

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
RAYSSA DA COSTA CABRAL

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM USINAS PRODUTORAS DE
AÇÚCAR E ETANOL

RIO DE JANEIRO
2022

Rayssa da Costa Cabral

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM USINAS PRODUTORAS DE
AÇÚCAR E ETANOL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadores:

Prof. Eduardo Mach Queiroz, D. Sc.

Flávio da Silva Francisco, D. Sc.

Rio de Janeiro

2022

CIP - Catalogação na Publicação

C117m Cabral, Rayssa da Costa
MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM USINAS
PRODUTORAS DE AÇÚCAR E ETANOL / Rayssa da Costa
Cabral. -- Rio de Janeiro, 2022.
180 f.

Orientador: EDUARDO MACH QUEIROZ.
Coorientador: FLÁVIO DA SILVA FRANCISCO.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos, 2022.

1. Diagrama de fontes de água. 2. Água. 3.
Etanol. 4. Emissões de carbono. I. MACH QUEIROZ,
EDUARDO, orient. II. DA SILVA FRANCISCO, FLÁVIO,
coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a) autor(a), sob a responsabilidade de Miguel Romeu Amorim Neto - CRB-7/6283.

Rayssa da Costa Cabral

MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM USINAS PRODUTORAS DE
AÇÚCAR E ETANOL

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Aprovada em: 31/10/2022



Prof. Eduardo Mach Queiroz, D. Sc., EQ/UFRJ

Lidia Yokoyama, D. Sc., EQ/UFRJ

Reinaldo Coelho Mirre, D. Sc., PV-PRH 27.1/SENAI-CIMATEC

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sei que sem Ele essa realização jamais seria possível, todos os dias e noites de angústia, medo, ansiedade, um misto de sentimentos que, se não fosse a força de Deus, eu jamais conseguiria enfrentar mais essa etapa da minha vida. Deus sempre me fez enxergar a esperança em dias melhores após todas as provações que o mestrado me possibilitou enfrentar. Agradeço também a minha Mãezinha, Nossa Senhora Aparecida, Ela, a quem eu sempre pedi socorro e calma, sempre me atendeu.

Minha amada mãe tem um agradecimento especial, desde o dia em que fui aprovada no mestrado, que era o meu sonho, ela sempre me deu forças, me apoiou em tudo, segurou minha mão e não me deixou desistir em momento algum. Mãe, sem você eu não teria chegado até aqui, obrigada por sempre cuidar tão bem de mim, por me apoiar, por me ouvir e me entender, por enfrentar comigo os meus medos durante o mestrado, pelo apoio e principalmente por não me deixar desistir, obrigada por investir tanto em mim e mais ainda por acreditar em mim, eu te amo e essa vitória eu dedico a você.

Ao meu querido pai, que não me acompanhou nessa etapa da vida e que também era um sonho dele, sou grata por todos os ensinamentos que deixou para mim, suas palavras de força me acompanham até hoje e eu pude tê-las comigo durante o mestrado. Fico imaginando como seria se você ainda estivesse aqui, imagino o seu rosto com tanto orgulho de mim, mas isso eu devo a você pai, foi por você que eu continuei depois da sua partida e cada conquista da minha vida eu dedico a você, obrigada por ter sido o melhor pai que eu poderia ter.

Ao meu irmão, que sempre me fez enxergar a realidade e ter os pés no chão, ao mesmo tempo que me apoiou, ouviu e me levantou tantas vezes, obrigada pela compreensão dos momentos em que eu não pude ajudar ou estar presente para resolver as coisas do nosso amado pai, obrigada pelo presente maravilhoso que é o nosso Antônio Ricardo, ele trouxe muito mais leveza e esperança para a minha vida, obrigada por tudo Lipe.

Ao meu namorado Anthony, que acompanhou a maior parte do meu tempo no mestrado, sempre me deu forças e foi meu ânimo nos dias mais exaustivos e difíceis, quando pensei que não teria saída, ele trouxe calma para o meu coração e me ensinou a confiar mais em mim, obrigada por tudo Toninho.

Aos meus avós, Eraldo que sempre me trouxe palavras de conforto, presente em praticamente todos os momentos da minha vida, sempre me dando forças e me lembrando do quanto que eu sou capaz, e Vó Laide por ser tão fã dos netos, por fazer as comidas que sempre trouxeram a sensação de aconchego para os dias mais difíceis. Eu amo muito vocês.

Às minhas primas-irmãs, Laysa, Júlia, Junny Lyss, Mari, Maíra e minha mãe postiça Laís, que sempre me ouviram nos dias mais difíceis e nunca me deixaram desacreditar de mim, sempre me ajudaram com palavras que me fortaleceram, obrigada por tudo meus amores. À minha cunhada Cibelle, que nunca mediu esforços para me ajudar em tudo que precisei, sempre me ouviu e me aconselhou, é uma irmã que ganhei.

Agradeço aos meus orientadores Flávio Francisco, que segurou minha mão quando eu me vi sem rumo no mestrado, agradeço demais todo o apoio e os “puxões de orelha” que me fizeram aprender a seguir pelo melhor caminho, e ao professor Eduardo Mach que foi o responsável pelo meu interesse na disciplina de Integração de Processos, agradeço todo o apoio e aprendizado.

Agradeço o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de PD&I da Resolução ANP nº 50/2015 e à FINEP, agradeço também à Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma fizeram parte dessa caminhada tão difícil, seja de forma direta ou indireta.

RESUMO

CABRAL, Rayssa da Costa. **MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM USINAS PRODUTORAS DE AÇÚCAR E ETANOL**. Rio de Janeiro, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Diante da escassez dos recursos hídricos e da emissão crescente de gases de efeito estufa (GEEs) no Brasil e no mundo, torna-se necessário focar na questão ambiental no intuito de racionalizar o uso de recursos hídricos e reduzir as emissões de GEEs. As maneiras mais eficientes para isso podem ser representadas por meio da reciclagem e do reuso, que reduzem o consumo de água em processos industriais. Estes expedientes são alternativas para reduzir o consumo de água nas indústrias, buscando a otimização do seu consumo e da geração de efluentes, que é uma das principais causadoras do descarte de poluentes pelas indústrias. O Diagrama de Fontes de Água (DFA) é uma ferramenta que visa orientar a adoção destas opções para uma melhor destinação das correntes aquosas, a fim de organizar o reuso destas correntes. O presente trabalho tem como objetivo aplicar o DFA em cenários de máximo reuso e de regeneração, considerando a metodologia proposta por Francisco (2022) e a regeneração com reuso para reduzir o consumo de água e conseqüentemente a geração de efluentes em usinas produtoras de etanol a partir de diferentes matérias-primas. Entre os estudos de casos avaliados, considerando diferentes layouts e usinas que usam diferentes matérias-primas, as reduções no consumo de água foram de 18% até 91,45%, além de reduzir o descarte de efluentes e a concentração de contaminantes nos mesmos, nos casos avaliados através do reuso. Os resultados apresentam também vantagens quando comparados a outras ferramentas, além da praticidade e um grande número de possibilidades que podem ser avaliadas. Isto mostra a importância do uso de ferramentas de integração de processos, principalmente o DFA, em estudos visando a redução do consumo de água.

Palavras-chaves: Minimização do consumo de água, minimização da geração de efluentes, usinas de etanol, diagrama de fontes de água.

ABSTRACT

CABRAL, Rayssa da Costa. **MINIMIZAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA EM USINAS PRODUTORAS DE AÇÚCAR E ETANOL**. Rio de Janeiro, 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2022.

Given the scarcity of water resources and the growing emission of greenhouse gases (GHGs) in Brazil and in the world, it is necessary to focus on the environmental issue in order to rationalize the use of water resources and reduce GHG emissions. The most efficient ways to do this can be represented through recycling and reuse, which reduce water consumption in industrial processes. They are alternatives to reduce water consumption in industries, seeking to optimize water consumption and effluent generation, which is one of the main causes of the disposal of pollutants by industries. The Water Source Diagram (DFA) is a tool that aims to guide the adoption of these options in the organization of the aqueous streams destination in order to establish the reuse of these streams. The present work aims to apply the DFA in scenarios of maximum reuse and regeneration, considering the methodology proposed by Francisco (2022) and regeneration with reuse to reduce water consumption and effluent generation in ethanol production plants from different raw materials. Among the case studies evaluated, considering different layouts and plants that use different raw materials, the reductions in water consumption ranged from 18% to 91.45%, in addition reducing the disposal of effluents and the concentration of contaminants in them in cases adopting reuse. The results obtained show advantages when compared to other tools, in addition to practicality, and a large number of possibilities that could be evaluated. The results show the importance of using process integration tools, especially DFA, in studies aiming to reduce water consumption.

Keywords: Minimization of water consumption, minimization of effluent generation, ethanol plants, water source diagram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -1Matriz Energética Brasileira 2022	16
Figura 2 – Etapas do processo integrado de produção de açúcar e etanol	26
Figura 3 - Ciclo neutro do etanol.	28
Figura 4 - Produção de etanol de primeira e de segunda geração.....	29
Figura 5 - Fluxograma das etapas de recepção, preparo da cana e extração do caldo.....	31
Figura 6 - Fluxograma do tratamento do caldo, etapas de pré-aquecimento, sulfitação e caleação.....	31
Figura 7 - Fluxograma do tratamento do caldo, etapas: aquecimento e decantação.	32
Figura 8 - Fluxograma de tratamento do caldo, etapa de lavagem da torta.	32
Figura 9 - Fluxograma do setor de evaporação do caldo da fábrica de açúcar.....	33
Figura 10 - Fluxograma dos setores de cozimento, cristalização e centrifugação da fábrica de açúcar.....	34
Figura 11 - Fluxograma das etapas de preparo do mosto e tratamento do mosto para fermentação.	35
Figura 12 - Fluxograma das operações de fermentação do mosto.	35
Figura 13 - Fluxograma das etapas de destilação do etanol.....	36
Figura 14 - Minimização do consumo de água fresca nas formas de a) reuso; b) regeneração com reuso; c) regeneração com reciclo.	39
Figura 15 - Representação do diagrama de fontes de água.	61
Figura 16 - Execução do diagrama de fontes de água para máximo reuso.	63
Figura 17 - Representação da rede de água para a opção de máximo reuso.	64
Figura 18 - Representação do diagrama de fontes de água com regeneração e reciclo.....	66
19 - Representação da rede de água para a opção de regeneração com reciclo.	69
Figura 20 - Representação do diagrama de fontes de água com regeneração e reuso.	71
Figura 21 - Representação do diagrama de fontes de água para a opção de regeneração com reuso.	72
Figura 22 - Representação do diagrama de fontes de água.	77

23 - Representação do diagrama de fontes de água para a opção de máximo reuso.	Erro! Marcador não definido.
Figura 24 - Representação da rede de água - máximo reuso.	80
Figura 25 - Representação do diagrama de fontes de água para opção de regeneração com reciclo.	82
Figura 26 - Rede de água para a opção de regeneração com reciclo.....	84
Figura 27 - Representação do diagrama de fontes de água para opção de regeneração e reuso.	85
Figura 28 - Representação do diagrama de fontes de água para máximo reuso.....	92
Figura 29 - Representação da rede para o estudo de caso 3 – máximo reuso.	93
Figura 30 - Representação do diagrama de fontes de água para regeneração.	95
Figura 31 - Representação da rede para o estudo de caso 3 – regeneração com reciclo.	96
32 - Representação do diagrama para o estudo de caso 3 – regeneração e reuso..	99
Figura 33 - Representação da rede para o estudo de caso 3 – regeneração e reuso.	100
Figura 34 - Representação do diagrama de fontes de água para opção de máximo reuso – estudo de caso 4.	108
Figura 35 - Representação do diagrama de fontes de água - regeneração com reciclo.	115
Figura 36 - Representação do diagrama de fontes de água - regeneração e reuso	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados da usina em estudo.....	60
Tabela 2 - Taxa de remoção do contaminante DQO.....	67
Tabela 3 - Comparação dos resultados obtidos para as diferentes possibilidades. ...	73
Tabela 4 - Dados do problema exemplo (fontes).	75
Tabela 5 - Dados do problema exemplo (demandas).	75
Tabela 6 – Cálculo do parâmetro Gw para o C1 e C2.....	77
Tabela 7 - Taxa de remoção dos contaminantes.	83
Tabela 8 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 2 para todos os cenários analisados.....	86
Tabela 9 - Dados do problema exemplo para o ácido acético.	88
Tabela 10 - Dados do problema exemplo para o ácido fórmico.	88
Tabela 11 - Vazões calculadas para o ácido acético e ácido fórmico.	89
Tabela 12 - Valores do parâmetro Gw para o AA e o AF.....	89
Tabela 13 - Valores ajustados de C out para o AA.	90
Tabela 14 - Valores ajustados de C out para o AF.....	90
Tabela 15 - Balanço de massa para os contaminantes AA e AF.	93
Tabela 16 - Balanço de massa para os contaminantes AA e AF.	96
Tabela 17 - Taxa de remoção dos contaminantes.	96
Tabela 18 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 3 (carga fixa).	101
Tabela 19 - Taxa de remoção dos contaminantes.	101
Tabela 20 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 3 (fontes e demandas).	102
Tabela 21 - Parâmetros operacionais da usina a ser modelada.	103
Tabela 22 - Dados do problema exemplo (fontes).	105
Tabela 23 - Dados do problema exemplo (demandas).	106
Tabela 24- Representação do consumo das fontes nas demandas – estudo de caso 4 - máximo reuso.....	113
Tabela 25 - Representação do consumo das fontes nas demandas – estudo de caso 4 – regeneração e reciclo.	119
Tabela 26 - Representação do consumo das fontes nas demandas – estudo de caso 4 – regeneração e reuso.	125
Tabela 27 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 4.	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
BRIX	Porcentagem de sacarose
DFA	Diagrama de Fontes de Água
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EDTA	Estação de Tratamento de Água
GEE	Gases de Efeito Estufa
GIPQ	Grupo de Integração de Processos Químicos
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ProÁlcool	Programa Nacional do Álcool
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PNL	Programação Não Linear
POL	Porcentagem em massa de sacarose aparente
STD	Sólidos Totais Dissolvidos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CENÁRIO ATUAL ENERGÉTICO E AMBIENTAL	16
1.2	BIOCOMBUSTÍVEIS	17
1.3	USO DA ÁGUA NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS	19
1.4	INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS PARA REUSO E REGENERAÇÃO DE ÁGUA	21
1.5	OBJETIVO DO TRABALHO	22
1.6	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	22
2	PROCESSO PRODUTIVO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL	24
2.1	ETANOL	24
2.1.1	<i>Cana-de-açúcar</i>	25
2.1.2	<i>Mandioca</i>	28
2.1.3	<i>Etapas de produção convencional do etanol</i>	29
3	REVISÃO DE LITERATURA	37
3.1	DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA (DFA)	44
4	METODOLOGIA	48
4.1	METODOLOGIA DE MÁXIMO REUSO	48
4.2	METODOLOGIA DE REGENERAÇÃO E RECICLO	54
4.3	METODOLOGIA DE REGENERAÇÃO E REUSO	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
5.1	ESTUDO DE CASO 1	60
5.1.1	<i>Aplicação do DFA para máximo reuso</i>	60
5.1.2	<i>Aplicação do DFA para regeneração e reciclo</i>	65
5.1.3	<i>Aplicação do DFA para regeneração e reuso</i>	70
5.2	ESTUDO DE CASO 2	74
5.2.1	<i>Aplicação do DFA para máximo reuso</i>	76
5.2.2	<i>Aplicação do DFA para regeneração com reciclo segundo a metodologia adaptada por Francisco (2022)</i>	80
5.2.3	<i>Aplicação do DFA para regeneração e reuso</i>	84
5.3	ESTUDO DE CASO 3	87

5.3.1 Aplicação do DFA para máximo reuso.....	87
5.3.2 Aplicação do DFA para regeneração com reciclo segundo a metodologia adaptada por Francisco (2022).	94
5.3.3 Aplicação do DFA para regeneração e reuso.	97
5.4 ESTUDO DE CASO 4	103
5.4.1 Aplicação do DFA para máximo reuso.....	107
5.4.2 Aplicação do DFA para regeneração com reciclo segundo a metodologia adaptada por Francisco et al., (2022).....	114
5.4.3 Aplicação do DFA para regeneração e reuso.	120
6 CONCLUSÕES.....	127
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	130
ARTIGO EM INGLÊS REFERENTE A DISSERTAÇÃO A SER SUBMETIDO	139
TRABALHOS DERIVADOS DA DISSERTAÇÃO SUBMETIDOS PARA A RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2022	177

1 INTRODUÇÃO

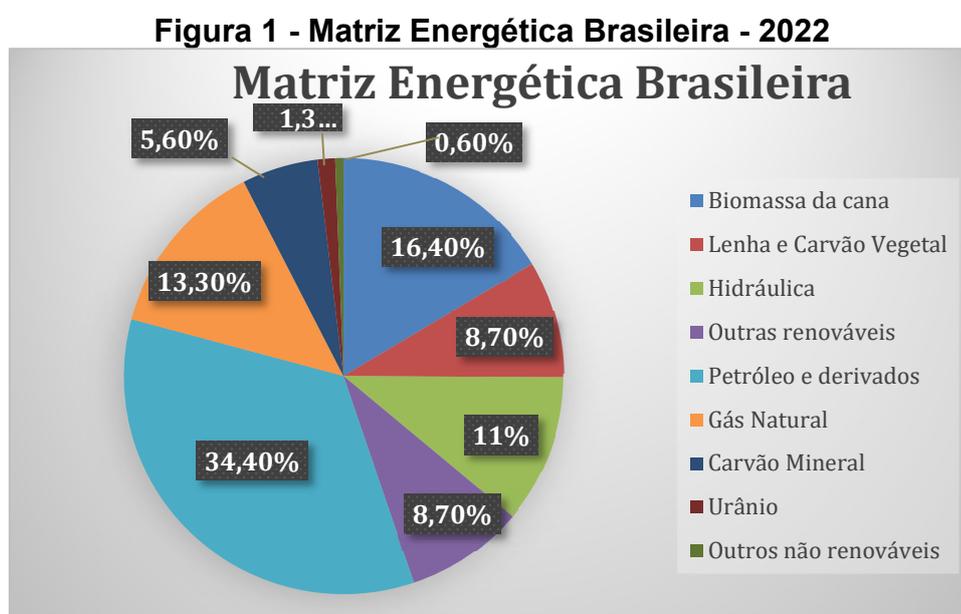
Nos dias atuais, no mundo, as indústrias têm sido pressionadas perante as questões ambientais, dentre elas destacam-se o consumo de energia, a gestão de recursos hídricos e das emissões de gases de efeito estufa (GEE). A degradação da qualidade do ar, um dos problemas ambientais mais graves mundialmente, é causada em grande parte pelo uso de combustíveis fósseis, que também têm grande colaboração para a ocorrência de chuva ácida, por exemplo. As medidas de mitigação são baseadas em uma legislação cada vez mais restritiva para o uso desses combustíveis (ANA *et al.*, 2009).

A escassez da água no planeta se tornou uma preocupação constante de ambientalistas e pesquisadores do mundo todo, com isso a busca de mecanismos para seu uso racional é objeto de inúmeras pesquisas e aplicações nos diversos setores industriais que utilizam água em seus processos (LEONE, 2018). Medidas incentivadoras foram criadas, tais como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, que são uma agenda mundial adotada durante a Cúpula das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável, em setembro de 2015, composta por 17 objetivos e 169 metas a serem atingidos até 2030 (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022).

O desenvolvimento do presente trabalho é importante para alguns desses objetivos, principalmente o ODS 6 – Água Potável e Saneamento, que visa assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos. Este objetivo possui duas importantes metas, a 6.3 e 6.4. A primeira busca, até 2030, melhorar a qualidade da água, reduzindo a poluição, eliminando despejos e minimizando a liberação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo à metade a proporção de águas residuais não tratadas e aumentando globalmente e de forma substancial a sua reciclagem e reutilização segura. Já a segunda visa, até 2030, aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores, assegurar retiradas sustentáveis e o abastecimento de água doce para enfrentar a escassez de água, e reduzir substancialmente o número de pessoas que sofrem com a escassez de água (NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2022).

1.1 CENÁRIO ATUAL ENERGÉTICO E AMBIENTAL

A matriz energética brasileira, apresentada na Figura 1, é diferente da matriz mundial, pois o Brasil utiliza mais fontes renováveis do que no restante do mundo, apesar de também empregar fontes não renováveis, como o petróleo, o gás natural e o carvão. As fontes renováveis contribuem para que o Brasil se mantenha em um patamar de energia renovável de 44,7%, que, segundo dados do EPE (2022), é um valor superior aos outros países. Entretanto observa-se uma redução quando comparado ao valor de 2020, que era de 48,5%, causada pela escassez hídrica em 2021 (EPE, 2022). Com isso, percebe-se que o Brasil, por consumir mais dessas fontes renováveis, emite menos GEE do que a maioria dos países.



Fonte: Adaptado de EPE (2022).

Os setores produtores de energia são cruciais para a melhoria da sustentabilidade mundial, pois são setores que podem contribuir para diminuição do impacto ambiental e da emissão de GEE causadas por suas atividades. Por esse motivo a agroindústria está em fase de expansão frente à demanda mundial por um combustível mais limpo e de fonte renovável, se destacando neste contexto a indústria sucroalcooleira (SANTOS *et al.*, 2015).

Devido à elevada participação da energia renovável na matriz energética brasileira – destacando o uso do etanol combustível no setor de transporte e do bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia e na geração de combustível de

segunda geração – a indústria da cana-de-açúcar e do álcool contribui para a redução das emissões de GEE na atmosfera. A indústria sucroalcooleira, por outro lado, apresenta elevado potencial de poluição devido tanto aos resíduos gerados na produção quanto à grande relevância da utilização de recursos hídricos, já que as plantas industriais utilizam grandes vazões de água em todo o processo produtivo, em especial, na lavagem da cana *in natura*, gerando um volume significativo de águas residuais (INGARAMO *et al.*, 2009; SAHU; CHAUDHARI, 2015).

A produção de açúcar no Brasil foi de 41.503 toneladas na safra 2020/2021, sendo maior do que a produção em 2019/2020, que foi de 29.606 toneladas. Enquanto a fabricação de etanol foi de 32.503 mil m³, um número menor do que a produção na safra de 2019/2020, que foi de 35.597 m³ (ÚNICA, 2021).

Atualmente, esse setor vem aprimorando seus processos para atender às especificações do mercado frente às questões ambientais, já introduzindo práticas com enfoque na minimização do consumo de água e energia (ÚNICA, 2021). Todavia, ainda há possibilidades para uma maior integração do processo produtivo, buscando uma maior redução do consumo de água e energia, a fim de promover uma maior sustentabilidade nas etapas industriais.

Para o setor de energia, o desenvolvimento sustentável deve considerar o uso mais eficiente de combustíveis baseados em fontes não renováveis; as novas tecnologias para reduzir significativamente a poluição local e global resultante dos combustíveis fósseis; e o aumento no desenvolvimento e na implementação do uso de fontes renováveis de energia.

1.2 BIOCOMBUSTÍVEIS

Os biocombustíveis são energéticos provenientes de fontes renováveis, ou seja, materiais vegetais que não sofreram o processo de fossilização. Por serem praticamente livres de enxofre, colaboram para a redução da poluição atmosférica e são considerados uma solução sustentável para substituição dos combustíveis fósseis (CBIE, 2020b). Exemplos de biocombustíveis são o etanol, o biodiesel, o biogás, entre outros. Eles são classificados como biocombustíveis de primeira,

segunda, terceira ou quarta geração, de acordo com a matéria-prima utilizada na sua produção (UNIVERSIDADE DE CORNELL, 2021).

Segundo relatório da Universidade de Cornell (UNIVERSIDADE DE CORNELL E SCIENTIFIC REPORTS, 2021), os biocombustíveis de primeira geração são aqueles produzidos a partir de espécies vegetais agrícolas, como cana-de-açúcar, milho, beterraba e trigo; são exemplos deles o etanol, biodiesel e biogás. Já a produção dos biocombustíveis de segunda geração ocorre a partir da celulose e de outras fibras vegetais existentes na madeira e em partes não comestíveis de vegetais. Essas fibras são convertidas em combustível por meio de procedimentos bioquímicos ou termoquímicos. Um exemplo importante dessa geração é o etanol celulósico.

O etanol de terceira geração é originado de espécies vegetais como, por exemplos, as algas, porém existem algumas tecnologias para modificação genética de espécies vegetais que facilitam a conversão do material em biocombustíveis de segunda geração. Há também a quarta geração que utiliza material genético das árvores, que fornecem biomassa ricas em carbono e possuem alta eficácia na captura de dióxido de carbono presente na atmosfera (UNIVERSIDADE DE CORNELL, 2021).

Os impactos ambientais na produção do etanol consideram a cultura da cana, o processamento industrial e o seu uso final, o que inclui os efeitos na qualidade do ar e no clima global, no uso do solo e sua biodiversidade, na conservação do solo, nos recursos hídricos e nos efeitos que o uso de defensivos e fertilizantes pode causar. Esses impactos podem ser positivos ou negativos; em alguns casos a indústria da cana tem resultados muito importantes, como a redução de emissões de GEE e a recuperação de solos agrícolas. A legislação ambiental brasileira é avançada e eficiente no que diz respeito as ações na cultura da cana (ANA *et al.*, 2009).

O aquecimento global e a necessidade de transição para uma economia de baixo carbono incentivam a busca por medidas regulatórias em todo o mundo, direcionando as empresas a adotarem alternativas sustentáveis para enfrentar o problema. O cultivo de plantas que possuem potencial de produção de biocombustíveis contribui positivamente para a mitigação das emissões de GEE, pois elas captam naturalmente o CO₂ da atmosfera durante sua etapa de

crescimento. A cana-de-açúcar é um exemplo desse tipo de planta, que absorve praticamente todo o CO₂ que a produção e o uso de etanol emitem (Embrapa, 2017).

1.3 USO DA ÁGUA NAS INDÚSTRIAS SUCROALCOOLEIRAS

Segundo Elia Neto (2005), os efluentes gerados em uma usina de cana-de-açúcar são a água de lavagem usada para lavar a cana ao chegar na unidade industrial; a água de condensadores barométricos e dos multijatos; a água de resfriamento de dornas e de condensadores; além de águas residuais usadas na limpeza dos equipamentos, do pátio industrial e utilidades domésticas da indústria. Segundo Jannuzzi (JANNUZZI, 2010), houve uma diminuição na quantidade de água coletada para produção de etanol, devido a algumas alterações “simples” no processo, como a substituição da lavagem da cana por lavagem a seco e modificação dos circuitos de resfriamento de mancais de moenda e turbogeradores, que passaram a ser fechados com torres de resfriamento em sistemas envolvendo cogeração.

Água e energia são recursos significativos nos processos industriais do setor canavieiro. A energia é a principal fonte de aquecimento e resfriamento da água utilizada nos processos produtivos. Além disso, a água é usada tanto na produção de energia quanto como agente de limpeza no processo produtivo, diluente da poluição ou como parte do produto final, ou seja, água e energia estão interligadas nos processos industriais (DUHBACI; ÖZEL; BULKAN, 2021).

A água nesse tipo de indústria está presente também nas utilidades, como água desmineralizada, que é usada para alimentar a caldeira, além do sistema de captação e tratamento de água e efluentes, necessário para a otimização do consumo de água no processo. A agroindústria sucroalcooleira é conhecida pelo seu potencial consumidor de água e ocasionalmente uma grande geradora de efluentes liberados pelas inúmeras etapas dos processos industriais dentro da usina. O volume de efluente gerado depende da capacidade de moagem da cana na usina e da gestão da água (KUSHWAHA, 2015).

De acordo com dados obtidos de Elia Neto (2005), uma usina com destilaria anexa e um mix de produção de 50% para açúcar e 50% para etanol, consome em

média 22 m³/t de cana. Segundo Almeida (ALMEIDA,2009), no processo de produção de açúcar e álcool são consumidos cerca de 3,6 bilhões de litros anuais de água e ainda se estima que, para cada tonelada de álcool hidratado produzido, são consumidas 125 toneladas de água.

A demanda química de oxigênio (DQO), a demanda biológica de oxigênio (DBO) e os sólidos totais dissolvidos (STD) são geralmente os principais representantes da composição dos efluentes nessas usinas. Esses efluentes também contêm, na maioria das vezes, carboidratos, nutrientes, óleos e graxas, cloretos, sulfatos e metais pesados (KUSHWAHA, 2015).

A lavagem da cana gera um efluente considerado de médio potencial poluidor em termos de matéria orgânica (180 a 500 mg/L de DBO e alta concentração de sólidos). Esse efluente possui teores consideráveis de sacarose, principalmente no caso da cana queimada, além de matéria mineral e vegetal (terra e pedregulhos aderidos). Algumas características são a temperatura média de 39,5°C; pH na faixa de 6,0; turbidez de 185 UTN; concentração de oxigênio dissolvido de 2,5 O₂ (mg L⁻¹); DBO 388; considera ausência de nitrogênio; 11 mg L⁻¹ de Potássio; e 2,2 mg L⁻¹ de fósforo (ALMEIDA, 2009).

Muitas vezes os efluentes são descartados no ambiente sem tratamentos prévios, ocasionando poluição tanto nos ambientes terrestres quanto nos aquáticos. Para evitar que isso ocorra são aplicados tratamentos como filtração e sedimentação, por exemplo, ou métodos biológicos como lagoas aeradas (KUSHWAHA, 2015). Também existe a possibilidade de reaproveitar efluentes tratados ou não nos processos.

Segundo Giordano (2004), a concentração dos poluentes nos efluentes é função das perdas no processo e/ou do consumo de água, e suas características são inerentes a composição das matérias primas. No Brasil, para controlar ações de descarte ou aproveitamento desses efluentes, existem padrões quanto a concentração dos contaminantes, que podem ser diferentes entre os Estados e as atividades. Estes padrões normalmente levam em conta parâmetros como, por exemplo, a DQO, a DBO e os sólidos totais dissolvidos.

Os principais efluentes da indústria sucroalcooleira são provenientes de equipamentos de resfriamento, colunas barométricas e multijatos, destilaria,

lavagem de gases das caldeiras, condensados, limpeza de pisos e equipamentos, vinhaça e esgoto doméstico (ANA *et al.*, 2009).

