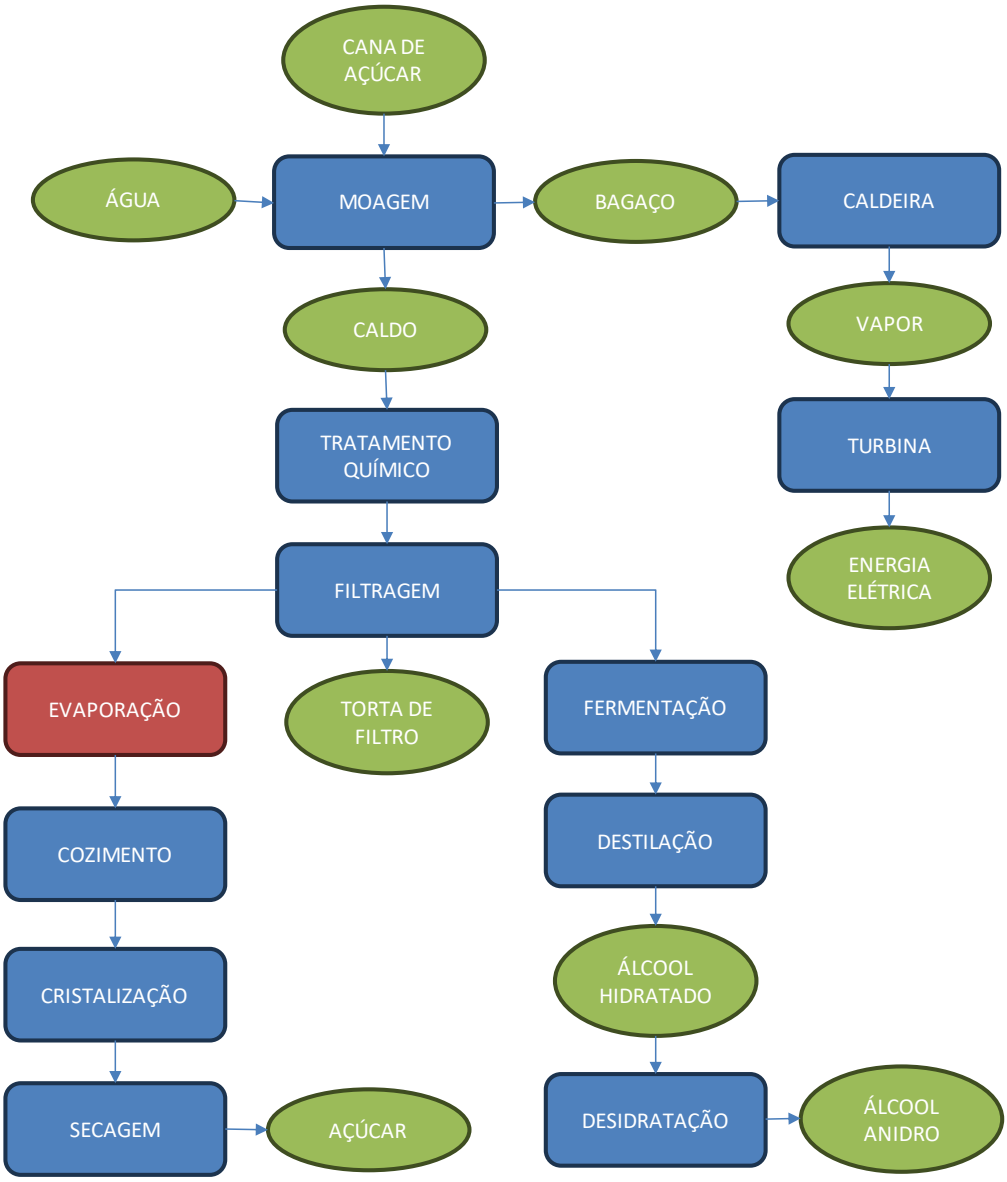
Para garantir rentabilidade ao setor sucroalcooleiro é fundamental obter elevada produtividade da cana-de-açúcar. O melhoramento genético é considerado um dos principais fatores agronômicos que contribuíram com o aumento da produtividade, permitindo desenvolver variedades com melhor adaptação às condições adversas de solo e clima e à incidência de pragas e doenças, assim como ao sistema de colheita. A produtividade média dos canaviais aumentou de 43 toneladas por hectare, em 1961, para 74 toneladas por hectare, em 2005, e grande parte desse aumento pode ser atribuída ao uso de variedades geneticamente melhoradas. Segundo Marin (2022) o correto planejamento do plantio juntamente ao adequado

manejo das variedades, interfere diretamente na produtividade em cana-de-açúcar, dessas, por sua vez, também devem atender a exigências tanto no campo como na indústria, para maximizar lucros.

3.2 Processamento industrial da cana-de-açúcar

Para esclarecer o processo produtivo da produção de açúcar e álcool, é apresentado o fluxograma geral de uma usina de cana-de-açúcar, com destaque no setor de evaporação do caldo que é o foco deste trabalho, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1- Fluxograma geral de uma usina de cana-de-açúcar



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A recepção da cana na indústria inicia-se com a pesagem da cana ainda no veículo de transporte em balanças rodoviárias, conforme mostra a Figura 2.

Figura 2- Balança de pesagem de cana



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Em seguida, tem-se a coleta de amostras por sondas mecânicas Figura 3 em pontos de coleta pré-definidos no veículo de transporte.

Figura 3- Sonda coletando cana



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

As amostras são processadas através de forrageira Figura 4 para realização de análises laboratoriais tais como a determinação do brix, pol, fibra, pureza e o ATR (Açúcar total recuperado) para o cálculo do pagamento de fornecedores (Payne, 1989).

Figura 4- Desintegrador e homogeneizador



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A extração do caldo da cana-de-açúcar é realizada em um tandem de moenda Figura 5, que varia de quatro a seis ternos, por sucessivas passagens do material vegetal nos ternos. A fibra sofre pressão mecânica e assim, o caldo é expelido. A eficiência do tandem de moendas é determinada pelos fatores: números de compressões; pressão efetiva; grau de ruptura das células; drenagem; propriedades físicas da fibra. Na prática, os equipamentos de extração são projetados para operar na capacidade nominal de recuperação, podendo atingir 90% de extração do caldo contido na fibra apenas pela ação mecânica de esmagamento, em que o bagaço é transportado por esteiras para as caldeiras e o caldo é bombeado para o tratamento para retirada de impurezas (Payne, 1989).

Figura 5- Moenda



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Para Santos, Barbosa e Ribeiro (2016), as caldeiras Figura 6 são equipamentos industriais que têm como o fluido de trabalho a água, com a finalidade de produzir vapor e acumulá-lo à uma pressão superior ao da atmosfera a partir de uma fonte de calor. O vapor da caldeira pode ser encontrado na forma saturada ou superaquecida, sendo vapor saturado o mais utilizado em indústrias, como por exemplo as indústrias têxtil, alimentícia e farmacêutica, enquanto o vapor superaquecido é direcionado para geração de energia mecânica nas termoelétricas (Santos; Fraga, 2017).

Figura 6- Caldeiras



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Segundo Alcarde e Silva (2007), a cogeração feita nas usinas de cana-de-açúcar ocorre da seguinte forma: o bagaço ao ser queimado Figura 7 gera energia térmica em forma de vapor. Em uma fornalha o bagaço é queimado, enquanto o vapor é produzido em uma caldeira, esse vapor gira uma turbina que, por estar interligada ao eixo de um gerador, faz com que o mesmo entre em movimento, e assim é gerada a energia elétrica.

Figura 7- Bagaço estocado



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Segundo Pace (1997), a água ideal para ser utilizada em caldeiras deve apresentar as seguintes características: quantidade mínima de sais e óxidos dissolvidos, bem como ausência de oxigênio e outros gases dissolvidos, materiais em suspensão e orgânicos, temperatura elevada e pH adequado (faixa alcalina). Portanto, para esse fim, faz-se necessária a Estação de Tratamento de Água (ETA), conforme mostra a Figura 8, que deve ser adequada para atender as características requeridas nos setores industriais: pH, dureza, alcalinidade, óxidos metálicos, substâncias inorgânicas, materiais em suspensão e condutividade.

Figura 8- Estação de Tratamento de Água



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Segundo Chieppe Júnior (2012), o tratamento do caldo de cana-de-açúcar para produção de etanol inicia-se com aquecimento do caldo a 105 °C e o caldo aquecido é enviado para decantação; após a decantação é obtido o caldo clarificado destinado à fabricação de álcool e o lodo segue para a filtração, tal como é feito na fabricação do açúcar.

3.3 Fabricação de açúcar

O tratamento do caldo é de suma importância principalmente para produção de açúcar. Essa etapa do processo tem como objetivo a remoção dos não açúcares, coloides, turbidez e cor. Esse resultado é alcançado através de etapas que envolvem ações físicas e químicas (Santos; Borém; Caldas, 2012).

Para Payne (1989) o principal objetivo do tratamento do caldo Figura 9, é elevar o pH para valores os quais a inversão da sacarose seja mínima. Em segundo plano, o tratamento promove a remoção de matérias insolúveis e substâncias dissolvidas de não interesse. Existem

cinco modelos de processos para o tratamento do caldo de cana: caleação ou calagem, sulfitação, fosfatação, carbonatação e uso de óxido de magnésio (Mezaroba; Meneguetti; Groff, 2010).

Figura 9- Tratamento de caldo para açúcar



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Na etapa de evaporação inicia-se a concentração dos açúcares contidos no caldo. A elevação do Brix se dá pela evaporação da água contida no caldo clarificado passando o Brix inicial em torno 13° Brix para 65° Brix, sendo evaporada em torno de 75 % de água (Payne, 1989).

Uma evaporação bem-sucedida reduz o consumo térmico da usina e aumenta a eficiência das etapas seguintes. Um xarope bem concentrado proporciona a otimização do processo de cristalização (Santos; Borém; Caldas, 2012). Na Figura 10, está apresentada uma parte do setor de evaporação, onde estão presentes os pré-evaporadores (P1 ao P6) e uma caixa de evaporação (C1).

Figura 10- Pré-evaporadores



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A etapa de evaporação promove apenas o aumento da concentração do Brix mantendo-se os valores para Pol, AR e ART contidos no caldo clarificado; após a concentração do caldo tem-se como produto o xarope com o Brix a 65 %. As perdas nos evaporadores quando não conhecidas são classificadas como indeterminadas tendo em vista que poucas unidades industriais possuem tal prática de acompanhamento. Caso seja feita a contabilização, as perdas passarão para o grupo das perdas determinadas (Fernandes, 2011). Na Figura 11, está representada a continuação do setor de evaporação contendo mais cinco caixas de evaporação (C2 ao C5).

Figura 11- Caixas evaporativas



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Na etapa de cristalização tem-se o cozimento do xarope produzido na etapa de evaporação conforme ilustrado na Figura 12. A finalidade da cristalização é a concentração da sacarose na forma de cristais e remoção das impurezas por meio de cristalizadores em sistema de batelada. Após essa etapa os cristais de açúcar são separados em centrífugas (Machado, 2012).

Segundo Hugot (1977), a concentração ideal do xarope que alimenta os cozedores deve estar entre 60° a 70º Brix; xaropes com Brix acima dos limites provocam a formação de cristais não uniformes.

Figura 12- Cozimento



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Na cadeia de produção de açúcar, caracterizada desde o cultivo, colheita da cana, extração, e distribuição final do produto, destacam-se o açúcar destinado diretamente ao consumo humano, como também direcionado ao setor da indústria alimentícia. A menor parcela do açúcar brasileiro é destinada ao mercado interno (37 %), distribuído para as indústrias de atacado e varejo. No caso do mercado externo, o açúcar é exportado tipo *Very Hight Polarization* (VHP), que é utilizado como insumo no processo de refinação. O mercado de açúcar atende ao comércio atacadista que, por conseguinte, distribuirá o produto para o comércio varejista e indústria de alimentos que, por fim, destinará o produto ao consumidor final (Machado, 2012). Para isso, a gestão da operação do armazém, demonstrado pela Figura 13, deve ser eficiente de modo que garanta o atendimento das necessidades dos clientes finais.

Figura 13- Armazém de açúcar



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.4 Fabricação de etanol

No preparo do mosto deve-se levar em conta as proporções dos componentes. Se na alimentação for apenas por caldo misto com Brix em torno de 12°, não se faz necessária correção do Brix. Se a alimentação for formada por caldo misto mais melaço, faz-se necessária a correção conforme a proporção dos componentes. Em caso de alimentação só por melaço se faz a correção com água a fim de se obter um teor entre 18° a 20° Brix (Santos; Borém; Caldas, 2012).

Os processos fermentativos na produção de álcool podem ser conduzidos por várias formas, sendo classificados como contínuos ou descontínuos, que podem ser com ou sem o reuso do fermento por recirculação (Santos; Borém; Caldas, 2012).

Todo processo fermentativo (Figura 14) é conduzido nas dornas de fermentação. Durante a fermentação se faz necessário o controle da temperatura na faixa de 28° a 30° C., pois temperaturas elevadas provocam a inativação das enzimas desenvolvidas pelas leveduras e consequentemente baixos rendimentos da fermentação (Lima; Marcondes, 2002).

A fermentação alcoólica com uso de microrganismo ocorre por processos metabólicos desenvolvidos pelas enzimas produzidas pelos microrganismos. Essas enzimas promovem transformações químicas nas substâncias orgânicas presentes no meio (Chieppe Júnior, 2012).

Figura 14- Fermentação



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A etapa de destilação tem como objetivo a separação dos componentes de interesse presentes no vinho centrifugado. O vinho é formado por componentes líquidos, sólidos e

gasosos e a separação dos componentes é feita pelos diferentes graus de volatilidade (Chieppe Júnior, 2012).

A etapa de destilação, conforme Figura 15 é conduzida em colunas de destilação. Essas colunas são constituídas de corpo cilíndrico e suas dimensões são calculadas em função das características dos componentes a serem separados. A coluna se divide em duas partes, topo e base, sendo que no interior têm-se os borbulhadores e pratos distribuídos conforme a necessidade do processo. Em geral o número de pratos varia entre 30 a 70, já a quantidade de borbulhadores em cada prato depende do diâmetro da coluna de destilação (Lima; Marcondes, 2002).

Figura 15- Destilaria



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

A produção de etanol hidratado carburante (92,6 a 93,8 % em massa INPM) é feita por meio da etapa de destilação e retificação. Esse sistema é composto por coluna de destilação e coluna de retificação. Para a obtenção do etanol anidro (com no mínimo 99,3 % em massa INPM) se faz necessária a etapa de desidratação que pode ser a destilação azeotrópica, destilação extrativa ou peneira molecular (Figura 16), (Santos; Borém; Caldas, 2012).

Figura 16- Peneira molecular



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Após produzido, o etanol é direcionado à armazenagem em tanques específicos (Figura 17), com capacidade para armazenar grandes volumes (Valente *et al*., 2012). Segundo Benetom e Moreira (2016), os tanques de armazenagem de etanol devem seguir as normas da ABNT NBR 7505/2000 (Armazenagem de Líquidos Inflamáveis e Combustíveis), que define as estruturas necessárias para os tanques.

Figura 17- Tanques de armazenamento de álcool



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

3.5 Evaporadores de tubos verticais tipo calandra, padrão ou Roberts

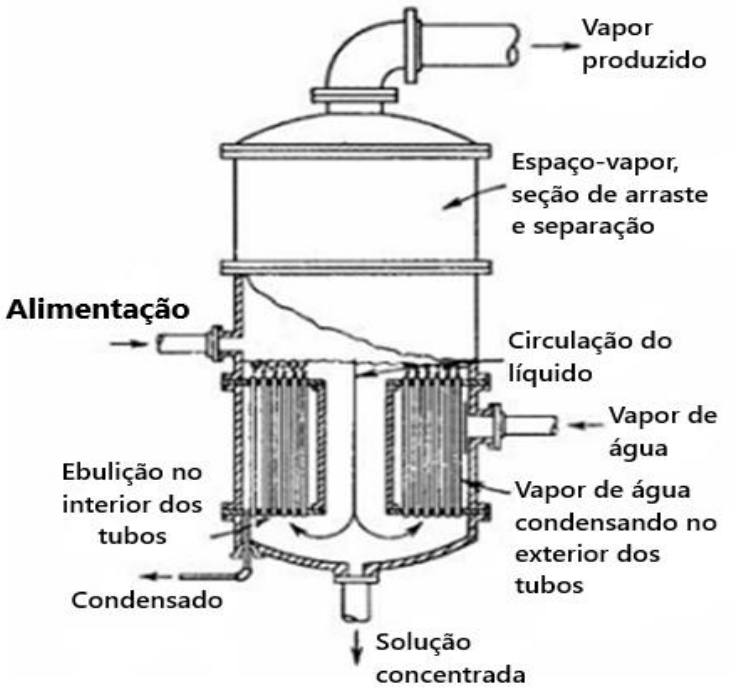
Conforme Araújo (2011), evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra, padrão ou Roberts, é um dos evaporadores mais antigos ainda em funcionamento, usado principalmente na indústria sucroalcooleira para concentrar caldo de cana na produção de açúcar.

O evaporador tipo Roberts é o mais utilizado nas indústrias açucareiras devido a sua área de aquecimento (Crivellaro; Pereira; Freitas, 2016). No evaporador tipo Robert, há um feixe de tubos verticais em seu interior por onde escoa o caldo de maneira ascendente e no centro do evaporador há um tubo central de maior diâmetro que os demais por onde escoa o concentrado. No lado do casco, há a entrada de vapor saturado, sendo realizada a troca térmica entre o caldo no interior dos tubos e o vapor do lado externo (Silva, 2013).

Segundo Araújo (2011), ele pode ser usado tanto na circulação natural, caso em que o líquido é pouco viscoso, e na circulação forçada quando o líquido é muito viscoso. Nesse último caso, pode-se ter a ativação de um impelidor ou rotor para que a movimentação da solução ocorra.

A calandra serve como aparelho de intercâmbio e calor: o vapor de aquecimento envolve os tubos externamente e o caldo a ser evaporado escoa no interior dos tubos (Hugot, 1977). O esquema de um evaporador tipo calandra está na Figura 18.

Figura 18- Evaporador de tubos verticais curtos tipo calandra



Fonte (Araújo, 2011 *apud* Lima, 2020, p. 19).

3.6 Açúcares redutores

Existem açúcares que possuem grupos carbonílico e cetônico livres, que são capazes de se oxidar na presença de agentes oxidantes, em soluções alcalinas. Estes são os açúcares redutores (AR), que são monossacarídeos como a glicose e a frutose, e alguns dissacarídeos, como a maltose (formada por glicose) e a lactose (formada por galactose e glicose). As funções cetônicas e aldeídicas livres possibilitam a redução de íons catiônicos, como o Cobre e o Ferro (Demiate *et al.,* 2002).

3.7 Açúcares redutores totais

Os açúcares redutores totais correspondem à soma total dos açúcares redutores contidos numa solução açucarada. Podem ser determinados por meio de análise que hidrolisa a sacarose em glicose e frutose, que, somados aos ARs já presentes constituem o ART.

3.8 Brix, pol, pureza e pH

O teor de brix se refere à porcentagem de sólidos solúveis (açúcares e sais) contidos em uma solução de açúcares e sais. Pode ser determinado via densimetria ou refratometria. Essa análise utiliza o princípio de que soluções açucaradas possuem a mesma densidade na mesma concentração, mesmo que o açúcar seja diferente (CTC, 2005. O método de determinação de açúcar (brix) considera todos os sólidos dissolvidos numa amostra e pode indicar falsos positivos para teores de açúcar. Apesar de ser um procedimento fácil de ser aplicado em campo, seus resultados podem dar margem a possíveis ganhos, quando comparados ao potencial das análises cromatográficas (Demiate *et al.,* 2002; Zenebon; Pascuet; Tiglea, 2008).

A Pol representa o teor de sacarose aparente na cana. Para a indústria canavieira, quanto mais elevados os teores de sacarose, melhor é para o processo produtivo (Ripoli, 2004).

A pureza é determinada pela relação Pol/Brix x 100. Quanto maior a pureza da cana, melhor a qualidade da matéria-prima para se recuperar açúcar. Todas as substâncias que apresentam atividade óptica podem interferir na Pol, como açúcares redutores (glicose e frutose), polissacarídeos e algumas proteínas (Ripoli, 2004).

A sacarose é o maior componente do caldo de cana. Entretanto, na literatura, ainda existem poucas informações voltadas à sua função no caldo de cana para consumo *in natura*. Dessa forma, as informações abordadas nesta revisão, se referem, em sua grande parte, em

estudos voltados à produção de açúcar. Em meio ácido, a sacarose sofre reação de inversão, resultando em açúcares redutores: glicose e frutose. A inversão ocorre em condições ácidas (pH < 7,0), e o grau de inversão da sacarose, em um determinado pH, é favorecido por altas temperaturas, longos tempos de exposição e baixa concentração de sacarose na solução (Chen; Chou, 1993). Em meio alcalino, a degradação da sacarose sob aquecimento pode levar à formação de furfural, acetona, gliceraldeídos, ácido láctico, ácido acético, ácido fórmico e dióxido de carbono entre outras substâncias (Edye; Clarke, 1995). Para minimizar as perdas de sacarose por inversão e degradação alcalina, as condições de trabalho durante o processamento do caldo de cana-de-açúcar são monitoradas de maneira que o pH permaneça o maior tempo possível próximo da neutralidade (pH 7,0) (Andrade, 1998). Outro fator relacionado às perdas de sacarose é a presença de microrganismos, os quais metabolizam a sacarose em ácido lático, ácido acético, etanol, manitol, polissacarídeos (dextranas e levanas) e produzem enzimas que catalisam as reações de degradação da sacarose (Michelena *et al*., 2006).