A água residuária gerada em alguns processos, se não for tratada, não pode ser reutilizada no processo e, por isso, é descartada juntamente com a vinhaça na agricultura, sendo destinada à fertirrigação no próprio solo do canavial sem a necessidade de tratamento (CRUZ, 2011). Porém, esse descarte é limitado na aplicação no campo, pois pode contaminar lençóis freáticos, ocasionar a salinização do solo, além de ocasionar maus odores, gerando impactos ao meio ambiente. Com isso, o reuso da água no processo pode ser uma solução de melhora no consumo de água e na geração de efluentes nas indústrias. Da mesma forma, a integração energética no processo pode contribuir para reduzir o consumo de energia (LEONE, 2018). Essa análise no sistema é tratada como alternativa inicial com esses objetivos, sem se esquecer da importância de um sistema de tratamento de efluentes líquidos (GIORDANO, 2004).

1.4 INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS PARA REUSO E REGENERAÇÃO DE ÁGUA

Investimentos em desenvolvimento tecnológico e na busca de soluções alternativas, para além da redução no consumo de energia, são importantes para ampliação da oferta de água através da redução do seu uso. Por exemplo, algumas ações como a utilização de água de reuso e da melhoria da eficiência na gestão da demanda da água têm tido grande aplicação no setor canavieiro e ajudam a reduzir os índices de perdas e desperdícios (SAUTCHUK *et al.*, 2005).

O balanço material de água em uma atividade industrial é uma excelente partida para o início de estudos visando a otimização do seu uso, procurando identificar oportunidades para o seu reuso. O balanço hídrico permite identificar visualmente a situação atual do processo industrial e onde intervir para reduzir a captação de água. Pode-se modificar o tipo de equipamento, o processo ou ainda a cultura da empresa e de seus funcionários por meio de diversos métodos, que podem ser organizados em algorítmicos ou baseados em métodos de otimização matemática (FIESP, 2005).

No contexto dos métodos algorítmicos, o Diagrama de Fontes de Água (DFA) surge como uma ferramenta capaz de atingir um consumo mínimo de água de maneira simples e representando as correntes de água e operações envolvidas. No algoritmo é efetuado o cálculo da meta de consumo de água primária (externa) e obtidas estruturas da rede hídrica correspondentes à meta de consumo de forma simultânea (PACHECO, 2014).

1.5 OBJETIVO DO TRABALHO

Diante da necessidade e importância de gerenciar os recursos hídricos, essa dissertação tem como objetivo principal a aplicação do Diagrama de Fontes de Água para avaliar a redução do consumo de água e da geração de efluentes, considerando a possível incorporação de processos regenerativos, em usinas integradas produtoras de etanol combustível, que empregam diferentes matérias-primas.

1.5.1 Objetivos específicos:

- Reduzir a captação de água em usinas produtoras de açúcar e etanol;
- Reduzir a geração de efluentes nessas usinas;
- Avaliar a eficácia do Diagrama de Fontes de Água nesse tipo de indústria.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A organização da dissertação se dá da seguinte forma. No presente capítulo, é apresentada uma introdução, contextualizando o trabalho, e o seu objetivo.

No Capítulo 2 é apresentado o processo produtivo de açúcar e álcool, apresentando as principais fontes e demandas de água no processo produtivo. No Capítulo 3 apresenta-se uma revisão de literatura com enfoque em trabalhos que buscam a redução do consumo de água em usinas de açúcar e álcool. No Capítulo 4 é descrita a metodologia empregada no trabalho, bem como as considerações e hipóteses necessárias para sua aplicação e validação. No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da ferramenta nos estudos de

caso efetuados. No capítulo 6 têm-se as conclusões dessa pesquisa e, por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as referências utilizadas no trabalho.

2 PROCESSO PRODUTIVO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

2.1 ETANOL

A produção integrada de etanol e açúcar tornou-se um objeto relevante de estudo no Brasil na segunda metade do século XX, pois sua difusão ocorreu tanto pela necessidade de minimizar as crises do setor açucareiro, quanto na intenção de reduzir a dependência do petróleo importado na área de combustíveis. Em 1975, durante os desdobramentos do primeiro choque do petróleo, foi criado o Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool), que buscava mitigar os efeitos da crise energética mundial na economia decorrentes das variações do preço do petróleo no mundo. Naquele ano, o Brasil importava cerca de 80% do petróleo que consumia (BiodieselBR, 2012).

O ProÁlcool foi o responsável pela inclusão do etanol na matriz energética brasileira. Na década de 1990, a diminuição no preço do petróleo e o aumento da produção de petróleo pela Petrobras foram responsáveis pela queda no comércio do etanol. Mesmo com os aumentos do preço do petróleo, o etanol não se tornava economicamente competitivo, o que demandou a criação de subsídios para incentivar o mercado nacional (BiodieselBR, 2012).

A partir de 2003, com o início da fabricação dos carros *Flexfuel*, que podem ser abastecidos com gasolina ou etanol, e com o aumento no preço do petróleo, o etanol novamente obteve destaque no mercado de combustíveis. Diante desse cenário, a produção de etanol conseguiu se expandir no Brasil com o surgimento de usinas chamadas sucroalcooleiras. No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal matéria-prima utilizada para a produção de etanol de 1ª geração, mas estudos vêm buscando novas fontes, como o bagaço de cana-de-açúcar, milho e mandioca, além de processos (alcoólquímica) para a produção de etanol de 2ª geração (EMBRAPA, 2017).

A produção industrial desse biocombustível inicia na moagem da cana. O processo convencional de produção de etanol se dá a partir do caldo da cana-de-açúcar (1ª geração) obtido na moagem. Esse processo é composto pelas seguintes etapas: recepção, lavagem (limpeza e preparo da cana-de-açúcar); extração dos açúcares (moagem); tratamento e concentração do caldo; fermentação; destilação e

desidratação (EMBRAPA, 2017). Enquanto o etanol de 2ª geração, a partir do bagaço, envolve quatro etapas: pré-tratamento para a remoção da lignina e hemiceluloses; hidrólise da celulose; fermentação da glicose; destilação e desidratação (GROSSI, 2015).

Outro processo de obtenção do etanol, que também será abordado em um estudo de caso nesta pesquisa, é a partir da mandioca. De forma análoga ao processo que usa o bagaço; há um processamento para liberação da celulose e posterior fermentação e destilação do mosto obtido. Estes últimos são similares aos presentes no processo convencional da cana (Brasil A., 2009).

2.1.1 Cana-de-açúcar

Segundo NCBI (2021), a cana-de-açúcar é uma gramínea do gênero *Saccharum* cultivada em todo o mundo. Uma planta de clima tropical com cultura perene, ou seja, sem necessidade de ser replantada todos os anos. Na colheita a cana-de-açúcar é cortada logo acima do nível da raiz para que novos brotos cresçam e fiquem prontos para serem colhidos novamente entre 10 e 12 meses. A cana serve como matéria-prima para a produção de açúcar; biocombustíveis, como o etanol e o biometanol; bebidas alcoólicas e produtos medicinais.

Grande parte da cana-de-açúcar é destinada ao setor sucroalcooleiro para a produção de etanol e açúcar. Seu processamento inicia-se com a moagem, que faz escorrer um líquido rico em sacarose, também chamado de caldo de cana. Em seguida esse caldo é fervido de forma que o excesso de água evapore formando o açúcar ou alternativamente o caldo é fermentado, levando à produção do etanol.

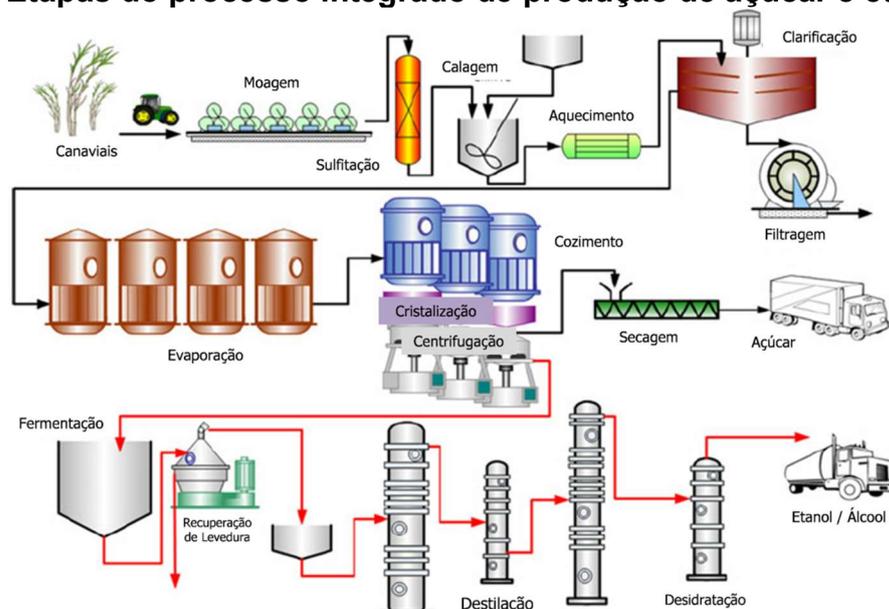
A partir da cana-de-açúcar também é possível retirar a cera, que tem propriedades importantes para a utilização nas indústrias alimentícia, farmacêutica, química, cosmética e de limpeza. Esse material tem origem na torta de filtro, um resíduo da indústria de cana, e pode ser uma alternativa às ceras vegetais, animais e sintéticas.

O setor da cana-de-açúcar contribui expressivamente (sustentabilidade responsável) para a substituição dos combustíveis fósseis, indo além da sua autossuficiência em energia (elétrica e térmica) (ANA *et al.*, 2009), podendo

aproveitar materiais que antes seriam resíduos, como o bagaço de cana, para a geração de energia; e a lignina, para produção de etanol de segunda geração.

A Figura 2 representa as etapas de produção convencional do etanol a partir da cana-de-açúcar.

Figura 1 – Etapas do processo integrado de produção de açúcar e etanol



Fonte: URV - Departamento de Engenharia Química *apud* CBIO (2020a).

Nos dias atuais, o material lignocelulósico da cana-de-açúcar tem sido aproveitado para a produção de etanol de segunda geração (etanol 2G), com o intuito de aumentar a produção de etanol por unidade de cana processada com objetivo de atender à demanda mundial, aumentando o aproveitamento dos resíduos da cana.

Segundo Grossi,

A lignina, uma macromolécula complexa, formada pela combinação dos álcoois coniferílico, sinapílico e p-cumarílico. Ela apresenta um alto poder calorífico e é produzida em grandes quantidades, como licor negro, nas indústrias de papel e celulose (GROSSI, 2015, p. 17).

Ainda de acordo com Grossi,

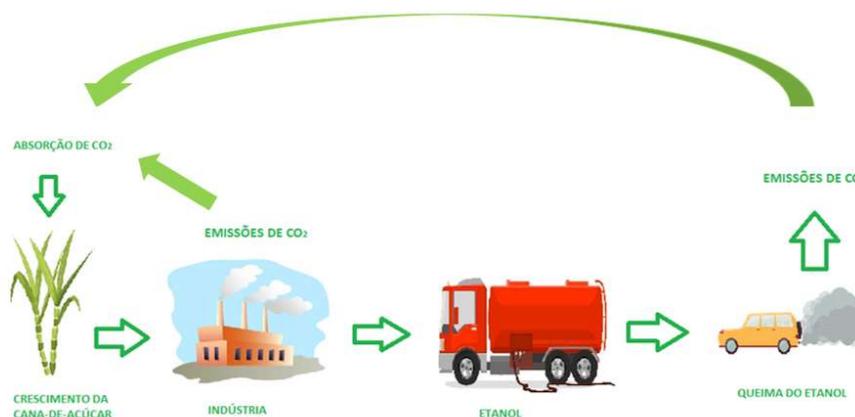
O termo lignocelulose refere-se à estrutura da parte dos vegetais que constitui a parede celular formada por fibras elementares de celulose envolvidas em uma matriz amorfa composta de polioses (hemicelulose) e lignina. Essa matriz, na qual a fibra celulósica está envolvida (lignina), constitui uma barreira para o ataque de microrganismos e enzimas, tornando o material pouco reativo e bastante rígido (GROSSI, 2015, p. 16.).

Ao comparar as emissões de combustíveis fósseis com as emissões causadas pelo uso do etanol, esse biocombustível pode ser considerado um dos mais limpos do mundo (UNICA, 2020). Entre os biocombustíveis de primeira geração, o etanol de cana-de-açúcar, por ser um biocombustível de baixo carbono, tem grande destaque devido às baixas emissões de GEE e por possuir custos menores de produção (CHAVEZ-RODRIGUEZ; NEBRA, 2010). O uso dos biocombustíveis contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa por motores de combustão.

Segundo informações obtidas em ANA *et al.* (2009), a agroindústria da cana relaciona-se com os impactos na qualidade do ar em dois pontos opostos: o uso do etanol tem causado melhorias consideráveis na qualidade do ar nos centros urbanos, já as queimadas de palha da cana no campo causam problemas com a dispersão de particulados e riscos com a fumaça. Efeitos como a redução nas emissões de monóxido de carbono, a eliminação de material particulado e de substâncias como enxofre e compostos de chumbos presentes na gasolina, são exemplos do impacto da utilização do etanol nas cidades, que ocasiona emissões menos tóxicas.

A cana tem a capacidade de sequestrar carbono por meio da fotossíntese, processo natural responsável pelo crescimento dos vegetais. Tal fenômeno ocorre na fase de crescimento, quando a planta necessita de uma quantidade maior de carbono para se desenvolver, sequestrando CO₂ da atmosfera a partir da fotossíntese na forma de carboidratos, que são por fim incorporados na parede celular das plantas (ECYCLE, 2021). Devido a essa capacidade da cana em sequestrar carbono ocorre o ciclo neutro, no qual a cana absorve durante seu crescimento praticamente todo o carbono emitido pela indústria que produz o etanol e pela queima desse combustível em veículos, como mostra a Figura 3.

Figura 2 - Ciclo neutro do etanol.



Fonte: Adaptado de UNICA (2022)

2.1.2 Mandioca

Este tipo de matéria-prima é uma variedade descoberta na Amazônia. Sua composição tem grande quantidade de açúcares na raiz e pouco de amido. Os açúcares são glicose na maior parte, que é usada na fermentação para produzir o etanol (ERENO, 2008).

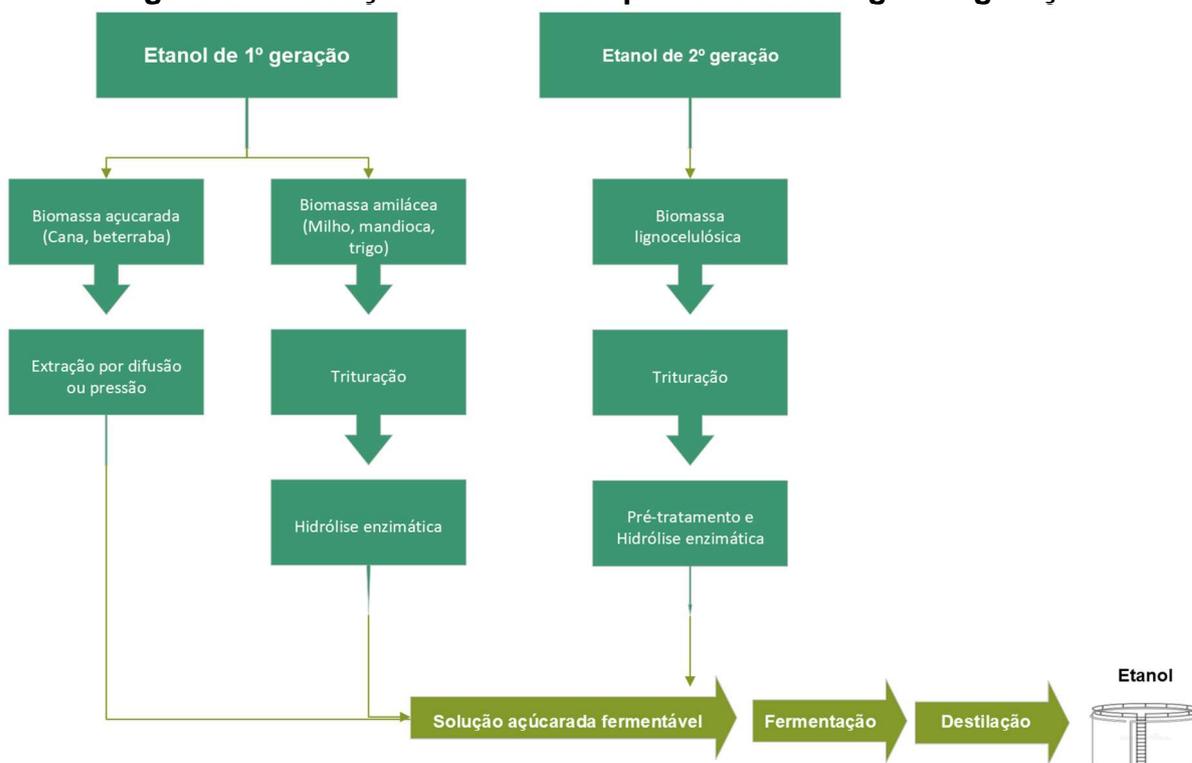
Essa variedade trata-se de uma mutação genética usada pelos indígenas para obter bebidas alcóolicas. O processo de produção do etanol a partir da mandioca segue as etapas de: pesagem; desintegração; gelatinização; sacarificação; fermentação; destilação, obtendo o etanol hidratado; e secagem para a obtenção do etanol anidro (BARROS, 2021).

Nesse processo, a mandioca passa por uma etapa de conversão do amido presente na raiz em glicose e só depois ocorrem a fermentação e a destilação (BARROS, 2021). De acordo com Ereno (2008), o cruzamento da mandioca doce com plantas de outras regiões resultou em uma variedade que, para a obtenção do açúcar e a conversão em alcoóis, não precisa passar pelo processo de hidrólise do amido (ERENO, 2008).

Chamada de mandioca açucarada, ela passa pelo processo de moagem, prensa e extração do caldo que vai direto para a fermentação, sem a necessidade da etapa de hidrólise do amido (BARROS, 2021). No Brasil essa variedade ainda não é tão utilizada em comparação com a cultura da cana-de-açúcar.

A Figura 4 mostra as etapas para obtenção do etanol a partir das matérias-primas analisadas no presente trabalho.

Figura 3 - Produção de etanol de primeira e de segunda geração.



Fonte: Adaptado de BNDES (2008) *apud* Piacente, Silva e Biaggi (2016).

2.1.3 Etapas de produção convencional do etanol

A produção de etanol proveniente da lignina e da mandioca é similar à produção convencional a partir da cana-de-açúcar, diferindo apenas que a biomassa amilácea e a lignocelulósica passam pelos processos de trituração e hidrólise (caso não seja mandioca açucarada). Além disso, a biomassa lignocelulósica também passa pela etapa de pré-tratamento. No entanto, o foco principal desta pesquisa está em usinas de cana-de-açúcar, então a seguir são apresentadas as etapas de produção do processo convencional de obtenção do etanol a partir da cana:

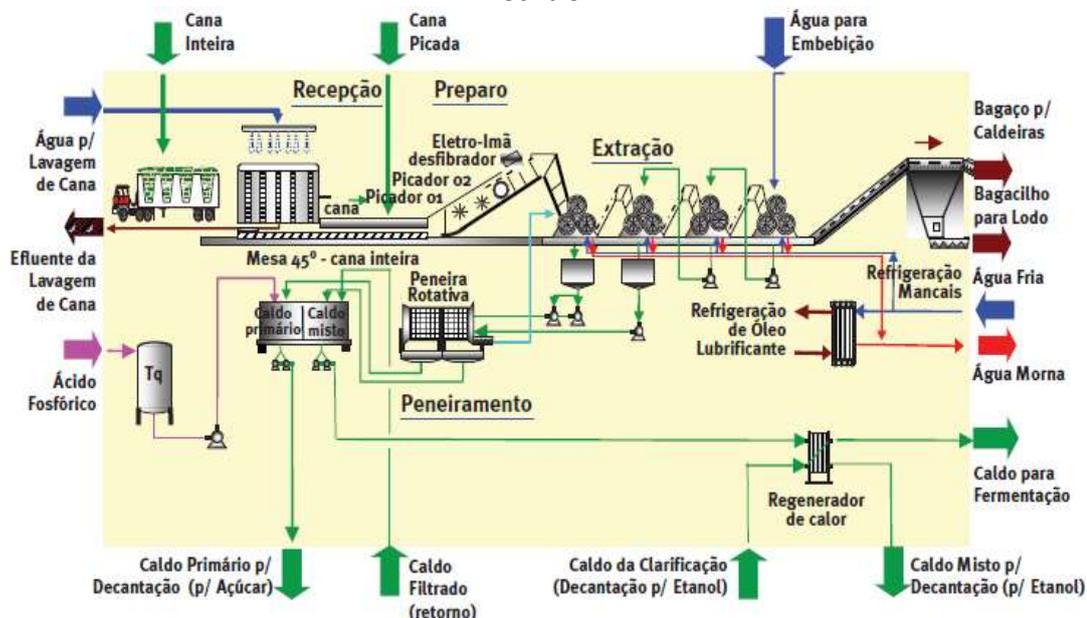
- a) recepção da cana: a cana ao chegar na usina é tombada na mesa alimentadora e passa pelo sistema de limpeza, que pode ser uma lavagem úmida ou a seco. A água que sai da lavagem passa pelo processo de decantação dos sólidos para ser reutilizada. Um dos grandes problemas nessa etapa é a questão da grande quantidade de água consumida e da

perda de até 2% dos açúcares da cana. Tipicamente, o efluente gerado nessa etapa possui DBO de 180 a 500 mg/L;

- b) preparo e extração do caldo: conforme mostra a Figura 5, a cana passa pelo picador para cortá-la, e em seguida vai para o desfibrador que a esmaga para facilitar a extração dos açúcares. Essa extração pode ser realizada por dois meios: moagem e difusão. A moagem possui de quatro a sete ternos¹ (geralmente seis ternos) acionadas por turbinas a vapor ou eletrificadas, estas economizam mais energia. Na moagem da cana a matéria-prima é esmagada pelos rolos e comprimida a pressões elevadas para liberação do caldo. No sexto terno há a utilização de água de embebição para aumentar a extração dos açúcares. Essa água vem do condensado dos pré-evaporadores com temperatura geralmente de 50°C. Por outro lado, o sistema de difusão é composto pelo difusor e por um ou dois ternos de moendas. A retirada do caldo se dá em contracorrente com a água a elevadas temperaturas (de 75 °C a 95 °C). Esse sistema obtém maior grau de extração, consome menos potência e tem menor desgaste. O caldo e o bagaço da cana são os produtos dessa etapa;
- c) tratamento do caldo: o caldo cru passa pelo tratamento físico, composto por peneiras e hidrociclones, com objetivo de remover partículas em suspensão. Em seguida, passa pelo tratamento químico, que retira totalmente as impurezas insolúveis, coloidais e promove a neutralização do caldo para evitar a inversão e decomposição da sacarose. O tratamento químico é feito com a adição da cal, na forma de leite de cal (Ca(OH)_2), que forma um precipitado de fosfato de cálcio. As Figuras 6, 7 e 8 mostram como ocorre esse processo.

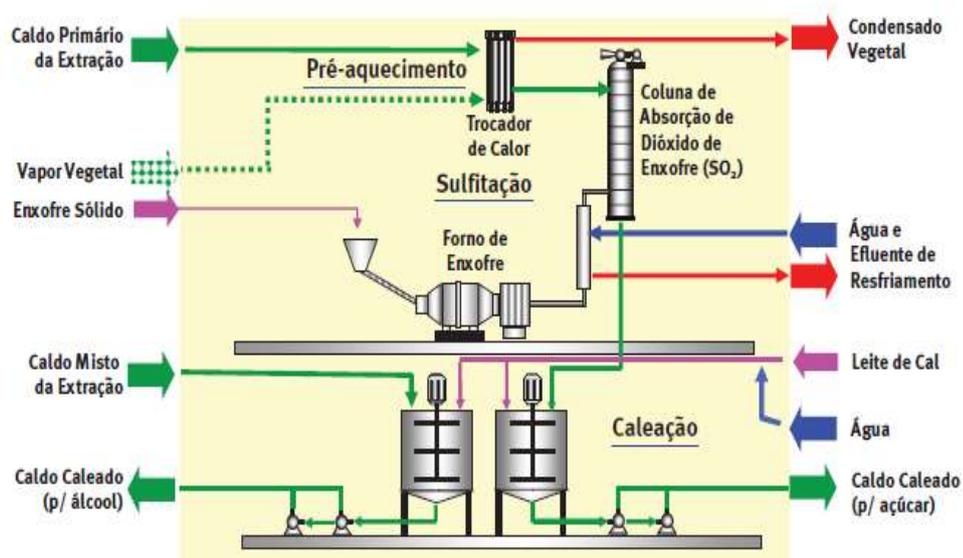
¹ Ternos: Também chamados de ternos de moenda, trata-se de equipamentos de alta pressão e baixa velocidade por onde passa a cana desintegrada para a extração do caldo.

Figura 4 - Fluxograma das etapas de recepção, preparo da cana e extração do caldo.



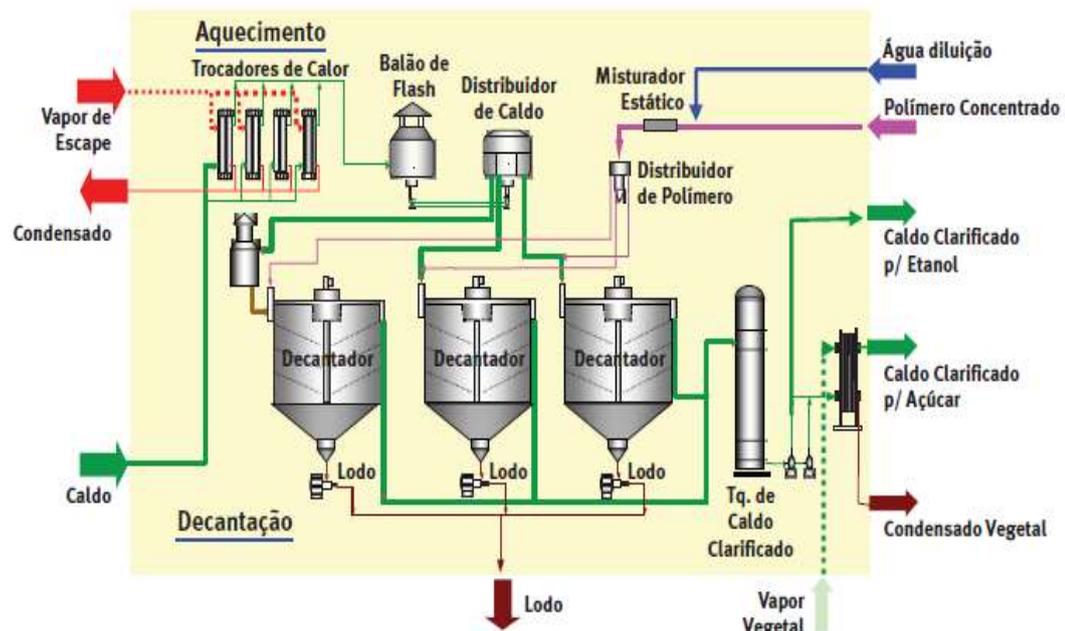
Fonte: ANA *et al.* (2009).

Figura 5 - Fluxograma do tratamento do caldo, etapas de pré-aquecimento, sulfitação e caleação.



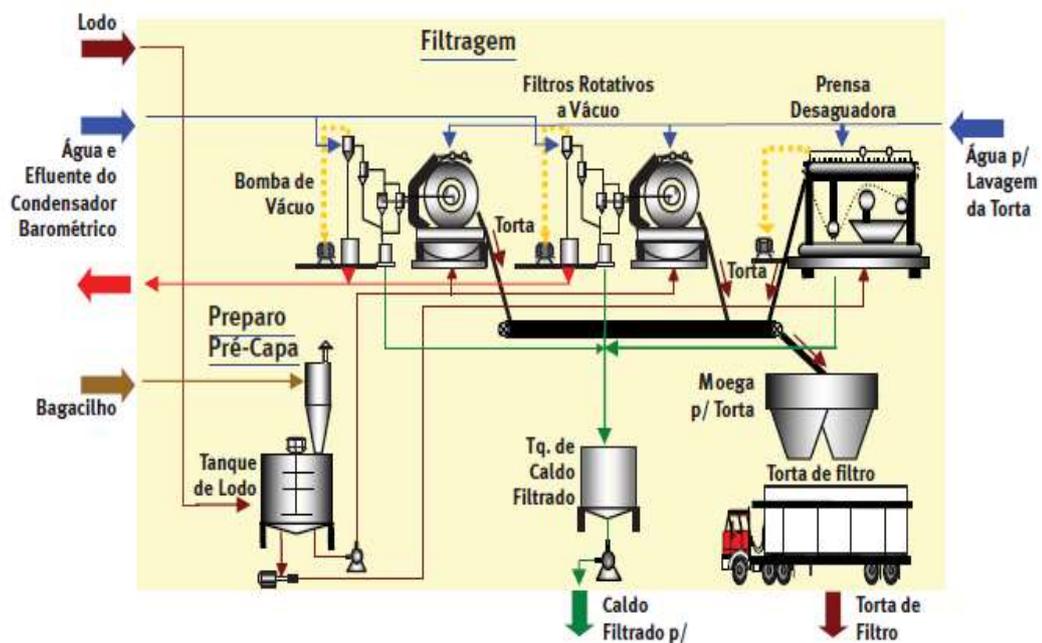
Fonte: ANA *et al.* (2009).

Figura 6 - Fluxograma do tratamento do caldo, etapas: aquecimento e decantação.



Fonte: ANA *et al.* (2009).

Figura 7 - Fluxograma de tratamento do caldo, etapa de lavagem da torta.

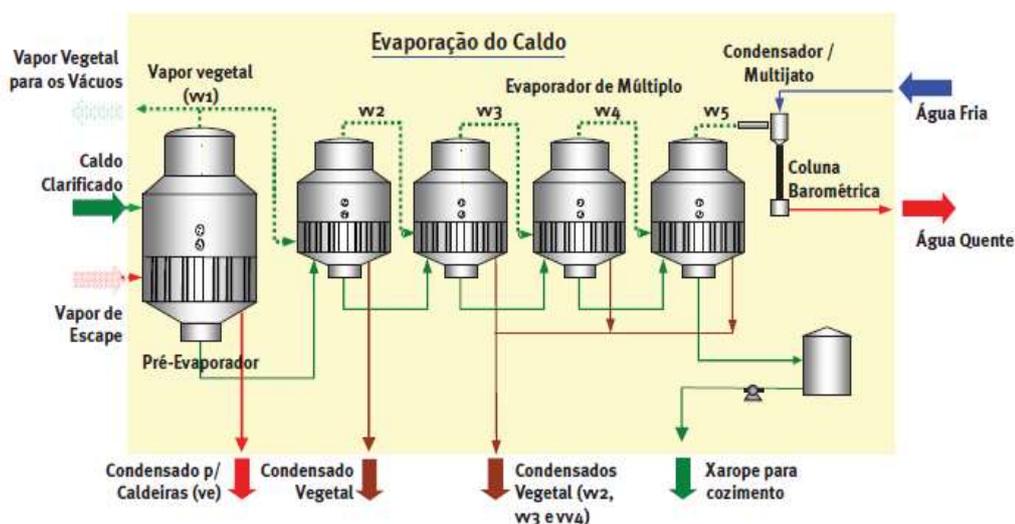


Fonte: ANA *et al.* (2009).

Após esses tratamentos, o caldo é aquecido a temperaturas acima de 100 °C e em seguida passa por um tambor de *flash* para remover gases não condensáveis (Figura 7). Um polímero floculante é adicionado no caldo para a remoção do material em suspensão. Após a separação do lodo por sedimentação, o caldo é enviado para o setor de concentração para ser concentrado e esterilizado antes de ser enviado para a fermentação. O lodo ainda contém açúcares e sendo assim são recuperados, por uma etapa de filtração com lavagem com água. O filtrado retorna para o processo e a torta é usada como fertilizante (Figura 8).

- d) evaporação do caldo: nesta etapa, mostrada na Figura 9, ocorre a maior demanda de vapor do processo. O caldo clarificado é evaporado para obter o xarope na faixa de 60 a 65 °BRIX, em conjuntos de evaporação de múltiplo efeito com de 3 a 5 efeitos, podendo-se sangrar vapores das caixas (primeira, segunda e terceira) para aquecer o caldo e para os cozedores de açúcar (ANA *et al.*, 2009).

Figura 8 - Fluxograma do setor de evaporação do caldo da fábrica de açúcar.

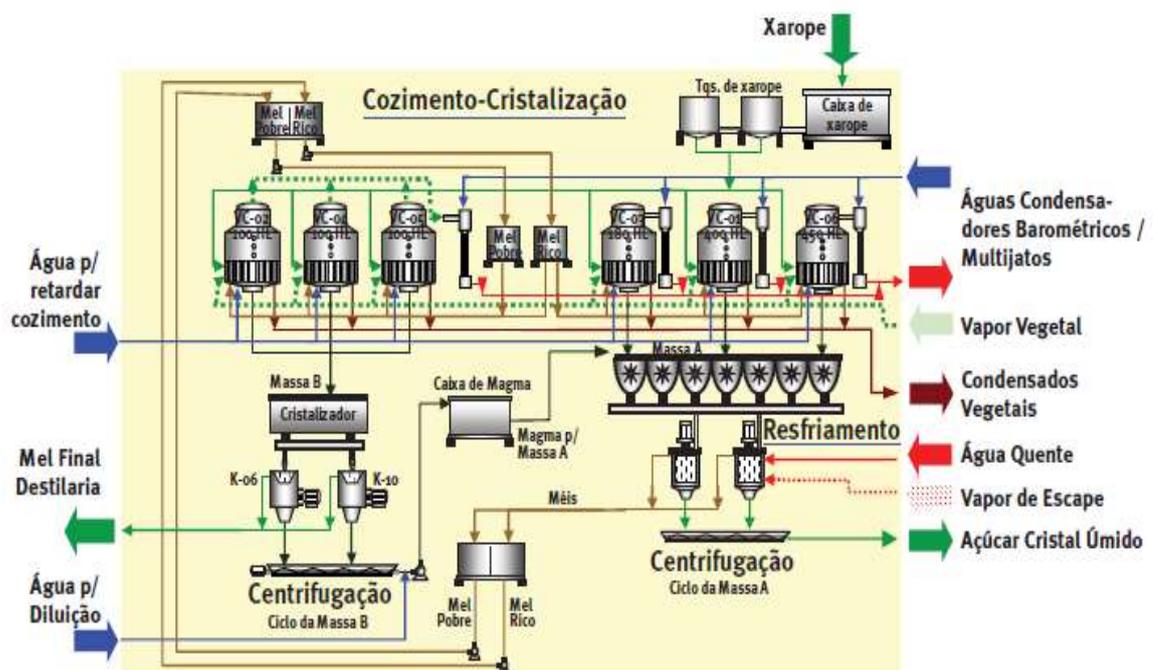


Fonte: ANA *et al.* (2009).

O cozimento do xarope (Figura 10) para a obtenção do açúcar cristal em cozedores é realizado em batelada, onde o xarope é aquecido, ocasionando a evaporação da água até atingir a concentração de saturação suficiente para ocorrer a cristalização da sacarose, sendo obtido o açúcar cristal como

produto. O calor é proveniente do vapor vegetal recuperado da evaporação, e o vapor da massa cozida do xarope passa pelos condensadores barométricos ou multijatos, e no cozedor ocorre produção de água condensada do vapor vegetal (ANA *et al.*, 2009).

Figura 9 - Fluxograma dos setores de cozimento, cristalização e centrifugação da fábrica de açúcar.

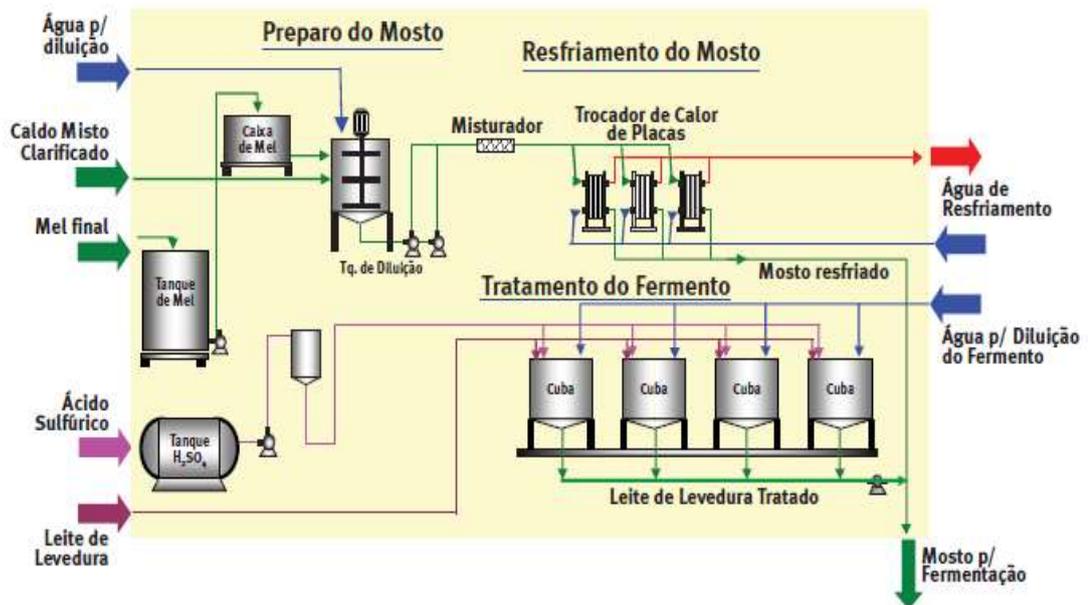


Fonte: ANA *et al.* (2009).

- e) fermentação: o caldo filtrado, resultado da etapa anterior, é resfriado e enviado para as dornas onde ocorre a fermentação. Esse processo consiste em reações químicas catalisadas pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* em condições anaeróbias. O mosto é o reagente da fermentação e o etanol é produzido pela conversão da sacarose (Figuras 11 e 12).

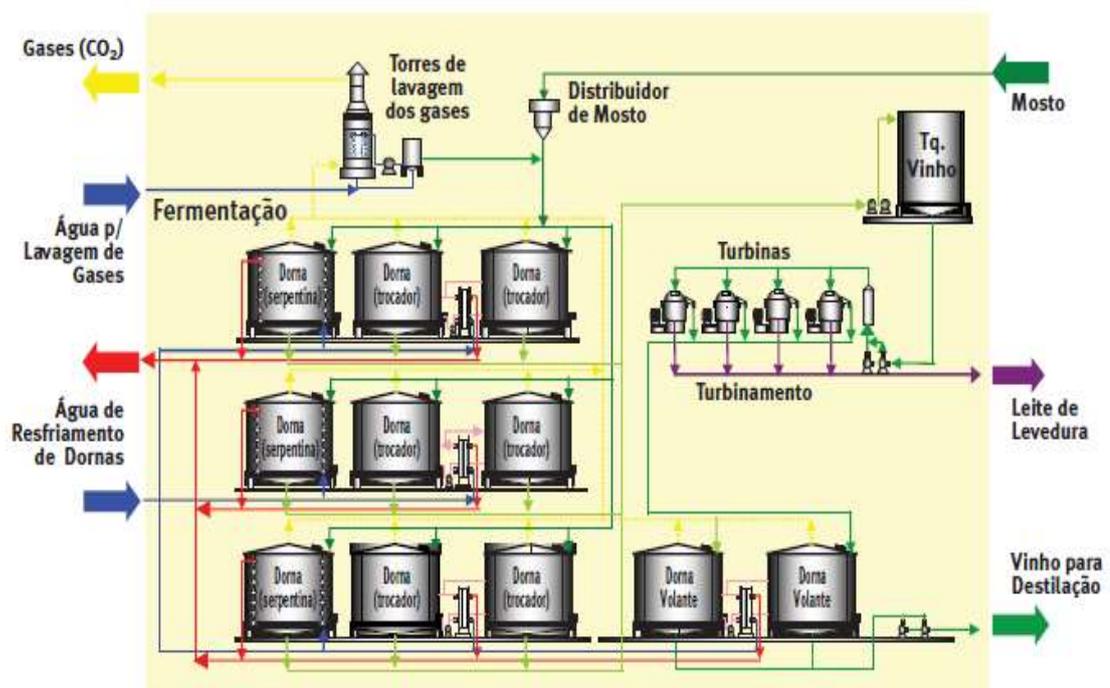


Figura 10 - Fluxograma das etapas de preparo do mosto e tratamento do mosto para fermentação.



Fonte: ANA *et al.* (2009).

Figura 11 - Fluxograma das operações de fermentação do mosto.

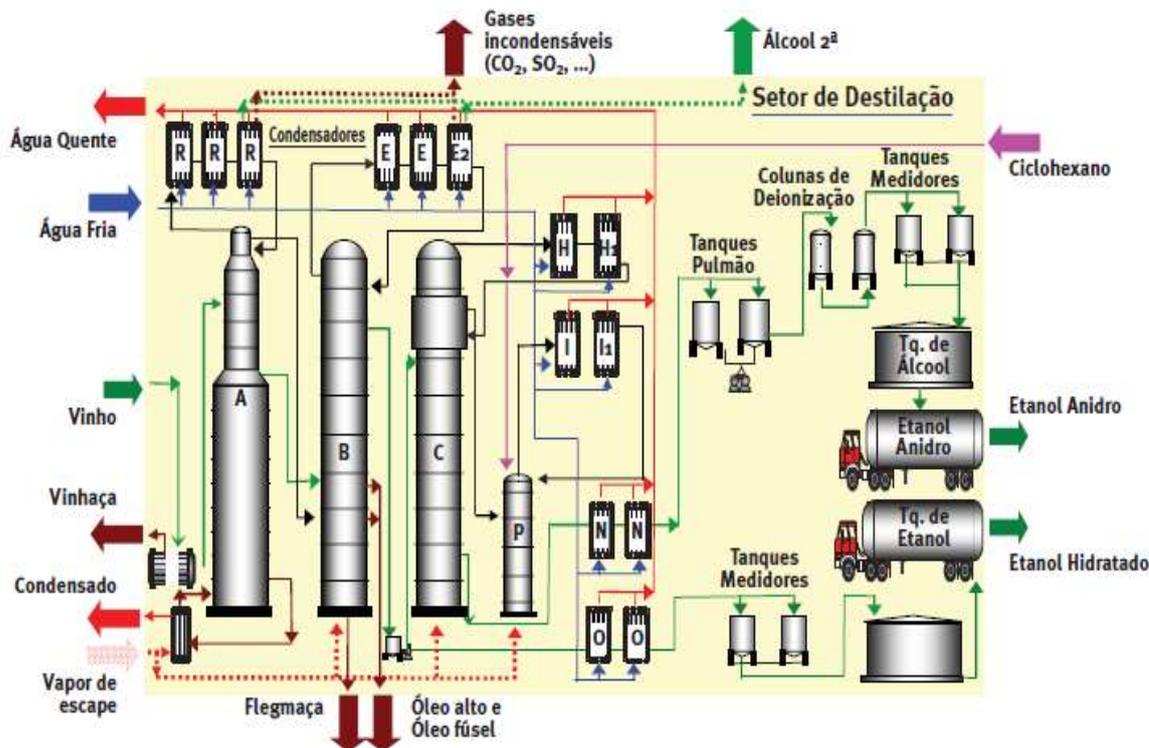


Fonte: ANA *et al.* (2009).

Para que os processos possam ser integrados, a fermentação deve ser contínua, ou seja, deve ocorrer com adições e retiradas contínuas no conjunto de reatores (fermentadores). Esse conjunto é constituído por em torno de três a cinco reatores e cada reator possuindo um sistema de resfriamento;

- f) destilação: nessa etapa é produzido o álcool hidratado, que posteriormente pode ser desidratado para produção do álcool anidro. O vinho entra na coluna “A” de destilação e é aquecido com vapor de escape e assim retificado na coluna “B”, obtendo como produto o etanol hidratado. Para a obtenção do etanol anidro, o hidratado passa pelo processo de desidratação na coluna “C”. A vinhaça é gerada na coluna “A” e a flegmaça² na coluna “B” (ANA *et al.*, 2009).

Figura 12 - Fluxograma das etapas de destilação do etanol.



Fonte: ANA *et al.* (2009).

² A flegmaça é o resíduo da retificação da flegma nas destilarias, segundo Zarpelon (1982)

3 REVISÃO DE LITERATURA

Para Nemat-Amirkolaii, Romdhana e Lameloise (2019), na indústria alimentícia há pouco conhecimento sobre: (a) integração de processos, (b) dados sobre os indicadores de poluentes e (c) volumes de água usados e descartados em etapas específicas da linha de processamento. Segundo os autores, a análise *pinch* mássica voltada para sistemas hídricos é uma abordagem conceitual e sistemática para minimizar o consumo de água e a geração de águas residuais em indústrias que são grandes consumidoras desse recurso como, por exemplo, as usinas de cana-de-açúcar que podem gerar produtos tanto do setor alimentício como do setor energético.

No entanto, o emprego da análise *pinch* de água ainda ocupa um espaço pequeno quando se trata da avaliação de possibilidades de redução do consumo de água em indústrias alimentícias. Nesse tipo de indústria geralmente são utilizadas práticas clássicas para a redução no consumo de água, como políticas de uso consciente da água e não que focam na economia do uso através do reuso.

A análise *pinch* foi inicialmente desenvolvida para otimizar redes de trocadores de calor, enquanto a análise *pinch* mássica teve início em meados de 1990 no intuito de minimizar o consumo de água propondo alternativas para o *retrofit* da rede de água. Wang e Smith (1994a) aplicaram pela primeira vez esse método para redução do consumo de água, batizando-o de “Water Pinch Analysis³”.

Diante disso, diversas ferramentas empregando o conceito da análise *pinch* vêm sendo desenvolvidas desde então. O conceito de *pinch* também passou a ser aplicado em diferentes focos diferentes de seu primeiro desenvolvimento, como o consumo de hidrogênio em refinarias (HALLALE; LIU, 2001), o fornecimento de oxigênio (ZHELEV; NTLHAKANA, 1999), o controle de emissões de CO₂ (LINNHOFF; HINDMARSH, 1983), entre outros.

Uma das aplicações mais importantes da análise *pinch* refere-se à redução do consumo de água, que tenta encontrar um equilíbrio ótimo entre as diferentes fontes de água (fresca, reutilizada, reciclada etc.) e as demandas de água, em diferentes setores industriais (NEMATI-AMIRKOLAII; ROMDHANA; LAMELOISE, 2019).

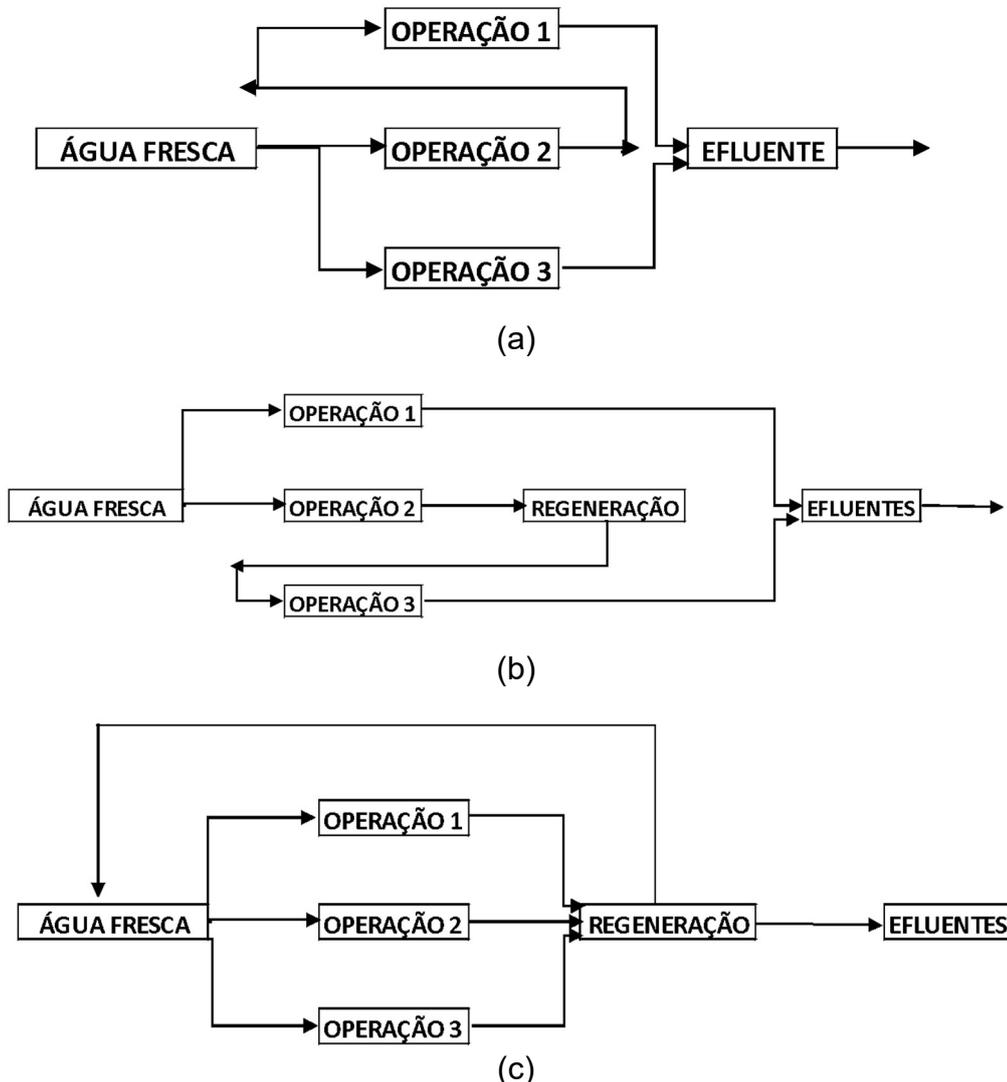
³ Tradução livre: Análise Pinch de Água

De acordo com Santos (2007), existem três formas de minimizar o consumo de água e a geração de efluentes líquidos em uma planta industrial: reuso, regeneração com reuso e regeneração com reciclo, descritas pelo autor conforme a seguir:

- a) reuso: se a concentração de contaminante não exceder a concentração permitida na operação, o efluente é utilizado sem a necessidade de algum tratamento prévio, reduzindo assim o consumo de água fresca e geralmente a carga de contaminantes permanece inalterada (Figura 14 (a));
- b) regeneração com reuso: os efluentes das outras operações envolvidas no processo passam por um tratamento para remoção de contaminantes para que essa corrente possa ser utilizada em outra operação que necessite de concentração igual ou maior do que a corrente regenerada. Essa opção ocasiona uma redução no volume de água fresca consumido, bem como no volume de efluentes gerados e na carga de contaminantes (Figura 14 (b));
- c) regeneração com reciclo: nesse tipo de operação, o efluente pode ser reutilizado na mesma operação que o gerou, pois passa por um tratamento parcial que remove contaminantes. Nesse caso também há redução no consumo de água fresca, no volume de efluentes gerado e na sua carga de contaminantes (Figura 14c).

Zver e Glavič (2005) desenvolveram e testaram uma abordagem sistemática para a minimização do consumo de água em uma usina de cana-de-açúcar. Foi usada uma abordagem heurística considerando alguns critérios de seleção como custos, capacidade técnica das fontes de água doce, confiabilidade, complexidade, impacto na qualidade do processo/produto, geração de resíduos secundários etc. No entanto, com base nos resultados obtidos e nas regras heurísticas, o método sugeriu levar em consideração procedimentos de regeneração de águas residuais, que sejam simples, como desinfecção, neutralização, entre outros, o que tornou o método limitado por só trabalhar com esse tipo de sistema.

Figura 13 - Minimização do consumo de água fresca nas formas de a) reuso; b) regeneração com reuso; c) regeneração com reciclo.



Fonte: Adaptado de Santos (2007).

De acordo com a ampla revisão da literatura realizada por Foo (2009), existem diferentes metodologias envolvendo a análise pinch de água, tornando-a dinâmica e útil para diferentes aplicações. Ele concluiu que a abordagem mais comum durante a década de 1990 eram aquelas que descrevem as operações de processos com uma carga fixa de contaminantes.

Segundo Francisco (2017), quando as operações são controladas pela qualidade são denominadas de operações de carga fixa e o foco é a quantidade de contaminante transferida entre as correntes do processo, sendo a vazão um fator menos importante. Já em operações de vazão fixa, as operações são controladas pela quantidade, quando as vazões especificadas na entrada e na saída das

operações precisam ser satisfeitas. Neste caso, as vazões de entrada e saída podem ser diferentes, diferentemente do que em operações de carga fixa, nas quais não é considerada perda ou ganho de água (FOO, 2009). Apesar desses dois tipos de problemas apresentarem grandes diferenças, eles estão inseridos em um contexto maior que é a descrição do processo para estudar propostas para a redução do consumo de água externa pelo processo como um todo (FRANCISCO,2017).

Para se ter uma ideia, a análise pinch de água teve aplicação em plantas de processamento de milho, refinarias, fábricas de papel e celulose, indústria de açúcar proveniente da beterraba, entre outros processos, obtendo-se em algumas destas plantas uma redução de cerca de 70% no consumo de água (ALWI; MANAN, 2013).

Muitas pesquisas foram realizadas para desenvolver metodologias baseadas na análise pinch em situações de consumo de água, porém, até então eram aplicadas supondo a presença de apenas um contaminante. Zhao, Liu e Feng (2007) desenvolveram um trabalho para a minimização do consumo de hidrogênio em refinarias com múltiplos contaminantes; porém, a metodologia desenvolvida também pode ser aplicada para a minimização do consumo de água. Essa metodologia só obtém a meta de consumo de água, sendo necessária outra ferramenta (ou método) para gerar a estrutura da rede de água.

Sistemas envolvendo a presença de múltiplos contaminantes são mais comuns e realistas, então, pensando nisso, Zhang, Feng e Chu (2013) apresentaram uma maneira de direcionar e projetar uma rede de água em um processo com múltiplos contaminantes utilizando uma metodologia gráfica.

Martinez-Hernandez, Sadhukhan e Campbell (2013) desenvolveram uma abordagem gráfica baseada na análise pinch em uma usina integrada produtora de etanol, utilizando o trigo como matéria-prima, visando minimizar o consumo de água por meio de reuso com reciclo. Segundo os autores, tal abordagem permitiu obter um sistema com maior eficiência, flexibilidade, rentabilidade e sustentabilidade.

Cortés *et al.* (2011) propuseram um procedimento sistemático para projetar simultaneamente uma rede com o mínimo consumo de água e de energia em uma planta industrial de usina de açúcar, considerando a redução do consumo de água através de uma perspectiva baseada em energia. Todavia, a integração foi realizada

sequencialmente, determinando inicialmente o consumo mínimo de água através da análise pinch de água e, posteriormente, o consumo mínimo de energia usando o diagrama de curvas compostas. Também foi usado um diagrama de rede bidimensional para explorar diferentes opções para a configuração do sistema de água e permitir a redução da complexidade das redes de energia e água. No entanto, o projeto proposto por essa metodologia implica em mudanças na configuração do projeto original que, do ponto de vista da água, podem restringir o potencial de novas soluções de redução do consumo desse recurso.

Mosqueira-Salazar *et al.* (2013) utilizaram a integração energética e mássica para estimar o aumento do consumo de água e da captação de água externa em uma usina de etanol de cana-de-açúcar devido à introdução da produção de etanol de segunda geração através do processo de hidrólise do bagaço e ainda identificaram as oportunidades de reuso de água. Foram avaliados três casos: uma usina convencional de produção de etanol de primeira geração e duas plantas de etanol de segunda geração, diferindo apenas pela concentração de glicose nos processos. Foram feitos balanços de massa e de energia através do *software Aspen Plus*, destacando a importância das práticas de redução do consumo de água e energia nesse tipo de indústria e o alto potencial de redução baseado no conceito de integração mássica e energética.

Kushwaha (2013) fez uma revisão das fontes de geração de efluentes da indústria de açúcar proveniente da cana-de-açúcar, os avanços nas tecnologias de tratamentos (aeróbio, anaeróbico e físico-químico) e a possibilidade de reutilização de efluentes tratados, dependendo da eficiência dos tratamentos.

Poddar e Sahu (2015) fizeram um estudo determinando as características físico-químicas das águas residuais em uma indústria açucareira e utilizaram um método híbrido (metodologia pinch com otimização matemática) para minimizar o consumo de água nesta planta industrial. Os autores concluíram que a metodologia desenvolvida é flexível e pode lidar com processos complexos, mas, para isso, várias etapas precisam ser realizadas.

Pina *et al.* (2015) realizaram um estudo para avaliar a redução da demanda de vapor e do uso da água em processos de uma indústria sucroalcooleira, através da integração térmica. Os autores analisaram duas configurações da planta: 1) com produção voltada apenas para o etanol e 2) com um *mix* de 50% para a produção de

açúcar e 50% para a produção de etanol. Empregando o *software Aspen Plus*, foram realizadas simulações para avaliar os balanços de massa e energia. As integrações mássicas e energéticas foram realizadas pela metodologia pinch usando o diagrama de curvas compostas (KLEMES, 2011) para minimizar o consumo de utilidades. Os resultados obtidos foram de redução no consumo de vapor devido à integração térmica e uma redução no consumo de água. No entanto, a metodologia obteve uma rede de trocadores de calor complexa e de alto custo.

Llanes *et al.* (2017) estudaram a integração mássica baseada na análise pinch entre as diferentes operações do processo de produção de açúcar bruto com o objetivo de reduzir o consumo de água externa considerando um problema do tipo híbrido e considerando como contaminante o açúcar dissolvido. A estratégia de integração é dividida em duas etapas fundamentais que são: a determinação dos requisitos mínimos de água externa e o redesenho da rede. Na primeira delas são construídas as curvas compostas de fontes e demandas e, em seguida, é feito o redesenho da rede através do algoritmo que considera que as fontes devam ter concentração menor ou igual às das demandas. A metodologia de integração utilizada pelos autores conseguiu eliminar o consumo externo de água e reduzir a quantidade de efluentes. No entanto, para identificar o pinch nesse problema, é necessário obter antes o diagrama de curvas compostas, o que significa a existência de mais etapas para a obtenção do resultado desejado.

Balla, Rabah e Abdallah (2018) utilizaram também a análise pinch e otimização matemática para obter o mínimo consumo de água em uma usina de cana-de-açúcar. Para obter a meta de consumo de água foi utilizado o método de cascata (FOO, 2012) e foi utilizado o *software Resource Conservation Networks* (Sustainable Process Integration Research Group) para projetar as redes de água. Como observado, essa metodologia envolve muitas etapas para atingir o objetivo final.

Valderrama, Quintero e Kafarov (2020) propuseram um esquema integrado de produção de etanol de primeira e de segunda geração para aumentar o rendimento de etanol produzido e reduzir as necessidades de captação de água e do uso de energia térmica na planta. Para simular o problema foi utilizado o *software Aspen Plus® V 8 .6* e, por meio da análise pinch, foram identificados os requisitos mínimos de aquecimento e resfriamento. Em sequência, foi realizada a integração da rede de

trocadores de calor aplicando programação matemática. Para a redução do consumo de água externa foi considerada uma otimização feita a partir de uma adaptação do modelo matemático proposto por Martín, Ahmetovic e Grossmann (2011), formulado como PNL (Programação Não-Linear). O *software* GAMS foi utilizado para sua solução do modelo, utilizando o algoritmo BARON. Como pode ser observado, a metodologia utilizada por Valderrama, Quintero e Kafarov (2020), apesar de trazer resultados de redução tanto de água como de energia, se apresenta com dificuldades para aplicação, pois, percebe-se, ao analisar a ferramenta, que ela requer o uso de softwares que não são facilmente disponíveis e, também, não permite ao engenheiro de processos um controle total das etapas.

Martín *et al.* (2011) estudaram a otimização do consumo de água em usinas produtoras de etanol de segunda geração, usando rotas termoquímicas, termobioquímicas ou bioquímicas, através de um método com três etapas divididas em: (i) otimização do consumo de energia nos processos de produção, reduzindo as necessidades de refrigeração e as perdas de água por evaporação; (ii) em seguida são analisadas possibilidades de substituição parcial do uso de água como agente de resfriamento, e, por último, (iii) a projeção das redes de água ideais para cada processo de produção do etanol, determinando o consumo mínimo de água com reuso, reciclo e o tratamento necessário usando uma metodologia de otimização de superestrutura.

Como visto, a maioria dos trabalhos consiste em metodologias de programação matemática, métodos gráficos, procedimentos algorítmicos ou com base em heurísticas que envolvem diversas etapas, que podem gerar procedimentos complexos e sem facilidade de aplicação. É nesse contexto que o Diagrama de Fontes de Água (DFA) se destaca por ser uma ferramenta algorítmica-heurística simples e eficaz. Além disso, pode ser utilizada de maneira fácil pelo engenheiro de processos, permitindo-o ter controle dos cálculos em todas as etapas, além de fornecer, simultaneamente, o consumo mínimo de água (meta) e a estrutura da rede correspondente.