3.9 Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE)

A técnica da cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) surgiu por volta de 1970. A tecnologia utiliza colunas fechadas com partículas muito finas, proporcionando separações mais eficientes do que a cromatografia tradicional (papel, camada delgada ou coluna aberta), que possui excelente capacidade analítica, podendo separar até 100 componentes em uma amostra por corrida (Figueiredo, 2012; Collins; Braga; Bonato, 1997). Nesta técnica cromatográfica, o circuito é fechado, o que permite sua utilização inúmeras vezes. As colunas utilizadas são bastante eficientes, mas oferecem resistência à vazão da fase móvel, fazendo-se necessária a aplicação de altas pressões para que a velocidade de eluição aumente. A injeção é feita por meio de microseringas ou de válvulas de injeção (Vogel, 2002; Skoog; Holler; Nieman, 2002).

Para que um solvente possa ser utilizado como fase móvel na CLAE, este deve apresentar alto grau de pureza e boa dissolução da amostra, não deve dissolver a fase estacionária, ter baixa viscosidade e deve ser compatível com o detector (Collins; Braga; Bonato, 1997).

As fases estacionárias utilizadas na cromatografia líquida de alta eficiência, geralmente sílica ou seus derivados, devem ter alta resolução entre os componentes da amostra e ser de fácil introdução na coluna. Uma característica importante da partícula dos materiais utilizados nesta fase é possuir uniformidade e pequeno coeficiente de variação de diâmetro das partículas.

Estas podem variar 3 a 40 μm de diâmetro e quanto menor for a partícula, maior será a eficiência da separação, favorecendo assim o processo de difusão das moléculas da amostra (Cecchi, 2003).

É comum a utilização de uma pequena coluna entre o injetor e a coluna de trabalho, chamada de pré-coluna para retenção de impurezas que possam estar presentes na amostra, evitando que sejam adsorvidas pela coluna de trabalho, aumentando seu tempo de vida (Ciola, 1998).

Os detectores são responsáveis pela fase móvel com os analitos na saída da coluna, detectando de forma contínua as propriedades físicas ou físico-químicas da amostra, além de enviarem um sinal para registro que é, geralmente, diretamente proporcional à concentração do componente na amostra (Stolyhwo; Colin; Gulochon, 1985 *apud* Santos, 2008).

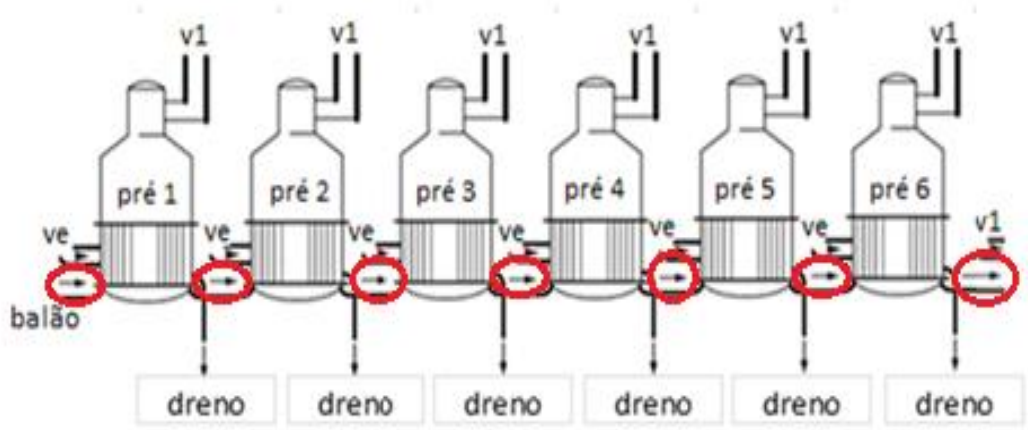
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de coleta das amostras

O sistema de evaporação investigado neste trabalho está instalado em uma indústria de açúcar e álcool localizada no município de Uberaba, na região do Triângulo Mineiro, estado de Minas Gerais o qual é constituído por evaporadores denominados: pré-evaporadores e evaporadores que usam o sistema de múltiplos efeitos. Nos pré-evaporadores, a energia em cada um dos componentes é vapor de escape. Os outros utilizam o sistema de alimentação das calandras com vapor vegetal.

Como apresentado na Figura 19, o vapor de escape (ve) é admitido individualmente em cada evaporador, que denomina-se de pré e sai individualmente como (v1). O caldo que vem do balão (onde passa o caldo clarificado) entra no pré 1, e, após a troca de calor com o (ve), o caldo sai do pré 1 e entra no pré 2 para sucessiva concentração do caldo até o pré 6.

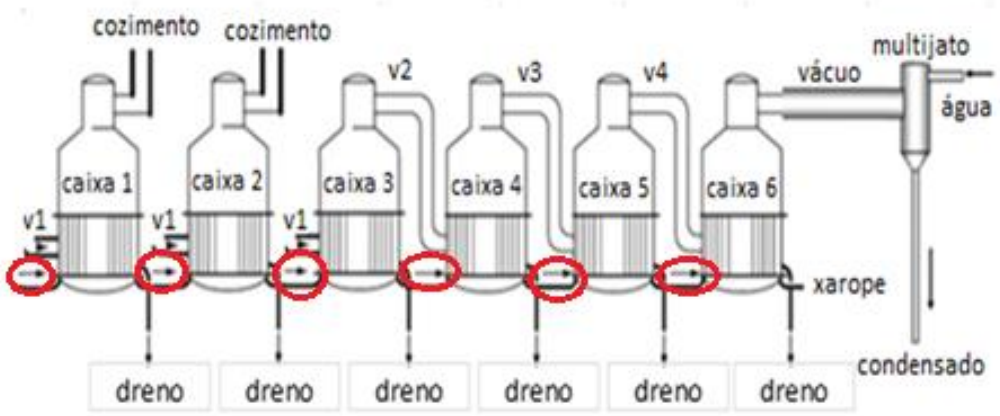
Figura 19- Pré-evaporação



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Continuando o desenvolvimento do processo, conforme mostrado na Figura 20, o vapor (v1) que é gerado nos Prés, alimentam as calandras dos três primeiros evaporadores, denominado Caixa, os quais o vapor vegetal gerado nos dois primeiros efeitos é o vapor de aquecimento em cozedores. Já da terceira Caixa, o vapor vegetal gerado alimenta o sistema a múltiplos efeitos, até a saída do caldo já concentrado na caixa 6, sendo que este caldo concentrado é denominado xarope.

Figura 20- Etapa de múltiplos efeitos



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nas Figuras 19 e 20, as setas indicadas com um círculo em vermelho, mostram a entrada e saída de caldo em cada pré e caixa que são os pontos de coleta de cada amostra.

4.2 Cálculo da vazão de caldo nos evaporadores

Os parâmetros do processo industrial apresentados no Quadro 1 são visualizados pelos computadores no Centro de Operações Industriais (COI), nos quais aparecem as medições de vazão, temperatura e pressão do corpo dos evaporadores e a pressão das calandras. Alguns pré-evaporadores e algumas caixas evaporativas não têm sensores para determinar a vazão conforme indicado no Quadro 1.

Os parâmetros obtidos da etapa de evaporação como, vazão, temperatura e pressão do corpo dos evaporadores e a pressão das calandras, serão mostrados no Quadro 1 e a ilustração do sistema encontra-se no Apêndice A, em que mostra o sistema de operação no interior dos pré-evaporadores e no Apêndice B o sistema de operação das caixas evaporativas.

Como mostrado no Quadro 1, tem-se a vazão de entrada de massa de caldo clarificado no primeiro evaporador (pré 1), mas, como não se tem todos os parâmetros de entrada e saída de caldo em todos os evaporadores, pode-se calcular usando a Equação (1), a vazão de cada evaporador e determinar quanto será a vazão de xarope que vai para o setor de cozimento e se apresenta valores próximos do calculado com o que mostra os sensores.

Quadro 1- Parâmetros da tela do supervisório da evaporação

Equipamento	Vazão Entrada (kg/h)	Vazão saída (kg/h)	Temperatura (°C)	Pressão do corpo	Pressão da calandra
Pré 1	679.780	--	112	1,45 kgf/cm	0,92 kgf/cm
Pré 2	--	584.010	119	1,43 kgf/cm	0,63 kgf/cm
Pré 3	584.010	--	118	1,45 kgf/cm	0,96 kgf/cm
Pré 4	--	--	119	1,44 kgf/cm	0,93 kgf/cm
Pré 5	--	--	118	1,43 kgf/cm	1,55 kgf/cm
Pré 6	--	373.620	94	0,86 kgf/cm	1,05 kgf/cm
Caixa 1	373.620	370.960	102	0,89 kgf/cm	0,68 kgf/cm
Caixa 2	370.960	--	109	0,88 kgf/cm	0,41 kgf/cm
Caixa 3	--	--	107	0,86 kgf/cm	0,25 kgf/cm
Caixa 4	--	--	102	0,45 kgf/cm	11,62 inHg
Caixa 5	--	--	99	0,39 kgf/cm	-5,47 inHg
Caixa 6	--	142.080	82	-15,08 inHg	-13,98 inHg

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Nota: --: Local que não apresenta sensor de monitoramento.

$$J = Vazão\ de\ entrada\ em\ massa\ de\ caldo\ (J') - água\ evaporada\ (E) \quad (1)$$

4.3 Cálculo da quantidade de água evaporada em cada evaporador

Segundo Procknor (2002), a taxa de evaporação normalmente utilizada é uma ferramenta grosseira de avaliação da performance dos evaporadores. Isto porque esta taxa depende muito da diferença de temperatura entre o vapor de aquecimento e o vapor gerado, bem como da temperatura com que o caldo é introduzido no equipamento. A quantidade de água evaporada será calculada para cada caixa de evaporação que é obtida pela Equação (2), conforme (Fernandes, 2011).

$$E = J \cdot \left(1 - \left(\frac{Bxentrada}{Bxsaída}\right)\right) \quad (2)$$

onde: E = quantidade de água evaporada por hora (kg/h); J = massa de entrada de caldo por hora (kg/h); Bxentrada = Brix do caldo na entrada do evaporador e Bxsaída = Brix do caldo na saída do evaporador.

4.4 Cálculo da taxa de evaporação (TE)

Segundo Fernandes (2011), outro controle de processo realizado regularmente é a determinação da taxa de evaporação (TE), pois este cálculo é obtido pela Equação (3).

$$TE = \left(\frac{E}{A}\right) \quad (3)$$

onde: TE = Taxa de Evaporação (kg/m²/h); E = quantidade de água evaporada por hora (kg/h) e A = Área de superfície de troca de calor do evaporador (m²).

Foi coletado um volume de 1000 mL de cada amostra somente uma única vez e realizadas em triplicata, posto que os resultados apresentados foram a média das três análises realizadas de cada amostra, como mostrado na Equação (4).

$$M = \left(\frac{L1 + L2 + L3}{3}\right) \quad (4)$$

onde: M = média da soma das três leituras realizadas; L1 = primeira leitura obtida; L2 = segunda leitura obtida; L3 = terceira leitura obtida.

O desvio médio foi calculado através da Equação (5).

$$DM = \left(\frac{(M - L1) + (M - L2) + (M - L3)}{3}\right) \quad (5)$$

onde: DM = desvio médio da soma das três leituras realizadas; L1 = primeira leitura obtida; L2 = segunda leitura obtida; L3 = terceira leitura obtida.

Através da Equação (6), determinou-se o desvio padrão das análises realizadas.

$$DP = \left(\frac{DM}{3}\right) \quad (6)$$

onde: DP = desvio padrão; DM = desvio médio.

4.5 Análises físico-químicas

As metodologias analíticas e tecnológicas aplicados aos caldos de cana-de-açúcar deste trabalho são baseadas nas referências bibliográficas da literatura técnica açucareira, nos órgãos de pesquisa do setor açucareiro, nas entidades de normalização, em métodos próprios e, ainda, em órgãos governamentais de controle de qualidade em alimentos e métodos de clientes.

Para realização das análises físico-químicas, as amostras dos caldos foram coletadas em 13 pontos diferentes de amostragem para as análises de pH, brix, pol, pureza, AR e ART.

4.5.1 Análise de brix

Para determinação do brix de acordo com os procedimentos do CTC (2011), foi utilizado um refratômetro digital Anton Paar, modelo Abbemat 3100, ilustrado pela Figura 21. Algumas gotas do caldo foram adicionadas no prisma do refratômetro sendo na sequência realizada a leitura do brix. Para os caldos mais concentrados foi realizada a diluição 1:1, multiplicando o valor de brix obtido por 2.

Figura 21- Refratômetro digital



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

4.5.2 Análise de pol e pureza dos caldos

Para a análise, conforme estipulado pelo CTC (2011), transferiu-se 200 mL de caldo para um béquer e em seguida, adicionou-se aproximadamente de 6,0 a 8,0 gramas de clarificante em agitação com auxílio de um bastão. A mistura é filtrada e com 70 mL do filtrado realizou-se a leitura sacarimétrica. Para essa análise foi utilizado um sacarímetro da Marca Schmidt Haensch, apresentado pela Figura 22. Com três porções da solução obteve-se o valor da leitura sacarimétrica e utilizou-se a Equação (7) para determinar a Pol.

$$\%Pol = (0{,}2605 - (0{,}0009882 * Brix)) * Leitura\ sacarimétrica \quad (7)$$

Para determinar a Pureza utiliza-se a Equação (8):

$$\%Pureza = \left(\frac{Pol}{Brix}\right) \cdot 100 \quad (8)$$

Figura 22- Sacarímetro



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

4.5.3 Análise de pH

Para as análises de pH de acordo com metodologia proposta por CTC (2005), utilizou-se um peagâmetro digital (Digimed DM-22) conforme apresentado na Figura 23. Em um béquer contendo 50 mL do caldo realizou-se as leituras anotando as medidas encontradas.

Figura 23- Peagâmetro



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

4.6 Análise de pol do açúcar

Para a análise, de acordo com metodologia proposta pelo CTC (2005), uma amostra de açúcar VHP (Figura 24) de 26,0 g foi homogeneizada com água deionizada em um béquer de 50 mL. Na sequência, transferiu-se a amostra para um balão volumétrico de 200 mL e adicionou-se 100 mL de água deionizada a 20 ºC. O balão foi mantido em agitação até a dissolução total da amostra, e posteriormente, completou-se o volume do balão com água destilada a 20 ºC. Esse volume foi transferido para um béquer de 250 mL e adicionou-se 8,0 g de clarificante octapol. A mistura foi homogeneizada em Mixer e, logo após, filtrada em papel de filtro qualitativo, desprezando os primeiros 10 mL. Verificou-se se a temperatura de 20 ºC da amostra foi mantida ao final do preparo e realizou-se a leitura no Sacarímetro em 4 porções de 50 mL anotando os valores obtidos.

Figura 24- Açúcar VHP



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Utilizando a Equação (9), obtém-se o cálculo para determinar a Pol do açúcar.

$$Pol\ do\ açúcar = Média\ das\ leituras\ obtidas\ no\ sacarímetro\ \cdot 2 \quad (9)$$

Nota: Se a leitura for realizada em temperatura de 20,0 ºC ± 0,5 °C, não há necessidade de realização da correção da Pol. A maioria dos sacarímetros fornece o valor da Pol em ºZ (International Sugar Scale), não havendo necessidade de cálculo ou transformação.

4.7 Análise de pol e pureza do xarope e do mel final

Segundo Caldas (2005), para a análise, pesou-se 26 gramas da amostra diluída em balão volumétrico de 200 mL. Completou-se o volume com água destilada até o menisco; transferiu-se para um béquer de 250 mL, adicionou-se de 6,0 a 8,0 g de Clarificante Octapol. Posteriormente, realizou-se a homogeneização com o Mixer; filtrou-se em papel de filtro tipo 10 recolhendo o filtrado em béquer, descartando as primeiras porções de ± 10 mL, realizando-se a leitura do filtrado no Sacarímetro, sendo o qual, para determinar a Pol % do xarope e do mel final, utiliza-se a Equação (10).

$$\%Pol = Leitura\ sacarimétrica\ \cdot 4 \quad (10)$$

Na realização da determinação da Pureza foi utilizada a Equação (8) no Item 4.5.2

4.8 Análise de Açúcares Redutores (AR) pelo método (Eynon-Lane)

Para a determinação de açúcares redutores (AR) nas amostras de caldo utilizou-se o método Lane-Eynon conforme descrito por Tavares *et al.* (2010). Transferiu-se 200 mL de caldo para um béquer de 500 mL, adicionando posteriormente 0,2 g de oxalato de sódio P.A e 2,0 g de Celite P.A. Em seguida, a mistura foi homogeneizada e filtrada em papel de filtro qualitativo desprezando aproximadamente 20 mL do filtrado obtido no início da filtração.

Do filtrado obtido determinou-se o AR, titulando a solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % e a amostra preparada em equipamento Redutec.

Para determinar o teor de açúcares redutores (%AR) em caldo que é expresso em porcentagem (g/100 mL), utilizou-se a Equação (11).

$$\%AR = 0{,}25\ \cdot \left(\frac{(Vp)}{(Va)}\right) \quad (11)$$

onde: Vp é a média dos volumes gastos nas titulações da solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % e Va e a média dos volumes gastos nas titulações da amostra.

Para a determinação de AR em caldos mais concentrados, fez-se necessário uma diluição o qual pesou-se 20,0 g do caldo mais concentrado em béquer de 250 mL, adicionando 100 mL de água e em seguida dissolveu-se a mistura com o auxílio de um agitador magnético. Transferiu-se o conteúdo do béquer para balão volumétrico de 250 mL, completando-se o volume com água. Adicionou-se 0,2 g de oxalato de sódio P.A e 2,0 g de Celite P.A. A mistura foi posteriormente homogeneizada e filtrada em papel de filtro qualitativo desprezando aproximadamente 20 mL do filtrado obtido no início da filtração.

Do filtrado obtido determinou-se o AR, titulando a solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % e a amostra preparada em equipamento Redutec.

Para determinar o teor de açúcares redutores (%AR) em caldos mais concentrados que é expresso em porcentagem (g/100 mL), utilizou-se a Equação (12).

$$\%AR = Fator \cdot \left(\frac{(Vp)}{(Va)}\right) \tag{12}$$

onde: Fator: 3,125; Vp é a média dos volumes gastos nas titulações da solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % e Va é a média dos volumes gastos nas titulações.

4.9 Análise de Açúcares Redutores Totais (ART) pelo método (Eynon Lane)

Na determinação de açúcares redutores totais (ART) pelo método Lane-Eynon nas amostras de caldo (Amorim; Basso; Alvez, 1996), transferiu-se 50 mL de caldo para um béquer de 250 mL, adicionando-se em seguida 0,2 g de oxalato de sódio P.A e 2,0 g de Celite P.A. Após a mistura ser homogeneizada, filtrou-se a mistura em papel de filtro qualitativo desprezando aproximadamente 20 mL do filtrado obtido no início da filtração.

Transferiu-se 10 mL da amostra filtrada, utilizando pipeta volumétrica, para balão volumétrico de 200 mL. Para completar o volume, foi acrescentado 20 mL da solução de HCl 0,75 N, com pipeta volumétrica. O balão volumétrico de 200 mL que contém a amostra filtrada permaneceu em forno de microondas, na potência máxima, contando cinco segundos após o início da ebulição em toda superfície do extrato. Após o resfriamento do balão em água

corrente, adicionou-se no balão de 200 mL 3 gotas de solução alcóolica indicadora de fenolftaleína a 1 % (g/100 mL).

O material contido no balão volumétrico de 200 mL foi neutralizado gotejando lentamente uma solução de NaOH 0,75 N e ao final uma solução de NaOH 0,1 N, utilizando pipetas graduadas, até que o extrato adquirisse a coloração levemente rósea. Em seguida, adicionou-se água deionizada no balão volumétrico de 200 mL até próximo da marca (menisco). Caso a coloração levemente rósea desaparecesse, adicionaria mais uma ou duas gotas da Solução de NaOH 0,1 N antes de completar o balão.

A partir do extrato contido no balão de 200 mL determinou-se o ART, titulando-se também a solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % no equipamento Redutec.

Para determinar a quantidade de açúcares redutores totais de cada amostra, utilizou-se a seguinte Equação (13):

$$\%ART = 25 \cdot \left(\frac{(Vp)}{(Va)}\right) \tag{13}$$

a qual a Vp é a média dos volumes gastos nas titulações da solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % e Va é a média dos volumes gastos nas titulações.

Para a determinação de ART nas amostras de caldos mais concentrados, fez-se necessário uma diluição de modo que pesou-se 20,0 g do caldo mais concentrado (xarope) em béquer de 250 mL, adicionando-se aproximadamente 100 mL de água e dissolveu-se com o auxílio de um agitador magnético. Transferiu-se o conteúdo do béquer para balão volumétrico de 250 mL, completou-se o volume com água, adicionando-se em seguida 0,2 g de oxalato de sódio P.A e 2,0 g de Celite P.A. Após a mistura ser homogeneizada, filtrou-se a mistura em papel de filtro qualitativo desprezando aproximadamente 20 mL do filtrado obtido no início da filtração.