Atualmente muitas indústrias realizam projetos de redução do consumo de água que envolvem apenas rotinas de inspeção para mitigar perdas no sistema, monitoramento online de grandes consumidores de água e upgrades no isolamento térmico. Todavia, é importante utilizar métodos sistemáticos que consigam avaliar os

processos em busca de oportunidades de reuso. Nesse sentido, o DFA é capaz de promover esta avaliação das possibilidades de reuso de forma simples e de fácil compreensão por parte das equipes de engenharia de processo.

3.1 DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA (DFA)

O DFA é uma metodologia que foi desenvolvida por Gomes (2002) e vem sendo aperfeiçoada pelo Grupo de Integração de Processos Químicos (GIPQ) da Escola de Química na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O DFA é uma ferramenta de integração de processos usada na gestão do consumo de água e da geração de efluentes em processos industriais. Segundo Francisco (2017), o DFA é uma ferramenta de grande importância para promover a sustentabilidade nas empresas ao possibilitar uma análise completa de sua rede hídrica.

A metodologia DFA é considerada uma evolução dos trabalhos de Castro *et al.* (1999) e Wang e Smith (1995, 1994a). Ele permite avaliar, através de um procedimento algorítmico problemas envolvendo um e múltiplos contaminantes, em condições de máximo reuso, restrição de vazão, múltiplas fontes, perda de água no processo e regeneração com reuso e reciclo (Mirre, 2009). Estudos continuam sendo realizados no sentido de preencher algumas lacunas existentes na aplicação da ferramenta em diferentes cenários industriais (FRANCISCO, 2017).

O DFA trata-se de uma ferramenta de fácil aplicação, ideal para uso por engenheiros de processos que necessitam de facilidade e rapidez na elaboração de projetos/diagnósticos para a minimização do consumo de água e da geração de efluentes em plantas industriais. De acordo com os trabalhos citados por Francisco (2017) é possível destacar que

a premissa básica de que todas as operações são um equipamento de transferência de massa, ou seja, em todos os processos uma taxa mássica de contaminante é transferida do processo para as correntes aquosas com a água assumindo o papel de agente de transferência de massa. Os problemas tratados são denominados de forma geral na literatura como Problema de Alocação de Água (*Water Allocation Problem – WAP*) (2017, p. 36).

Além disso, Francisco (2017) também destacou que,

As operações que utilizam água podem ser divididas em dois grupos: (1) controladas pela qualidade ou baseadas na transferência de massa (*mass-transfer-based*) e (2) controladas pela quantidade ou não baseadas na transferência de massa (*non mass-transfer-based*) (Dhole *et al.*, 1995; Polley e Polley, 2000; Hallale, 2002; Manan *et al.*, 2004) (2017, p. 36).

Operações que envolvem carga fixa são controladas pela qualidade que representa um processo de transferência de massa com uma quantidade fixa de contaminante sendo transferida de uma corrente de processo para uma corrente aquosa. As vazões de entrada e saída da corrente aquosa são tipicamente iguais e, portanto, neste tipo de operações não há perdas ou ganhos de água (FRANCISCO, 2017). Todavia, observa-se que pode existir perda ou ganho de água nestas operações, mas a transferência de carga de contaminante é o principal fator a ser considerado.

Francisco (2017) citou que operações de vazão fixa são controladas pela quantidade que tem como principal fator a vazão que passa através da operação, não sendo normalmente modeladas como um processo de transferência de massa. Nesse tipo de operações podem ocorrer ganhos ou perdas de água, bem como podem ocorrer operações do tipo fonte e demanda (*Source/Sink*) as quais consomem ou geram quantidade fixa de água.

A corrente de entrada da operação está limitada por valores máximos admissíveis de concentração, enquanto a corrente de saída deve deixar a operação com o valor máximo de concentração da operação, que é independente da concentração de entrada (Fan *et al.*, 2012; Teles, Castro e Novais, 2009). Objetivando reduzir o consumo de água externa (ou água primária), Prakash e Shenoy (2005) afirmaram que a corrente que sai de uma operação deve estar no seu valor máximo de concentração, enquanto a corrente de entrada deve possuir o valor máximo de concentração especificado em ambos os tipos de problemas (carga fixa e vazão fixa) (2017, p. 37).

Em 2003, Delgado usou o DFA em problemas envolvendo um e múltiplos contaminantes considerando reuso, reuso com reciclo e regeneração diferenciada de correntes. Neste trabalho, o critério para seleção do regenerador era apenas a identificação do contaminante.

Magalhães (2005) aplicou o DFA em um problema com um único contaminante em uma refinaria de petróleo, avaliando a redução do consumo de água através do máximo reuso e de dois possíveis esquemas de regeneração, centralizada ou distribuída.

Cunha, Mirre e Santos (2005) também aplicaram o DFA em uma refinaria de petróleo, mas diferente de Magalhães (2005), o sistema envolvia a presença de múltiplos contaminantes, o que se aproxima mais da realidade industrial. Nesse estudo, o DFA foi aplicado considerando o máximo reuso. Higa e Penha (2006) também analisaram uma refinaria considerando múltiplos contaminantes através do DFA considerando máximo reuso e regeneração.

Em 2007, Santos aplicou o DFA para cenários de máximo reuso, regeneração com reciclo, e regeneração com reuso considerando múltiplos contaminantes, em diversos casos industriais. Mirre *et al.* (2009) verificaram a possibilidade de incorporação do procedimento DFA como um suporte às etapas de desenvolvimento de um programa de Produção Mais Limpa, utilizando como exemplo dados de uma refinaria obtidos da literatura. O problema foi desenvolvido através de um problema de retrofit de uma refinaria abordado por Huang *et al.* (1999) e adaptado por Ullmer *et al.* (2005). Mirre *et al.* (2009) utilizaram o programa computacional MINEA (Santos, 2007) para a obtenção dos resultados. Gomes *et al.* (2013) estenderam o DFA para máximo reuso em processos de carga fixa e múltiplos contaminantes.

Francisco *et al.* (2015) aplicaram o DFA para problemas de vazão fixa envolvendo um contaminante e Francisco *et al.* (2018) estenderam o procedimento anterior para múltiplos contaminantes.

Em um contexto voltado para o estudo da inclusão da regeneração, Ulson de Souza *et al.* (2011) desenvolveram um método de regeneração diferenciada que trata a operação de um processo químico de interesse de forma objetiva e sistêmica, empregando o DFA para múltiplos contaminantes e usando o *software* de otimização (GAMS). A metodologia usada por Ulson de Souza *et al.* (2011) preestabelece metas de regeneração para cada unidade e contaminante como forma de minimizar o fluxo a ser regenerado. Por ser um modelo linear, não há dificuldades computacionais e garante a otimização global. No entanto, não houve uma abordagem sobre a identificação da concentração ideal do regenerador e da seleção das correntes apropriadas para a regeneração. Desse modo, as correntes poderiam

ser selecionadas de forma inadequada, levando a perda de eficiência das unidades de regeneração, podendo também ocasionar um aumento dos custos, visto que se forem selecionadas correntes com altas concentrações, essas precisam de tratamentos de remoção mais eficientes e, conseqüentemente, mais caros.

Francisco *et al.* (2022) desenvolveram uma nova abordagem para preencher a lacuna do uso do DFA em problemas de carga fixa e vazão fixa com múltiplos contaminantes considerando o uso de regeneração e reciclo. O estudo visou a minimização do consumo de água e da geração de efluentes usando o método do DFA considerando dois cenários: a) máximo reuso e b) regeneração e reciclo. A abordagem usada envolve a determinação do valor de concentração ideal de contaminantes na corrente de água pós-regenerada, a seleção das correntes de águas residuais mais apropriadas para tratamento e a determinação do valor ideal da vazão de água regenerada.

O DFA tem sido aplicado em diversos tipos de indústria como refinarias (Higa *et al.*, 2007), planta de alumínio (Francisco *et al.*, 2017), fábrica de papel (Francisco *et al.*, 2018), refinaria de milho (Francisco *et al.*, 2022), entre outras. Por outro lado, estudos de minimização do consumo de água em indústrias de etanol e açúcar na literatura envolvem, em sua maioria, metodologias de otimização matemática que podem trazer bons resultados, mas exigem bastante tempo, dedicação e, na maioria das vezes, custos maiores. Além disso, a otimização de processos baseada em programação matemática nos casos de redes de água apresenta problemas numéricos em função das restrições não serem lineares, sendo na maioria complexas e com dificuldades de resolução (FARIA, 2004), o que torna métodos baseados na análise pinch, como o DFA, ferramentas mais acessíveis quando comparadas às metodologias com programação matemática.

Neste contexto, o DFA se apresenta como uma ferramenta adequada para a minimização do consumo de água em diversos tipos de indústria. Contudo, como foi possível observar, seu uso em indústrias sucroalcooleiras ainda não foi avaliado. Assim, o presente trabalho, além de aplicar o DFA no setor sucroalcooleiro, busca ampliar o método de Francisco *et al.* (2022) ao considerar a opção de regeneração e reuso.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesta pesquisa foi baseada na aplicação da ferramenta DFA, adaptada por Francisco *et al.* (2022), em estudos de casos envolvendo dados de plantas da indústria sucroalcooleira. A ferramenta foi aplicada para casos de máximo reuso, de regeneração com reciclo e de regeneração com reuso em todos os estudos de caso.

4.1 METODOLOGIA DE MÁXIMO REUSO

Neste item é descrita a metodologia para aplicação do DFA com base no trabalho de Francisco *et al.* (2018) com foco no máximo reuso em problemas envolvendo múltiplos contaminantes, complementada posteriormente com a consideração da possibilidade de haver regeneração com reciclo (Francisco *et al.* (2022)). O procedimento visando o máximo reuso é a base para a avaliação de outras opções, sendo sempre o ponto de partida para aplicação do DFA.

Etapa 1: Obtenção dos dados do problema para construção da Tabela de Oportunidades.

Muitas vezes essa pode ser uma etapa com muitas dificuldades, pois a instrumentação nas correntes de água não está disponível ou é incompleta em muitas plantas. Nesta etapa, tem-se a rede hídrica da planta e deve-se identificar as vazões limites e respectivas concentrações de entrada e de saída dos componentes envolvidos no estudo em cada operação a ser analisada.

Etapa 2: Organização do problema

O problema é dividido em intervalos de concentração, limitados pela(s) concentração(ões) da(s) fonte(s) primária(s) de água, definida(s) como fonte(s) externa(s) no algoritmo DFA e pelas concentrações de entrada e de saída das operações (fontes internas no DFA), caso o problema esteja descrito através de suas operações, ou dos valores de concentração das fontes e das demandas, caso o processo seja descrito como fontes e demandas (*Source/Sink*).

Os valores de concentrações das fontes internas e externas são ordenados de forma crescente, definindo os intervalos de concentração.

Etapa 3: Identificar se os dados limites da operação estão na forma de operações de carga fixa ou fontes/demandas.

Importante ter uma forma uniforme de representar o processo, de modo que o algoritmo seja utilizado. Cabe ressaltar que as operações podem ser representadas das duas formas, mas a forma de operações de carga fixa facilita muito a visualização, acompanhamento e análise dos resultados ao longo do procedimento.

Etapa 4: Escolha do Contaminante de Referência e da Operação de Referência.

A escolha do contaminante de referência ocorre em ambos os tipos de problemas, descritos como operações ou fontes/demandas, que tenham mais de um contaminante. Caso o problema possua apenas um contaminante, não é necessário realizar essa etapa.

Em problemas envolvendo operações de carga fixa é necessário realizar a identificação da operação de referência e fazer os ajustes necessários nas concentrações, tanto na operação de referência como nas demais operações. Em problemas envolvendo fontes e demandas não é preciso identificar a operação de referência nem é necessário definir o critério de monotonicidade para o contaminante de referência.

Desta forma, se a descrição do processo estiver na forma de operações, realize as Etapas 4.1 e 4.2, caso contrário realize somente a Etapa 4.1 (no caso da descrição como fontes e demandas).

Etapa 4.1: Determinação do contaminante de referência

É adotado o critério de escolha do contaminante de referência apresentado por Calixto *et al.* (2015), que avalia prioritariamente se há algum contaminante com concentração de entrada igual a zero, se não houver, calcula-se o parâmetro G_W de acordo com a Equação 1 para problemas de carga fixa:

$$G_{j,k}^W = \frac{\Delta m_{j,k}}{C_{out,j,k}^{max}} \quad (1)$$

em que $\Delta m_{j,k}$ é a massa a ser transferida do contaminante j na operação k e $C_{out,j,k}^{max}$ é a concentração máxima de saída do contaminante j na operação k . Além da

determinação desse parâmetro, é necessário avaliar o critério de monotonicidade da concentração de saída (SAVELSKI; BAGAJEWICZ, 2003). O contaminante de referência será aquele com maior valor do parâmetro G_W e que também segue ao critério de monotonicidade em sua concentração. (SAVELSKI; BAGAJEWICZ, 2003).

Para problemas de vazão fixa ou descritos como fontes e demandas é utilizada o parâmetro G é determinado pela Equação 2.

$$G_{j,t}^{Reuse} = \frac{F_{out,t}^{lim} \cdot C_{out,j,t}^{max} - F_{in,t}^{lim} \cdot C_{in,j,t}^{max}}{C_{out,j,t}^{max}} = \frac{F_i \cdot C_{j,i}}{C_{j,i}^{lim}} \quad (2)$$

na qual $F_{in,t}^{lim}$ e $F_{out,t}^{lim}$ indicam respectivamente as vazões de entrada e de saída na operação t . $C_{in,j,t}^{max}$ e $C_{out,j,t}^{max}$ são os valores máximos das concentrações de entrada e de saída do contaminante j na operação j . F_i indica a vazão da demanda i e $C_{j,i}^{lim}$ é o valor limite permitido para a concentração do contaminante j na demanda i .

Etapa 4.2: Determinação da Operação de referência

Segundo o critério de Calixto *et al.* (2015), a operação de referência será aquela em que pelo menos um de seus contaminantes tenha concentração de entrada igual a zero. Se mais de uma operação atender a esse critério, a de referência será aquela em que um de seus contaminantes apresenta a menor concentração de saída.

Em alguns casos mais de uma operação será candidata a ser a operação de referência. Quando isso ocorre é necessário calcular o Fator de Restrição $R_{j,k}$ (SANTOS, 2007), que mostra a quantidade aproximada de água a ser economizada em uma determinada operação K . Esse fator é calculado através da Equação 3.

$$Fator R_{j,k} = \frac{C_{out,j,ref}}{C_{in,j,k}} \quad (3)$$

em que o Fator $R_{j,k}$ é o fator restritivo de um contaminante j na operação k , $C_{out,j,ref}$ é a concentração de saída do contaminante j na operação de referência, e $C_{in,j,k}$ é a concentração de entrada do contaminante j em uma operação k . A operação de referência é aquela que apresenta menor valor do Fator $R_{j,k}$.

Após determinar a operação de referência, deve-se ajustar as concentrações de entrada de todos os contaminantes da operação de referência, aos valores da menor qualidade da fonte de água externa, na grande maioria dos casos 0 ppm.

Etapa 5: Montagem do DFA

Aqui é construído o DFA baseado nas concentrações do contaminante de referência. São aqui apresentados dois métodos de geração do DFA, o primeiro (5.1) para operações de carga fixa e o segundo (5.2) para operações representadas por fontes/demandas.

Etapa 5.1 - Operações de carga fixa:

Nesse tipo de problema deve-se avaliar se os processos possuem ganhos ou perdas de água. Se não possuírem, pode-se gerar o DFA baseado na concentração do contaminante de referência. Caso contrário é utilizado o conceito de operações fictícias apresentado por Francisco *et al.* (2015). Após esse procedimento, é feita a montagem do DFA, em que em cada operação K é representada por uma linha no diagrama que tem início em sua concentração de entrada vai até sua concentração de saída do contaminante de referência. A vazão f_k (em t/h) da operação é registrada no lado esquerdo do diagrama no mesmo nível da respectiva operação.

Tanto para operações de carga fixa como para fontes/demandas, o algoritmo organiza as operações em ordem crescente de concentração de entrada, se mais de uma operação possuir o mesmo valor para a concentração de entrada, a ordem das operações no diagrama será definida pela concentração de saída, organizada dos valores mais baixos para os mais altos. Se mais de uma operação tiver os mesmos valores para as concentrações de entrada e saída, essas operações devem ser alocadas no diagrama em ordem crescente de vazão.

Etapa 5.2 - Fontes/demandas:

Para problemas de fontes/demandas, segundo Francisco *et al.* (2018), as demandas são representadas por uma linha no diagrama que tem origem no valor de concentração inicial da demanda em questão até o máximo valor de concentração entre todas as fontes e demandas do sistema, isto é, o último intervalo

de concentração. Aqui, as operações são organizadas em ordem crescente de concentração de entrada e caso essas sejam iguais, como a concentração máxima de saída nesse tipo de problema será a mesma em todas as operações, é levado em conta a ordem crescente de vazão para a organização do diagrama.

Organização do DFA:

Uma etapa comum para ambas as formas de descrição do problema é a determinação da quantidade de massa transferida em cada intervalo da operação K ($\Delta m_{k,j}$), em g/h, que pode ser feita através da Equação 4:

$$\Delta m_{k,j} = F_{k,j} (C_{k,j,in}^{proc} - C_{k,j,out}^{proc}) = f_k (C_{k,j,out} - C_{k,j,in}) \quad (4)$$

onde, C está em ppm, F em t/h e Δm em g/h.

A quantidade de massa transferida em cada intervalo é representada entre parênteses sobre a linha de cada operação, ao lado direito em seu respectivo intervalo.

Etapa 6: Execução do DFA

O DFA é executado para a determinação da vazão necessária de água em cada demanda. A vazão para cada intervalo pode ser calculada por meio da Equação 5, quando se trata de apenas uma corrente, e pela Equação 6 quando a operação precisa de mais de uma corrente:

$$f_k = \frac{\Delta m_{k,j}}{(C_{k,j,out} - C_{k,j,in})} \quad (5)$$

$$f_k = \frac{[\Delta m_{k,j} - f_{k,j}(C_{k,j,out} - C_{k,j,in})]}{C_{k,j,out} - C_{k,sr,out}} \quad (6)$$

em que $f_{k,j}$ é a vazão da operação k para o contaminante j e $C_{k,i,in}$ é a concentração de entrada da fonte que irá fornecer água nesse intervalo.

O DFA segue três regras para utilizar o mínimo de água primária (fresca ou fonte externa) possível no processo, são elas (Gomes, 2002):

Regra 1: Priorizar o uso de fontes internas de água e utilizar fontes externas somente quando não houver fonte interna disponível, tanto em quantidade quanto em qualidade.

Regra 2: Transferir toda a quantidade possível de contaminante dentro de um intervalo de concentração.

Regra 3: Para evitar a divisão de operações, naquelas que estiverem presentes mais de um intervalo, ao mudar de intervalo, a corrente deve continuar fluindo pela mesma operação até o final dessa.

Ao finalizar a execução do DFA é determinado o consumo mínimo de água primária e é determinado o ponto de pinch, localizado na maior concentração do último intervalo que necessita de água externa. Essa regra serve para todos os tipos de operações.

Etapa 7: Inspeção para verificar se houve violações

É feita uma inspeção para verificar se todas as vazões das operações ou demandas foram atendidas e se houve alguma violação de concentração dos demais contaminantes. Para tal, através de balanços de massa, são colocadas na estrutura gerada as concentrações correspondentes dos outros contaminantes, além do referênci, que foi usado para gerar a estrutura em análise. Caso exista violação, para operações de carga fixa pode ser feito um reciclo local e após isso é realizado um balanço de massa para determinar as novas concentrações de entrada da operação. As violações para ambas as formas de problema podem ser eliminadas ajustando o consumo de água da fonte externa ou redirecionando as saídas das operações onde se tem violação (fontes com elevadas concentrações). Essa última opção pode eliminar a violação sem aumentar o consumo de água da fonte externa (Gomes *et al.*, 2013).

Outra possibilidade, que visa diminuir o consumo de água da fonte externa na evolução da rede, ocorre quando as outras operações, exceto a de referênci, recebem água externa e possuem o valor de concentração de entrada abaixo do

valor limite. Neste caso, essas operações podem ser tratadas como operações independentes e têm o seu consumo de água recalculado, devendo o novo valor de saída da corrente desta operação ser considerado para o reuso. Processos com essa característica podem apresentar um menor consumo de água primária. Esta etapa de remoção das violações pode ser tomada como uma etapa de evolução da rede (Gomes *et al.*, 2013).

Etapa 8: Construção da rede final.

Após a inspeção de violações e suas retiradas, em ambos os problemas, constrói-se a rede final.

4.2 METODOLOGIA DE REGENERAÇÃO E RECICLO

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador

Aqui o algoritmo parte dos resultados obtidos na aplicação do DFA para máximo reuso, como o contaminante de referência e o ponto de pinch mássico. Estas informações são necessárias para identificar a concentração ideal do regenerador.

Quando a concentração de saída do regenerador é baixa, gera-se água regenerada com mais qualidade, o que oferece mais possibilidades de reuso, reduzindo custos associados ao consumo de água primária e ao volume de efluente a ser tratado e descartado. Todavia, essa situação leva a um aumento nos custos de regeneração associados a um alto grau de tratamento para alcançar pequenas concentrações de saída do regenerador para um dado contaminante j .

A regra geral para problemas baseados na metodologia pinch afirma que as correntes a serem regeneradas devem ter concentração acima do ponto de pinch e devem ser regeneradas até uma concentração abaixo ou igual ao pinch, ou seja, a localização da descarga do regenerador deve ser entre a concentração de água de fonte primária e a concentração do ponto de pinch (Hallale, 2002).

Para o uso de unidade(s) de regeneração é preciso determinar a concentração limite de saída do regenerador, de modo que possa permitir uma redução do consumo de água primária sem uma elevação dos custos de tratamento.

Para tanto, a concentração de saída do(s) regenerador(es) deve estar localizada entre os valores de entrada da(s) operação(ões) (ou demandas) abaixo do ponto de pinch. Tendo o ponto de pinch como norteador, as operações (ou demandas) do problema podem ser divididas em 3 grupos (A, B e C), a saber:

- A. **Operações (demandas) abastecidas inteiramente por fontes internas:** não utilizam água regenerada;
- B. **Operações (demandas) parcialmente abastecidas por fontes internas e fontes externas:** a concentração ideal do contaminante de referência no regenerado é igual à concentração limite de entrada da(s) operação(ões) deste grupo que possua(m) o maior valor de vazão acumulada para um mesmo valor de concentração limite;
- C. **Operações (demandas) inteiramente abastecidas com água da fonte externa:** a concentração ideal do contaminante de referência no regenerado é igual à concentração limite de entrada da(s) operação(ões) deste grupo que possua(m) o maior valor de vazão acumulada para um mesmo valor de concentração limite.

Etapa 2: Seleção da concentração de saída do regenerador

As operações(demandas) completamente supridas por fontes internas (Grupo A) são removidas da análise, pois não faz sentido usar fonte de água regenerada em operações deste grupo, afinal, elas já são totalmente supridas por fontes internas. Entre as operações restantes, se existir operações do grupo C e operações do grupo B simultaneamente, as operações do grupo C são removidas da análise.

Havendo apenas operações do grupo B, considera-se a concentração ideal do contaminante de referência igual à concentração limite da operação com maior somatório de vazão acumulada para uma dada concentração. Ao definir essa concentração é gerado o DFA incluindo a corrente regenerada com base na concentração do contaminante de referência.

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

O DFA é novamente realizado, considerando a corrente regenerada. Assim, é calculada a vazão necessária da(s) corrente(s) regenerada(s) e da(s) fonte(s)

externa(s) em cada intervalo de cada operação de acordo com as Equações 5 e 6. O algoritmo segue as mesmas regras apresentadas na seção de máximo reuso; no entanto, a diferença é que pela presença de um regenerador no sistema, o DFA para regeneração e reciclo é semelhante ao DFA para múltiplas fontes externas (FRANCISCO *et al.*, 2022). Neste caso, a concentração do regenerador é considerada uma fonte externa, que tem prioridade de uso em relação a fonte de água fresca (externa), objetivando reduzir o consumo desta última.

Além disso, por se tratar de regeneração com reciclo, a vazão de água regenerada é considerada ilimitada nesse método, priorizando a máxima utilização possível de água regenerada.

Etapa 4: Realização do balanço de massa

Com o DFA terminado e a estrutura da rede definida, é feito o balanço de massa para os outros contaminantes em todas as operações(demandas) para verificar se houve violações.

Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Nessa etapa existem dois caminhos distintos a serem seguidos. Se houver violação, elas devem ser removidas, ajustando as vazões de água da fonte primária e/ou as vazões de saída da operação que ocorre a violação. Se após isso ainda existirem violações, é necessário ajustar as concentrações dos demais contaminantes na corrente regenerada e realizar uma otimização matemática para cada operação (ou demanda) restante, considerando as correntes de água primária e regenerada.

Se após esse procedimento o consumo de água primária aumentar, repete-se a etapa de ajuste de concentração dos demais contaminantes. Caso contrário, identifica-se as fontes localizadas acima do ponto de pinch e um novo consumo mínimo de água fresca.

É importante esclarecer que não é considerada perda de água no processo de regeneração e assume-se que as concentrações regeneradas de cada contaminante são limitadas pelo valor determinado pelo balanço de massa e pelo menor valor de água fresca.

Etapa 6: Seleção das correntes a serem regeneradas

É necessário identificar quais são as correntes a serem enviadas para o processo de regeneração. Para esta identificação, o ponto de pinch é importante, pois são avaliadas as fontes que estão localizadas acima do ponto de pinch. Para cada uma destas fontes é determinada a taxa de remoção do contaminante j , de acordo com a Equação 7.

$$RR_{SR_S,J} (\%) = \left[\frac{C_{SR_S,J} - C_{J,Reg}^{out}}{C_{SR_S,J}} \right] X 100 \quad (7)$$

Se $C_{SR_S,J} \leq C_{J,Reg}^{out}$, então não há necessidade de regeneração e RR será zero.

Para cada fonte acima do ponto de pinch calcule-se o $RR_{SR_S}^{Total}$ a partir da Equação 8:

$$RR_{SR_S}^{Total}(\%) = \sum_J RR_{S,J} (\%) \quad (8)$$

As fontes que possuem menor valor de $RR_{SR_S}^{Total}(\%)$ serão selecionadas para a regeneração. Caso essa fonte apresente vazão disponível maior do que a quantidade necessária para a regeneração, não é preciso usar outra fonte, caso contrário, deve-se escolher a outra fonte com menor $RR_{SR_S}^{Total}(\%)$ até que a vazão do regenerador seja totalmente suprida.

Etapa 7: Construção da rede final.

Construção da rede final do problema considerando o regenerador.

4.3 METODOLOGIA DE REGENERAÇÃO E REUSO

A metodologia para regeneração e reuso é similar à de regeneração e reciclo, diferindo na disponibilidade de corrente regenerada. No caso de regeneração e reuso, a corrente regenerada não é considerada ilimitada como na regeneração com reciclo. Nessa situação só haverá regeneração da corrente proveniente de uma

operação quando alguma operação do sistema for finalizada no DFA, no caso dos problemas descritos como operações, tendo o seu valor limitado ao valor de vazão da saída da operação (GOMES, 2002). Para o caso do problema descrito por fontes/demandas, a princípio, qualquer fonte do sistema pode ser considerada para ser regenerada, pois se considera que elas estão disponíveis em qualquer momento no sistema.

As Etapas 1, 2, 4 e 5 são exatamente iguais ao caso para regeneração e reciclo. Neste sentido, a seguir serão abordadas somente as etapas nas quais existem alguma modificação.

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

O DFA é novamente realizado, considerando a presença da corrente regenerada. Todavia, a sua utilização só poderá ser considerada ao término de uma operação, que disponibilizará a sua corrente de saída para ser regenerada (GOMES, 2022). A corrente regenerada é considerada uma fonte externa ao processo, com privilégio de uso frente a água externa (fresca).

Em cada intervalo, utilizando as Equações 5 e 6, é(são) calculada(s) a(s) vazão(ões) necessária(s) da(s) corrente(s) regenerada e da(s) fonte(s) externa(s) em cada intervalo de cada operação. As regras do DFA de máximo reuso são empregadas, no entanto, a diferença é que há a presença de uma corrente regenerada no sistema com quantidade limitada, sendo semelhante ao DFA para múltiplas fontes (FRANCISCO et al., 2022).

No caso de fontes/demandas há duas opções distintas a serem consideradas: 1) utilizar as regras de seleção das correntes a serem regeneradas de acordo com o apresentado na metodologia de regeneração e reciclo (Etapa 6 - Item 4.2); ou 2) considerar qualquer fonte do sistema para ser regenerada. A primeira opção busca aumentar o reuso interno das correntes do sistema, uma vez que privilegia a regeneração de correntes acima da concentração de pinch do contaminante de referência. Na segunda opção há a possibilidade de selecionar correntes com concentração abaixo do pinch em relação ao contaminante de referência. Este fato pode levar a uma redução do reuso interno ao avaliar o contaminante de referência e aumentar o consumo de água regenerada; no entanto, ao avaliar a regeneração

de outros contaminantes que não o de referência, em situações nas quais o uso de uma corrente com baixa concentração do contaminante de referência apresenta um alto valor de concentração para os demais contaminantes, o que levaria a uma violação na rede para tais contaminantes.

Diante disso, a escolha das fontes a serem regeneradas em problemas de fonte/demandas serão, a princípio, selecionadas de acordo com a concentração dos contaminantes que não o de referência. Neste sentido, podem ser selecionadas correntes abaixo do pinch de concentração do contaminante de referência em problemas de múltiplos contaminantes. Para o caso de um contaminante é seguida a regra do caso de regeneração e reciclo para escolha das correntes.

A Etapa 7 do caso de regeneração e reciclo será a Etapa 6 (final) do caso de regeneração e reuso.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ESTUDO DE CASO 1

Este estudo de caso é baseado em dados apresentados por Liu (2019) para uma usina produtora de etanol de mandioca chinesa, que produz 106,06 toneladas de etanol por dia e consome 1156,17 toneladas de água por dia. O processo será apresentado em etapas.

5.1.1 Aplicação do DFA para máximo reuso

Etapa 1: Obtenção dos dados do problema para construção da Tabela de Oportunidades.

Tabela 1 - Dados da usina em estudo.

OPERAÇÃO	DESCRIÇÃO	VAZÃO (T/H)	C_{in} DQO (PPM)	C_{out} DQO (PPM)	ΔM (G/H)
OP.1	Circuito de resfriamento	2,42	5	100	229,9
OP.2	Oficinas de limpeza	1,09	60	1500	1569,6
OP.3	Condensado	2,7	0	20	54
OP.4	Limpeza das instalações	2,58	50	1000	2451
OP.5	Esterilização	0,5	50	400	175

Além disto, há disponibilidade ilimitada de uma fonte externa a 0 ppm.

Etapa 2: Organização do problema para máximo reuso e Etapa 3: Identificar se os dados limites da operação estão na forma de operações de carga fixa ou fontes/demandas

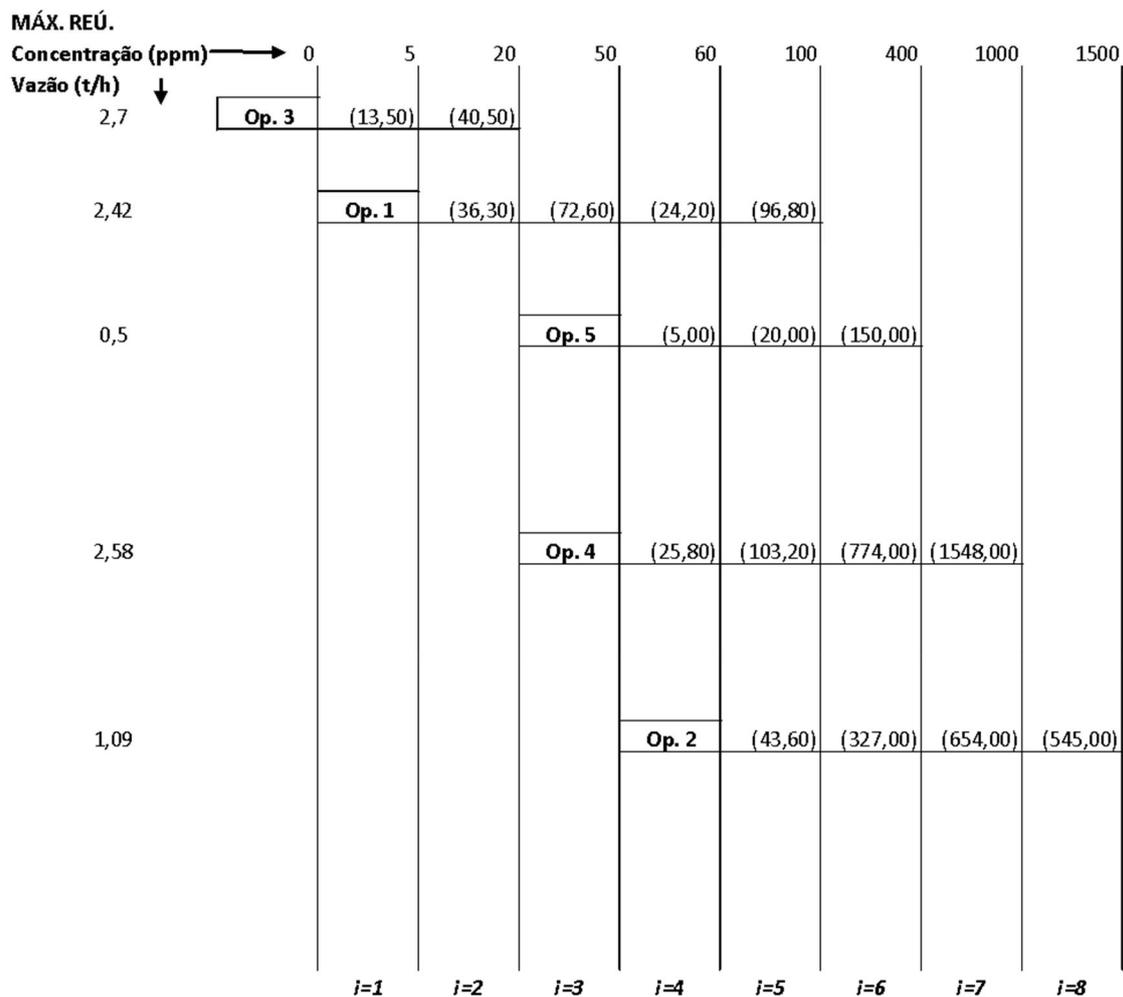
O problema é descrito na forma de operações de carga fixa conforme pode ser visto na Tabela 1. Além disso, é um problema que envolve apenas um contaminante, não sendo necessária a realização da Etapa 4 como é descrita na metodologia apresentada na Seção 4.1.

Etapa 5: Montagem do DFA

Etapa 5.1 (Operações de carga fixa):

Organização do DFA:

Figura 14 - Representação do diagrama de fontes de água.



As operações são posicionadas em função de sua concentração de entrada e a quantidade de massa transferida em cada intervalo é representada entre parênteses sob a linha de cada operação ao lado direito, em seu respectivo intervalo, como mostrado na Figura 15.

Etapa 6: Execução do DFA

Iniciando o procedimento, somente a operação 3 está presente no primeiro intervalo de concentração e utiliza somente água fresca a 0 ppm, que é a única fonte disponível com concentração aceitável para essa operação.

No segundo intervalo, além da operação 3, que já teve sua vazão suprida, está presente também a operação 1, que utilizou 1,815 t/h de água fresca a 0 ppm que era a única fonte disponível nos intervalos 1 e 2, apesar dessa operação poder usar água com concentração a partir de 5 ppm.

No terceiro intervalo ($i=3$) há somente a operação 1, a qual ainda necessita de água para realizar a transferência de massa do contaminante nesse intervalo. Estão disponíveis as fontes externas a 0 ppm e 2,7 t/h provenientes da operação 3 (20 ppm). Pela regra do DFA, a prioridade é usar a fonte interna, então usa-se 0,605 t/h de água da fonte da operação 3.

Já no quarto intervalo, estão presentes as operações 1, 4 e 5. A operação 1 já está satisfeita em relação a transferência de massa ao utilizar a fonte interna da própria operação proveniente do intervalo anterior ($i=3$). Para a operação 5, tem-se disponíveis a fonte externa (0 ppm) e a fonte interna da operação 3. A prioridade é empregar a fonte interna da operação 3, sendo utilizado um total de 0,125 t/h (Equação 5). Já para a operação 4, tem-se disponíveis as mesmas fontes, bem como a priorização de uso da fonte da operação 3, empregando um total de 0,645 t/h.

No quinto intervalo, estão presentes as operações 1, 2, 4 e 5. As operações 2, 4 e 5 ainda necessitam de outras fontes de água para ter a transferência de massa de contaminante suprida, ao contrário da operação 1, que já alcançou o seu valor limite de vazão. De acordo com a Equação 6 estas operações empregam, respectivamente, 0,17 t/h, 0,1875 t/h e 0,9675 t/h de água proveniente da operação 3. No entanto, a quantidade dessa fonte não é suficiente para remover a carga de contaminante da operação 2, sendo necessário a utilização da fonte externa (0 ppm), em uma quantidade de 0,3 t/h.

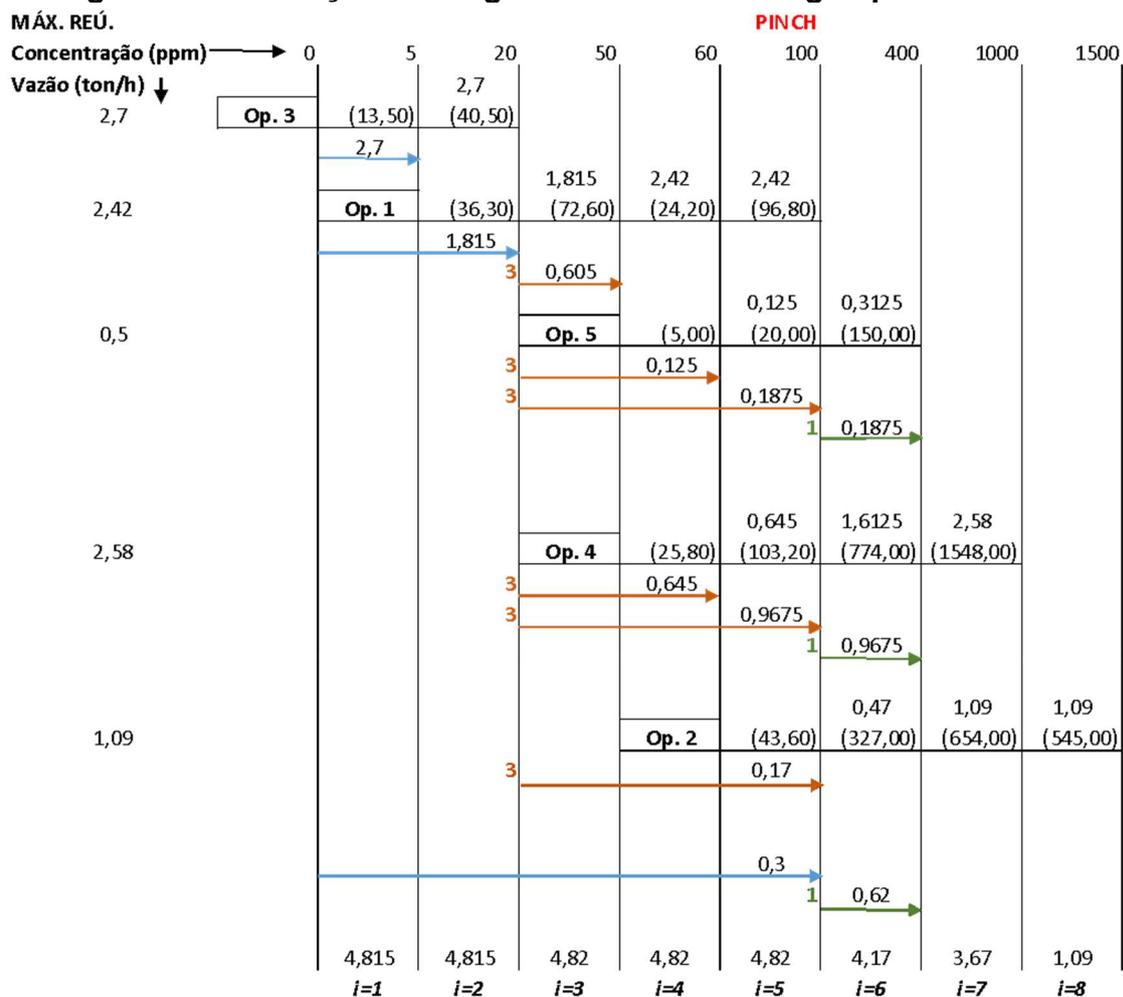
No sexto intervalo, estão presentes as operações 2, 4 e 5. As fontes disponíveis neste intervalo são a fontes externa (0 ppm) e fonte interna da operação 1 (100 ppm). A fonte interna da operação 1 é empregada nas operações 2 com 0,62

t/h, na operação 4 com 0,9675 t/h e na operação 5 com 0,1875 t/h , de modo a transferir a carga de contaminante.

No sétimo intervalo de concentração tem-se as operações 2 e 4. Todavia, estas operações já alcançaram os valores limites de vazão, conseguindo transferir a carga mássica de contaminante com a própria vazão interna de cada operação. No último intervalo ($i=8$), há apenas a operação 2, que é suprida pela fonte interna proveniente dela mesma.

Na Figura 16 é possível observar o diagrama final obtido para o máximo reuso a partir do procedimento descrito anteriormente, indicando as correntes empregadas em cada operação.

Figura 15 - Execução do diagrama de fontes de água para máximo reuso.



De acordo com Francisco (2017), o último intervalo a empregar água da fonte externa indica o ponto de pinch, que no presente estudo de caso representa o valor

de 100 ppm. O consumo da fonte externa (0 ppm) foi de 4,815 t/h, que representa uma redução de 48,2 % em relação ao somatório das vazões em cada operação nos dados originais (9,29 t/h).

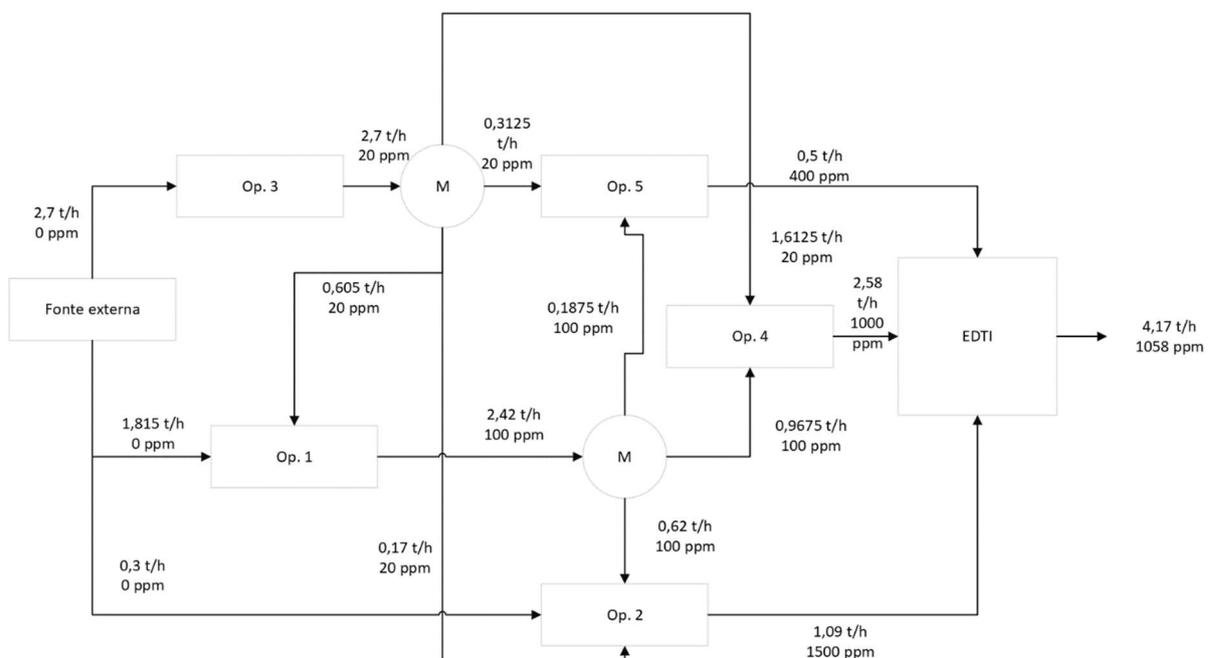
Etapa 7: Inspeção para verificar se houve violações

Por ser um problema de um único contaminante, não existe violação de concentração na entrada dos equipamentos. Também não foram encontradas violações nas vazões de saída das operações.

Etapa 8: Construção da rede final.

A Figura 17 corresponde a rede final obtida para o DFA representado na Figura 16. Neste fluxograma as correntes de saída estão misturadas em uma unidade representada como EDTI, que não está no DFA, sendo uma das opções para gerenciar os efluentes.

Figura 16 - Representação da rede de água para a opção de máximo reuso.



5.1.2 Aplicação do DFA para regeneração e reciclo

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção da concentração de saída do regenerador

Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.2, tomando como base o diagrama obtido para o para máximo reuso (Figura 16), em relação ao ponto de pinch (100 ppm) as operações podem ser separadas no grupo A (operações 2, 4 e 5), no grupo B (operação 1) e no grupo C (operação 3). Seguindo a metodologia adotada por Francisco *et al.* (2022), as operações dos grupos A e C são removidas da análise, pois há operações pertencentes ao grupo B. Como só existe uma operação no grupo B (operação 1), a concentração ideal da saída do regenerador é igual a concentração limite da operação 1 (5 ppm).

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

No primeiro intervalo, somente existe a operação 3, que necessita de água da fonte externa (0 ppm), sendo utilizada 2,7 t/h dessa fonte para suprir a demanda dessa operação. No segundo intervalo, além da operação 3, satisfeita pela fonte interna proveniente dela mesma, tem-se a operação 1 que tem como fontes disponíveis a externa e a de água regenerada a 5 ppm. Como há a priorização do uso da água da fonte regenerada, na operação 2 são empregadas 2,42 t/h desta fonte.

No terceiro intervalo, apenas a operação 1 está presente, sendo que está já tem a transferência de massa de contaminante satisfeita, pois alcançou a sua vazão limite. Já no quarto intervalo, as operações 1, 4 e 5 estão presentes. Todavia, a operação 1 já foi satisfeita e, as operações 4 e 5, tem suas vazões supridas pelo uso da fonte interna proveniente da operação 3 em 0,125 t/h e 0,645 t/h, respectivamente.

No quinto intervalo, estão presentes as operações 1, 2, 4 e 5. A operação 1 já está satisfeita. Para as demandas remanescentes, estão disponíveis as fontes externas (0 ppm), do regenerador (5 ppm) e da operação 3 (20 ppm). Na operação 5 são empregadas 0,1875 t/h de água da operação 3; já para a operação 4 são empregadas 0,9675 t/h de água da operação 3. Para a operação 2, emprega-se o restante da vazão da operação 3 (0,775 t/h), sendo necessário empregar a fonte

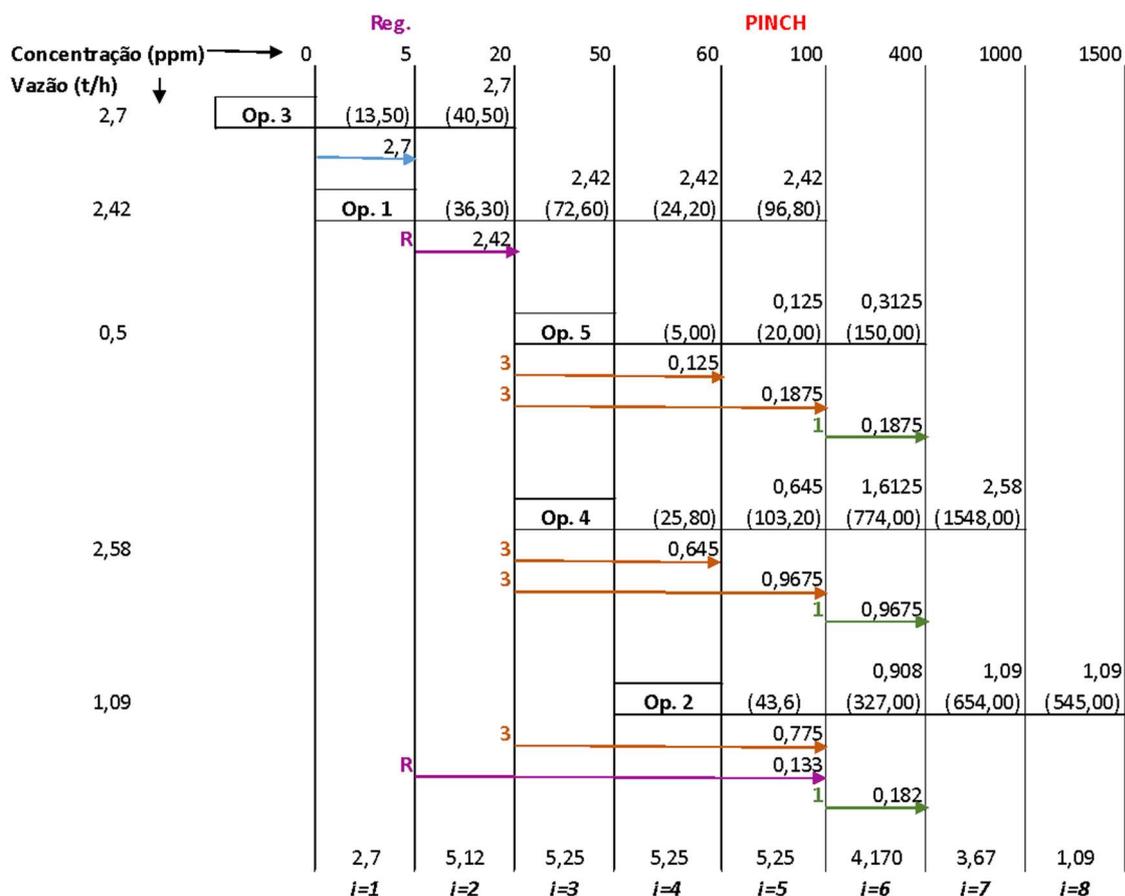
regenerada para assimilar o restante de contaminante deste intervalo, sendo então empregando um total de 0,133 t/h desta fonte.

No sexto intervalo, estão presentes as operações 2, 4 e 5 e estão disponíveis as fontes externa, do regenerador e da operação 1. A fonte da operação 1 é empregada em cada uma das operações do intervalo para assimilar a quantidade de contaminante necessária. A vazão de água da fonte interna da operação 1 é de 0,182 t/h, 0,9675 t/h e 0,1875 t/h, nas operações 2, 4 e 5, respectivamente.

No sétimo intervalo, há apenas as operações 2 e 4, que já estão satisfeitas em termos de vazão e de assimilação da carga mássica do contaminante pelas respectivas fontes internas.

A Figura 18 apresenta o DFA obtido para o caso de regeneração e reciclo de acordo com os cálculos descritos anteriormente..

Figura 17 - Representação do diagrama de fontes de água com regeneração e reciclo.



O consumo da fonte externa (água fresca – 0 ppm) foi de 2,7 t/h e a quantidade de água regenerada foi de 2,553 t/h. Em relação ao caso de máximo reuso, a redução do consumo de água fresca foi de 43,92 %.

Etapa 4: Realização do balanço de massa

Como o problema apresenta apenas um contaminante, não é necessário realizar o balanço de massa para determinar as concentrações.

Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Já que o problema não apresenta violação de concentração, foi verificada a possibilidade de existência de violação na vazão, a qual também não existiu nesse estudo de caso. Todas as operações tiveram suas vazões supridas totalmente, mas caso elas fossem menores do que seus limites, também não haveria violação.

Etapa 6: Seleção das correntes a serem regeneradas

A taxa de remoção do contaminante é calculada de acordo com as Equações 7 e 8, e serve para definir a prioridade da regeneração das correntes do processo. As correntes avaliadas são aquelas que se encontram acima do ponto de pinch (100 ppm), e elas são representadas pelas saídas das operações 1, 2, 4 e 5. A ordem de regeneração das correntes é determinada pela ordem crescente do RR_{TOTAL} . A Tabela 2 apresenta a taxa de remoção de contaminante, que serve para indicar as correntes que serão regeneradas.

Tabela 2 - Taxa de remoção do contaminante DQO.

FONTES	$C_{SR,C1}$ (PPM)	$RR_{SR,C1}$ (%)	RR_{TOTAL} (%)
OP.1	100	95%	95%
OP.2	1500	100%	100%
OP.4	1000	100%	100%
OP.5	400	99%	99%

A operação 1 é a melhor opção para ser regenerada, pois apresentou menor valor para o RR_{TOTAL} . Agora deve-se analisar se a vazão de água da operação 1 é suficiente para atender a demanda de água regenerada do sistema. Neste caso,

observa-se que a operação 1 não possui vazão suficiente para produzir água regenerada do sistema, ($2,42 \text{ t/h} < 2,553 \text{ t/h}$), sendo necessário utilizar outra fonte, que no caso é a proveniente da operação 5.

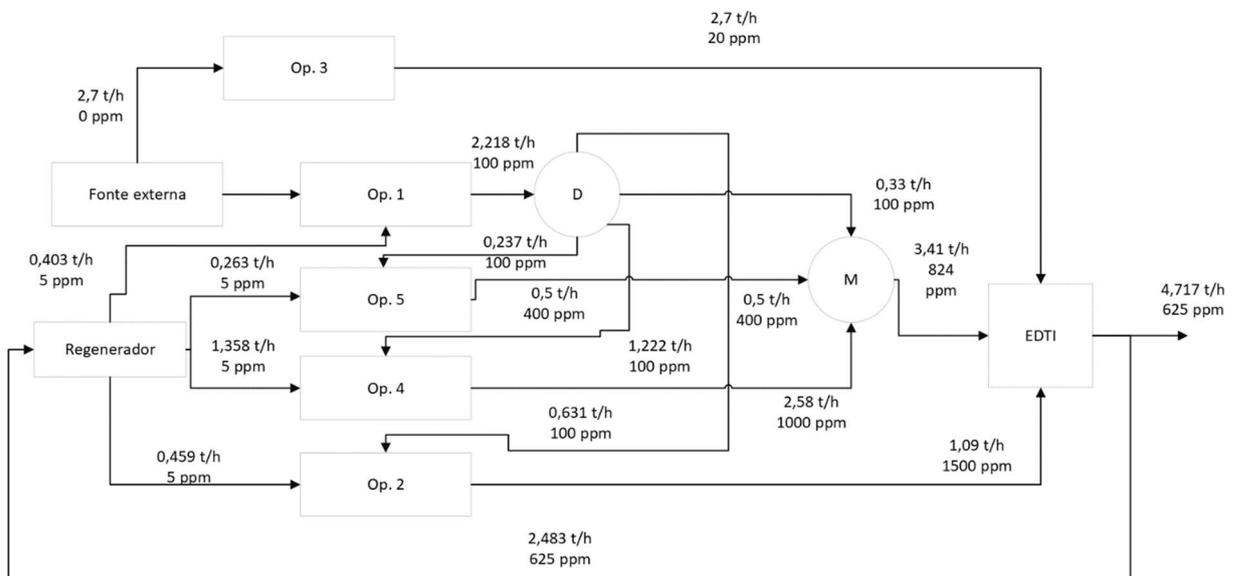
A operação 5 é ideal para complementar a vazão de regeneração pois possui RR_{TOTAL} menor do que as operações restantes (2 e 4) e sua vazão é suficiente para complementar a vazão da operação 1 para a regeneração.

Etapa 7: Construção da rede final

A Figura 19 corresponde a rede final obtida para o DFA representado na Figura 18. Analogamente à Figura 17, nela também está representada uma EDTI para juntar todos os efluentes.

.

Figura 18 - Representação da rede de água para a opção de regeneração com reciclo.



5.1.3 Aplicação do DFA para regeneração e reuso

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção da concentração de saída do regenerador

As Etapas 1 e 2 são idênticas ao do DFA com regeneração e reciclo. Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.3, a concentração ideal da saída do regenerador é igual a concentração limite da operação 1 (5 ppm).

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

No primeiro intervalo, há somente a operação 3, que necessita de 2,7 t/h de água da fonte externa (0 ppm), a única fonte disponível neste intervalo. No segundo intervalo, além da operação 3, tem-se a operação 1 e a única fonte disponível é a fonte externa. Note que apesar de existir a indicação da concentração da fonte regenerada no diagrama, ainda não é possível utilizá-la, pois nenhuma operação foi finalizada. Assim, não há nenhuma saída de operação que disponibilizará uma corrente para ser regenerada até a concentração indicada. Logo, são empregadas 1,815 t/h de água da fonte externa na operação 3. Neste intervalo, a operação 3 é finalizada, disponibilizando a sua corrente para ser regenerada até um limite de 2,7 t/h.

No terceiro intervalo, apenas a operação 1 está presente, e as fontes externa e a regenerada. A operação 1 recebe 0,403 t/h da fonte regenerada para ter a transferência de massa de contaminante satisfeita. Já no quarto intervalo, as operações 1, 4 e 5 estão presentes. Todavia, a operação 1 já foi satisfeita e, as operações 4 e 5, tem suas vazões supridas pelo uso da fonte de água regenerada em 0,091 t/h e 0,469 t/h, respectivamente.

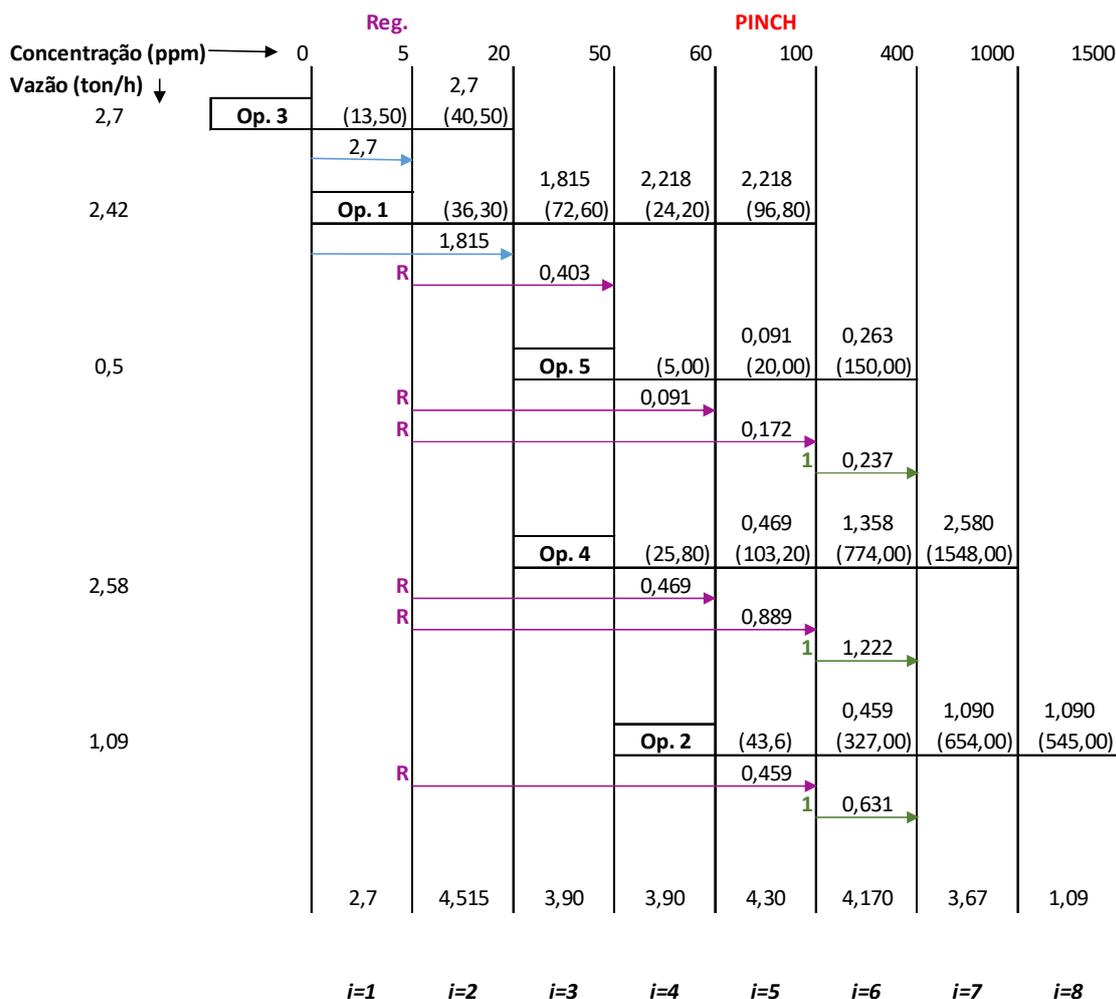
No quinto intervalo, estão presentes as operações 1, 2, 4 e 5. A operação 1 já está satisfeita e é finalizada neste intervalo, podendo o efluente dessa operação ser direcionada para o regenerador. Para as demandas remanescentes, estão disponíveis as fontes externas (0 ppm) e a do regenerador (5 ppm). Novamente, nas operações 2, 4 e 5, são empregados, respectivamente, 0,459 t/h, 0,172 t/h e 0,889 t/h de água do regenerador.