Transferiu-se 10 mL da amostra filtrada, utilizando pipeta volumétrica, para o balão volumétrico de 200 mL, ainda não completado volume, adicionou-se 20 mL da solução de HCl 0,75 N com pipeta volumétrica. O balão volumétrico de 200 mL que contém a amostra filtrada permaneceu em forno de micro-ondas, na potência máxima, contando cinco segundos após o início da ebulição em toda superfície do extrato. Após o resfriamento do balão em água corrente, adicionou-se no balão de 200 mL 3 gotas de solução alcóolica indicadora de fenolftaleína a 1 % (g/100 mL).

O material contido no balão volumétrico de 200 mL foi neutralizado gotejando lentamente uma solução de NaOH 0,75 N e ao final uma solução de NaOH 0,1 N, utilizando pipetas graduadas, até que o extrato adquirisse a coloração levemente rósea. Em seguida, adicionou-se água deionizada no balão volumétrico de 200 mL até próximo da marca (menisco). Caso a coloração levemente rósea desaparecesse, seria adicionado mais uma ou duas gotas da Solução de NaOH 0,1 N antes de completar o balão.

A partir do extrato contido no balão de 200 mL determinou-se o ART, titulando-se também a solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % no equipamento Redutec.

Para determinar a quantidade de açúcares redutores totais de cada amostra, utilizou-se a Equação (14):

$$\%ART = 62{,}5 \cdot \left(\frac{(Vp)}{(Va)}\right) \tag{14}$$

em que Vp é a média dos volumes gastos nas titulações da solução padrão trabalho de açúcar invertido a 0,25 % e Va é a média dos volumes gastos nas titulações.

Para determinar o volume titulado do padrão de açúcar invertido, o AR e o ART utilizou-se o aparelho Redutec (Tecnal Modelo TE-088) conforme a Figura 25.

Para fins de cálculos é preciso pipetar 25 mL do padrão de açúcar invertido 1 %, transferindo-se para balão de 100 mL e completar com água deionizada, sendo que desta diluição, faz-se titulação no Redutec o qual determina-se o volume padrão utilizado nas equações 11, 12, 13 e 14.

Figura 25- Redutec



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

4.10 Análises por Cromatografia Líquida de Alta Eficiente (CLAE)

Nesta fase, alíquotas de 15 mL de amostras de caldo coletadas em treze diferentes pontos dos pré-evaporadores e caixas evaporativas do setor de evaporação da indústria de açúcar foram transferidas para tubos Falcon e centrifugadas (Centrífuga Anco, CDR 22000) durante 15 minutos a 2000 rpm. Posteriormente, o volume de 1 mL do sobrenadante foi transferido para balões volumétricos de 10 mL tendo esse volume completado com água. Dessa forma, todas as amostras foram diluídas em água na proporção de 1:10.

Os açúcares sacarose, glicose e frutose foram quantificados nas amostras de caldo previamente preparadas em um cromatógrafo líquido de alta eficiência (Shimadzu Modelo LC-20A Prominence) equipado com detector de índice de refração (Shimadzu Modelo LC-20A). As amostras foram filtradas (membranas de 0,22 µm) e um volume 20 µL de cada solução foi injetado no cromatógrafo com uma coluna Supelcogel (250 mm × 4.6 mm e tamanho de partículas de 5 µm) e pré-coluna (50 mm × 4.6 mm e tamanho de partículas de 5 µm) com as seguintes condições cromatográficas: modo isocrático, fase móvel com água ultrapura acidificada com ácido fosfórico (HPLC) a 0,1 % v/v, fluxo de 0,5 mL/min, temperatura do forno de 40 °C e tempo de análise de 35 minutos. Todas as análises foram realizadas em triplicata. Curvas analíticas com os padrões de cada açúcar foram construídas (Sacarose 0,1 – 80 g/L, Glicose 0,1 – 10 g/L e Frutose 0,1 – 10 g/L) e os resultados das concentrações obtidas para os açúcares foram expressos em g/L. A metodologia experimental seguiu a proposta realizada por Fernandes *et al*. (2013), com modificações. Os limites de detecção e quantificação foram determinados de acordo com Ribani *et al*. (2004). Na Figura 26 está apresentado o equipamento utilizado para a determinação dos açúcares.

Figura 26- Cromatógrafo líquido de alta eficiência



Fonte: elaborada pelo autor (2025).

4.11 Cálculo de recuperação da fábrica (SJM)

A análise de recuperação da fábrica (SJM) expressa o quanto de açúcar estamos retendo dentro da fábrica através das quedas de purezas existentes entre o xarope e o mel residual (mel final). Quanto maior for o delta pureza entre o xarope e o mel residual, maior será o SJM (Fernandes, 2011). A Equação (15) é utilizada para saber o quanto foi recuperado de açúcar na Fábrica SJM (Sugar Juice Molasses).

$$Recuperação = \left(\frac{(S \cdot (J - M))}{(J \cdot (S - M))}\right) \cdot 100 \quad (15)$$

onde: S (Sugar) = Pol do açúcar; J (Juice) = Pureza do xarope e M (Molasses) = Pureza do mel final.

4.12 Cálculo da relação sacarose/brix

Para verificar o comportamento de possíveis perdas ao longo do processo, a concentração de sacarose que foi determinada através da titulação dos caldos pelo método Eynon-Lane expressa em ART (g/100 mL) das amostras de caldo coletadas na saída de cada pré-evaporador e caixa de evaporação, foi dividida por um marcador, nesse caso, a relação sacarose/brix conforme mostra a Equação (16).

$$Relação = \left(\frac{sacarose}{brix}\right) \quad (16)$$

4.13 Proporção de glicose e frutose

Para saber se está invertendo ou degradando açúcares na evaporação, foi utilizada a Equação (17), onde foi dividido o brix de saída de cada evaporador pelo brix de entrada de cada um, para assim conhecer a proporção que o brix concentrou.

$$Proporção = \left(\frac{Bxsaída}{Bxentrada}\right) \quad (17)$$

O próximo passo foi determinar se a glicose e a frutose estão se concentrando na mesma proporção que o resultado obtido no cromatógrafo, assim podendo verificar se está invertendo ou degradando açúcares. Para estes cálculos utilizamos as Equações (18) e (19).

$$Relação = Proporção \cdot glicose \tag{18}$$

$$Relação = Proporção \cdot frutose \tag{19}$$

4.14 Cálculo da perda de açúcar em sacas e em reais

Para fins de cálculos verificamos o quanto entrou de vazão de caldo no setor de evaporação e através de análises, determinamos o brix e a pureza do caldo clarificado em que através da Equação (20), determinamos o quanto obteve de entrada em toneladas de brix por hora.

$$Entrada\left(\frac{ton}{h}.brix\right) = \left(\frac{vazão\ de\ clarificado}{100}\right) \cdot brix\ do\ clarificado \tag{20}$$

Para determinar o quanto entrou em massa de sacarose, foi tomado o resultado da Equação (21), dividido por 100 e multiplicado pela pureza do clarificado, mostrados através da Equação (21).

$$Entrada\left(\frac{ton}{h}.sacarose\right) = \left(\frac{ton}{h} \cdot \frac{brix}{100}\right) \cdot pureza\ do\ clarificado \tag{21}$$

Logo após, foram verificados o quanto estava a vazão de xarope e analisado o brix e a pureza do xarope no setor de evaporação, que por meio da Equação (19), é determinado o quanto obteve de saída em toneladas de brix por hora.

$$Saída\left(\frac{ton}{h}.brix\right) = \left(\frac{vazão\ de\ xarope}{100}\right) \cdot brix\ do\ xarope \tag{22}$$

E para determinar o quanto obteve na saída da evaporação em massa de sacarose, o resultado da Equação (19) é dividido por 100 e multiplicado pela pureza do xarope, conforme apresentado na Equação (20).

$$Saída\left(\frac{ton}{h}.sacarose\right) = \left(\frac{ton}{h} \cdot \frac{brix}{100}\right) \cdot pureza\ do\ xarope \quad (23)$$

Ao subtrair o resultado da Equação (21) com o resultado da Equação (23), este resultado é dividido em sacas (50 kg). Dessa forma, tem-se o resultado em perdas de sacas de açúcar por hora (scs/h) no setor de evaporação. Na sequência, a multiplicação por 24 gera o resultado da perda de sacas por dia (scs/dia).

No final de perdas em sacas (scs/dia), o resultado é multiplicado pelo valor em reais da saca (sistema monetário brasileiro) e, assim tem-se o valor estimado em reais no setor de evaporação, onde o valor encontrado em sacas foi encontrado no site: https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/sucroenergetico/acucar-cristal-cepea. Assim, obteve-se o valor da saca de açúcar a 139,42 reais no dia 28 março 2025 (Notícias Agrícolas, 2025).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Resultados calculados para determinar a vazão dos evaporadores

Os parâmetros do processo industrial apresentados no presente estudo são visualizados pelos computadores no Centro de Operações Industriais (COI), onde aparecem as medições do processo coletados por meio de sensores instalados em toda a indústria, como demonstrado no Apêndice A, que se refere ao sistema de operação nos prés-evaporadores e no Apêndice B, ao sistema de operação das caixas evaporativas.

Por meio da Equação (1), foram calculadas as vazões de entrada e saída de cada evaporador, as quais os resultados são mostrados na Tabela 1. Pela equação, foi encontrado o resultado de vazão do último evaporador de 141.721 kg/h de caldo concentrado (xarope). No momento da coleta da amostra, no computador na tela que indica os parâmetros do processo mostrava que a vazão era de 142.080 kg/h deste caldo concentrado. Logo, chega-se à conclusão de que os valores calculados e o obtido no computador estavam bem próximos, indicando que houve uma boa eficiência na saída deste caldo concentrado, onde na indústria é chamado de xarope.

Tabela 1- Vazão de entrada e saída em massa de caldo dos evaporadores

Equipamento	Vazão Entrada (kg/h)	Vazão saída (kg/h)
CE1	679.780	616.837
CE2	616.837	568.216
CE3	568.216	519.617
CE4	519.617	517.667
CE5	517.667	455.430
CE6	455.430	392.032
CE7	392.032	351.133
CE8	351.133	256.497
CE9	256.497	218.002
CE10	218.002	199.210
CE11	199.210	173.641
CE12	173.641	141.721

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: CE = Caldo evaporado

Conforme mostra a Tabela 1, há uma grande variação de vazão de um equipamento para o outro entre o CE4 até o CE8, verificando que é necessário para um melhor acompanhamento

e desenvolvimento no processo, a presença de sensor de vazão em todos os equipamentos, evitando-se assim perdas e degradação da sacarose durante o processo.

5.2 Quantidade de água a ser evaporada e a taxa de evaporação em cada evaporador

No Brasil, o sistema de evaporação em múltiplos efeitos é o mais usual. Esse sistema segue o princípio de Rillieux em que uma unidade de vapor é capaz de evaporar tantas unidades de água quantos números de evaporadores compõem o sistema. Assim, um sistema de múltiplo efeito composto por quatro evaporadores é capaz de evaporar quatro unidades de água para cada unidade de vapor (Payne, 1989).

Os resultados obtidos da etapa de evaporação da quantidade de água evaporada e a taxa de evaporação estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2- Resultados da quantidade de água evaporada e a taxa evaporativa

amostra	Quantidade de água evaporada (kg/h)	Taxa de evaporação (kg/m²/h)
CE1	62.943	42,0
CE2	48.621	32,4
CE3	48.599	32,4
CE4	1.949	1,3
CE5	62.237	41,5
CE6	63.398	42,3
CE7	40.899	27,3
CE8	94.636	63,1
CE9	38.495	25,7
CE10	18.793	12,5
CE11	25.568	17,0
CE12	31.920	21,3

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: CE = Caldo evaporado

Como mostrado na Tabela 2, no CE4 houve pouca evaporação de água acompanhada de uma menor taxa de evaporação, mostrando uma diferença muito abaixo comparada aos outros equipamentos. Essa ocorrência indica a necessidade de um melhor acompanhamento em relação à temperatura do equipamento e a vazão do mesmo, pois como mostrado anteriormente no item 4.6 no quadro 1, o equipamento não possui sensor de vazão, sendo que poderia ter obtido uma quantidade melhor de evaporação de água no caldo elevando a taxa de evaporação.

No caso do CE8, houve uma quantidade elevada em relação aos outros equipamentos, fazendo com que houvesse uma alta taxa de evaporação.

Esses parâmetros precisam ser monitorados para que haja um melhor controle em relação ao brix e reduzir seus problemas, bem como preservar a pureza no final do processo, atrapalhando a eficiência do xarope que irá para o setor de cozimento.

5.3 Resultados das análises por polarimetria

Os resultados obtidos da etapa de evaporação das análises de pH, brix, pol e pureza, foram obtidos a partir das metodologias aplicadas de acordo com (CONSECANA, 2006). Como pode-se observar na Tabela 3, o pH do caldo que entra na evaporação (CC), até a saída no último evaporador (CE12), apresentou um decréscimo de 0,65. Este valor de decréscimo do pH de 0,65 mostra que houve degradação do caldo, principalmente a partir do ponto CE8 que mostra uma diferença maior de pH de um ponto para o outro até o CE12.

Segundo Paulino ([2015?]) durante a evaporação é comum um decréscimo no pH do caldo com uma diferença entre o valor do pH inicial e final próxima a 0,3. Este decréscimo é proporcional ao tempo de retenção na evaporação.

Tabela 3- Resultados das análises de pH, brix, pol e pureza dos caldos

amostra	pH	brix	pol	pureza
CC	6,47 ± 0,08	14,21 ± 0,10	11,90 ± 0,15	83,74 ± 0,48
CE1	6,44 ± 0,06	15,66 ± 0,07	13,12 ± 0,11	83,76 ± 0,29
CE2	6,39 ± 0,04	17,00 ± 0,16	14,24 ± 0,19	83,75 ± 0,31
CE3	6,34 ± 0,03	18,59 ± 0,17	15,57 ± 0,24	83,77 ± 0,54
CE4	6,34 ± 0,04	18,66 ± 0,12	15,90 ± 0,17	85,19 ± 0,38
CE5	6,33 ± 0,04	21,21 ± 0,12	17,65 ± 0,19	83,22 ± 0,40
CE6	6,26 ± 0,03	24,64 ± 0,21	20,52 ± 0,28	83,29 ± 0,41
CE7	6,23 ± 0,02	27,51 ± 0,20	22,31 ± 0,58	81,10 ± 1,53
CE8	6,08 ± 0,05	37,66 ± 0,16	30,58 ± 0,63	81,19 ± 1,33
CE9	6,02 ± 0,03	44,31 ± 0,09	34,70 ± 0,22	78,30 ± 0,35
CE10	5,98 ± 0,05	48,49 ± 0,20	37,82 ± 0,31	78,00 ± 0,32
CE11	5,91 ± 0,05	55,63 ± 0,15	43,23 ± 0,18	77,70 ± 0,11
CE12	5,82 ± 0,04	68,16 ± 0,15	56,40 ± 0,27	82,75 ± 0,21

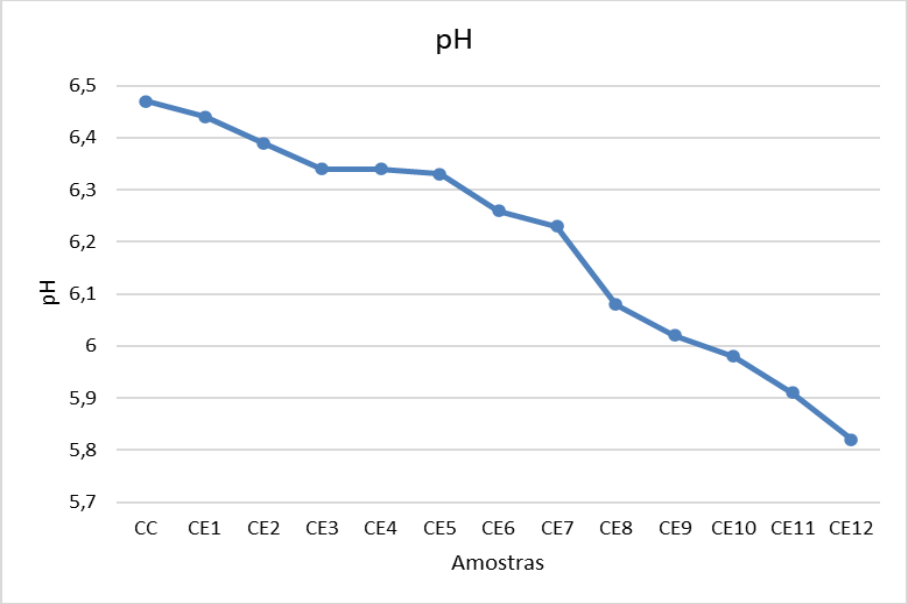
Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: CC = caldo clarificado. CE = Caldo evaporado.

No Gráfico 1, está apresentado o valor de pH obtido em cada amostra de caldo analisada. Os valores indicam um decréscimo do pH ao longo do processo. É possível verificar um

decaimento do pH até o CE3, em seguida um patamar de estabilização de CE3 a CE5, e a partir do CE6 é evidenciado um decréscimo que pode ser um indicativo de degradação do caldo. Essa degradação pode ter ocorrido devido ao tempo de retenção na evaporação.

Gráfico 1- Valores de pH obtidos nas amostras de caldo

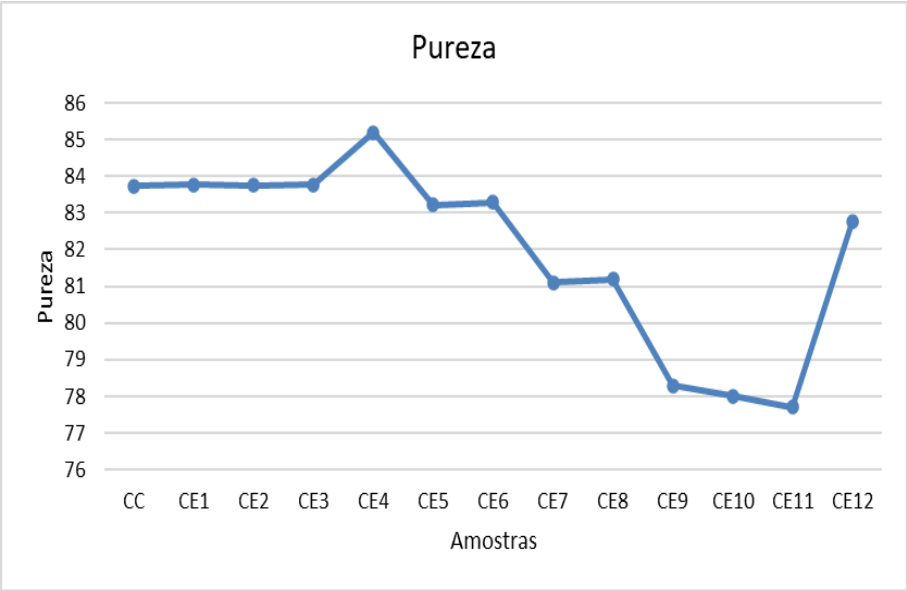


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

No Gráfico 2 estão apresentados os resultados encontrados para a pureza dos caldos coletados em cada evaporador. Ao observar os valores, é possível verificar uma queda na pureza das amostras de caldos. Esses resultados representam que, quando há queda na pureza, há uma indicação de inversão de sacarose, causando perdas indesejáveis (Paulino, [2015?]). É possível observar que houve uma queda na pureza dos caldos em CE4 → CE5, CE6 → CE7, CE8 → CE9, CE9 → CE10 e CE10 → CE11, posteriormente ocorrendo aumento da pureza em CE12.

O aumento da pureza pode ocorrer devido a problemas de amostragem, pois é difícil garantir que o caldo analisado represente fielmente aquele que percorreu todo o setor de evaporação, do início ao fim. A degradação existe, o que precisa é garantir que ela seja a menor possível.

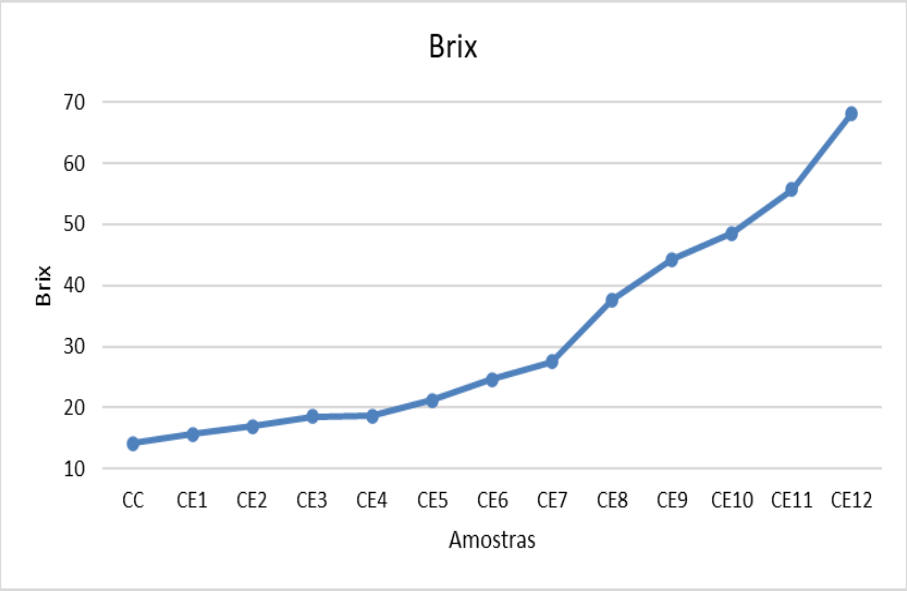
Gráfico 2- Valores de pureza obtidos nas amostras de caldo



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

No Gráfico 3 estão indicados os valores de Brix determinados em cada amostra de caldo. De acordo com a análise de brix na entrada (14,21) e na saída (68,16) da evaporação, houve uma eliminação de 79,15 % de água. Esse resultado se torna satisfatório, pois, Segundo Soares *et al.* (2020), a evaporação é a principal operação unitária na fabricação do açúcar e é utilizada para retirar os quase 75 % da água que contém o caldo e retirar o açúcar que vem na cana. Com isso, tem-se um alto consumo de energia em forma de vapor.