No sexto intervalo, estão presentes as operações 2, 4 e 5 e estão disponíveis as fontes externa, regenerada e da operação 1. Note que o efluente da operação 1

pode ser enviado para o regenerador ou ser empregado diretamente nas demais operações. Para reduzir os custos de regeneração, o efluente da operação 1 será direcionado para o reuso interno nas demais operações. Assim, a fonte da operação 1 é empregada em cada uma das operações do intervalo para assimilar a quantidade de contaminante necessária. A vazão de água da fonte interna da operação 1 é de 0,631 t/h, 1,222 t/h e 0,237 t/h, nas operações 2, 4 e 5, respectivamente.

No sétimo intervalo há apenas as operações 2 e 4, que já estão satisfeitas em termos de vazão e de assimilação da carga mássica do contaminante. A Figura 18 apresenta o DFA obtido para o caso de regeneração e reuso.

Figura 19 - Representação do diagrama de fontes de água com regeneração e reuso.



O consumo da fonte externa (água fresca – 0 ppm) foi de 4,515 t/h e a quantidade de água regenerada foi de 2,483 t/h.

Etapa 4: Realização do balanço de massa

Como o problema apresenta apenas um contaminante, não é necessário realizar o balanço de massa para as concentrações.

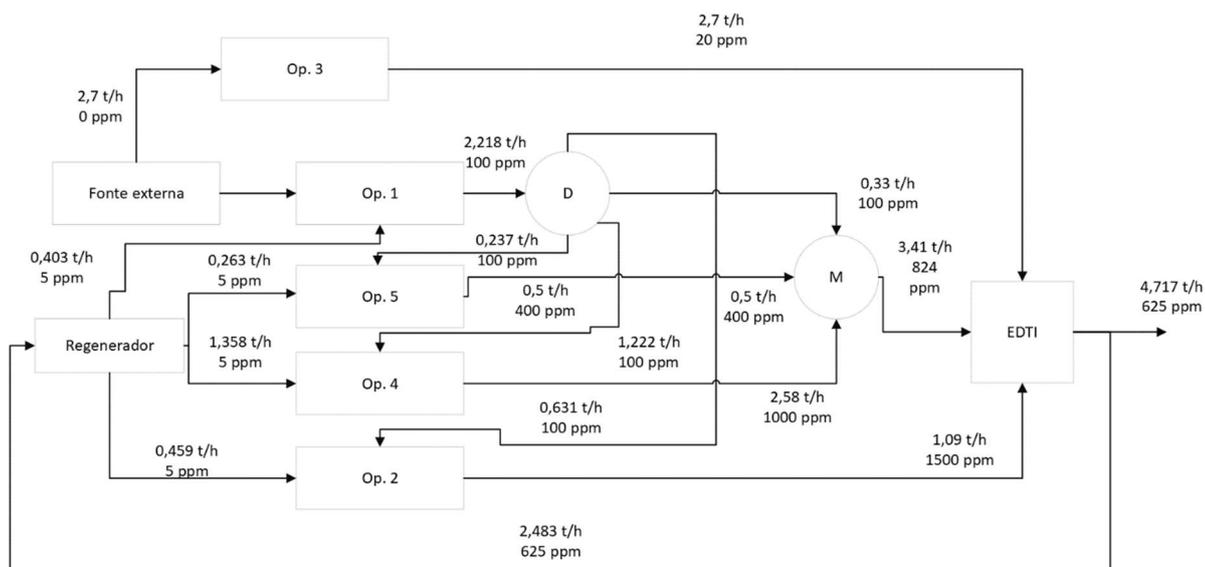
Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Já que o problema não apresenta violação de concentração, foi verificado a possibilidade de existência de violação na vazão, que também não está presente nesse estudo de caso. Todas as operações tiveram suas vazões supridas totalmente.

Etapa 6: Construção da rede final

A Figura 21 corresponde à rede final obtida para o DFA representado na Figura 20.

Figura 20 – Fluxograma do processo correspondente ao DFA da Figura 20 - Opção de regeneração com reuso.



5.1.4 Análise dos resultados – Estudo de Caso 1

Em relação à opção de máximo reuso, a redução do consumo de água fresca com a regeneração com reuso foi de 6,2 %. O volume de água regenerada em relação ao caso de regeneração e reciclo foi 2,7% menor.

A Tabela 3 apresenta uma comparação dos resultados obtidos através dos procedimentos propostos (DFA) com o resultado apresentado no trabalho utilizado como base (Liu (2019)), para o consumo da fonte externa a 0 ppm.

O resultado para máximo reuso foi bem próximo ao obtido por Liu (2019), sendo menor do que o de Liu (2019) em 3,12%. Liu (2019) usa uma metodologia que combina a uma análise da pegada hídrica com a análise pinch.

Tabela 3 - Comparação dos resultados obtidos para as diferentes possibilidades.

CONSUMO DE ÁGUA DA FONTE EXTERNA (0 ppm)	MÁXIMO REUSO	REGENERAÇÃO COM RECICLO	REGENERAÇÃO COM REUSO
Resultados encontrados	4,815 t/h	2,7 t/h	2,7 t/h
Referência	4,97 t/h	-	-

Cabe aqui também ressaltar que há um compromisso entre o custo do consumo de água externa e o custo para regeneração. No presente trabalho e custo do processo de regeneração é avaliado de forma superficial, qualitativamente, ou seja, a função objetivo aqui adotada é o consumo de água externa.

5.2 ESTUDO DE CASO 2

O presente estudo de caso trata de um processo de produção integrada de bioetanol de 1ª e 2ª gerações, com o intuito de aumentar o rendimento de etanol produzido e diminuir as necessidades de energia e água no processo produtivo (VALDERRAMA; QUINTERO; KAFAROV, 2020). Inicialmente os autores empregaram a metodologia pinch para determinar os requisitos mínimos de aquecimento e resfriamento da planta. Após isso, foi feita a integração energética baseada em um modelo de programação matemática (Yee & Grossman, 1990) com as correntes quentes e frias selecionadas para estabelecer o menor custo total anual da rede de trocadores de calor. Para a integração mássica foi feita a otimização a partir da adaptação de um modelo matemático proposto por Martín, Ahmetovic e Grossmann (2011) (programação não linear). Nessa integração foi considerada apenas a água requerida para os processos, sendo desconsiderada a água empregada no sistema de utilidades. De acordo com os autores, foi possível obter um aumento da produção de bioetanol em cerca de 40% com a integração e a minimização do consumo de água em aproximadamente 16%.

A seguir é empregado o DFA para analisar esse processo.

Etapa 1: Obtenção dos dados do problema para construção da Tabela de Oportunidades.

Esse processo está descrito com a opção de fontes e demandas. As correntes de água provenientes da torta de filtro, condensados do evaporador, condensados de cristalizador e vinhaça foram considerados como fontes. Já as correntes de água utilizadas nos processos de embebição, tratamento (água de lavagem e água de cal), fermentação e lavagem de CO₂ foram consideradas como demandas (sumidouros). A sacarose e DQO foram consideradas como contaminantes mais restritivos do processo de produção de etanol. A sacarose é identificada por C1 enquanto C2 representa a DQO. Nas Tabelas 4 e 5 são apresentadas as vazões limites e as concentrações máximas dos contaminantes para as fontes e as demandas, respectivamente.

Tabela 4 - Dados do problema exemplo (fontes).

FONTES	FONTES	VAZÃO (KG/H)	C_{C1}^{MAX} (PPM)	C_{C2}^{MAX} (PPM)	ΔM_{C1} (KG/H)	ΔM_{C2} (KG/H)
S1	Vinhaça	17749,87	0	97,4	0	1728837,34
S2	Condensad o. de evaporação	29271,55	0,79	0	23124,52	0
S3	Condensad o de cristalização	7299,43	0,000241	0	1,759	0
S4	Torta de filtro	2000,61	25538,9	0	51093378	0

Fonte: Valderrama, Quintero e Kafarov (2020).

Tabela 5 - Dados do problema exemplo (demandas).

DEMANDAS	DEMANDAS	VAZÃO (KG/H)	C_{C1}^{MAX} (PPM)	C_{C2}^{MAX} (PPM)
D1	Extração do caldo	12118,2	0	0
D2	Clarificação (cal)	296,91	0	0
D3	Clarificação (Água)	2271,26	0,1	0
D4	Fermentação (Água de fermentação)	1468,23	0	0
D5	Fermentação (Água de lavagem de CO ₂)	478,76	0,1	0

Fonte: Valderrama, Quintero e Kafarov (2020).

Segundo os autores é necessário empregar unidades de interceptação (regeneradores) para remover ou diminuir os contaminantes das correntes indicadas como fontes antes de serem reusados em outras unidades de processo que necessitam de água.

Para a remoção dos contaminantes nas correntes aquosas dos processos (efluentes), é proposto um sistema de osmose inversa assumindo uma remoção de 90% para a sacarose. Para a remoção da DQO é considerado o processo de biodigestão, assumindo uma remoção de 95%.

5.2.1 Aplicação do DFA para máximo reuso

O procedimento de solução é realizado em 8 etapas, a saber:

A Etapa 1 corresponde a obtenção dos dados dos problemas, já apresentados nas Tabelas 4 e 5. As Etapas 2 e 3 se referem à construção do diagrama e à identificação das fontes e demandas com seus respectivos limites.

Para a aplicação do DFA em problemas de fontes e demandas é necessária uma adaptação do algoritmo. As fontes atuam como fontes internas de acordo com suas concentrações, sendo usadas a partir do respectivo intervalo em que se encontram. Nesse caso, na montagem do DFA as demandas são representadas por uma linha que tem início no valor de concentração inicial dessa demanda até o valor máximo de concentração entre todas as fontes e demandas, ou seja, o último intervalo de concentração do sistema. As vazões limites das demandas, f_k , são escritas no lado esquerdo do diagrama, conforme representado na Figura 20.

Etapa 4: Escolha do Contaminante de Referência e da Operação de Referência.

A sacarose (C1) foi definida como o contaminante de referência, pois além de apresentar maior valor do parâmetro G_W (Equação 2), está presente na maioria das demandas. O valor de G_W foi igual a zero em todas as demandas para o contaminante C2, pois, como visto nas tabelas de oportunidades, as concentrações limites desse contaminante em todas as demandas são iguais a zero. Esses valores podem ser vistos na Tabela 6. Como o problema é do tipo Fontes/Demandas não é preciso definir uma operação de referência, bem como realizar o ajuste de concentrações (Francisco et al., 2018).

Etapa 6: Execução do DFA

No primeiro intervalo de concentração estão disponíveis a fonte externa a 0 ppm e uma fonte S1 também à 0 ppm. Nesse mesmo intervalo, as demandas D1, D2 e D4 necessitam de uma fonte com concentração de 0 ppm. Seguindo as regras do DFA, deveria ser utilizada a fonte S1, que é uma fonte interna ao processo. Todavia, devido ao elevado valor de concentração do contaminante C2, e pelas demandas D1, D2 e D4 necessitarem de uma fonte com 0 ppm para ambos contaminantes, a fonte S1 não será empregada nestas demandas, pois haveria violação de concentração do contaminante C2 caso esta fonte fosse usada. No segundo intervalo as mesmas demandas do intervalo anterior estão presentes. Como essas demandas já alcançaram a sua vazão limite, elas não receberão mais reuso de nenhuma outra operação.

No terceiro intervalo, estão presentes as demandas D3 e D5 e as fontes externa (0 ppm) S1 (0 ppm) e S3 ($2,41 \times 10^{-4}$ ppm) estão presentes. Como a regra do DFA prioriza o uso da fonte de pior qualidade, a fonte S3 terá prioridade de uso.

No quarto intervalo, as fontes disponíveis são a fonte externa (0 ppm), a fonte S1 (0 ppm), a fonte S3 ($2,41 \times 10^{-4}$ ppm) e a fonte S2 (0,79 ppm). A fonte com preferência de uso é a fonte S2, por possuir a maior concentração. Porém, é possível continuar empregando a fonte S3 caso haja disponibilidade e se queira reduzir o número de conexões na rede. No entanto, essa opção não será utilizada, e será empregada a fonte S2, para assimilar os contaminantes das demandas D3 e D5. A Figura 23 apresenta o diagrama obtido para o caso de máximo reuso analisado.

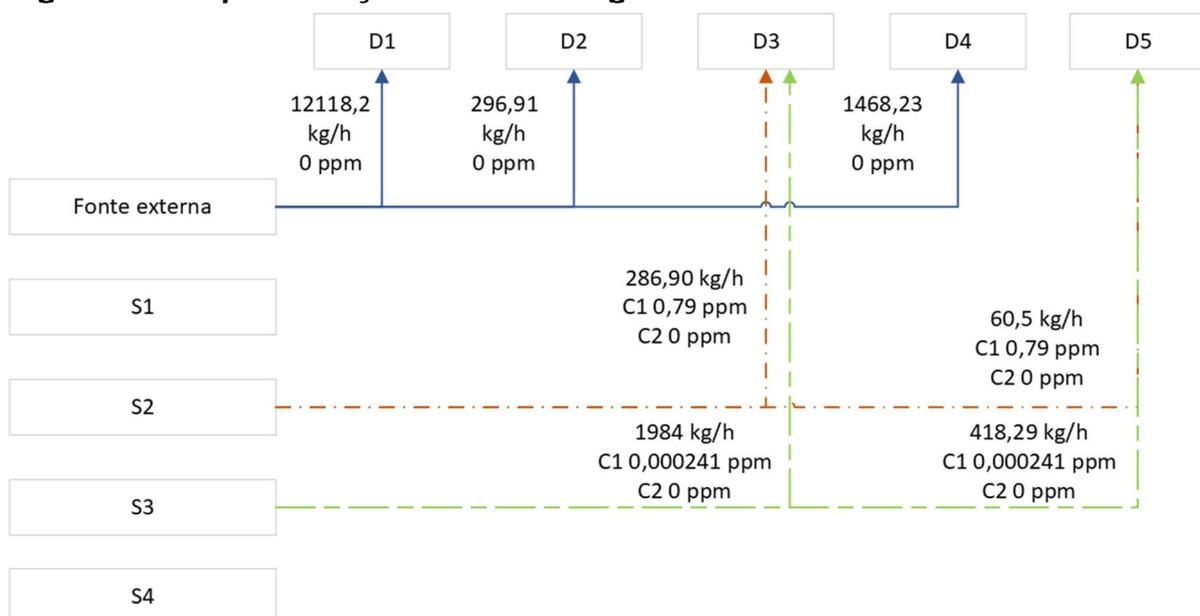
alcançaram os seus limites estabelecidos e as concentrações de entrada estão abaixo dos seus valores limites.

Como observado, não houve violação da concentração de entrada de nenhum contaminante, nem da vazão das operações. Note que haveria violação nas operações D1, D2 e D4 para o contaminante C2, caso a fonte S1 a 0 ppm fosse utilizada, conforme já discutido.

Etapa 8: Construção da rede final.

A Figura 24 apresenta o fluxograma correspondente à rede final obtida com base no DFA representado na Figura 23.

Figura 22 - Representação da rede de água - máximo reuso. Estudo de Caso 2.



5.2.2 Aplicação do DFA para regeneração com reciclo segundo a metodologia adaptada por Francisco (2022).

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção das operações que farão parte da análise

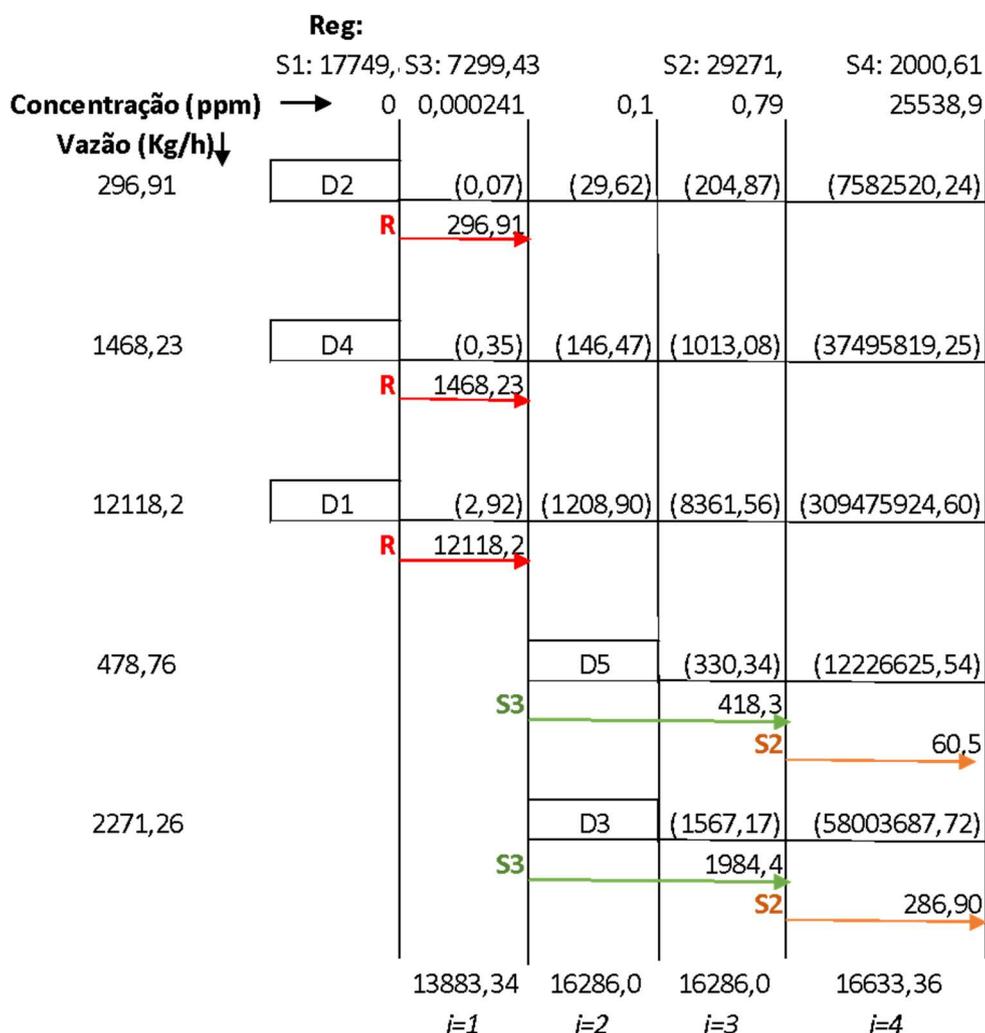
As Etapas 1 e 2 correspondem a determinação da concentração de saída do regenerador, baseada no ponto de pinch do sistema e na localização das concentrações de entrada das demandas. A localização do regenerador foi determinada seguindo a metodologia de regeneração com reciclo. As demandas D1, D2 e D4 são classificadas como grupo C (operações inteiramente abastecidas por fonte externa), as demandas D3 e D5 são removidas da análise por pertencerem ao grupo A (operações abastecidas completamente por fontes internas), pois essas operações não necessitam de água regenerada. Com isso, a concentração ideal da saída do regenerador foi determinada de acordo com o valor da concentração limite de entrada do grupo C, ou seja, 0 ppm.

Etapa 3: Cálculo das vazões para cada intervalo em cada operação

A Figura 25 apresenta o diagrama para o cenário de regeneração e reciclo. No primeiro intervalo, as demandas D1, D2 e D4 utilizaram água proveniente do regenerador (0 ppm). Essas demandas estão presentes em todos os quatro intervalos de concentração do DFA e tiveram suas vazões completamente supridas pela água regenerada. No entanto, a localização do regenerador pode trazer custos maiores com tratamentos para tornar a concentração de água igual a 0 ppm.

A partir do terceiro intervalo, tem-se as demandas D3 e D5, as fontes disponíveis eram, a fonte externa (0 ppm), a água regenerada (0 ppm), a fonte interna S1 (0 ppm) e a fonte interna S3, essa última foi a escolhida para ser usada nesse intervalo por ser a fonte de pior qualidade (mais contaminada), de acordo com as regras da metodologia do DFA. Vale lembrar que essas demandas (D3 e D5) não utilizam água regenerada, então a opção é usar as fontes internas disponíveis como é aplicada na metodologia para máximo reuso.

Figura 23 - Representação do diagrama de fontes de água para opção de regeneração com reciclo. Referência Sacarose - Estudo de caso 2.



Etapa 4: Realização do balanço de massa e Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Após a geração do DFA foi realizado o balanço de massa para verificar se houve violações e essas não foram encontradas, passando-se então para a Etapa 6.

Etapa 6: Cálculo da taxa de remoção do contaminante

Foi então calculada a taxa de remoção (Tabela 7) dos contaminantes de acordo com as Equações 7 e 8, para selecionar as correntes a serem regeneradas.

Tabela 7 - Taxa de remoção dos contaminantes.

FONTES	$C_{SR,C1}$ (PPM)	$RR_{SR,C1}$ (%)	$C_{SR,C2}$ (PPM)	$RR_{SR,C2}$ (%)	RR_{TOTAL} (%)
S2	0,79	100%	0	0%	100%
S4	25538,9	100%	0	0%	100%
S3	0,000241	100%	0	0%	100%

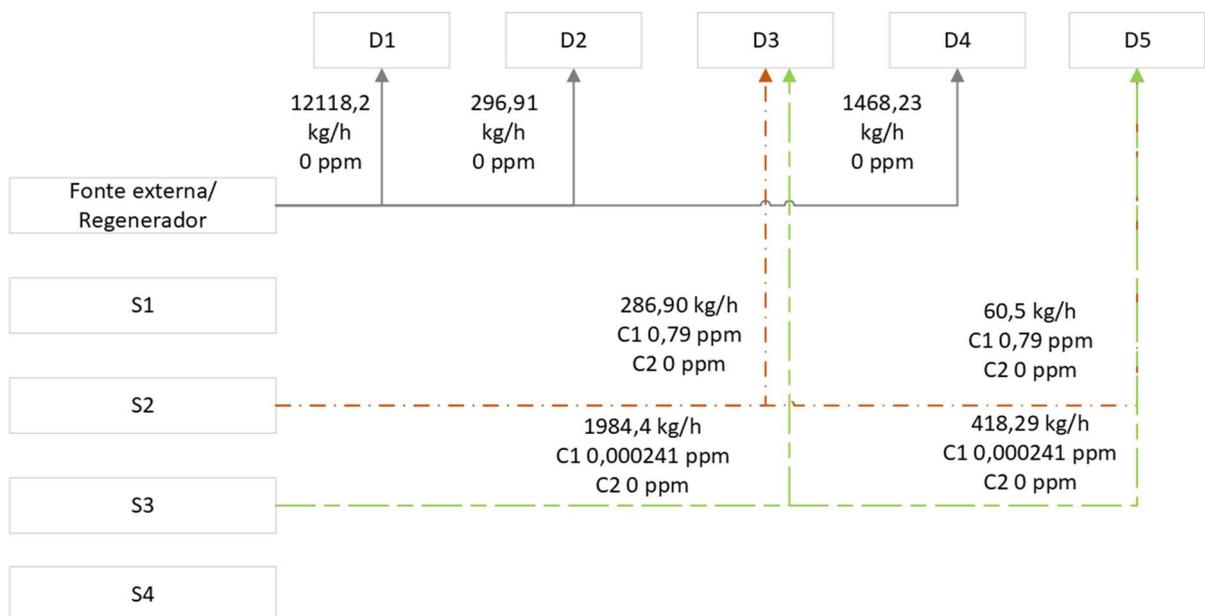
Seguindo as regras da metodologia de FRANCISCO ET AL. (2022), as fontes com menor $RR_{SR_S}^{Total}(\%)$ devem ser selecionadas para serem regeneradas. As fontes S2, S3 e S4 possuem $RR_{SR_S}^{Total}(\%)$ iguais, desta forma as três podem ser selecionadas para serem regeneradas, no entanto, a fonte S3 possui menor carga mássica a ser removida e isso a torna a melhor opção de escolha dentre as fontes a serem regeneradas, com o objetivo de diminuir os custos dos processos regenerativos.

Para a remoção dos contaminantes nas correntes aquosas dos processos (efluentes), é proposto um sistema de osmose inversa assumindo uma remoção de 90% para a sacarose e para a remoção da DQO é considerado o processo de biodigestão, assumindo uma remoção de 95%. No entanto, como o problema considera que não há sistema com regeneração 100%, pode-se considerar um sistema regenerativo composto por alguns regeneradores em série, assim a corrente regenerada pode passar por uma sequência de regeneradores, obtendo a remoção necessária do contaminante.

Etapa 7: Construção da nova rede de água.

A Figura 25 corresponde a rede final obtida para o DFA representado na Figura 26.

Figura 24 - Rede de água para a opção de regeneração com reciclo. Estudo de caso 2.



5.2.3 Aplicação do DFA para regeneração e reuso.

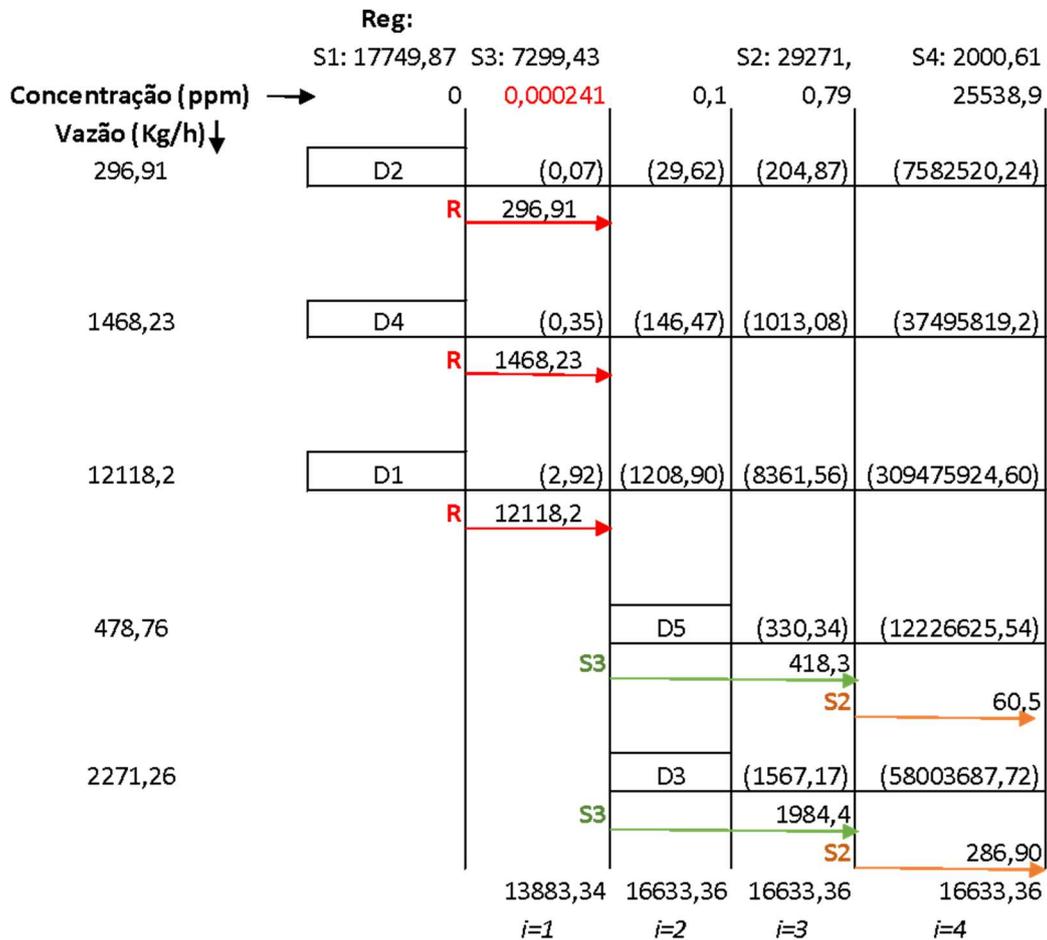
Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção da concentração de saída do regenerador

As Etapas 1 e 2 são idênticas ao do DFA com regeneração e reciclo. Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.3, a concentração ideal da saída do regenerador é igual a concentração limite da demanda 1 (0 ppm).

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

Aqui, o DFA foi idêntico ao obtido na Seção 5.2.2 bem como os resultados, pois a concentração do regenerador é a mesma e a fonte selecionada para regeneração foi S1, seguindo a segunda opção da metodologia apresentada na Seção 4.3. A fonte S3 também poderia ser selecionada por apresentar concentração igual ao ponto de pinch, no entanto, causaria uma redução no reuso interno, aumento do consumo de água da fonte externa e assim aumento nos custos de regeneração, pois sua concentração é maior do que a fonte S1.

Figura 25 - Representação do diagrama de fontes de água para opção de regeneração e reuso. Referência Sacarose. Estudo caso 2.



Etapa 4: Realização do balanço de massa e Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Após a geração do DFA foi realizado o balanço de massa para verificar se houve violações e essas não foram encontradas.

Etapa 6: Construção da rede final

Assim como o DFA, a rede será a mesma da opção de regeneração com reciclo, representada pela Figura 26.

5.2.4 Análise dos resultados – Estudo de caso 2.

O resultado obtido pelo DFA para o consumo de água externa na opção de máximo reuso foi igual ao obtido pelo autor que apresenta o caso base aqui utilizado (VALDERRAMA; QUINTERO; KAFAROV, 2020), representando uma proposta de redução de aproximadamente 17% no uso de água externa a 0 ppm.

A redução obtida na opção com regeneração é de 100%, sendo que a água regenerada precisaria ser regenerada até 0 ppm, ou seja, até igualar a da água fresca disponível. Isso implica em custos maiores com tratamentos, o que não seria vantajoso para a indústria. Desta forma, abre-se uma possibilidade de estudo, fora do escopo do presente trabalho, para uma escolha da concentração ideal do regenerador como uma corrente com baixa carga mássica entre 0 e o Pinch, para não tornar o processo inviável.