Gráfico 3- Valores de brix obtidos nas amostras de caldo



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

5.4 Resultados das análises dos vapores condensados

As perdas nos evaporadores, quando não conhecidas, são classificadas como indeterminadas tendo em vista que poucas unidades industriais possuem tal prática de acompanhamento. Caso seja feita a contabilização, as perdas passarão para o grupo das perdas determinadas (Fernandes, 2011). Os resultados obtidos da etapa de evaporação das análises de pH e brix dos vapores condensados, estão apresentados na Tabela 4. Os valores de brix nos vapores de escape indicam que não houve um significativo arraste de açúcares, uma vez que a perda de açúcares nos vapores condensados do v1, v2, v3, v4 e no multijato pode ser considerada pequena e dentro do esperado.

Tabela 4- Resultados das análises de pH e brix dos vapores condensados

vapores	pH	brix
escape	6,73	0
TQ v1/v2	7,89	0,04
TQ v3/v4	6,10	0,02
multijato	7,39	0,09

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

5.5 Resultado do rendimento encontrado na fábrica de açúcar

A análise de recuperação da fábrica (SJM) expressa o quanto de açúcar está sendo retido dentro da fábrica por meio das quedas de purezas existentes entre o xarope e o mel residual (mel final). Estes dados estão presentes na Tabela 5, onde o resultado foi encontrado através da Equação (15). Quanto maior for o delta pureza entre o xarope e o mel residual maior será o SJM.

Tabela 5- Resultados das análises para determinar o rendimento da fábrica de açúcar

Amostra	Resultados (%)
S (Pol do açúcar)	99,17 ± 0,08
J (Pureza do xarope)	86,13 ± 0,16
M (Pureza do mel final)	65,83 ± 0,21
Rendimento	70 ± 0,14

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Segundo Hugot (1969, p. 490), uma maneira de avaliar o processo de esgotamento é calcular a recuperação da fábrica que deverá ficar acima de 70 %. Como mostrado na Tabela 5,

o valor encontrado do rendimento da fábrica foi de 70 %, ou seja, não foi um resultado ruim, mas o rendimento poderia ser melhor se a pureza do mel final fosse menor, haja vista que o mel final, não é utilizado mais na fábrica para produzir açúcar, mas enviado para a fermentação para a produção de etanol. No entanto, quanto mais se esgotar o mel final com redução de sua pureza, melhor será o rendimento da fábrica.

5.6 Resultados da proporção de concentração dos brix e de glicose e frutose

A Tabela 6 apresenta a Proporção que foi concentrando o brix do caldo nos evaporadores e a Proporção de Glicose e Frutose ao longo do processo do setor evaporativo.

Em relação à proporção de concentração do brix, é possível observar que, embora tenha ocorrido uma estabilização nas amostras de caldo CE3 e CE4, houve um indicativo de aumento da concentração do brix até a amostra CE12 conforme esperado. Esses resultados foram considerados aqui como satisfatórios.

Em relação à glicose, houve um indicativo de degradação nos pontos CE8 e CE10, o qual pode estar relacionado com a queima do caldo nesses pontos. Nas amostras analisadas a seguir, verificou-se uma melhora desse parâmetro.

Nos resultados encontrados para a frutose, evidenciou-se uma degradação no ponto CE8, restabelecendo à proporção nas demais amostras. Destaca-se aqui a importância de um acompanhamento mais eficiente em relação ao tempo de retenção do caldo e na temperatura mediante o funcionamento do setor de evaporação.

Tabela 6- Resultados da proporção em concentração dos brix, da glicose e da frutose

Amostras	Proporção	Glicose	Frutose
CE1	1,10	0,36	0,38
CE2	1,20	0,35	0,40
CE 3	1,31	0,33	0,33
CE4	1,31	0,34	0,38
CE 5	1,49	0,33	0,38
CE6	1,73	0,31	0,37
CE 7	1,94	0,33	0,37
CE 8	2,65	0,42	0,47
CE 9	3,12	0,35	0,45
CE 10	3,41	0,38	0,40
CE 11	3,91	0,32	0,40
CE 12	4,80	0,29	0,32

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: CE = Caldo evaporado.

5.7 Resultados da perda de açúcar em sacas e em reais

No setor de evaporação, em um balanço de massa na Equação (20), é demonstrado o quanto entrou em tonelada de brix por hora, sendo que na Equação (21) o quanto entrou em tonelada de sacarose por hora.

Já na Equação (22) é apresentado o quanto saiu em tonelada de brix por hora e na Equação (23) o quanto saiu em tonelada de sacarose por hora.

Na Tabela 7, estão apresentados estes resultados onde se pôde calcular a perda no setor de evaporação em sacas de açúcar por hora/dia e o valor estimado no sistema monetário em reais, no qual o valor foi de R$ 63.575,52, sendo que este valor pode ser melhorado devido a correções no processo, em que também depende muito da qualidade da cana e de fatores climáticos.

Tabela 7- Perda de açúcar em sacas e em reais

Entrada em tonelada/hora x brix	96,60 ton/brix.h
Entrada em tonelada de sacarose por hora	80,89 ton/sacarose.h
Saída em tonelada de brix por hora	96,60 ton/brix.h
Saída em tonelada de sacarose por hora	79,94 ton/sacarose.h
Perda de açúcar em sacas / hora	19 scs/h
Perda de açúcar em sacas / dia	456 scs/dia
Perda de açúcar em reais	R$ 63.575,52

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

5.8 Resultados das curvas analíticas e cromatogramas obtidos por Cromatografia Líquida de Alta Eficiência (CLAE)

As amostras coletadas no setor de evaporação da indústria de açúcar foram submetidas às análises por CLAE. Os pontos de coleta já foram apresentados no item 4.1 e foram os seguintes: amostra denominada CC coletada na entrada do sistema de evaporação (entrada do pré-evaporador 1), amostras denominadas CE1 a CE6 coletadas nas saídas dos pré-evaporadores e amostras CE7 a CE12 coletadas nas saídas das caixas de evaporação. A amostra C12 corresponde ao xarope destinado à produção de açúcar.

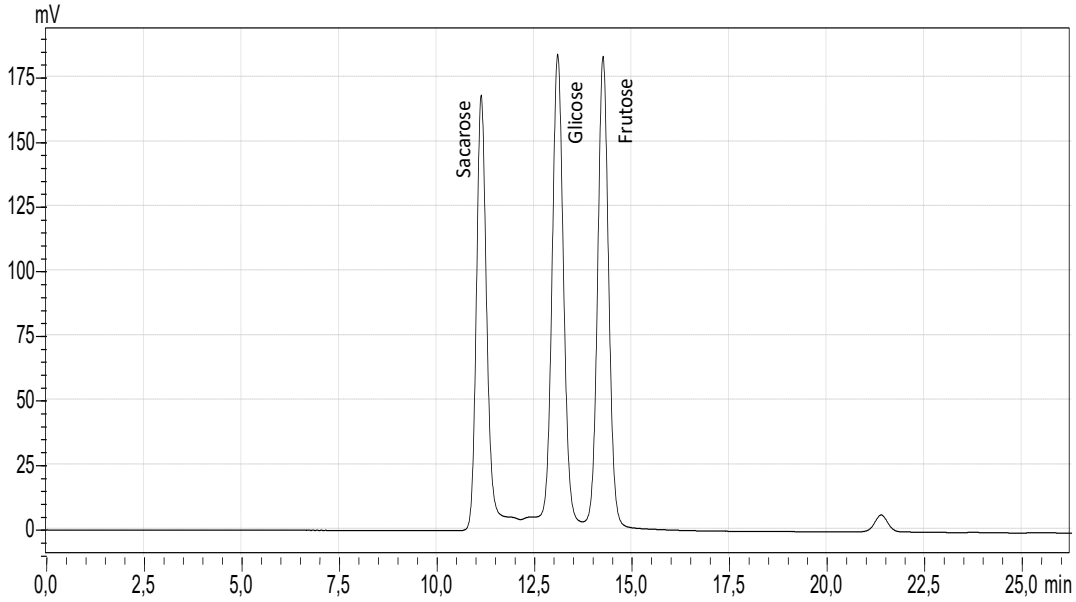
Nas análises por CLAE, as concentrações dos açúcares sacarose, glicose e frutose foram determinadas a partir das curvas analíticas construídas com padrões grau espectroscópicos de

acordo com as seguintes equações: sacarose (y = 274759x – 46078 / R^2 = 0,9977), glicose (y = 357476x – 5137,7 / R^2 = 0,9999) e frutose (y = 350482x – 5519,3 / R^2 = 0,9999). As curvas analíticas para cada açúcar estão apresentadas no Apêndice C. A partir das curvas analíticas, os limites de detecção (LD) e limites de quantificação (LQ) foram calculados de acordo com Ribani *et al*. (2004). Para a sacarose, os valores encontrados foram LD = 0,06 g/L e LQ = 0,18 g/L, glicose LD = 0,05 g/L e LQ = 0,17 g/L e frutose LD = 0,05 g/L e LQ = 0,17 g/L.

No Gráfico 4 está apresentado o cromatograma obtido para os padrões de sacarose, glicose e frutose a uma concentração de 10 g/L. Os tempos de retenção foram 11,07 minutos para sacarose, 12,96 minutos para glicose e 14,13 minutos para frutose.

Os cromatogramas obtidos para as amostras analisadas estão apresentados no Apêndice D. Embora as análises tenham sido realizadas em triplicata, foi apresentado apenas um dos cromatogramas para cada amostra.

Gráfico 4- Cromatograma com os tempos de retenção da sacarose, glicose e frutose



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 8 estão apresentadas as concentrações de sacarose determinadas por CLAE encontradas nas amostras de caldo coletadas nos 13 diferentes pontos do setor de evaporação. As concentrações de sacarose em g/L foram convertidas para % m/m (Pol) utilizando nos cálculos os valores das densidades de cada amostra. De forma comparativa, na Tabela 8 também estão apresentadas as porcentagens massa/massa (Pol) obtidas por polarimetria. A partir das

densidades, essas medidas de Pol foram convertidas para concentração em g/L de sacarose. No Gráfico 5 estão apresentados os valores de Pol determinados por CLAE e por polarimetria.

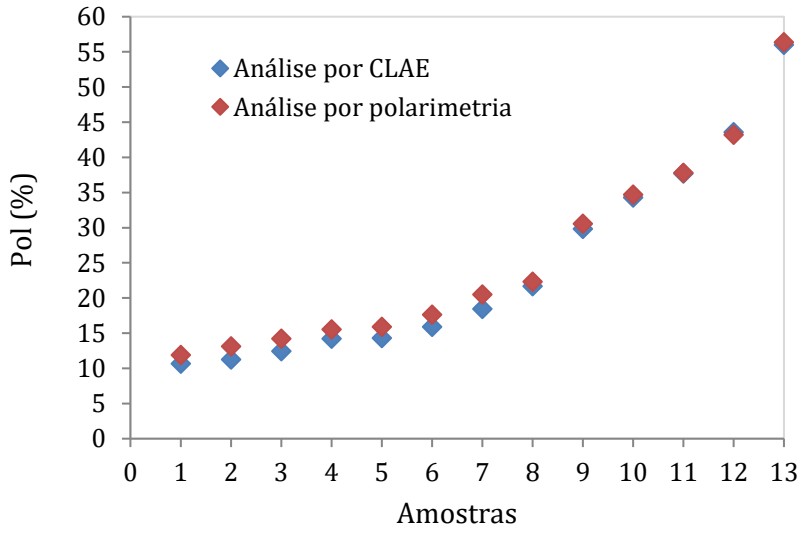
Tabela 8- Concentrações de sacarose obtidas por CLAE e polarimetria

Amostras		CLAE		POLARIMETRIA		Densidade (g/mL)
		Sacarose (g/L)	Pol (% m/m)	Pol (% m/m)	Sacarose (g/L)	
1	CC	144,68 ± 0,07	10,69	11,90 ± 0,15	161,05	1,3533
2	CE1	152,53 ± 1,58	11,25	13,12 ± 0,11	177,78	1,3551
3	CE2	169,30 ± 0,08	12,46	14,24 ± 0,19	193,36	1,3579
4	CE3	193,50 ± 0,42	14,22	15,57 ± 0,24	211,73	1,3599
5	CE4	194,75 ± 1,68	14,30	15,90 ± 0,17	216,39	1,3610
6	CE5	217,10 ± 1,57	15,91	17,65 ± 0,19	240,81	1,3644
7	CE6	253,04 ± 0,40	18,46	20,52 ± 0,28	281,16	1,3702
8	CE7	298,22 ± 1,18	21,68	22,31 ± 0,58	306,78	1,3751
9	CE8	411,63 ± 1,56	29,83	30,58 ± 0,63	421,88	1,3796
10	CE9	482,59 ± 0,95	34,31	34,70 ± 0,22	487,98	1,4063
11	CE10	533,89 ± 3,06	37,72	37,82 ± 0,31	549,38	1,4152
12	CE11	623,25 ± 6,68	43,58	43,23 ± 0,18	618,23	1,4301
13	CE12	817,67 ± 9,03	56,03	56,40 ± 0,27	822,93	1,4591

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: CC = caldo clarificado. CE = Caldo evaporado.

Gráfico 5- Valores de pol (%) obtidos nas amostras de caldo



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

As concentrações em g/L de sacarose e Pol tiveram valores crescentes à medida que as amostras foram coletadas ao longo dos pré-evaporadores (Amostras CE1 a CE6) e caixas de evaporação (Amostras CE7 a CE13) em ambas as metodologias empregadas. A amostra do caldo clarificado (CC), coletada na entrada do pré-evaporador 1 (Ponto 1) apresentou Pol igual 10,69 e 11,90 por CLAE e polarimetria, respectivamente. Quando a CE12 foi analisada (Xarope - Saída da caixa de evaporação 6), os valores encontrados para a Pol estiveram próximos de 56,0 para ambas as metodologias. Esses resultados foram esperados uma vez que o caldo ao entrar no setor de evaporação e passar sucessivamente pelos pré-evaporadores e caixas de evaporação vai perdendo água, tornando-se mais concentrado. Portanto, ao longo desse processo, ocorre o aumento da concentração de sacarose conforme evidenciado pelos dados obtidos de Pol.

Ao longo do processo de evaporação foi possível observar que as concentrações de sacarose em g/L determinadas por CLAE estiveram mais baixas do que quando determinadas por polarimetria, especialmente até a amostra CE8. A partir da amostra CE9, os resultados obtidos por CLAE foram discretamente mais baixos comparado com os dados obtidos por polarimetria. Nas amostras com maior teor de sacarose (CE11 e CE12), os valores de concentração obtidos para ambos os métodos foram mais próximos. Particularmente em relação a Pol (% m/m), as diferenças dos resultados não foram maiores que duas unidades quando as duas metodologias são comparadas.

De forma geral, as concentrações de sacarose em g/L e Pol (% m/m) mais baixas encontradas por CLAE podem ser relacionadas ao fato de que, por essa metodologia, a sacarose é quantificada isoladamente em relação aos demais componentes da mistura. Essa técnica tem maior custo. Entretanto, pode retratar com mais precisão as concentrações de um determinado analito em uma amostra.

A determinação da Pol utilizando polarimetria é a metodologia mais largamente empregada nas indústrias sucroalcooleiras. O polarímetro é um aparelho que permite a determinação da concentração de um açúcar por meio da rotação óptica quando uma luz polarizada incide na amostra. Entretanto, no caso da determinação de sacarose em caldo de cana de açúcar, impurezas e outros compostos presentes em uma amostra podem ser praticamente ativos, o que pode exercer influência na análise. Dentre esses compostos estão a glicose (dextrógira) e frutose (levógira) que ocorrem naturalmente no caldo, além de serem produtos da hidrólise da sacarose. Quanto maior a proporção desses compostos, menor é a precisão da medida de sacarose por polarimetria (Mohamed; Higazi, 2016). Os autores também avaliaram a concentração de sacarose, glicose e frutose em caldo de cana e evidenciaram que a análise

realizada por CLAE é mais precisa, fornecendo uma determinação direta e rápida desses constituintes. Na indústria pesquisadas por esses pesquisadores, os caldos clarificados analisados apresentaram valores de Pol % entre 13,44 e 14,94, enquanto os resultados do xarope estiveram entre 52,0 e 56,26.

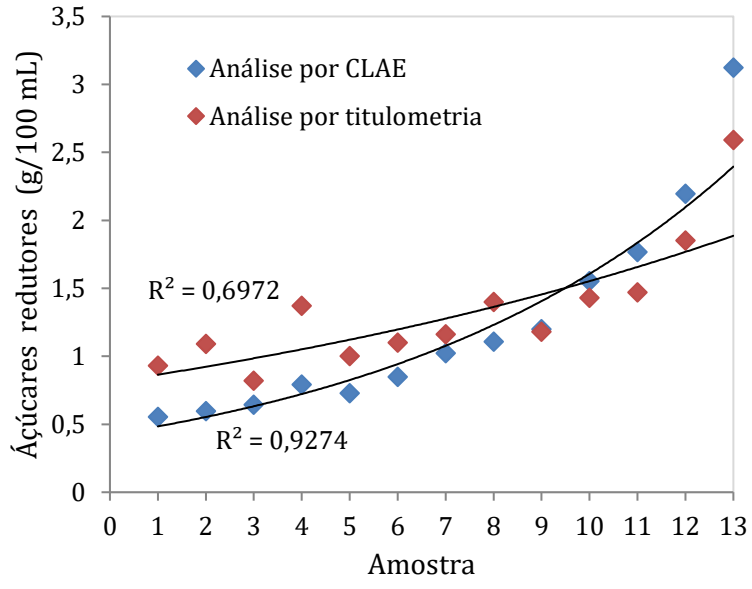
Xu, Liang e Zhu (2015) determinaram frutose, glicose e sacarose em melaço de cana de açúcar por CLAE e destacaram o método como simples, quantitativo e que promove uma economia de tempo. De acordo com esses estudos, é possível sugerir que os resultados de açúcares encontrados neste trabalho com as amostras coletadas no setor de evaporação da indústria de açúcar investigada empregando CLAE, podem ser mais precisos que aqueles obtidos por polarimetria.

Com relação à concentração de sacarose do caldo clarificado (CC) que entrou no setor de evaporação, os valores encontrados foram 14,46 e 16,10 g/100 mL quando analisada por CLAE e polarimetria, respectivamente. Esses dados estão dentro daqueles obtidos por Mattos, Zagato e Jacintho (1988) quando encontraram valores entre 10,55 e 18,21 % m/v testando duas diferentes metodologias.

5.9 Concentrações de glicose e frutose obtidas por CLAE e de açúcares redutores obtidos por titulometria

No Gráfico 6 estão representados os resultados de açúcares redutores encontrados nas amostras coletadas no setor de evaporação por cromatografia e por titulometria (Eynon-Lane).

Gráfico 6- Açúcares redutores por CLAE e titulometria



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Na Tabela 9 estão apresentados os valores de concentração de glicose e frutose das amostras coletadas no setor de evaporação determinados por CLAE, bem como as concentrações de açúcares redutores determinados por método titulométrico.

Tabela 9- Concentrações de glicose e frutose obtidas por CLAE e de açúcares redutores obtidos por titulometria

Amostras		CLAE				Eynon - Lane
		Glicose (g/L)	Frutose (g/L)	(Gli + Fru) (g/L)	(Gli + Fru) (g/100mL)	AR (g/100mL)
1	CC	2,89 ± 0,04	2,65 ± 0,02	5,54	0,554	0,93 ± 0,03
2	CE1	3,06 ± 0,20	2,89 ± 0,08	5,95	0,595	1,09 ± 0,05
3	CE2	3,39 ± 0,17	3,03 ± 0,06	6,42	0,642	0,82 ± 0,03
4	CE3	3,98 ± 0,06	3,93 ± 0,45	7,91	0,791	1,37 ± 0,04
5	CE4	3,85 ± 0,38	3,43 ± 0,04	7,28	0,728	1,00 ± 0,07
6	CE5	4,50 ± 0,04	3,97 ± 0,15	8,47	0,847	1,10 ± 0,07
7	CE6	5,61 ± 0,03	4,61 ± 0,02	10,22	1,022	1,16 ± 0,04
8	CE7	5,85 ± 0,02	5,23 ± 0,15	11,08	1,108	1,40 ± 0,06
9	CE8	6,35 ± 0,60	5,63 ± 0,22	11,98	1,198	1,18 ± 0,05
10	CE9	8,85 ± 0,40	6,88 ± 0,03	15,53	1,553	1,43 ± 0,04
11	CE10	9,07 ± 0,58	8,44 ± 0,59	17,66	1,766	1,47 ± 0,02
12	CE11	12,22 ± 0,55	9,74 ± 0,08	21,96	2,196	1,85 ± 0,06
13	CE12	16,39 ± 0,22	14,83 ± 0,06	31,22	3,122	2,49 ± 0,05

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: Gli = Glicose. Fru = Frutose. CC = caldo clarificado. CE = Caldo evaporado.

As concentrações de glicose e frutose em g/L determinadas por CLAE dentro das amostras analisadas foram somadas e convertidas para g/100 mL. Quando os resultados obtidos por CLAE são observados, é possível verificar que as amostras de CC a CE5 (Coletadas nos pré-evaporadores) apresentam valores de glicose e frutose somados, mais baixos que os valores de açúcares redutores obtidos por titulometria. As amostras CE6, CE7 e CE8 evidenciam resultados próximos para ambas as metodologias e, em seguida, as amostras CE10, CE11 e CE12 quando determinadas por CLAE mostram resultados superiores quando comparadas ao método por titulometria.

No trabalho de Ogando *et al*. (2022) foi evidenciado que os métodos colorimétricos para o monitoramento de açúcares, como o de Eynon-Lane empregado neste estudo, podem apresentar resultados superestimados ou subestimados, enquanto controle de açúcares redutores em caldo de cana por cromatografia demonstrou ser mais estável, preciso e exato. A presença de interferentes presentes no caldo tais como, alguns íons metálicos, podem gerar erros analíticos na determinação de açúcares redutores. Esses autores ainda destacaram que dados superestimados de açúcares redutores podem estar relacionados a um problema do método analítico e não a um distúrbio no processo.

Xu, Liang, Zhu (2015) analisaram por CLAE frutose e glicose em melaço de cana de açúcar e destacaram a técnica como simples, fácil de executar e precisa.

Os resultados de açúcares redutores foram também representados no Gráfico 6. Observando os resultados obtidos por CLAE, é possível perceber, pelos pontos do Gráfico, uma regressão exponencial mais estável quando comparado ao método colorimétrico empregado. Para verificar essa observação, os coeficientes de determinação (R^2) para cada curva foram determinados, sendo o R^2 para a curva com os resultados obtidos por CLAE foi 0,9274 enquanto o R^2 para a curva com os dados obtidos por titulometria foi 0,6972.

Embora sejam amplamente empregados nas indústrias de açúcar, os métodos colorimétricos (espectrofotométricos) para a determinação de açúcares em caldo de cana e para o monitoramento de carboidratos em outras amostras da indústria como o xarope e melaço de cana, podem evidenciar resultados menos precisos. Pelos métodos cromatográficos, os componentes de interesse são analisados separadamente e sem a interferência de agentes corantes que podem influenciar os resultados. Dessa forma, mesmo com um custo mais elevado, a cromatografia é bem conhecida pela precisão nas análises desde que corretamente conduzida. Resultados mais confiáveis de sacarose, glicose e frutose em uma indústria de açúcar, permitem o monitoramento dos processos nos diversos setores com mais precisão. Isso possibilita diagnósticos mais rápidos e intervenções eficientes evitando perdas substanciais no processo.

5.10 Concentração de açúcares redutores totais obtidos por CLAE e por titulometria

Na Tabela 10 estão apresentados os valores de açúcares redutores totais (ART) obtidos por titulometria (Eynon - Lane) e por CLAE. Nos resultados por CLAE, esse valor corresponde à soma das concentrações de sacarose, glicose e frutose presente em 100 mL de amostra de

caldo. Os valores de ART foram convertidos para porcentagem massa/massa a partir da densidade de cada amostra.

Os valores de ART determinados por CLAE seguiram valores crescentes ao longo do processo e foram mais altos que os valores de ART determinados por titulometria (Eynon - Lane). Quando os resultados de ART foram convertidos para porcentagem em massa, os dados também foram mais altos por CLAE. Entretanto, não foram superiores aos valores de Brix determinados em cada amostra.

Tabela 10- Concentração de açúcares redutores totais nas amostras de caldo

Amostras		CLAE		Eynon - Lane		Brix
		ART (g/100mL)	% m/m	ART (g/100mL)	% m/m	
1	CC	15,01	11,09	13,60 ± 0,05	10,04	14,21 ± 0,10
2	CE1	15,8	11,65	15,09 ± 0,06	11,13	15,66 ± 0,07
3	CE2	17,57	12,93	15,94 ± 0,05	11,73	17,00 ± 0,16
4	CE3	20,14	14,80	18,07 ± 0,04	13,28	18,59 ± 0,17
5	CE4	20,19	14,83	17,95 ± 0,04	13,18	18,66 ± 0,12
6	CE5	22,55	16,52	19,95 ± 0,09	14,62	21,21 ± 0,12
7	CE6	26,32	19,20	23,10 ± 0,05	16,85	24,64 ± 0,21
8	CE7	30,92	22,48	25,34 ± 0,05	18,42	27,51 ± 0,20
9	CE8	42,35	30,69	33,87 ± 0,06	24,55	37,66 ± 0,16
10	CE9	49,98	35,54	38,68 ± 0,07	27,50	44,31 ± 0,09
11	CE10	55,14	38,96	42,11 ± 0,08	29,75	48,49 ± 0,20
12	CE11	64.51	45,10	48,58 ± 0,05	33,96	55,63 ± 0,15
13	CE12	84,88	58,17	64,13 ± 0,09	43,95	68,16 ± 0,15

Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: ART = Açúcares redutores torais. CC = caldo clarificado. CE = Caldo evaporado.

No trabalho de Mattos, Zagatto e Jacintho (1988), foi analisado o teor de ART em diferentes amostras de caldo clarificado e os valores obtidos variaram entre 12,56 e 18,63 % m/m. Nesse estudo o caldo clarificado apresentou valores de ART de 11,09 e 10,04 % m/m.

5.11 Resultados da relação sacarose/brix determinado por CLAE e polarimetria

Para verificar o comportamento de possíveis perdas ao longo do processo, a concentração de sacarose determinada no caldo coletado na saída de cada pré-evaporador e caixa de evaporação foi dividida por um marcador. Em se tratando desse estudo, o brix. Se a relação sacarose/brix for diminuindo ao longo da evaporação, indica a possibilidade de perdas e revisões no processo precisam ser avaliadas. Na Tabela 11 está apresentado o monitoramento da relação sacarose/brix, calculados por meio da Equação (16). Esses resultados também estão presentes no Gráfico 7.

Tabela 11- Relação sacarose/brix determinado por CLAE e polarimetria

Amostras		CLAE		Polarimetria		Brix
		Sacarose (g/L)	Sacarose/Brix	Sacarose (g/L)	Sacarose/Brix	
1	CC	144,68	10,18	161,05	11,33	14,21 ± 0,10
2	CE1	152,53	9,74	177,78	11,35	15,66 ± 0,07
3	CE2	169,30	9,95	193,36	11,37	17,00 ± 0,16
4	CE3	193,50	10,40	211,73	11,38	18,59 ± 0,17
5	CE4	194,75	10,43	216,39	11,59	18,66 ± 0,12
6	CE5	217,10	10,23	240,81	11,35	21,21 ± 0,12
7	CE6	253,04	10,26	281,16	11,41	24,64 ± 0,21
8	CE7	298,22	10,84	306,78	11,15	27,51 ± 0,20
9	CE8	411,63	10,93	421,88	11,20	37,66 ± 0,16
10	CE9	482,59	10,89	487,98	11,1	44,31 ± 0,09
11	CE10	533,89	11,01	549,38	11,32	48,49 ± 0,20
12	CE11	623,25	11,20	618,23	11,11	55,63 ± 0,15
13	CE12	817,67	11,99	822,93	12,07	68,16 ± 0,15

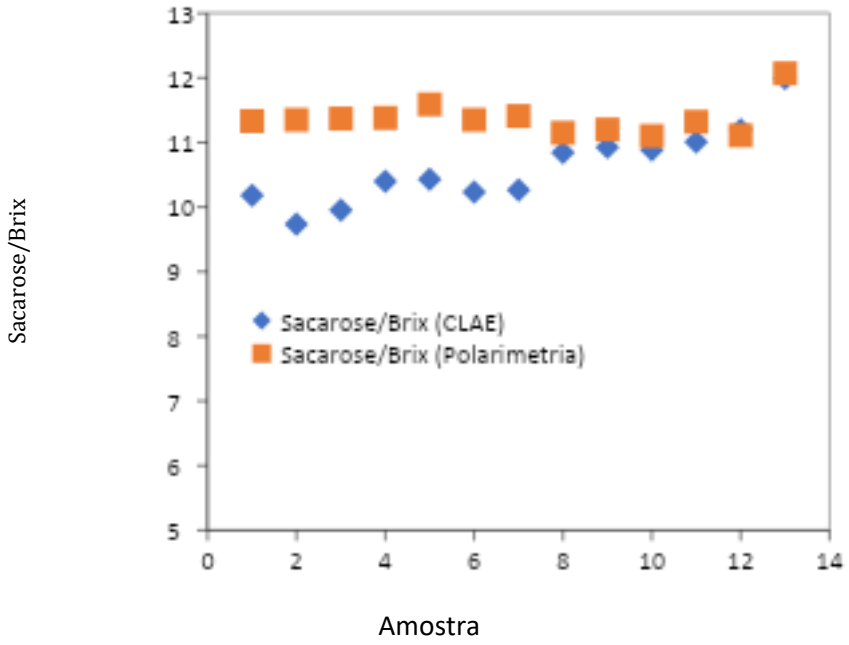
Fonte: elaborada pelo autor (2025).

Nota: ART = Açúcares redutores totais. CC = caldo clarificado. CE = Caldo evaporado.

Observando no Gráfico 7, o comportamento das relações sacarose/brix com o processo monitorado por CLAE e por polarimetria, é possível verificar que, quando as concentrações de sacarose foram determinadas por CLAE, decréscimos na relação sacarose/brix puderam ser

verificados com maior precisão. Dessa forma, relatórios mais rápidos e dados mais corretos do processo também podem ser gerados.

Gráfico 7- Relação sacarose/brix



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

É importante destacar que, análises realizadas por diferentes métodos podem apresentar diferenças nos resultados (Ogando *et al.,* 2022). Nesse estudo, o processo de evaporação foi monitorado por técnicas de rotina em indústrias de produção de açúcar e por cromatografia, uma técnica que até o momento, não é amplamente explorada nesse setor. Foi possível perceber que ambas as metodologias utilizadas, evidenciaram a mesma tendência ao longo do processo de evaporação e podem mostrar indicadores que justificam a intervenção no processo. Entretanto, a cromatografia é reconhecidamente uma técnica mais precisa e eficiente, e que pode fornecer resultados mais confiáveis em uma indústria de açúcar.

6 CONCLUSÃO

Na operação da planta industrial, o planejamento e a padronização fazem grande diferença. Planos de produção e balanços ajudam consideravelmente na definição da condução do processo. Os resultados apresentados são relativos à qualidade da cana-de-açúcar e ao tempo climático do momento do estudo. Variações climáticas, condições de manejo na cultura e mudanças no processo da fábrica durante a safra podem alterar os dados obtidos neste estudo.

Os cálculos teóricos de vazão dos evaporadores estiveram próximos daqueles indicados nos sensores dos evaporadores dado que, mesmo assim é recomendável o uso de sensores de vazão em todas as entradas e saídas dos evaporadores permitindo um melhor acompanhamento, e assim, reduzindo possíveis falhas e perdas no processo.

Os dados da quantidade de água evaporada e a taxa evaporativa indicaram diminuição desses parâmetros em um dos evaporadores, indicando que é necessário um melhor acompanhamento no tempo de residência do caldo nos evaporadores.

As análises realizadas nesse estudo permitiram verificar em alguns pontos do setor evaporativo, possíveis perdas no processo. Os resultados obtidos podem indicar possíveis melhorias no setor de evaporação da usina, evitando perdas, elevando a produtividade e lucratividade por meio da redução dos custos de produção.

As análises físico-químicas e os cálculos realizados permitiram verificar o valor das perdas em sacas de açúcar e o valor em reais. Permitiram também o monitoramento adequado do setor, mesmo que alguns investimentos, como por exemplo, a instalação de sensores de vazão em todos os equipamentos seja importante para um mapeamento mais preciso. Os interferentes como vazão, brix, pureza, temperatura, AR e ART podem ser acompanhados de forma mais sistemática para minimizar mais rapidamente possíveis perdas no processo.

A pureza do caldo apresentou reduções, chegando a 77,77% no penúltimo evaporador (CE11) e em seguida, retornou para 82,75 % em C12.

As análises por cromatografia líquida seguiram a tendência das análises por titulometria. Entretanto, diversos estudos evidenciam que as análises por CLAE são mais precisas, e apresentam com muito mais confiabilidade nos resultados, levando a usina a ter menos perdas e mais lucros.

Os resultados de brix e pH dos vapores condensados do vapor de escape que vem das turbinas de cogeração de energia sendo coletados na entrada dos evaporadores e dos vapores de V1/V2 e V3/V4 coletados nos tanques que ficam no setor de evaporação, indicaram que não houve significativo arraste de açúcar, sendo que os vapores condensados dos tanques de V1/V2

são utilizados no setor de cozimento e os vapores condensados dos tanques de V3/V4, retornam para serem reutilizados no processo. Já os resultados de arraste de açúcar dos multijatos são considerados como perdas, pois não são reutilizáveis no processo, devendo ser acompanhado os resultados em todos os turnos para que não haja uma perda maior.

O valor apresentado das perdas em sacas de açúcar (456 scs/dia), resultando num valor de R$ 63.575,52 por dia, indica que é preciso fazer um melhor acompanhamento dos parâmetros e das análises realizadas fato que pode auxiliar no aumento da capacidade de produção, o rendimento, reduzir custos operacionais e, ao mesmo tempo, ser cada vez mais sustentável.

REFERÊNCIAS

ALCARDE; A. R.; SILVA, F. C. da. **Geração de energia elétrica.** Brasília, DF: Embrapa, 2007. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/geracao-de-energia-eletrica. Acesso em: 03 ago. 2023.

AMORIM, H.; BASSO, L.C.; ALVEZ, D.M.G**. Métodos analíticos para o controle da produção de álcool**. Piracicaba: ESALQ, 1996.

ANDRADE, A. R. P. **Tratamento do caldo**: manual técnico da usina de açúcar Santa Terezinha**.** Santana do Paraíba: [*s. n*.], 1998.

ARAÚJO, E. C. da C. Evaporadores. *In*: ARAÚJO, E. C. da C. **Operações unitárias envolvendo transmissão de calor**. São Carlos: UFSCar, 2011 cap. 2, p. 57-101. (Coleção UAB-UFSCAR). Disponível em: http://livresaber.sead.ufscar.br/handle/123456789/668. Acesso em: 12 ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7505**: armazenagem de líquidos inflamáveis e combustíveis. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

BENETOM, B. da S. P.; MOREIRA, G. de C. **Viabilidade econômica para a construção de um tanque de armazenagem de etanol hidratado.** 2016. 22 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Agronegócios) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/item/003169542. Acesso em: 12 ago. 2023.

BOFO, D. C. dos S. **Reologia de fluidos envolvidos no processo de obtenção de bioetanol**. 2015. 168f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência de Alimentos) - Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", São José do Rio Preto, 2015. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/entities/publication/0906f062-3313-4777-bd01-f461a6897def. Acesso em: 29 jul. 2024.

BRUMATTI, G. Produtividade no Centro-Sul aumenta 19% em 2023/24 com canaviais mais jovens. **Novacana**, Curitiba, jul. 2023. Disponível em: https://www.novacana.com/noticias/produtividadecanaviaiscentrosulaumenta19%ciclo2023/24plantasmaisjovens. Acesso em: 29 jul. 2023.

CALDAS, C. **Teoria básica das análises sucroalcooleira**. Maceió: Central Analítica, 2005.

CECCHI, H M. **Fundamentos teóricos e práticos em análise de alimentos**. 2. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 2003.

CENTRO TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Manual de métodos de análises para açúcar**. Piracicaba: CTC/ Laboratório de Análises, 2005. 1 CD-ROM.

CENTRO TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Manual de métodos analíticos controle químico da fermentação.** Piracicaba: CTC/ Laboratório de Análises, 2011.

CHEN, J.C.P.; CHOU, C. C. **Cane sugar handbook**: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists. 12. ed. New York John Wiley & Sons, 1993.

CHIEPPE JÚNIOR, J. B. **Tecnologia da fabricação do álcool.** Inhumas: IFG; Santa Maria: UFSM, 2012. Disponível em: https://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_prd_industr/tec_acucar_alcool/161012_tec_fabric_alc.pdf. Acesso em: 29 jul. 2024.

CIOLA, R. **Fundamentos da cromatografia a líquido de alto desempenho**: HPLC. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.

COLLINS, C. H.; BRAGA, G. L.; BONATO, P. S. **Introdução a métodos cromatográficos**. 7. ed. Campinas: Editora UNICAMP, 1997.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Produção de cana-de-açúcar na safra 2023/24 é a maior da série histórica da Conab**. Brasília, DF: CONAB, 2024. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202404/producao-de-cana-de-acucar-na-safra-2023-24-chega-a-713-2-milhoes-de-toneladas-a-maior-da-serie-historica. Acesso em: 29 jul. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Safra 2024/25 de cana-de-açúcar encerra com produção estimada em 676,96 milhões de toneladas**. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: https://www.gov.br/conab/pt-br/assuntos/noticias/safra-2024-25-de-cana-de-acucar-encerra-com-producao-estimada-em-676-96-milhoes-de-toneladas. Acesso em: 22 abr. 2025.

CONSELHO DOS PRODUTORES DE CANA-DE-AÇUCAR, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Manual de instruções**. 5. ed. Piracicaba: CONSECANA, 2006. Disponível em: https://unicadata.com.br/arquivos/pdfs/2012/01/5a990f3b31d6d242de6185434d6f1790.pdf. Acesso em: 22 abr. 2025.

CRIVELLARO, F. P. P; PEREIRA, A. A.; FREITAS, I. R.; Dimensionamento de um pré-evaporador modelo Robert´s para concentrar caldo-de-cana. **Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica**. Madrid, v. 20, n. 2, p. 61-70, maio 2016. Disponível em: https://www.uned.es/universidad/dam/facultades/industriales/RIBIM/volumenes%20hasta%202019/Vol20N2Octubre2016/V20N2A06.pdf. Acesso em: 22 abr. 2025.

DELGADO, A. A.: CESAR, M. A. A.; SILVA, F. C. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1976.

DEMIATE, I. M.; WOSIACKI, G.; CZELUSNIAK, C.; NOGUEIRA, A. Determinação de açúcares redutores e totais em alimentos. Comparação entre método colorimétrico e titulométrico. **Publicatio UEPG**. Ciências Exatas e da Terra, C. Agrárias e Engenharias, Ponta Grossa, v. 8, n. 1, p. 65-78, 2002. DOI: https://doi.org/10.5212/publicatio.v8i01.772. Disponível em: http://www.pitangui.uepg.br/gtm/menu/volume04/artigo23.pdf. Acesso em: 16 jun. 2023.

EDYE, L.A.; CLARKE, M.A. Sucrose loss and color formation in evaporators. *In*: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 22., 1995.

Cartagerna. **Proceedings** […]. Cartagena: ISSCT, 1995. p.238- 246. Disponível em; https://issct.org/wp-content/uploads/proceedings/1995/1996%20Edye%20Sucrose%20Loss%20and%20Color%20Formation%20in%20Evaporators.pdf. Acesso em: 16 jun. 2023.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **A cana de açúcar**. Brasília, DF: Embrapa: 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/visao-de-futuro/trajetoria-do-agro/desempenho-recente-do-agro/cana-de-acucar. Acesso em: 29 jul. 2023.

ESTÁ escrito. Compositor e intérprete: Grupo Revelação. *In*: **Ao vivo no morro**. Rio de Janeiro: Deckdisc. 2009. 1 DVD.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar.** 3. ed. Piracicaba: Stab, 2011.

FERNANDES, J. P. dos. S.; SAVINO, G.; AMARANTE, A. C. G.; SOUZA, M, R. de.; SILVA, G, R. da; CIANCIULLI, M. E.; CORRÊA, M. F.; FERRARINI, M. Estudo das relações entre estrutura e atividade de parabenos: uma aula prática. **Química Nova,** Campinas, v. 36, n. 6, p. 890-893, mar. 2013. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422013000600026. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/7sxNwrKSD5WVZsSswt3hJsx/?lang=pt. Acesso em: 03 ago. 2023.

FIGUEIREDO, T. M. P. **Validação de métodos analíticos:** determinação do teor de açúcar numa amostra de produto alimentar. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2012. Disponível em: https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/20637. Acesso em: 03 ago. 2023.

FRANCISCO, B. H. **Manual de produção açucareira**: elementos para capacitação profissional. 2020. *E-book*. Disponível em: https://pt.linkedin.com/posts/bruno-francisco-68b970a0_manual-de-produ%C3%A7%C3%A3o-a%C3%A7ucareira-ele-aborda-activity-6595358778105843712-2hE. Acesso em: 29 jul. 2023.

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, 1977.

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira.** São Paulo: Editora Mestre Jou, 1969.

JAMBASSI, J. R. **Aspectos da qualidade do açúcar**: impactos de diferentes condições de armazenamento e método de classificação por espectroscopia Raman. 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017. Disponível: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11138/tde-16082017-152118/pt-br.php. Acesso em: 03 ago. 2023.

LIMA, L. R.; MARCONDES, A. A. **Álcool carburante uma estratégia brasileira.** 67. ed. Curitiba: Ed. UFPR, 2002.

LIMA, R. A. de. **Eficiência energética de evaporadores de múltiplos efeitos.** 2020. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia,

Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020. Disponível em: https://www.repositorio.ufal.br/handle/123456789/7878. Acesso em: 03 ago. 2023.

LUCENA, R, A, F.; DEMARTELAERE, A. C. F.; PRESTON, H. A. F.; PRESTON, W.; FEITOSA, S. dos S.; FERREIRA, A. dos S.; SILVA, H. F. da.; SANTOS, J. J. M. dos. Levantamento da estrutura do solo em função da colheita mecanizada em diferentes estádios da cana-de-açúcar em áreas de produção no município de Pureza-RN. **Brazilian Journal of Development**, São José dos Pinhais. v. 6, n. 9, p. 64881-64892, set. 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n9-066. Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/16106. Acesso em: 03 ago. 2023.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da fabricação do açúcar.** 2012. 56 f. Inhumas: IFG; Santa Maria: UFSM, 2012. Disponível em: http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_prd_industr/tec_acucar_alcool/161012_tec_fabric_acucar.pdf. Acesso em: 03 ago. 2023.