A Tabela 8 apresenta uma comparação dos resultados obtidos através dos procedimentos propostos (DFA) com o resultado apresentado no trabalho utilizado como base (VALDERRAMA; QUINTERO; KAFAROV, 2020) para o consumo da fonte externa a 0 ppm.

Tabela 8 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 2 para todos os cenários analisados.

CONSUMO DE ÁGUA DA FONTE EXTERNA (0 ppm)	MÁXIMO REUSO	REGENERAÇÃO COM RECICLO	REGENERAÇÃO COM REUSO
<i>Resultados encontrados</i>	13.883,34 Kg/h	0 kg/h	0 kg/h
<i>Referência</i>	13.883,34 Kg/h	-	-

5.3 ESTUDO DE CASO 3

O artigo usado como base para esse estudo de caso (Nikolakopoulos, 2016), aplicou um novo método de direcionamento e projeto para a integração de água em biorrefinarias lignocelulósicas com foco nos desvios das premissas típicas sobre vazões constantes e misturas diluídas.

A solução proposta no artigo não exige a instalação de equipamentos adicionais para o tratamento das correntes hídricas (regeneração da água), aproveita o processo de destilação implantado para recuperar as quantidades de ácidos utilizados para o pré-tratamento da biomassa. Os resultados do procedimento realizado no artigo base mostraram uma redução de 85,5% na captação de água com uma combinação ideal das opções de reutilização, regeneração e reciclo.

Os dados empregados na presente análise e por Nikolakopoulos (2016) são obtidos de uma biorrefinaria real presente em Mountraki *et al.* (2011). A rede total de água produzida considera dois componentes principais: as unidades consumidoras de água (demandas) e as unidades de tratamento de águas residuais (regeneradores). A refinaria desse estudo de caso tem capacidade para processar 17 t/h de biomassa lignocelulósica.

5.3.1 Aplicação do DFA para máximo reuso

A Etapa 1 corresponde a obtenção dos dados do processo, que estão apresentados nas Tabelas 9, 10 e 11. As Etapas 2 e 3 se referem à construção do diagrama (DFA) e à identificação das operações de carga fixa com seus respectivos limites.

Nessa refinaria, os componentes analisados são o ácido acético (AA) e o ácido fórmico (AF), ambos presentes no processo de desacidificação. Os dados para esses dois contaminantes são apresentados nas Tabelas 9 e 10. Como pode ser visto nas tabelas, o problema está na forma de carga fixa.

Tabela 9 - Dados do problema exemplo para o ácido acético. Estudo de caso 3.

Nº	OPERAÇÕES	CARGA MÁSSICA (T/H)	$C_{in,AA}$ (PPM)	$C_{out,AA}$ (PPM)
OP.1	Desacidificação	6,35	34.082	622.525
OP.2	Precipitação	3,84	38.654	402.935
OP.3	FG ST. 1	0,22	329	39.861
OP.4	FG ST. 2	0,021	0	337
OP.5	FG ST. 3	0,02	10	329
OP.6	C-5 Stripping Stage	1,2	20	188.038

Tabela 10 - Dados do problema exemplo para o ácido fórmico. Estudo de caso 3.

Nº	OPERAÇÕES	CARGA MÁSSICA (T/H)	$C_{in,AF}$ (PPM)	$C_{out,AF}$ (PPM)
OP.1	Desacidificação	3,87	18.590	373.158
OP.2	Precipitação	0,0458	21.091	28.329
OP.3	FG ST. 1	0,08185	124	15.061
OP.4	FG ST. 2	0,000778	0	127
OP.5	FG ST. 3	0,00076	10	124
OP.6	C-5 Stripping Stage	0,0277	10	4316

Foi necessário calcular a vazão de cada operação (Equação 5), pois os dados fornecidos representavam a carga mássica de cada contaminante. A Tabela 9 apresenta os valores de vazão limites calculados para cada operação com base na carga mássica de cada contaminante.

A operação de referência é a operação 4 de acordo com a metodologia apresentada na Seção 4.1, pois é a operação com C_{in} igual a zero ppm. Como as outras operações apresentam C_{in} menores do que a C_{out} da operação de referência, deve-se fazer os ajustes de concentrações para essas.

De acordo com os novos valores de vazão foi preciso ajustar as concentrações nas operações de acordo com a metodologia apresentada por Mirre (2009), sendo um estudo de sensibilidade. É estabelecida uma variação flexibilizando as operações impossibilitadas de reuso, seleciona-se os maiores valores de vazão calculados para cada operação, estes serão os valores da vazão representativos da operação.

Em seguida, considera-se que a concentração de entrada das operações se mantém fixa e com a carga mássica de cada contaminante, vazão e concentração de entrada fixas, calcula-se a vazão de saída ajustando a concentração de saída das operações com menor vazão de acordo com o contaminante. Essa metodologia é apresentada detalhadamente em Mirre (2009).

Tabela 11 - Vazões calculadas para o ácido acético e ácido fórmico. Estudo de caso 3.

OPERAÇÕES	VAZÃO (T/H) AA	VAZÃO (T/H) AF
DESACIDIFICAÇÃO	10,79	10,91
PRECIPITAÇÃO	10,54	6,33
FG ST. 1	5,57	5,48
FG ST. 2	62,31	6,13
FG ST. 3	62,70	6,67
C-5 STRIPPING STAGE	6,38	6,43

Etapa 4: Escolha do Contaminante de Referência e da Operação de Referência.

Etapa 4.1: Determinação do contaminante de referência

O contaminante de referência será o ácido acético, pois apresentou maior valor do parâmetro Gw calculado de acordo com a operação 4, como pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 - Valores do parâmetro Gw para o AA e o AF. Estudo de caso 3.

OPERAÇÕES	Gw AA	Gw AF
OP. 1	10,194	10,370
OP.2	9,530	1,080
OP.3	5,519	5,433
OP.4	62,314	0
OP.5	60,790	0
OP.6	6,381	6,111

Etapa 4.2: Determinação da Operação de referência

Os novos valores de C_{out} para os dois contaminantes são apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13 - Valores ajustados de C out para o AA. Estudo de caso 3.

C_{in} (PPM)	C_{out} (PPM)	ΔM_{AA} (KG/H)
34082,00	615866,7028	6350000
38654	402935	3840000
329	39861,00	220000
0	337,00	21000
10,00	329,00	20000
20	186561,52	1200000

Tabela 14 - Valores ajustados de C out para o AF. Estudo de caso 3.

C_{in} (PPM)	C_{out} (PPM)	ΔM_{AF} (KG/H)
18590	373158	3870000
21091	25435,81	45800
124	14831,70091	81850
0	12,48504762	778
10	22,122	760
10	4316	27700

Etapa 5.1 Montagem do DFA (Operações de carga fixa) e Etapa 6: Execução do DFA

A Figura 28 apresenta o DFA obtido para o caso de máximo reuso, como o ácido acético como referência. No primeiro intervalo de concentração, tem-se apenas a operação 4 que necessita de água a 0 ppm, que é suprida pela fonte externa em um total de 62,31 t/h. No segundo intervalo estão presentes as operações 4 e 5. A operação 4 já alcançou o seu valor de vazão limite, bem como a remoção da carga de contaminante. Para a operação 5 só está disponível água fresca, sendo fornecidas 31,35 t/h de água desta fonte neste intervalo, para esta operação.

No terceiro intervalo de concentração estão presentes as operações 4, 5 e 6, das quais, para as operações 5 e 6 só há disponibilidade de água da fonte externa (0 ppm), sendo empregadas, respectivamente, 29,442 t/h e 6,04 t/h desta fonte.

No quarto intervalo as operações 3, 4, 5 e 6 estão presentes. Para essas operações a água disponível é, além da água fresca da fonte externa, o efluente proveniente da operação 5, que foi finalizada no intervalo anterior. As operações 3 e 6 usam 5,57 t/h e 0,39 t/h da fonte interna da operação 5.

No quinto intervalo, as operações 3 e 6 já atingiram o valor de vazão limite e conseguem remover a carga mássica de contaminante. No sexto intervalo estão presentes as operações 1, 3 e 6. A operação 1 é a única desse intervalo que ainda precisa de água para remover a carga mássica do contaminante. As fontes disponíveis são a externa (0 ppm) e as fontes internas das operações 4 e 5. No entanto, a opção adequada seria usar água proveniente da operação 4 que é a mais próxima, mas, esse reuso causaria violação na concentração do contaminante AF. Assim foi priorizado o uso de água da fonte externa para essa operação, tanto nesse intervalo, que usou 1,29 t/h, como no sétimo intervalo que usou 0,29 t/h de água da fonte externa.

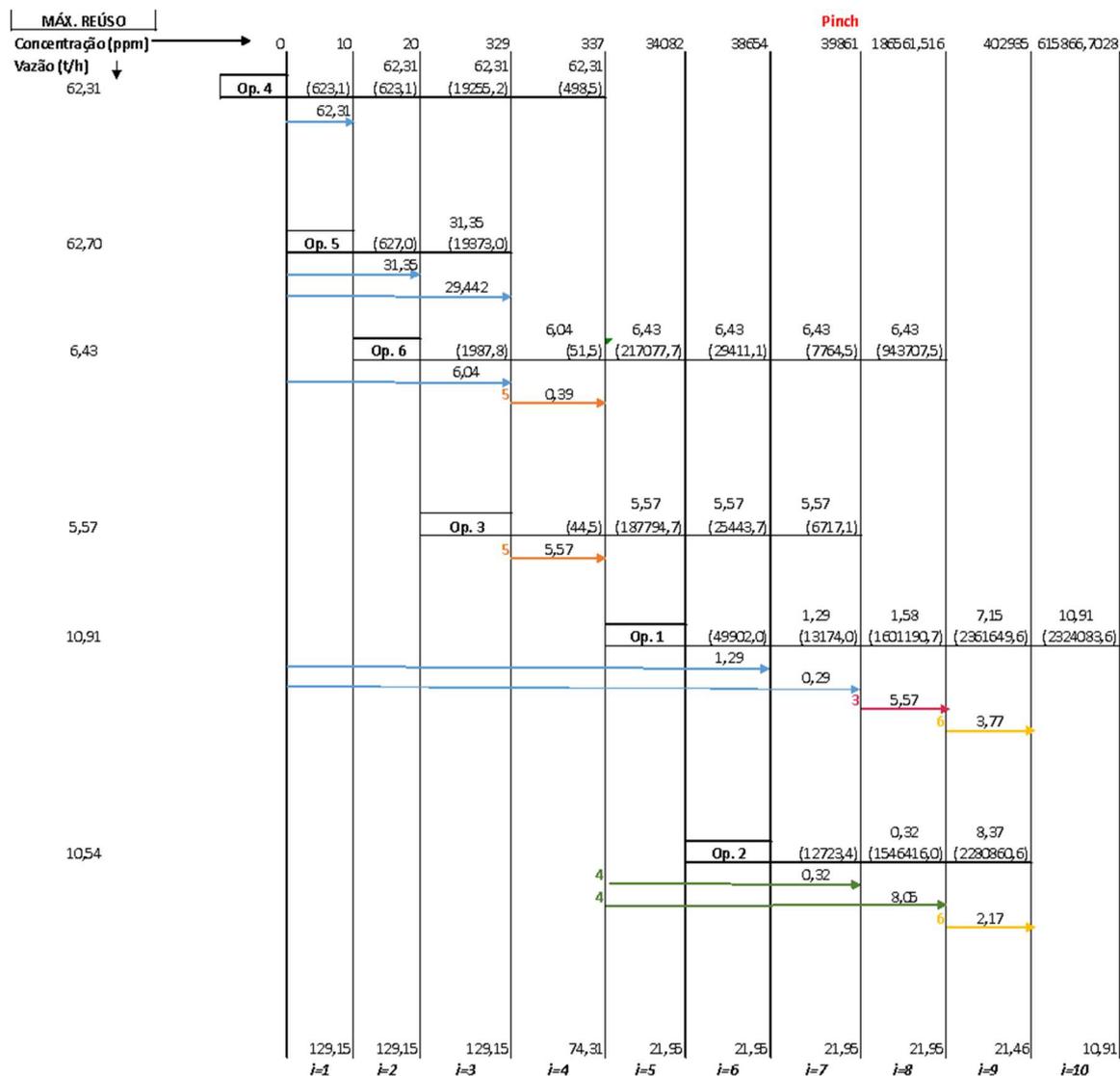
No intervalo 7 ocorrem as operações 1, 2, 3 e 6, das quais, as operações 1 e 2 ainda precisam de água para sua transferência de massa. Como dito anteriormente, a operação 1 utilizou água fresca para evitar violações de concentração, enquanto a operação 2 reusou 0,32 t/h de água da operação 4.

No intervalo 8 tem-se as operações 1, 2 e 6 e as fontes disponíveis são, além da fonte externa (0 ppm), água da operação 3, água da operação 4 e água da operação 5. A operação 1 reusou toda a vazão disponível da operação 3 (5,57 t/h) e a operação 2 reusou 8,05 t/h de água da operação 4, que eram as fontes contaminadas mais próximas, seguindo a regra do DFA.

No nono intervalo estão presentes as operações 1 e 2. As fontes disponíveis neste intervalo são a fonte externa (0 ppm) e a fonte interna proveniente da operação 4 (337 ppm), a fonte interna da operação 5 (329 ppm) e a fonte da operação 6 (186561,516 ppm), que foi finalizada no intervalo anterior ($i = 8$). As duas operações priorizam o uso da água da operação 6, pois é a fonte com concentração maior mais próxima desse intervalo e sua vazão é suficiente para atender às quantidades requeridas nas operações 1 e 2. Então a operação 1 usou 3,77 t/h e a operação 2 usou 2,17 t/h.

No último intervalo ($i = 10$) está presente a operação 1. No entanto, essa já alcançou seu limite de vazão.

Figura 26 - Representação do diagrama de fontes de água para máximo reuso.
Referência Ácido Acético – Estudo de caso 3.



O consumo inicial de água fresca era de 158,29 t/h e com a aplicação do DFA passou a ser de 129,15 t/h. O ponto de Pinch foi identificado no sétimo intervalo, que foi o último intervalo de concentração que utilizou água da fonte externa, tendo o seu valor igual a 39.861 ppm.

Etapa 7: Inspeção para verificar se houve violações

Devido a existência de dois contaminantes no estudo de caso, é necessário realizar o balanço de massa para o outro contaminante, o AF, para verificar se houve violação nas concentrações de entrada das operações. Através do balanço de massa foi observado que não houve violação das concentrações de entrada do AF, estando essas dentro dos limites estabelecidos pelas operações.

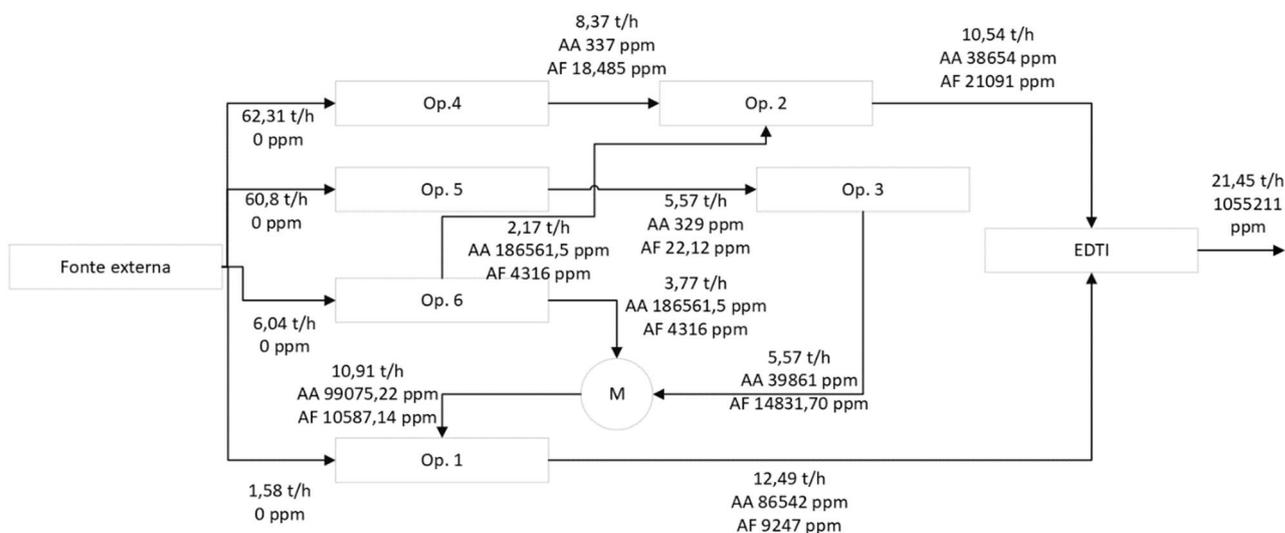
Tabela 15 - Balanço de massa para os contaminantes AA e AF.

OP.	$C_{m\acute{A}x,AA}$ (PPM)	$C_{m\acute{A}x,AF}$ (PPM)
OP. 1	20372,93	9168,86
OP.2	38654,00	897,96
OP.3	329,00	22,12
OP.4	0	0,00
OP.5	0	0,00
OP.6	20	7,54

Etapa 8: Construção da rede final.

A Figura 29 representa a rede descrita no diagrama da Figura 28.

**Figura 27 - Representação da rede para o estudo de caso 3 – máximo reuso.
Estudo de caso 3.**



5.3.2 Aplicação do DFA para regeneração com reciclo segundo a metodologia adaptada por Francisco (2022).

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção das operações que farão parte da análise

As operações dos grupos A e C são removidas da análise (Op.2, Op. 3, Op.4 e Op.5), as operações do grupo B (Op. 1 e Op. 6) participam da análise para a localização ideal do regenerador. No entanto, a operação 1 apresenta maior vazão e seguindo a regra da metodologia de Francisco (2022), a localização do regenerador será igual a concentração de entrada da operação com maior vazão, que é de 34.082 ppm no quinto intervalo.

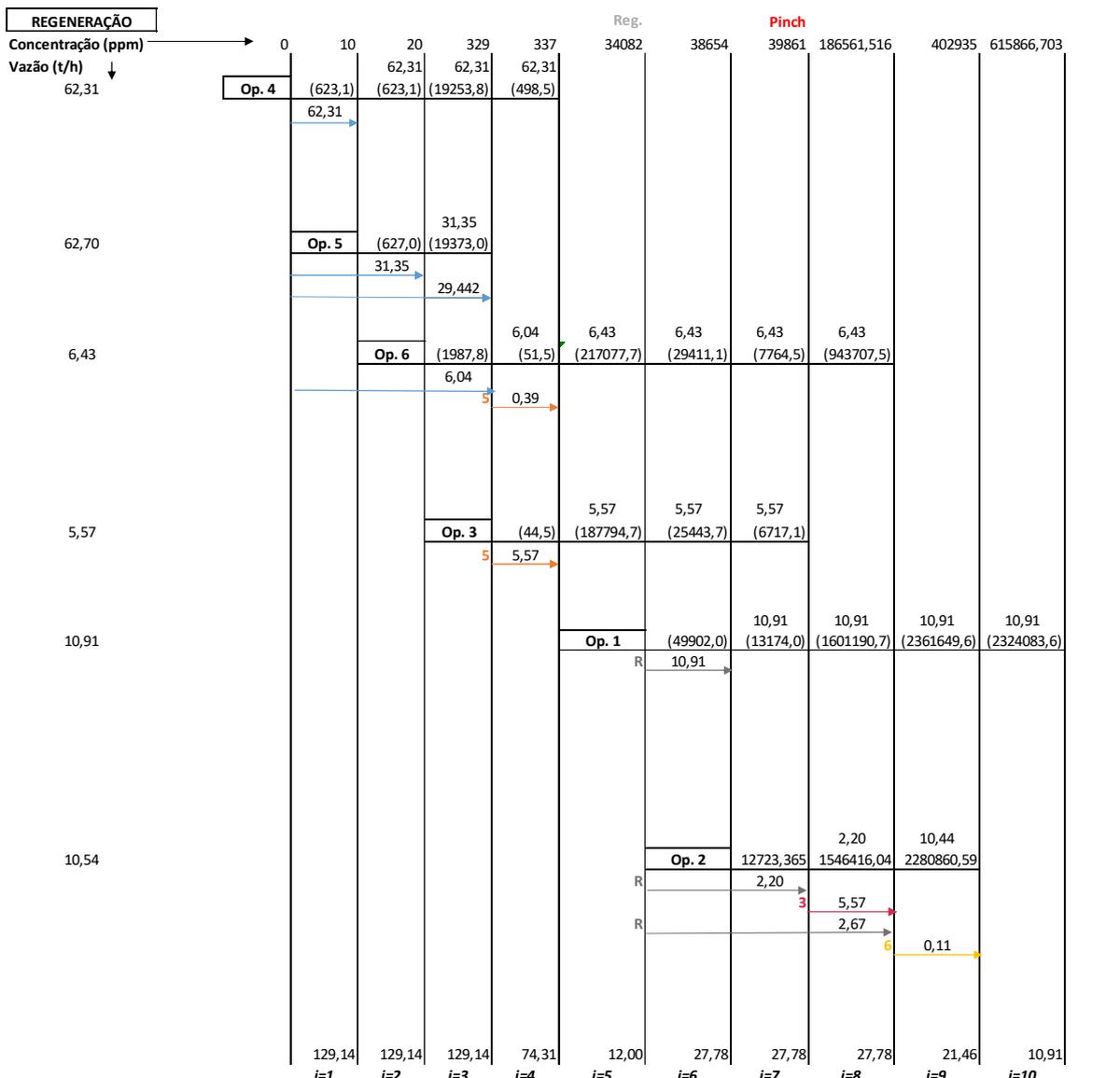
Etapa 3: Cálculo das vazões para cada intervalo em cada operação

Os resultados desta etapa estão na Figura 30. Eles sejam a metodologia do DFA já apresentada nos estudos de caso anteriores.

A quantidade água fresca a 0 ppm captada foi de 129,14 t/h, a qual foi igual a redução obtida na opção de máximo reuso, o que mostra que, nesse caso, não é vantajoso utilizar regenerador pois teriam custos com tratamento e não iria alterar a quantidade de água captada da fonte externa.

Figura 28 - Representação do diagrama de fontes de água para regeneração.

Estudo de caso 3. Referência AA.



Etapa 4: Realização do balanço de massa e Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Após a geração do DFA foi realizado o balanço de massa, descrito na Tabela 16, para verificar se houve violações e essas não foram encontradas.

Tabela 16 - Balanço de massa para os contaminantes AA e AF. Estrutura DFA da Figura 30. Estudo de caso 3.

OP.	$C_{m\dot{A}x,AA}$ (PPM)	$C_{m\dot{A}x,AF}$ (PPM)
OP. 1	34082	18590,00
OP.2	22905,48	16463,48
OP.3	329,00	22,12
OP.4	0	0,00
OP.5	0	0,00
OP.6	20	1,34

Etapa 6: Cálculo da taxa de remoção do contaminante

A Tabela 17 apresenta os resultados para a taxa de remoção dos dois contaminantes, calculadas a partir das Equações 7 e 8.

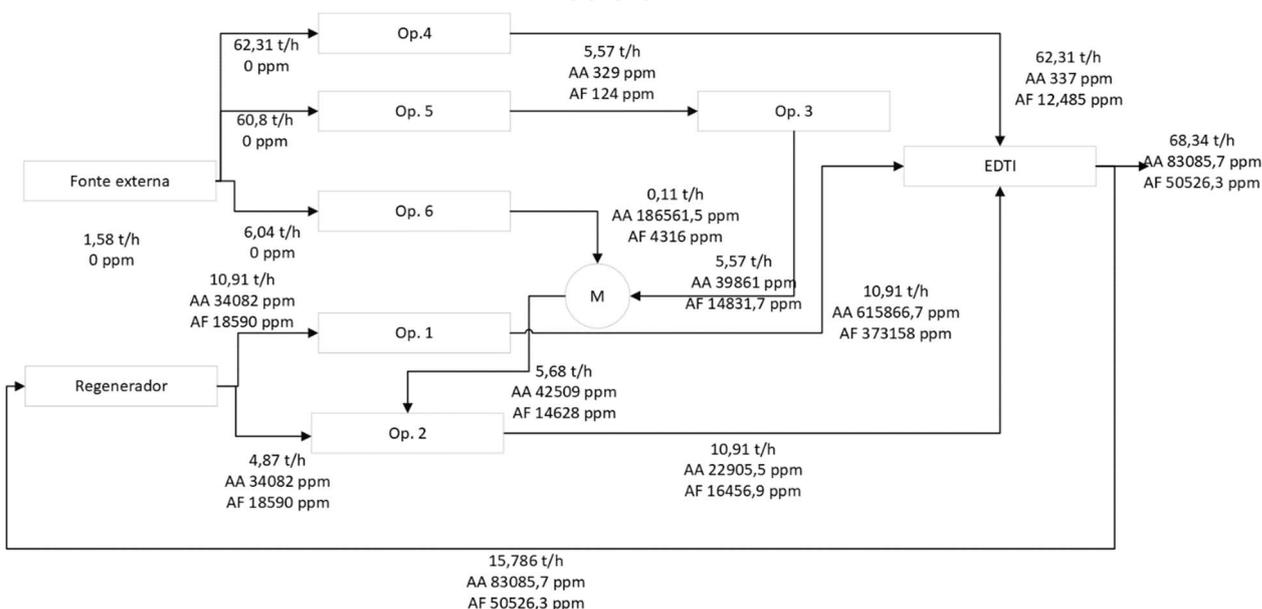
Tabela 17 - Taxa de remoção dos contaminantes. Estudo de caso 3.

FONTES	$C_{SR,AA}$ (PPM)	$RR_{SR,AA}(\%)$	$C_{SR,AF}$ (PPM)	$RR_{SR,AF}(\%)$	$RR_{TOTAL}(\%)$
OP. 1	622525	98%	367412	96%	194%
OP. 2	402935	96%	21804,9	33%	130%

Etapa 7: Construção da nova rede de água.

A Figura 31 representa a rede descrita no diagrama da Figura 30 para o caso de regeneração e reciclo..

Figura 29 - Representação da rede para o estudo de caso 3 – regeneração com reciclo.



5.3.3 Aplicação do DFA para regeneração e reuso.

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção da concentração de saída do regenerador

As Etapas 1 e 2 são iguais ao do DFA com regeneração e reciclo. Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.3, a concentração ideal da saída do regenerador é igual a concentração limite da operação 1 (34082 ppm).

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

No primeiro intervalo apenas a operação 4 está presente e necessita de 62,31 t/h de água a 0 ppm, a única fonte que pode suprir essa necessidade é a fonte externa. No segundo intervalo tem-se a operação 5, que necessita de água com 10 ppm e a única fonte disponível nesse intervalo é também a fonte externa a 0 ppm. Então, essa operação utiliza 31,35 t/h nesse intervalo.

No terceiro intervalo temos as operações 4 e 5 que já tiveram suas vazões supridas e ainda acontece a operação 3 que também irá utilizar água da fonte externa, pois é a única disponível. Então essa operação utiliza 29,44 t/h da fonte externa. Ainda nesse intervalo está presente a operação 6, que necessita de água com concentração inicial de 20 ppm. Como a única fonte disponível ainda é a da fonte externa a 0 ppm, devem ser utilizadas 6,04 t/h para essa operação nesse intervalo.

No quarto intervalo estão as operações 3, 4 e 6. A operação 4, como já foi dito anteriormente, já teve sua necessidade atendida. As operações 3 e 6 ainda precisam de água para atender a quantidade necessária para a transferência de massa nesse intervalo, para isso, têm-se disponíveis a fonte externa (0 ppm) e a água da operação 5, que foi finalizada no quarto intervalo. Como a regra é utilizar a água da fonte próxima com maior concentração, foram usadas 0,39 t/h na operação 6 e 5,57 t/h na operação 3.

No quinto intervalo as operações 3 e 6 estão presentes, mas já tiveram suas necessidades de água atendidas. No sexto intervalo, além das operações 3 e 6, há a operação 1, que utiliza 1,30 t/h de água proveniente da operação 4 que é a fonte próxima com maior concentração e por isso tem prioridade frente às outras fontes disponíveis, que são além da fonte externa a 0 ppm, a operação 5 que sai a 329

ppm. Nesse intervalo, a concentração da fonte regenerada já está indicada, mas ainda não pode ser utilizada, pois nenhuma operação acima dessa concentração foi finalizada, existindo operações com concentrações menores que podem ser reusadas sem a necessidade de tratamentos.

No sétimo intervalo ocorrem as operações 1,2,3 e 6, dessas, as operações 1 e 2 ainda necessitam de água para suprir suas necessidades. As fontes disponíveis são a água da fonte externa (0 ppm), água da operação 4, que sai a 337 ppm, e água proveniente da operação 5, que sai a 329 ppm. A prioridade é sempre utilizar a água da fonte contaminada mais próxima, então usa-se 0,29 t/h para a operação 1 e 0,32 t/h para a operação 2.

No oitavo intervalo a fonte regenerada já pode ser usada, pois a operação 3 já foi finalizada, porém, essa mesma operação tem prioridade de ser reusada na operação 1 nesse intervalo, visto que é a fonte contaminada mais próxima quando comparada a água externa e a água das operações 4 e 5. Então, a operação 1 utiliza 5,7 t/h da operação 3 e 3,61 t/h de água da corrente regenerada dessa mesma operação. A operação 2 poderia utilizar o restante da corrente regenerada da operação 3, que era de 1,96 t/h, mas haveria violação na concentração de entrada do contaminante, então, para evitar, utilizou 8,05 t/h de água proveniente da operação 4 que é a prioridade.

No nono intervalo estão presentes as operações 1 e 2, e as fontes disponíveis são a fonte externa (0 ppm), água da corrente regenerada (34082 ppm), água da operação 4 (337 ppm), água da operação 5 (329 ppm) e água saindo da operação 6, que finalizou no oitavo intervalo (186561,51 ppm). A prioridade aqui é usar água da operação 6, então a operação 1 usou 0,14 t/h e a operação 2 usou 2,17 t/h provenientes da operação 6, pois também haveria violação caso fosse usada água da corrente regenerada da operação 3 ou da operação 6.