MARIN, F. R. **Cana:** variedades**.** Brasília, DF: Embrapa, 2022. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pre-producao/caracteristicas/variedades. Acesso em: 23 maio 2023.

MATOS, P. F. de; MARAFON, G. J. Dinâmica territorial do setor sucroenergético em Santa Vitória, Minas Gerais. **Revista Campo-Território**, Uberlândia, v. 15, n. 37, p. 1-18, ago. 2020. DOI: https://doi.org/10.14393/RCT153701. Disponível em: https://seer.ufu.br/index.php/campoterritorio/article/view/. Acesso em: 04 ago. 2023.

MATTOS, I. L.; ZAGATTO E. A. G.; JACINTHO, A. O. Spectrophotometric flow-injection determination of sucrose and total reducing sugar in sugar-cane juice and molasses. **Analytcca Chzmica Acta,** Amsterdã, v**.** 214, p. 247-257, 1988. DOI: https://doi.org/10.1016/S0003-2670(00)80446-8. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003267000804468. Acesso em: 04 ago. 2023.

MEZAROBA, S.; MENEGUETTI, C. C.; GROFF, A. M. Processos de produção do açúcar de cana e os possíveis reaproveitamentos dos subprodutos e resíduos resultantes do sistema. *In*: ENCONTRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO AGROINDUSTRIAL, 4., 2010. Campo Mourão. **Anais** [...]. Campo Mourão: FECILCAM, 2010. p. 1-10. Disponível em: http:www.fecilcam.br/anais_iveepa/arquivos/9/9-04.pdf. Acesso em: 04 ago. 2023.

MICHELENA, G.; MARTÍNEZ, A.; CERUTTI, G.; CORONEL, M.; BELL, A.; CARRERA, E.; LÓPEZ-MURGUÍA, A.; PORTUONDO, R.; MERGAREJO, L.; STEELE, F.M. Inhibitory effect on *Leuconostoc* and other bactéria. **International Sugar Journal,** United Kingdom**,** v. 108, n. 1285, p. 44-48, Feb. 2006. Disponível em: https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20063008908. Acesso em: 04 ago. 2023.

MOHAMED, Y. A.; HIGAZI, S. E. Determination of sugar in cane juices using high performance liquid chromatography (HPLC) and ultra violet UV at Kenana sugar factory – Sudan. **Journal of Chemical and Pharmaceutical Research,** Haryana**,** v. 8, n. 12, p. 71-75, Jan. 2016. Disponível em: https://www.jocpr.com/archive/jocpr-volume-8-issue-12-year-2016.html. Acesso em: 29 jul. 2023.

NOTÍCIAS AGRÍCOLAS. **Cotações e preços do açúcar e etanol**. [*S. l.*]: Notícias Agrícolas, 2025. Disponível em: https://www.noticiasagricolas.com.br/cotacoes/sucroenergetico/acucar-cristal-cepea. Acesso em: 28 mar. 2025.

NUNES, J. L. S. Importância econômica da cana-de-açúcar**. Agrolink**, [*S. l.*], 2020. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/cana-de-acucar/informacoes-da-cultura/informacoes-gerais/importancia-economica-da-cana-de-acucar_438260.html. Acesso em: 29 jul. 2023.

OGANDO, F. I. B.; SANTOS, C. B.; NOUER, P. A.; ALVES, M. E.; AGUIAR, C. L. Control of reducing sugars in sugarcane bioenergy industries by colorimetric methods: Is it always possible? **Revista Brasileira de Tecnologia Industrial**, Francisco Beltrão, v. 16, n. 2, p. 3936-3953, dez. 2022. Disponível em: https://periodicos.utfpr.edu.br/rbta/article/view/15265. Acesso em: 29 jul. 2023.

PACE, L. W. B. **Introdução ao tratamento de águas industriais**. Campinas: Buckman Laboratórios .1997.

PAULINO, O. F. T. **Produção de açúcar**. [Araras]: UFSCar, [2015?]. 103 slides. Disponível em: http://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840855/LOQ4023/Producao-de-Acucar-materialdeapoio.pdf. Acessado em: 23 fev. 2025.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana.** São Paulo: Nobel, 1989.

PEREIRA, M. J.; SANTOS, R. L. dos; SILVA, C. J. C da.; ATAIDE, L. dos S. C.; SANTOS, R. V. de S.; MONTE, I. R. do; SILVA, I. C. da; SANTOS, J. A dos.; SANTOS, M. B. da C. Development of sugarcane varieties under foliar application of Nitrogen. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 8, p. 1-18, jul. 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5359. Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5359. Acesso em: 20 jan. 2025.

PROCKNOR, C; **Taxa de evaporação.** São Paulo, 2002. Disponível: https://www.procknor.com.br/br/artigos/taxa-de-evaporacao. Acesso em: 28 fev. 2025.

RIBANI, M.; BOTTOLI, C. B. G.; COLLINS, C. H.; JARDIM, I. C. S. F.; MELO, L. F. C. Validação em métodos cromatográficos e eletroforéticos, **Quimica Nova**, Campinas, v. 27, n. 5, p. 771-780, out. 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422004000500017. Disponível em: https://www.scielo.br/j/qn/a/bq5SjVnnKptZkf8NnK6kqRc/?lang=pt. Acesso em: 29 jul. 2023.

RIPOLI, T. C. C.; RIPOLI, M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar**: colheita, energia e ambiente. Piracicaba: Barros & Marques. 2004.

SALMOS 23. *In*: **Bíblia sagrada**. Tradução: João Ferreira de Almeida. 2. ed. Barueri: Sociedade Bíblica do Brasil, 2012.

SAMPAIO, A. F. R. A.; ALVES, L. C. de F. **Panorama da indústria do etanol combustível no Brasil**. 2011. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia

Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/18613. Acesso em: 29 jul. 2023.

SANTOS, E. J. N.; FRAGA, F. E. N. **A importância do tratamento e cuidados com a água de caldeira**. 2017. 10 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufersa.edu.br/server/api/core/bitstreams/bf261e6d-a00c-47fb-9be9-f48302aa3bca/content. Acesso em: 29 jul. 2023.

SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (ed.). **Cana-de-açúcar**: bioenergia, açúcar e etanol: tecnologias e perspectivas. 2. ed. Londrina: Mecenas, 2012.

SANTOS, L. de O.; BARBOSA, S. A.; RIBEIRO, W. F. Análise da qualidade da água da chuva para uso em caldeiras industriais. **Interfaces Científicas - Saúde e Ambiente**, Aracaju, v. 5, n.1, p.163-172, 2016. DOI: http://doi.org/10.17564/2316-3798.2016v5n1p163-172. Disponível em: https://periodicos.set.edu.br/saude/article/view/3735. Acesso em: 29 jul. 2023.

SANTOS, P. C. dos. **Método de cromatografia líquida de alta eficiência com detector evaporativo de espalhamento de luz para a determinação de Biciclo [2.2.1] Heptano-2,3-dicarboxilato de Sódio**. 2008. 72 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/16124. Acesso em: 29 jul. 2023.

SILVA, P. R. S. **Simulação dinâmica e otimização de evaporadores de múltiplos efeitos em biorrefinarias.** 2013. 167 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: https://portal.peq.coppe.ufrj.br/index.php/dissertacoes-de-mestrado/2013-1/44-simulacao-dinamica-e-otimizacao-de-evaporadores-de-multiplos-efeitos-em-biorrefinarias/file. Acesso em: 29 jul. 2023.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

SOARES, M. S. da S.; CUNHA, C. J. C. M. R. da; VASCONCELOS, R. L. F. de M.; SILVA, I. S. e. Estudo do processo evaporativo em indústria sucroalcooleira no município de Sirinhaém em Pernambuco. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 6, n. 6, p. 34163-34177, jun. 2020. DOI: https://doi.org/10.34117/bjdv6n6-096**.** Disponível em: https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/11117. Acesso em: 29 jul. 2023.

STOLYHWO, A.; COLIN, H.; GULOCHON, G. Analysis of triglycerides in oils and fats by liquid chromatography with the laser light scattering detector. **Analytical Chemistry**, Washington, v. 57, n. 7, p. 1342-1354, Jun. 1985. DOI: https://doi.org/10.1021/ac00284a038. Disponível em: https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ac00284a038. Acesso em: 20 jan. 2025.

TAVARES, J. T. de Q.; CARDOSO, R. L.; COSTA, J. A.; FADIGAS, F. de S.; FONSECA, A. A. Interferência do ácido ascórbico na determinação de açúcares redutores pelo método de Lane e Eynon. **Química Nova**, Campinas, v. 33, n. 4, p. 805-809, mar. 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-40422010000400008. Disponível em:

https://www.scielo.br/j/qn/a/dNKDBb4SSZyrscyvcmWtJpJ/?lang=pt. Acesso em: 20 jan. 2025.

UNIÃO NACIONAL DA BIOENERGIA. **Produtividade da cana na safra 2024/2025 tem queda de 10,8%, diz CTC**. Araçatuba: UDOP 2025 Disponível em: https://www.udop.com.br/noticia/2025/01/20/produtividade-da-cana-na-safra-2024-2025-tem-queda-de-10-8-diz-ctc.html. Acesso em: 02 abr. 2025.

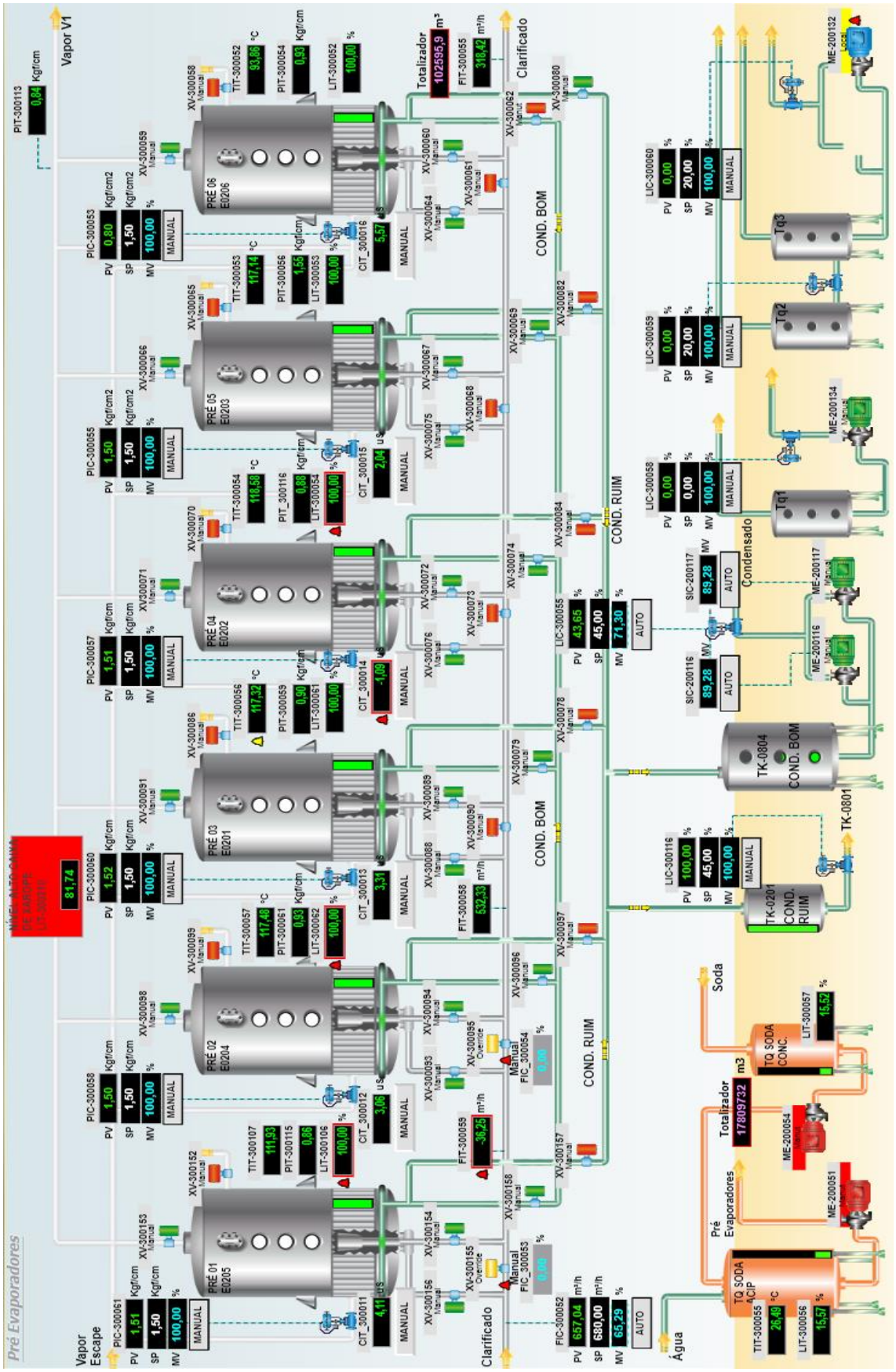
VALENTE, M. S.; NYKO, D.; REIS, B. L. S. F. S. dos; MILANEZ, A. Y. Bens de capital para o setor sucroenergético: a indústria está preparada para atender adequadamente a novo ciclo de investimentos em usinas de cana-de-açúcar? **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, n. 36, p. 119-178, set. 2012. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/1529. Acesso em: 02 abr. 2025.

VOGEL, A. **Análise química quantitativa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

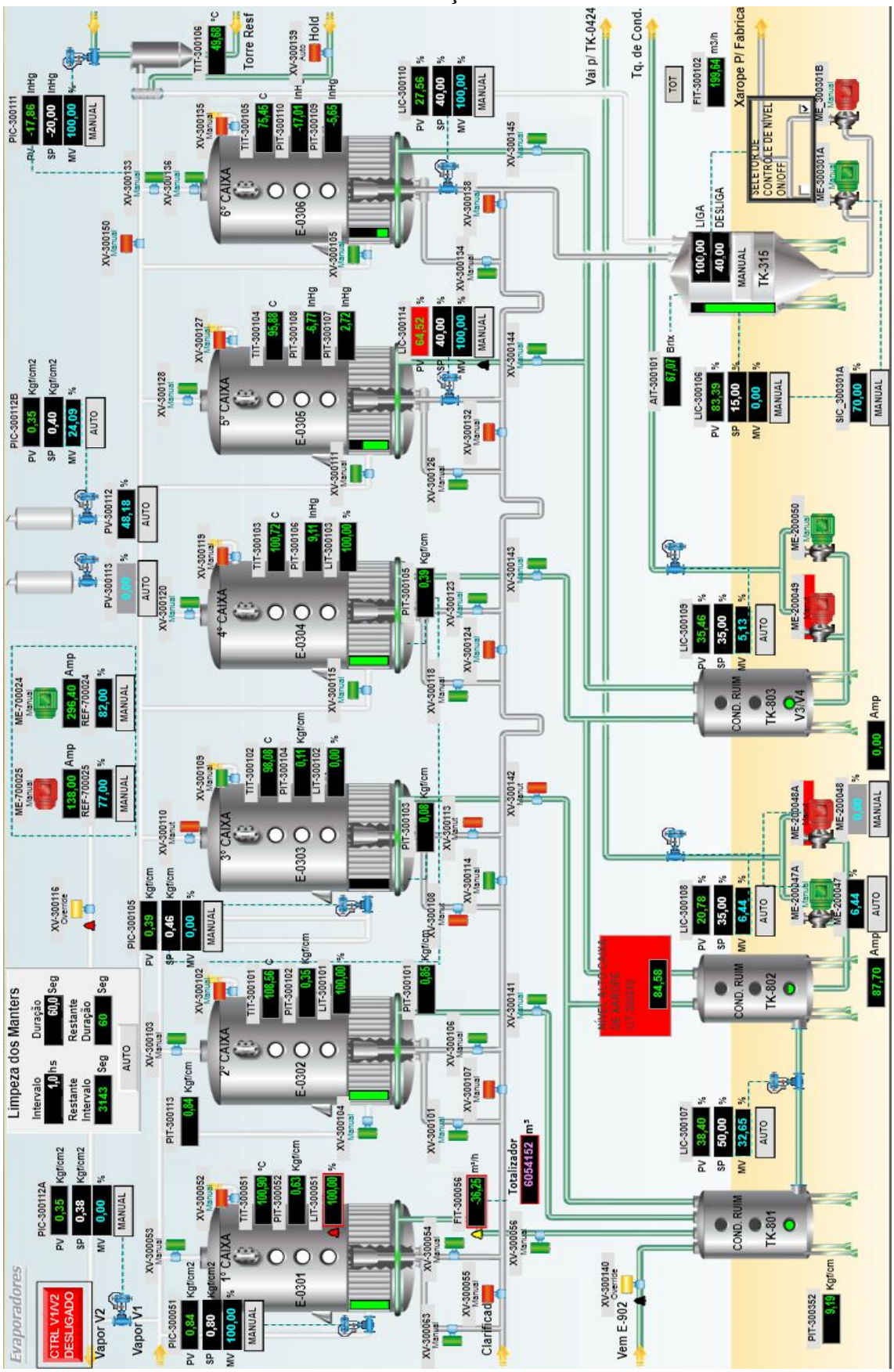
XU, W.; LIANG, L.; ZHU, M. Determination of sugars in molasses by HPLC following solid-phase extraction, **International Journal of Food Properties**, London, v.18, n. 3, p. 547-557, 2015. DOI: https://doi.org/10.1080/10942912.2013.837064. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/10942912.2013.837064. Acesso em: 20 jan. 2025.

ZENEBON, O.; PASCUET N. S.; TIGLEA, P. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos.** 2008. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. Disponível em: http://www.ial.sp.gov.br/resources/editorinplace/ial/2016_3_19/analisedealimentosial_2008.pdf. Acesso em: 16 jun. 2023.

APÊNDICE A- SISTEMA DE OPERAÇÃO DOS PRÉ-EVAPORADORES

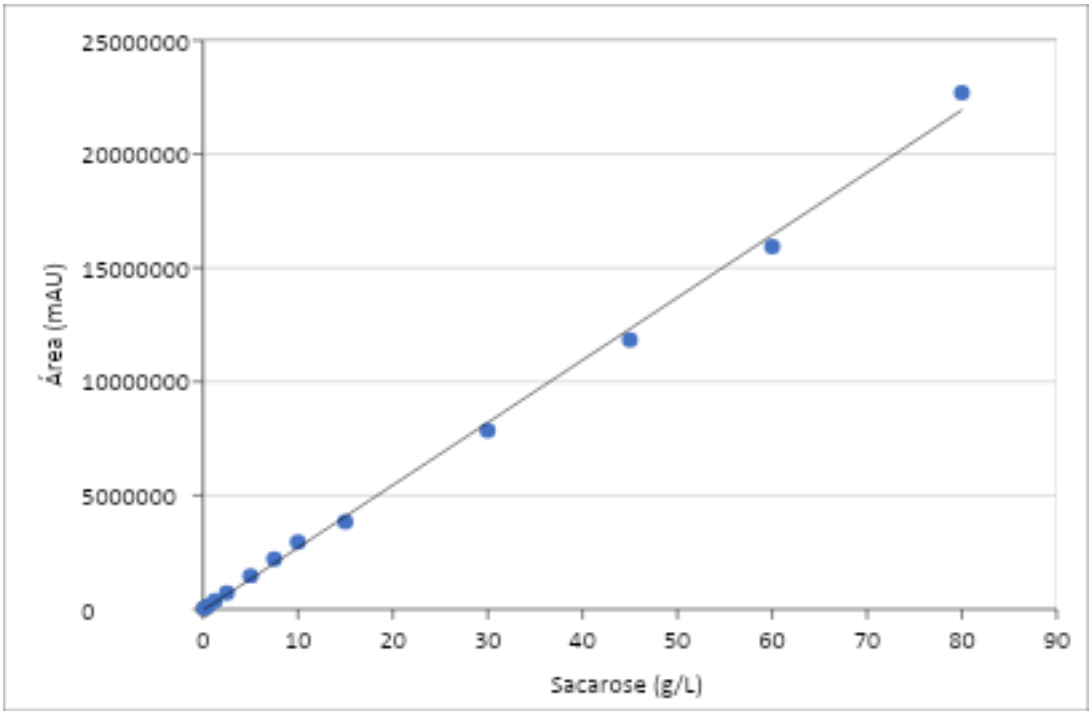


APÊNDICE B- SISTEMA DE OPERAÇÃO DAS CAIXAS EVAPORATIVAS



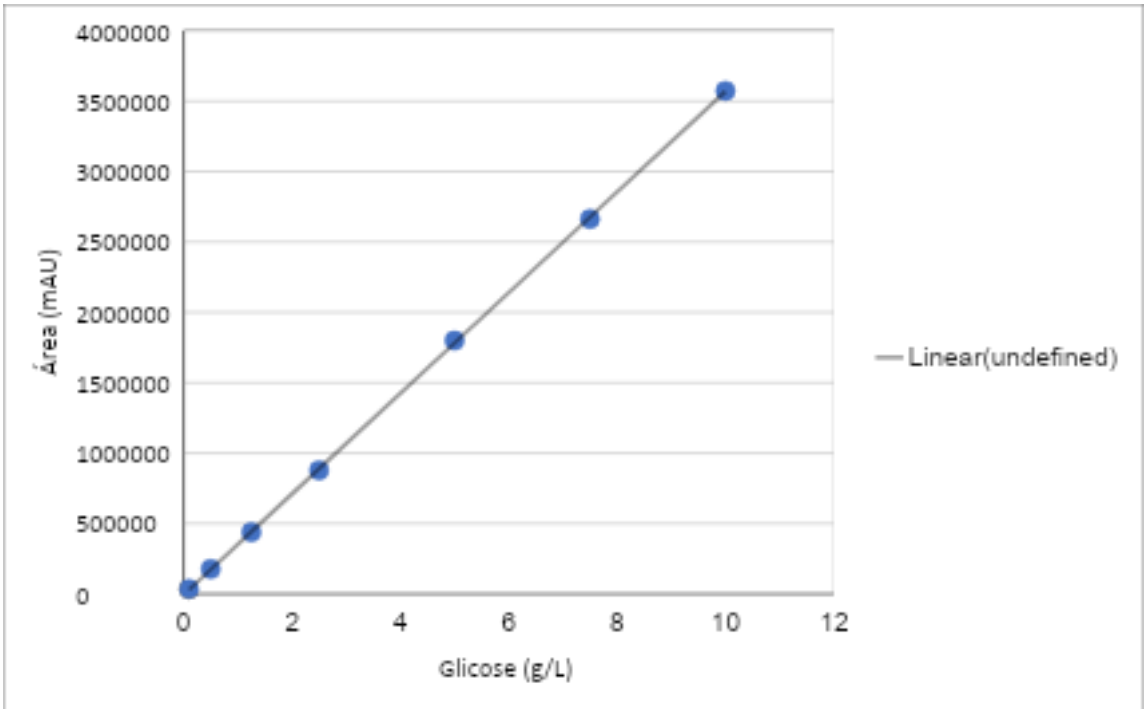
APÊNDICE C - CURVA ANALÍTICA DA SACAROSE

Gráfico 1- Curva analítica da glicose



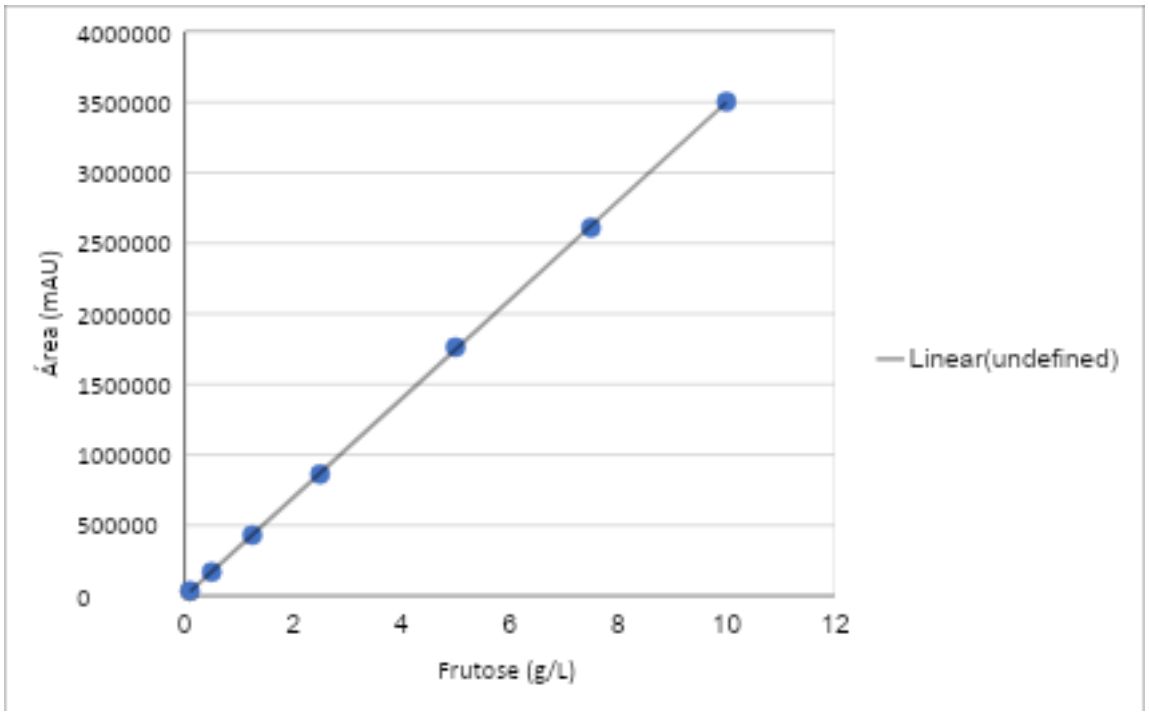
Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Gráfico 2. Curva analítica da glicose



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

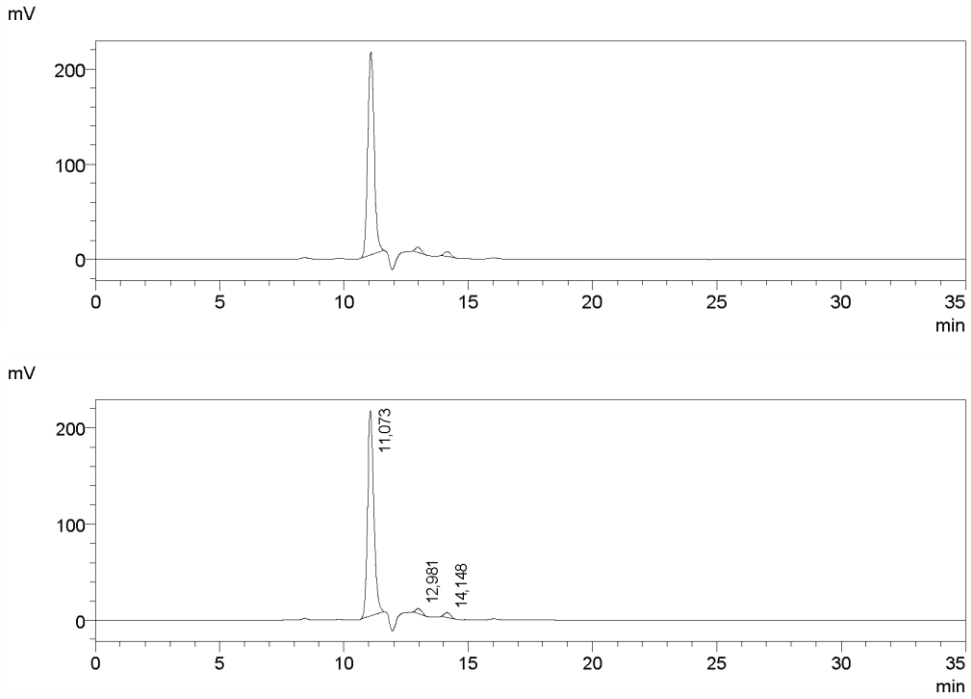
Gráfico 3- Curva analítica da frutose



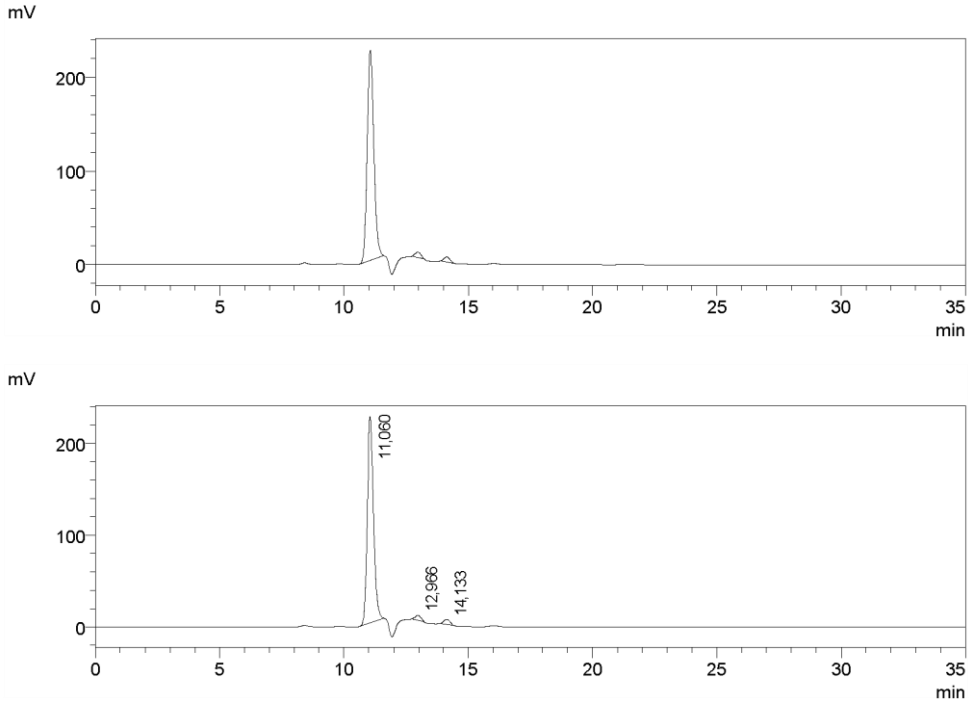
Fonte: elaborado pelo autot (2025).

APÊNDICE D- CROMATOGRAMAS

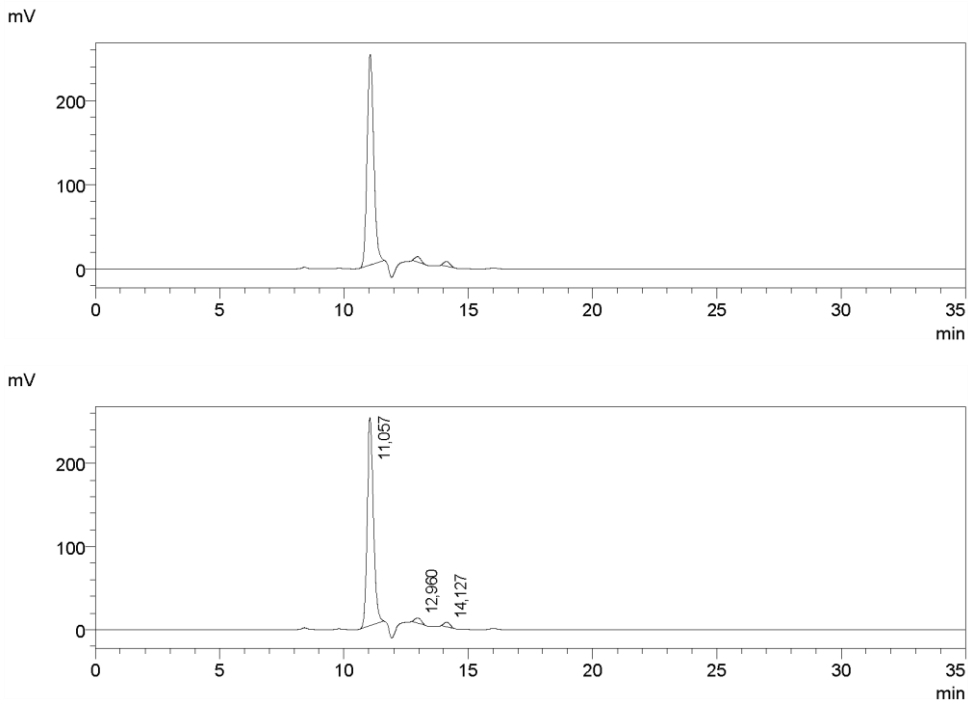
Caldo Clarificado (CC)



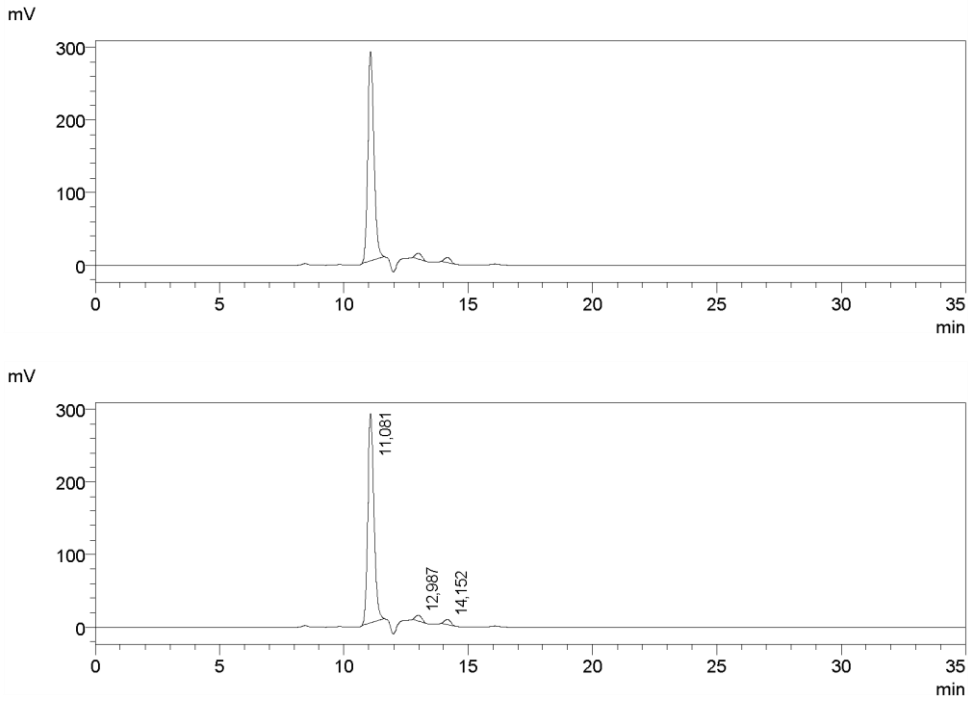
Caldo Evaporado 1 (CE1)



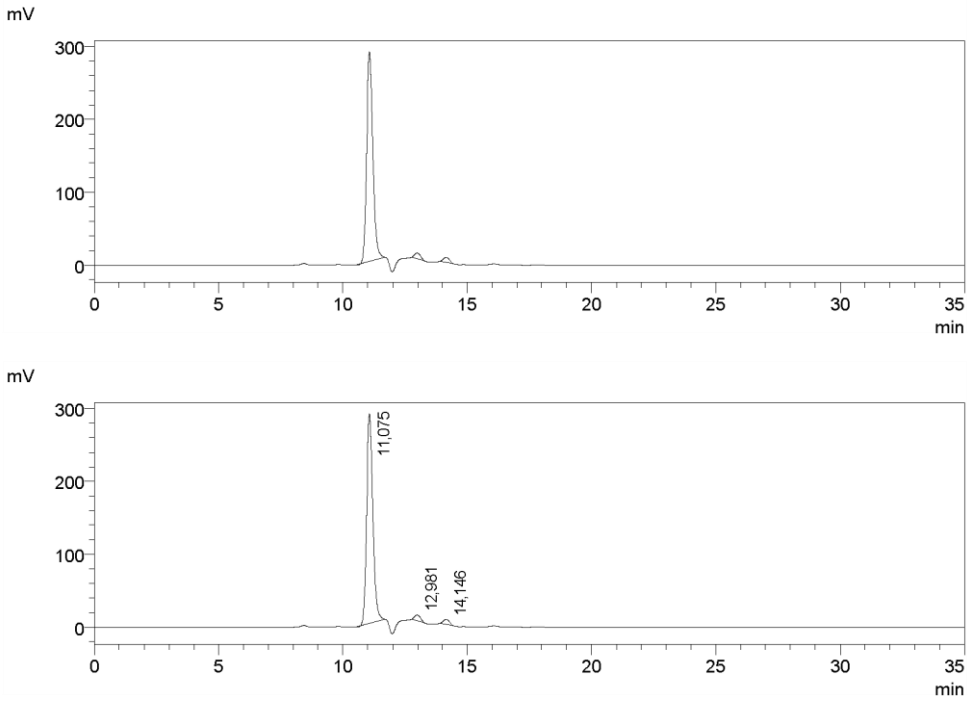
Caldo Evaporado 2 (CE2)



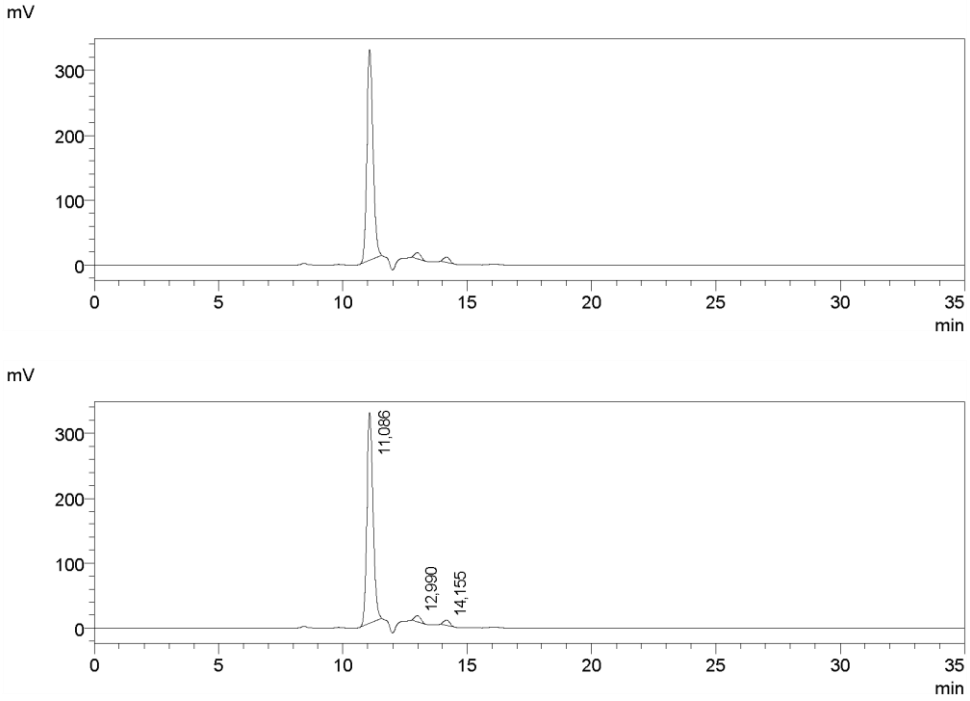
Caldo Evaporado 3 (CE3)



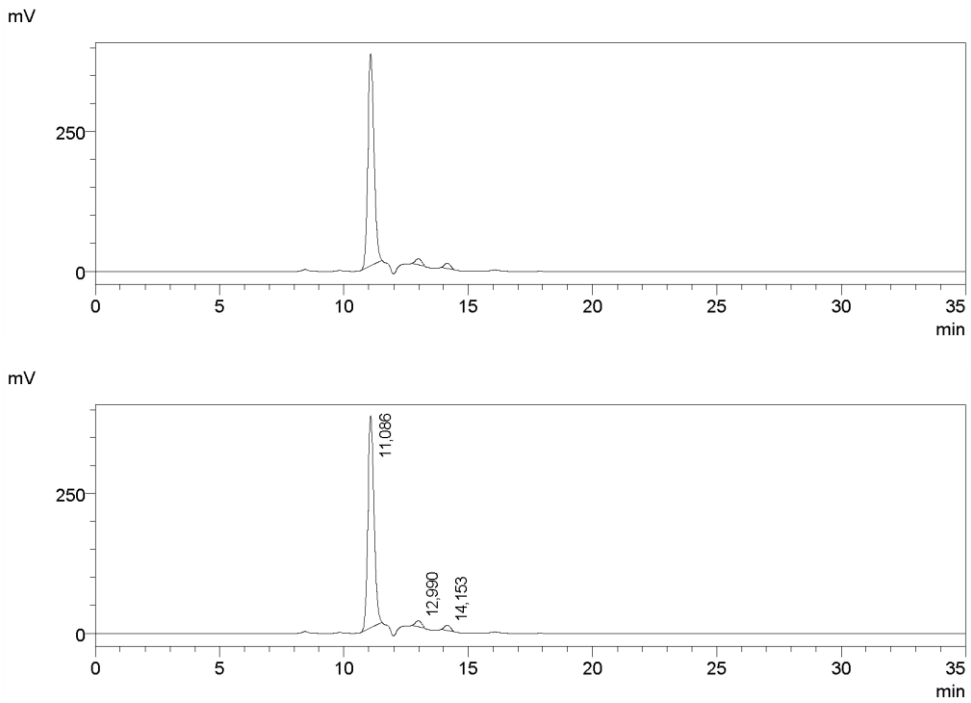
Caldo Evaporado 4 (CE4)



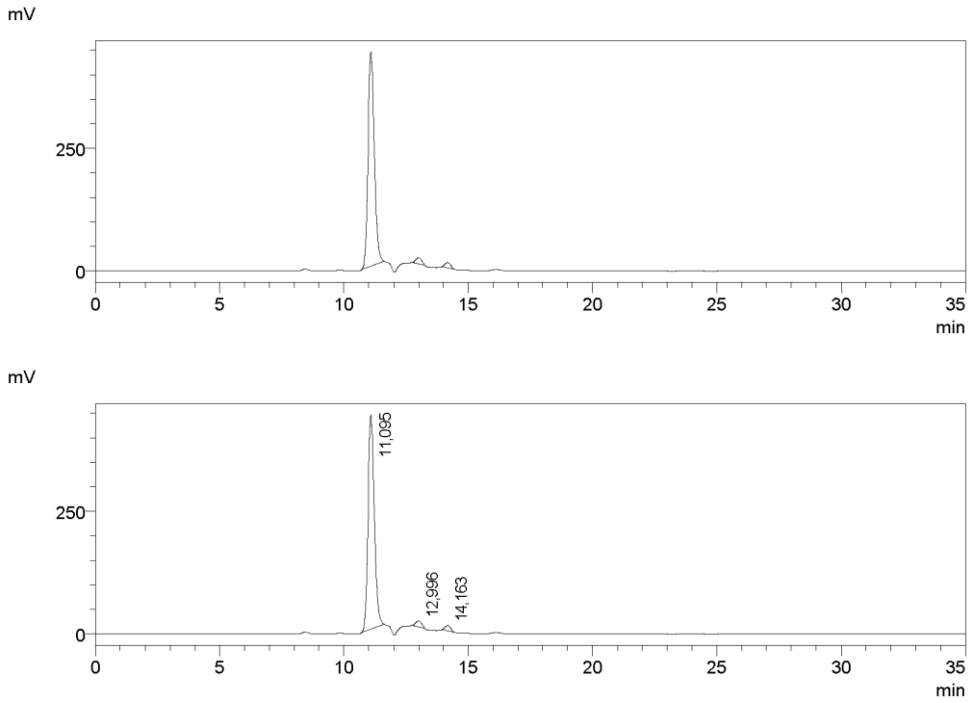
Caldo Evaporado 5 (CE5)



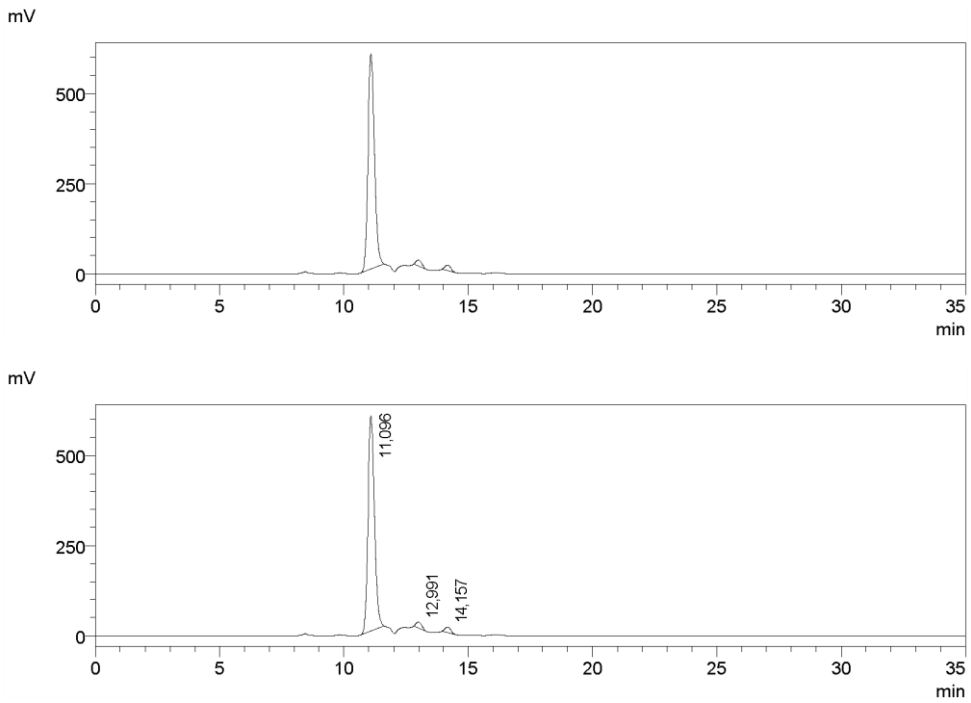
Caldo Evaporado 6 (CE6)



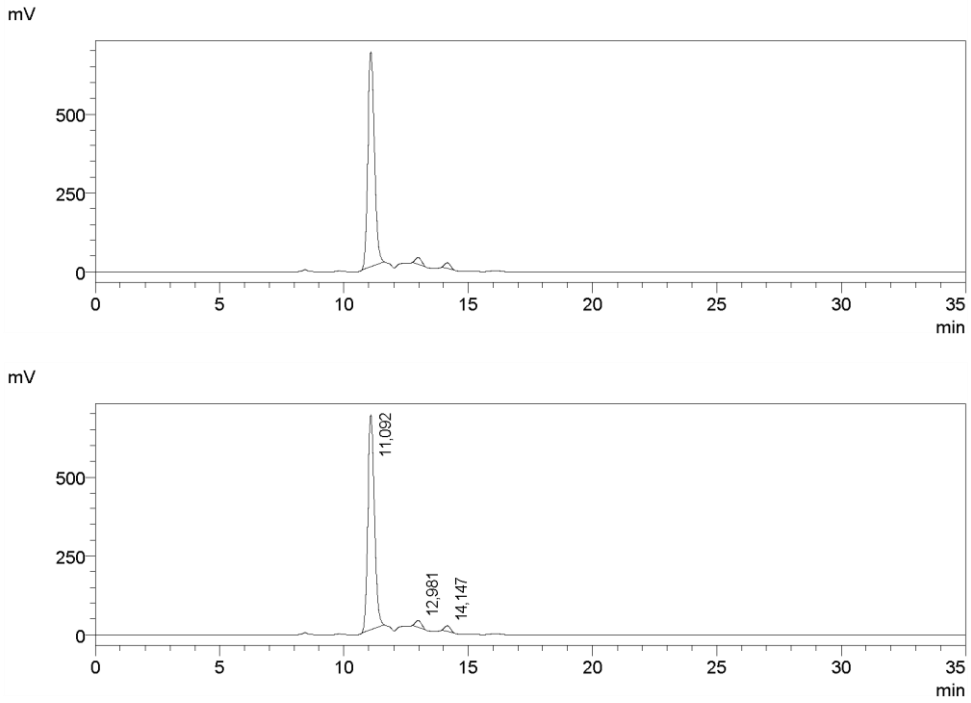
Caldo Evaporado 7 (CE7)



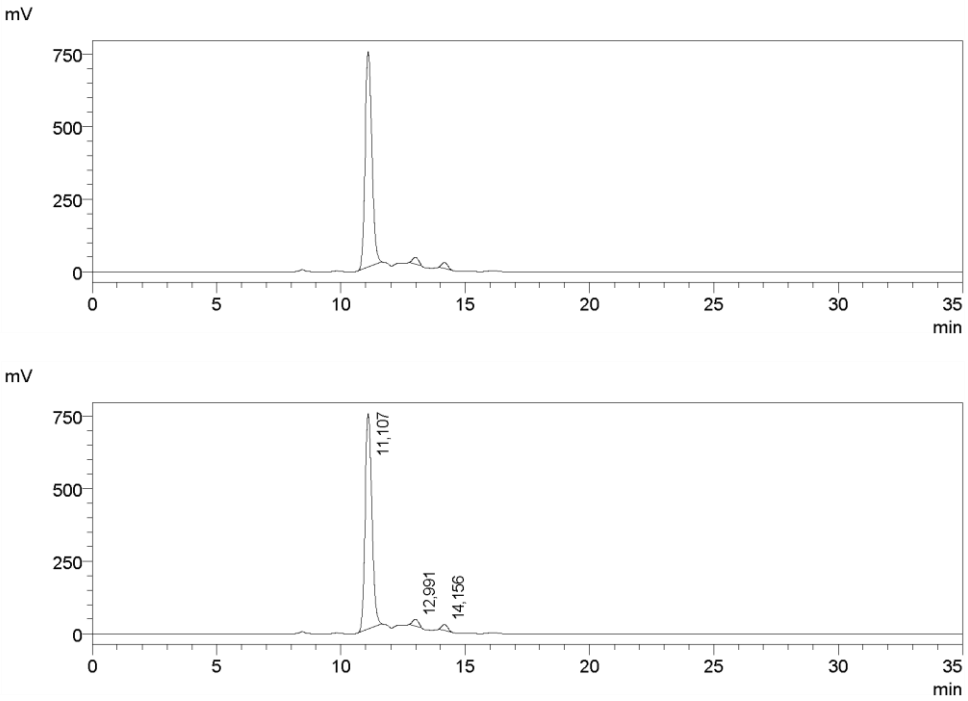
Caldo Evaporado 8 (CE8)



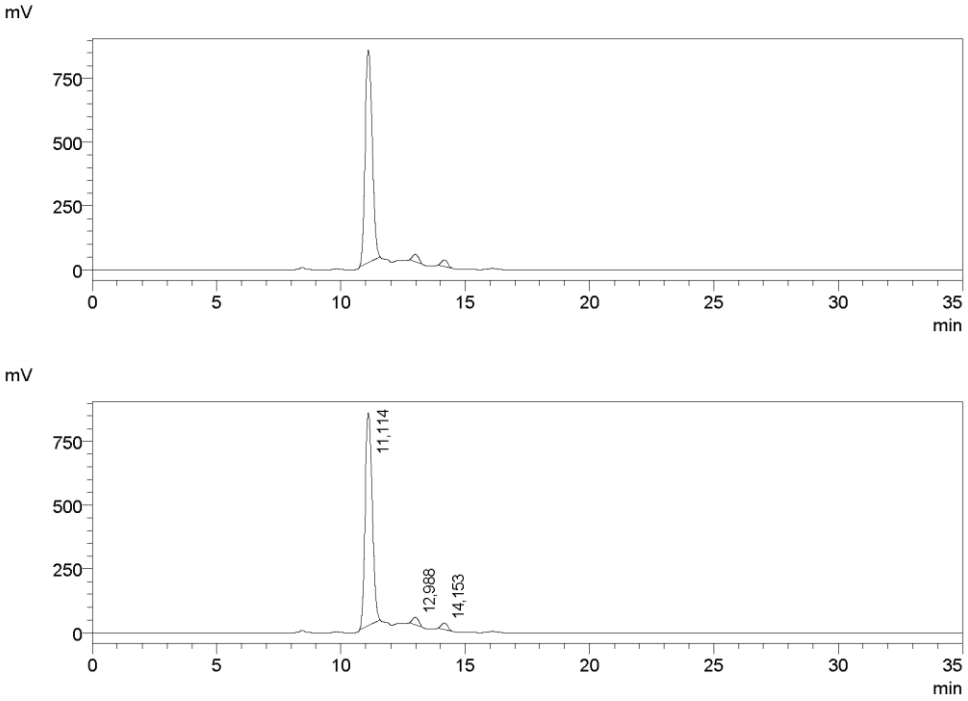
Caldo Evaporado 9 (CE9)



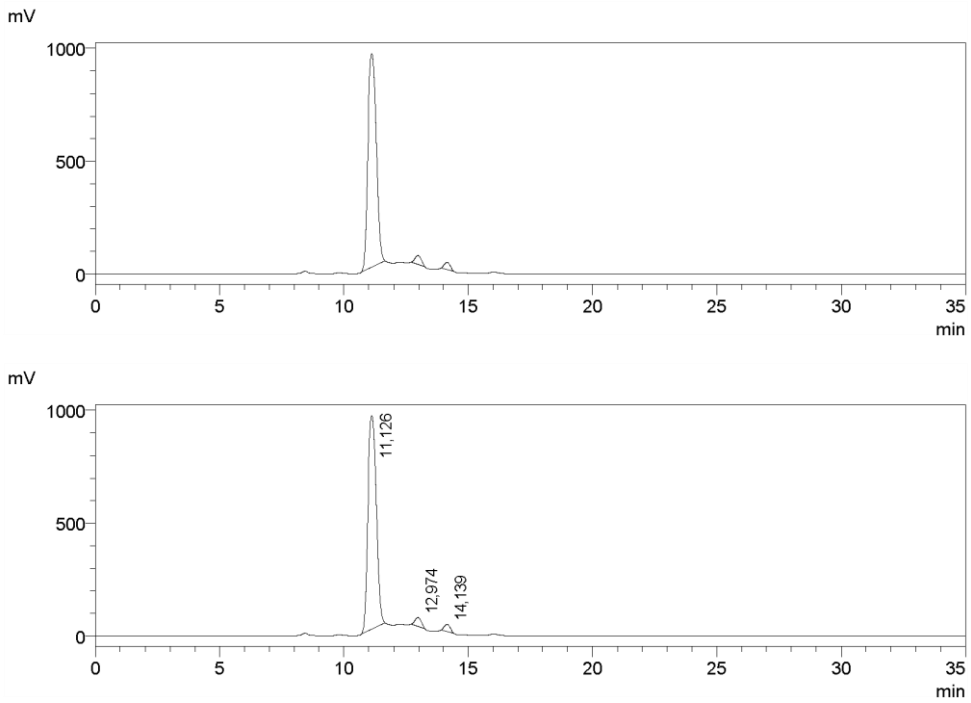
Caldo Evaporado 10 (CE10)



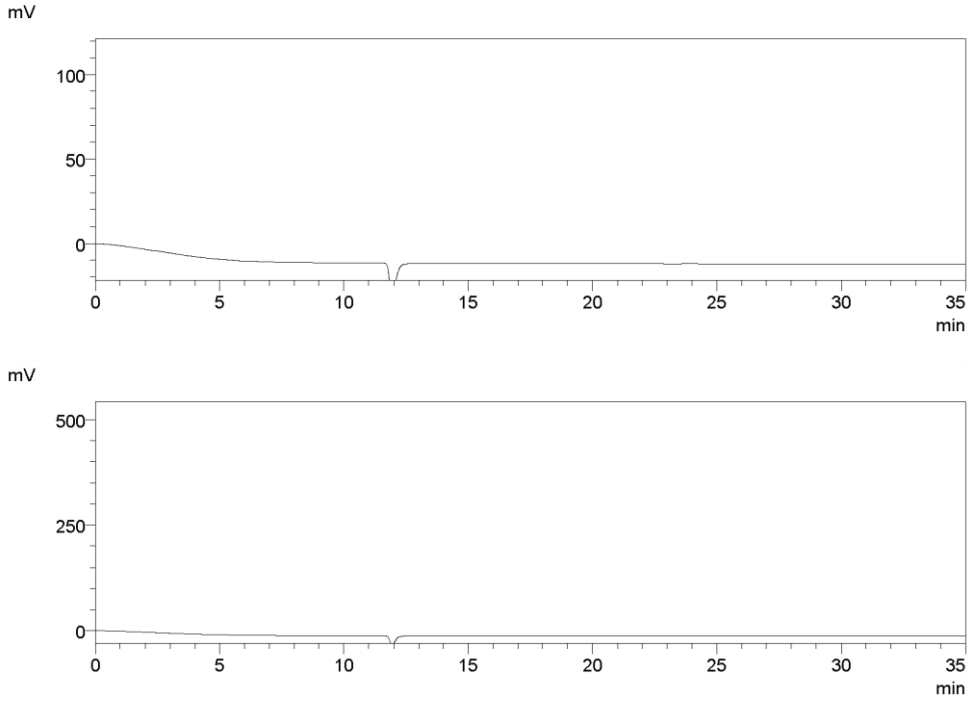
Caldo Evaporado 11 (CE11)

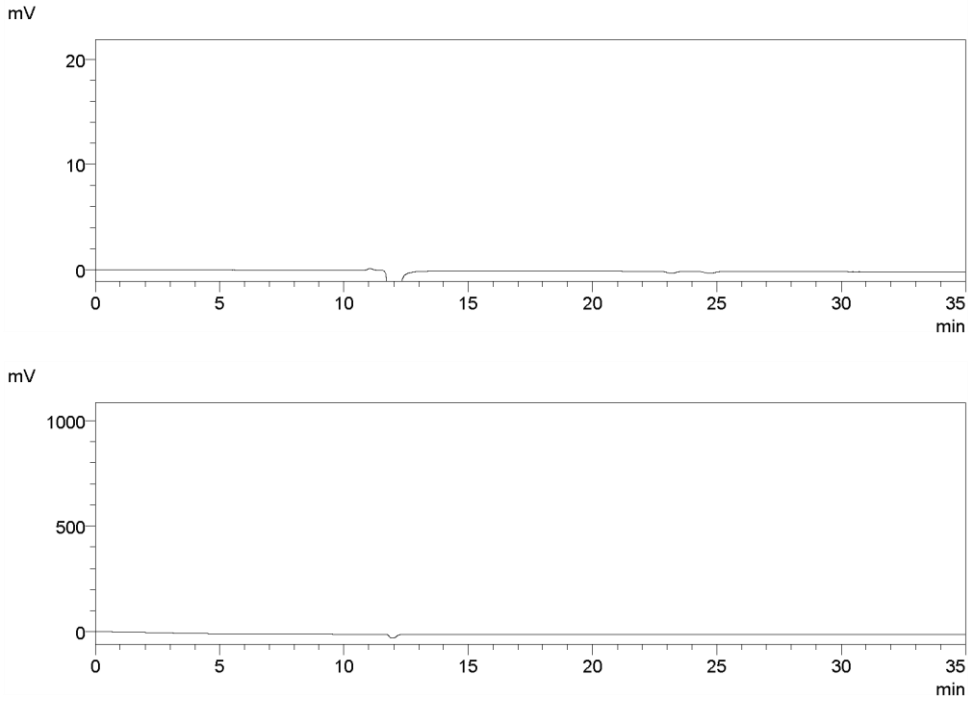


Caldo Evaporado 12 (CE12)

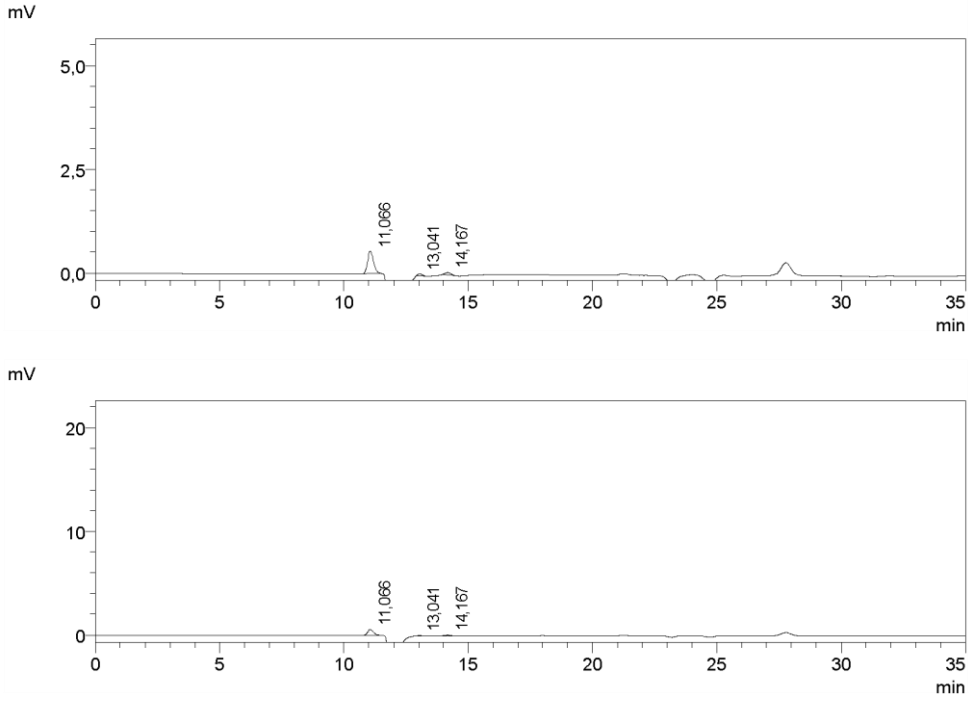


Condensado do Vapor escape (ve)

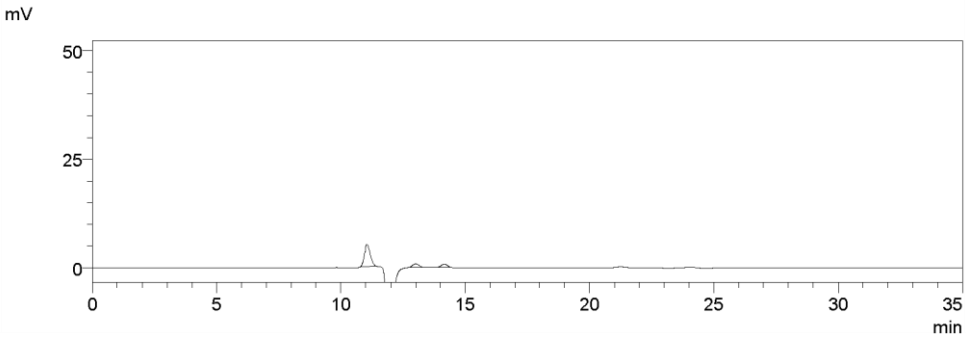


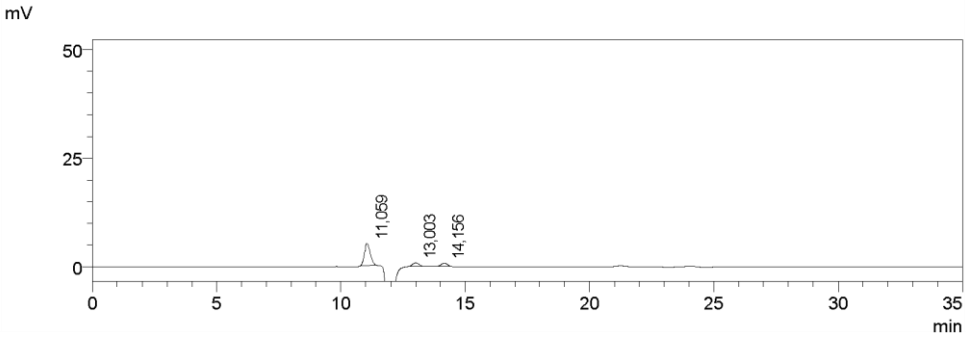


Condensado do Vapor do Tanque de V1/V2



Condensado do Vapor do Tanque de V3/V4





Condensado do Multijato