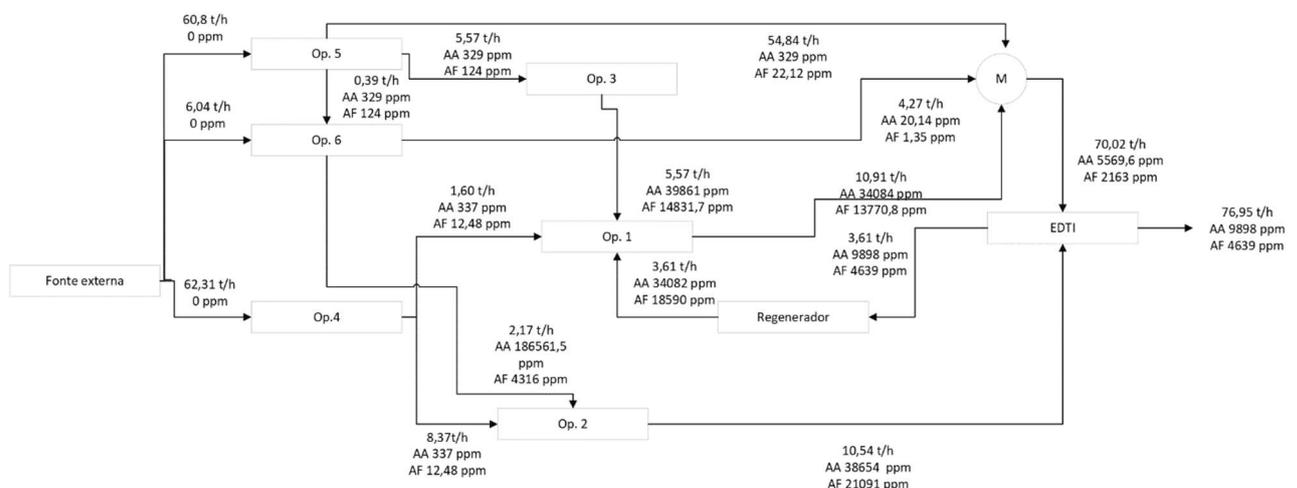
Os resultados de cada um destes passos anteriormente descritos podem ser verificados na Figura 32 a seguir.

esse problema foi solucionado ao longo do DFA para o contaminante de referência, as violações foram evitadas.

Etapa 6: Construção da rede final

A Figura 33 apresenta o fluxograma correspondente ao DFA da Figura 32.

Figura 31 - Representação da rede para o estudo de caso 3 – regeneração e reuso.



5.3.4 Análise dos resultados - Estudo de caso 3

Na biorrefinaria avaliada nesse estudo de caso, o consumo de água da fonte externa era de 158,29 t/h em suas operações. Esse caso também foi avaliado seguindo a metodologia de fontes e demandas, descrita na Seção 4.1, de acordo com os dados das correntes disponíveis na referência Nikolakopoulos (2016), que são os mesmos usados na opção de carga fixa, diferindo-se apenas a aplicação da metodologia.

O DFA conseguiu reduzir esse valor em até 18% (Tabela 18) nas três opções estudadas, considerando a opção de carga fixa, enquanto que, ao considerar a opção de fontes e demandas, o DFA chegou a uma redução de até 60,8% (Tabela 19) para a opção de regeneração com reciclo. No entanto, Nikolakopoulos (2016) obteve uma maior redução do consumo de água (85,5%). A possível explicação é

pela aplicação do método sendo uma combinação simultânea das opções de reutilização, regeneração e reciclo.

Tabela 18 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 3 (carga fixa).

CONSUMO DE ÁGUA DA FONTE EXTERNA (0 ppm)	MÁXIMO REUSO	REGENERAÇÃO COM RECICLO	REGENERAÇÃO COM REUSO
<i>Resultados encontrados</i>	129,15 t/h	129,14 t/h	129,14 t/h
<i>Referência</i>	29 t/h	6,25 t/h	6,25 t/h

Descrevendo o problema através de fontes e demandas, o contaminante de referência utilizado foi o mesmo usado no problema de carga fixa, isso porque a regra da metodologia é a mesma para ambos os tipos de operações. Aqui, o ponto de pinch foi identificado na concentração 329 ppm, não houve violações e as melhores opções de correntes a serem regeneradas foram as fontes S4 e S5 que apresentaram menores valores de RR_{TOTAL} conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19 - Taxa de remoção dos contaminantes.

Fontes	$C_{SR,C1}$ (ppm)	$RR_{SR,C1}$ (%)	$C_{SR,C2}$ (ppm)	$RR_{SR,C2}$ (%)	RR_{TOTAL} (%)
S1	622525	100%	373158	100%	200%
S2	402935	100%	28329	100%	200%
S3	39861	100%	15061	100%	200%
S4	337	97%	127	92%	189%
S5	329	97%	124	92%	189%
S6	188038	100%	4316	100%	200%

Na Tabela 20 são apresentados os resultados para a abordagem fontes/demandas. No DFA eles têm comportamento análogo ao da abordagem de carga fixa, como esperado, a assim também diferem dos resultados de Nikolakopoulos (2016) em proporções semelhantes.

Tabela 20 - Comparação dos resultados para o estudo de caso 3 (fontes e demandas).

CONSUMO DE ÁGUA DA FONTE EXTERNA (0 ppm)	MÁXIMO REUSO	REGENERAÇÃO COM RECICLO	REGENERAÇÃO COM REUSO
<i>Resultados encontrados</i>	129,10 t/h	62,31 t/h	68,31 t/h
<i>Referência</i>	29 t/h	6,25 t/h	6,25 t/h

Esse caso foi avaliado usando as duas abordagens (carga fixa e fontes e demandas), pois os resultados obtidos na primeira opção não foram tão satisfatórios quando comparados aos obtidos por Nikolakopoulos (2016). Como o objetivo desse trabalho é conseguir a máxima redução do consumo de água da fonte externa e considerando a disponibilidade de dados na forma de fontes e demandas para o processo analisado, foi possível usar as duas abordagens do DFA e observou-se que os resultados são compatíveis. Como já comentado, a comparação aqui com a estratégia dos autores originais deve ser feita com cuidado, pois eles adotam uma mistura de reuso e regeneração com reciclo e sem, não muito clara, característica que ainda não é contemplada pelo estado da arte do algoritmo do DFA.

5.4 ESTUDO DE CASO 4

Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013) desenvolveram um modelo para uma planta padrão de uma usina de cana-de-açúcar integrada, que produz açúcar e etanol, com base em trabalho desenvolvido por Ensinas (2008), que empregou dados de usinas reais e da literatura.

Foi considerado como primeira etapa deste estudo um processo comum para produção de açúcar e etanol, incluindo a recepção da cana-de-açúcar, lavagem, preparação e extração do caldo. O caldo cru, que é extraído na primeira etapa, passa por uma fase de tratamento para a produção de açúcar e etanol, sendo consumido nas etapas subseqüentes de acordo com a sua destinação. A produção de açúcar é completada com a evaporação do caldo, cozimento, centrifugação e secagem. A produção de álcool hidratado, por sua vez, conta com uma etapa de preparação do caldo para a etapa de fermentação, além da destilação e retificação.

Para a distribuição dos açúcares totais recuperáveis (ATR) presentes na cana-de-açúcar, considerou-se que 50% foram utilizados na produção de açúcar e 50% para a produção de etanol, sendo estas contabilizadas com o melaço da produção de açúcar, além da quantidade de xarope e caldo tratado. As características gerais da planta modelada, como os parâmetros utilizados para a modelagem da usina, são descritas na Tabela 21.

Tabela 21 - Parâmetros operacionais da usina a ser modelada.

PARÂMETRO	VALOR
CAPACIDADE DE MOAGEM AO ANO (T CANA/ANO)	2000000
TAXA DE MOAGEM (T CANA/H)	500
HORAS DE OPERAÇÃO POR SAFRA (H/ANO)	4000
CONTEÚDO DE FIBRA DA CANA (%)	14
POL DA CANA (%)	14
PRODUÇÃO DE AÇÚCAR (KG/T CANA)	65
PRODUÇÃO DE ÁLCOOL HIDRATADO (L/T CANA)	40

Fonte: Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013).

Em relação ao uso da água no processo industrial, procura-se comparar as demandas de água na usina e a sua captação efetiva, sendo a primeira o resultado

da soma de todos os usos de água nos processos, como se todos os circuitos de água estivessem abertos, enquanto a segunda é o resultado da captação efetiva para a reposição nos circuitos existentes. O uso da água no processo industrial foi analisado considerando todas as necessidades de água. Para representar estas demandas, a usina foi modelada sem circuitos fechados e considerando uma taxa de consumo de água média encontrada na literatura com base em usinas reais.

Etapa 1: Obtenção dos dados do problema para construção da Tabela de Oportunidades.

Nesta etapa foram adotados os seguintes procedimentos:

- Todos os valores foram obtidos no artigo do Chavez-Rodriguez (2013) e Elia Neto (2009);
- Elia Neto (2009) considerou o consumo total de água em uma planta industrial produtora de açúcar e etanol de 22 m³/t de cana-de-açúcar;
- Chavez- Rodriguez *et al.* (2013) definiram as correntes de reuso através do método heurístico, onde a água de maior qualidade é fornecida e quando necessário é complementada pela água da estação de tratamento;
- a vinhaça, a purga da caldeira e as perdas de água do lavador de gases não foram consideradas como fontes;
- os condensados são considerados por Rodriguez (2013) as principais fontes de reutilização.

O problema será descrito na abordagem fontes/demandas e os dados para essas correntes estão nas Tabelas 22 e 23 apresentadas a seguir.

Tabela 22 - Dados do problema exemplo (fontes).

Nº	FONTES DE ÁGUA	M (KG/S)	T (°C)	P(BAR)	M (KG/T CANE)
	Condensado de filtração	0.4	70	0.31	1500
F1	Condensado de Vapor de 1º Efeito (coletado na saída da calandra de 2º efeito)	7.9	115	1.69	28500
F2	Condensado de Sangria do Vapor de 1º efeito para esquentar no tratamento do caldo	20.2	115	1.69	72500
F3	Condensado de Sangria do Vapor de 1º Efeito a esquentar o Cozedor A	11.8	115	1.69	42500
F4	Condensado de Sangria de Vapor de 1º Efeito a esquentar o Cozedor B	2.2	115	1.69	8000
F5	Condensado de Vapor de 2º Efeito	8.5	107	1.31	30500
F6	Condensado de Vapor de 3º Efeito	9.1	98	0.93	32500
F7	Condensado de Vapor de 4º Efeito	9.7	83	0.54	35000
F8	Condensado de Vapor de 5º Efeito no Condensador Barométrico	10.5	50	1.01	37500
F9	Condensado de Vapor do Cozedor A	8.3	50	1.01	30000
F10	Condensado de Vapor do Cozedor B	1.5	50	1.01	5500
F11	Purga da Caldeira	4.9	25	1.01	17500
F12	Perdas de água do Lavador de Gases	8.5	25	1.01	30500
F13	Vinhaça	61.5	76	6.00	285000
F14	Água de limpeza coletada (50%)	3.5	25	1.01	12500

Fonte: Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013).

Tabela 23 - Dados do problema exemplo (demandas).

Nº	CAPTAÇÃO DE ÁGUA POR PROCESSO (DEMANDAS)	M (KG/S)	T (°C)	P (BAR)	M (KG/T CANA)
D1	Embebição	20,8	25	1,01	75000
D2	Reposição de Resfriamento de mancais	41,7	50	6	150000
D3	Reposição de Resfriamento de óleo lubrificante	0,2	25	1,01	1000
D4	Reposição de Resfriamento de Sulfitação	1,7	25	1,01	6000
D5	Preparo de leite de cal	0,1	25	1	500
D6	Lavagem de torta de filtro	3,2	107,4	6	11500
D7	Lavagem das Centrifugas	9,7	107,4	6	35000
D8	Diluição de meis	2,3	107,4	6	8500
D9	Diluição de açúcar B	0,3	107,4	6	1000
D10	Para Cozedor B	1,2	107,4	6	4500
D11	Reposição para Condensadores Barométricos de Evaporação	0,4	107,4	6	1500
D12	Reposição para vácuo nos filtros	14,8	30	1	53500
D13	Reposição para resfriamento de caldo para etanol	0,5	30	1	2000
D14	Reposição dos circuitos de vácuo dos cozedores	4,5	25	6	16500
D15	Diluição de fermento	13,9	30	1	50000
D16	Reposição de resfriamento das dornas	17	25	6	61000
D17	Reposição do Condensador da coluna de Destilação	7,3	25	6	26000
D18	Reposição do Condensador da coluna de Retificação	0,3	30	1	1000
D19	Reposição do Condensador da coluna Extrativa	4,2	30	1	15000
D20	Reposição do Condensador da coluna de recuperação	0,3	30	1	1000
D21	Reposição de Resfriamento do Solvente	8,5	25	1	30500
D22	Reposição de lavagem dos gases	4,9	25	1	17500
D23	Reposição de água de alimentação da caldeira	6,9	-	1,01	25000
D24	Limpezas Gerais	4,2	25	1,01	15000
D25	Usos potáveis	1,4	30	1,01	5000
D26	Reposição de resfriamento de turbogeradores	0,2	30	1,01	1000
	Reposição de resfriamento dos cozedores	170,5		TOTAL	614500

Fonte: Chavez- Rodriguez *et al.*, (2013).

5.4.1 Aplicação do DFA para máximo reuso

A Etapa 1 corresponde a obtenção dos dados dos problemas, já apresentados nas Tabelas 21 a 23. As Etapas 2 e 3 se referem a construção do diagrama e na identificação das fontes e demandas com seus respectivos limites.

Etapa 4: Escolha do Contaminante de Referência e da Operação de Referência e Etapa 5.2 (Fontes/Demandas):

Chavez- Rodriguez *et al.* (2013) consideraram como componente de referência a quantidade de sacarose (Kg) por tonelada de cana, sendo este considerado também no estudo com a aplicação do DFA. Como descrito na metodologia, em operações do tipo fontes/demandas não é necessário definir a operação de referência.

Etapa 6: Execução do DFA

Ao desenvolver o DFA seguindo as regras descritas na Seção 4.1 é obtido o diagrama de fontes reportado na Figura 34. Com exceção das demandas D7, D12 e D15, que só empregam fontes internas ao processo; todas as demais demandas empregaram água proveniente da fonte externa (0 kg/t de cana) em maior ou menor quantidade.

O ponto de pinch é definido no último intervalo ($i = 31$), pois este necessita de água fresca. Desta forma a concentração de pinch para o processo é igual a 285000 Kg/t de cana, no último intervalo do DFA. A quantidade de água fresca era de 1229 L/t de cana e com o DFA foi reduzida para aproximadamente 355,5 L/t de cana, na opção de máximo reuso. Este resultado é melhor do que o resultado obtido por Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013). No entanto, Chavez- Rodriguez *et al.*, (2013) levaram em conta a integração energética, o que pode ter influenciado no resultado obtido para a minimização do consumo de água, visto que há uma interdependência envolvendo o consumo de água e de energia no processo não considerada no DFA.

Etapa 7: Inspeção para verificar se houve violações

Como o problema é mono contaminante o procedimento do DFA evita o aparecimento de violação de concentração na estrutura final. No caso das vazões, houve o não atendimento da restrição no valor da vazão para as demandas D1 e D2, sendo necessário aumentar o consumo de água da fonte externa para garantir o cumprimento da restrição de vazão.

Etapa 8: Construção da rede final.

A Tabela 24 apresenta a representação da rede obtida na Figura 34, indicando o consumo das fontes nas demandas.

5.4.2 Aplicação do DFA para regeneração com reciclo segundo a metodologia adaptada por Francisco *et al.*, (2022).

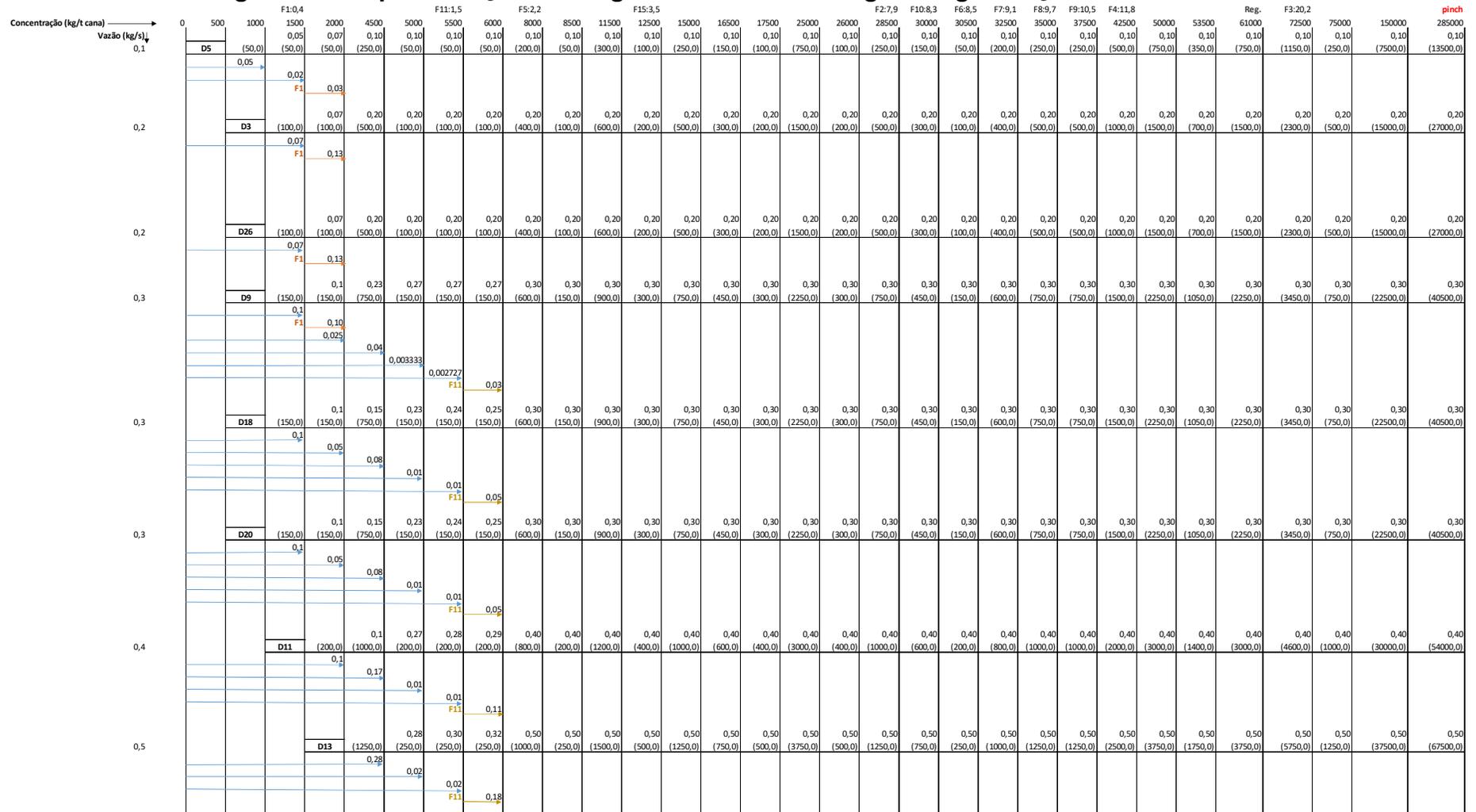
Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção das operações que farão parte da análise

As demandas são classificadas em grupos A, B e C, para identificar quais delas farão parte da análise. As demandas dos grupos A e C são removidas da análise quando há a existência de demandas no grupo B. Então, a concentração do regenerador será igual à concentração limite de entrada da operação do grupo B que tenha maior taxa de vazão acumulada. No presente processo, a concentração será igual a concentração da demanda D16, que é 61000 kg/t de cana.

Etapa 3: Cálculo das vazões para cada intervalo em cada operação

As únicas demandas que podem usar água do regenerador são D1, D2, D12, D15 e D16, por terem concentrações de entrada igual ou maior que a concentração de saída do regenerador. As outras demandas utilizam água das fontes disponíveis ao longo dos intervalos de concentração e da fonte externa com água a 0 kg/t de cana.

Figura 33 - Representação do diagrama de fontes de água - regeneração com reciclo.



O DFA considerando regeneração e reciclo reduziu a captação de água da fonte externa de 1229 L/t de cana para 104,97 L/t de cana, sendo um resultado bem superior a opção de máximo reuso.

Etapa 4: Realização do balanço de massa e Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Como o problema envolve apenas um contaminante, não ocorrerão violações de concentração, podendo ocorrer apenas violações nas restrições de vazão, como foi o caso da demanda D1.

Etapa 6: Cálculo da taxa de remoção do contaminante

Como não há operação acima do ponto de pinch, então a opção é selecionar as fontes que têm concentração acima do valor de saída da concentração do regenerador e nesse caso a fonte F3 é ideal para ser regenerada.

Etapa 7: Construção da nova rede de água.

A Tabela 25 apresenta a representação da rede obtida na Figura 35, indicando o consumo das fontes nas demandas.

5.4.3 Aplicação do DFA para regeneração e reuso.

Etapa 1: Determinação da localização do regenerador e Etapa 2: Seleção da concentração de saída do regenerador

As Etapas 1 e 2 são iguais ao do DFA com regeneração e reciclo. Seguindo a metodologia descrita na Seção 4.3, a concentração ideal da saída do regenerador é igual à concentração limite da demanda D16 que é 61000 Kg/t de cana.

Etapa 3: Geração do DFA considerando a corrente regenerada

Aqui a corrente disponível para ser regenerada é apenas a fonte F3, pois seguindo a metodologia usada no DFA para regeneração e reciclo essa fonte é a única que tem concentração maior do que a concentração de saída do regenerador.

O DFA nesse caso foi praticamente igual ao caso de regeneração com reciclo, que teve alterações apenas a partir do intervalo 28, que corresponde a localização do regenerador. As únicas operações que utilizaram água regenerada foram as demandas D12, D15 e D16, pois a vazão disponível da fonte regenerada era de 20,2 kg/s, no entanto essas demandas ainda precisaram de água das fontes internas disponíveis para suprir suas vazões.

As demandas D1 e D2, que ocorrem nos intervalos posteriores ao de concentração do regenerador, não puderam utilizar água regenerada porque não tinha mais disponível, então, reusaram fontes internas e a demanda D2 utilizou 19,65 Kg/s de água da fonte externa a 0 Kg/t de cana.

Como nesse caso a vazão do regenerador é limitada e a demanda D2 necessitou consumir água da fonte externa, a captação dessa aumentou para 232,05 L/t de cana em relação a opção de regeneração com reciclo.

Etapa 4: Realização do balanço de massa e Etapa 5: Inspeção das operações para verificar se houve violações

Como o problema apresenta apenas um contaminante não é necessário fazer o balanço de massa para verificar se houve violações de concentração, basta apenas verificar se houve violações de vazão e essas foram encontradas nas demandas D1 e D2 e foram retiradas.

Etapa 6: Construção da rede final

A Tabela 26 apresenta a representação da rede obtida na Figura 36, indicando o consumo das fontes nas demandas.

5.4.4 Análise dos resultados – Estudo de caso 4

Como pode ser visto na Tabela 24, o DFA conseguiu reduzir o consumo de água trazendo resultados melhores do que os resultados obtidos por Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013). A regeneração com reciclo foi a opção que mais reduziu a captação de água, cerca de 91,45% em relação a quantidade inicialmente captada por essa indústria. A redução é de 45,13% se comparada à redução obtida por Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013) para a opção de máximo reuso, 83,80% para a opção de regeneração com reciclo e 64% para a opção de regeneração com reuso. Nesse caso, assim como Chavez-Rodriguez *et al.* (2013) definiram, os condensados foram as principais correntes de reuso observadas em todas as opções.

Tabela 27 - Comparação dos resultados para o Estudo de Caso 4.

CONSUMO DE ÁGUA DA FONTE EXTERNA (0 ppm)	MÁXIMO REUSO	REGENERAÇÃO COM RECICLO	REGENERAÇÃO COM REUSO
Resultados encontrados	355,54 L/t de cana	104,97 L/t de cana	232,05 L/t de cana
Referência	648 L/t de cana	—	—

6 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou a aplicação do DFA, considerando máximo reuso, regeneração e reciclo, e regeneração e reuso em indústrias produtoras de açúcar e etanol a partir de matérias-primas variadas, com o intuito de avaliar possibilidades para reduzir o consumo de água destas unidades industriais. Assim, há o intuito de aumentar a sustentabilidade de tal segmento, indo de encontro das ODS da ONU. A redução de consumo de água em tal segmento é importante, pois este é um setor que apresenta grande consumo de água e de geração de efluentes. Para demonstrar a eficácia do método DFA com consideração de regeneração, foram efetuados quatro estudos de caso com dados de processos disponíveis na literatura.

O primeiro estudo de caso abordou uma usina de etanol de mandioca na China, envolvendo operações descritas com carga fixa e um contaminante. O consumo original desta planta é de 9,29 t/h de água da fonte externa. Após a aplicação do método DFA, o consumo foi reduzido para 4,815 t/h, o que representa cerca de 52% de redução para a opção de máximo reuso. Com a consideração de regeneração e reciclo, considerando a recente metodologia de Francisco *et al.* (2022), foi possível reduzir o consumo de água para 2,7 t/h de água da fonte externa, uma redução de 70,93 % em relação ao caso base.

O segundo estudo de caso apresentou uma usina com produção integrada de etanol de 1ª e de 2ª gerações, que consome originalmente 16.633,36 Kg/h de água externa. A rede hídrica foi descrita através do conceito de fontes e demandas e dois contaminantes, sacarose e DQO, foram considerados. Aplicando o DFA para máximo reuso, o consumo de água foi reduzido para 13.883,34 Kg/h e no caso de regeneração e reciclo não houve a necessidade de captação de água de fonte externa, considerando um tratamento completo do efluente do sistema.

O terceiro estudo de caso tratou de uma refinaria lignocelulósica considerando a presença de dois contaminantes (ácido acético e ácido fórmico) e operações de carga fixa e também com o processo descrito por fontes e demandas. Neste estudo o DFA levou a uma redução no consumo de água da fonte externa de até 18% para a opção de reúno e de até 60,8% para um problema considerando a opção de regeneração com reciclo. O presente trabalho considerou as opções de máximo reuso, regeneração com reciclo e regeneração com reuso separadamente, o que difere do método utilizado por Nikolakopoulos e Kokossis, (2016), que

obtiveram um resultado melhor do que o DFA, sendo que o método usado implica em custos maiores com as opções de tratamento.

O quarto estudo de caso aborda uma usina produtora de açúcar e etanol, que tem originalmente uma demanda de água externa de 1229 L/t de cana. Com a aplicação do DFA para máximo reuso foi possível reduzir esse consumo para aproximadamente 355,54 L/t de cana, o que representa uma economia de 56%. O resultado apresentado foi melhor do que o de Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013). Todavia, o trabalho de Chavez-Rodriguez *et al.*, (2013) considerou a minimização simultânea de água e energia, o que não foi considerado no presente trabalho. Tal situação não permite uma comparação direta dos dois resultados focando-se somente na água. A opção do DFA com regeneração e reciclo conseguiu reduzir a captação de água externa para aproximadamente 104,97 L/t de cana, representando uma economia de cerca de 91,45% da demanda total original de água.

De acordo com o presente trabalho é possível perceber a eficácia da ferramenta DFA aplicado para esse setor industrial, ou seja, plantas industriais produtoras de açúcar e etanol. O DFA se mostra uma ferramenta de fácil aplicação e que traz resultados que são similares aos métodos de otimização comumente empregados para minimização do consumo de água da fonte externa neste setor. Além disso, traz como vantagem a simplicidade de gerar redes de água sem grandes alterações no processo industrial.

Pode-se perceber ainda que o uso da metodologia de regeneração e reciclo proposta em Francisco *et al.* (2022) é capaz de reduzir ainda mais o consumo de água da fonte externa através do uso de processos regenerativos. No entanto, devem ser avaliados os custos dos processos regenerativos a fim de avaliar a economicidade de implantar tais sistemas frente à opção de máximo reuso. Isso é importante, pois em certas situações o tratamento necessário para remoção de contaminantes pode gerar custos consideráveis em relação ao custo de captação de água da fonte externa.

O DFA se apresentou como uma ferramenta que possibilita ao engenheiro de processos a execução de cálculos manuais sem a necessidade do uso de programas computacionais, sendo uma ferramenta simples e eficaz, que pode ser implementada facilmente em uma indústria quando se dispõe dos dados necessários para sua utilização.

7 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A partir dos resultados e das conclusões obtidas nessa dissertação, apresentam-se algumas sugestões para a continuidade deste estudo:

- Avaliar de forma integrada o consumo de água e de energia em plantas industriais sucroalcooleiras;
- Avaliar os custos necessários para a implantação de reuso e de regeneração na planta industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, J. C. **A Indústria Sucroalcooleira-energética e os Recursos Hídricos: Rio Santo Antônio Grande, Alagoas. Maceió, 2009.** Disponível em:

<https://ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs/sites/default/files/dissertacaojoceline.pdf>

Acesso em: 10/10/2022.

[ANA] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS; [FIESP] FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; [ÚNICA] UNIÃO DA INDÚSTRIA DA CANA-DE-AÇÚCAR; [CTC] CENTRO DE TECNOLOGIA CANAVIEIRA. **Manual de Conservação e Reuso de Água na Indústria Sucoenergética.** Brasília: ANA, 2009. Disponível em: <https://unica.com.br/wp-content/uploads/2020/10/manual-de-conservacao-e-reuso-de-agua-na-agroindustria-sucoenergetica.pdf>. Acesso em: 5 out. 2021.

ALWI, Sharifah Rafidah Wan; MANAN, Zainuddin Abdul. **Water pinch analysis for water management and minimization an introduction.** *In*: Handbook of Process Integration (PI). Woodhead Publishing, [S. l.], 2013. p. 353-382.

BARROS, T. D. **Etanol de mandioca.** Brasília: Embrapa Agroenergia. 2021.

Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/p-d-e-i/etanol/etanol-de-mandioca>.

Acesso em: 16 set. 2022.

BALLA, W. H.; RABAH, A. A.; ABDALLAH, B. K. **Pinch Analysis of Sugarcane Refinery Water Integration.** SugarTech, [S. l.], 2018, p. 122–134. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s12355-017-0535-5>.

Brasil, A. (02 de 03 de 2009). **Produção de etanol da mandioca pode ser mais barata do que com a cana.** Tn petróleo. Disponível em:

<https://tnpetroleo.com.br/noticia/producao-de-etanol-a-partir-da-mandioca-pode-ser-mais-barata-do-que-com-a-cana/> Acesso em: 16/09/2022

Biodiesel BR. **ProÁlcool- Programa Brasileiro de Álcool.** 2012. Disponível em:

<https://www.biodieselbr.com/proalcool/pro-alcool/programa-etanol> Acesso em 15 set. 2021.

Calixto, E.E.S., Quaresma, A.C.L., Queiroz, E.M., Pessoa, F.L.P., 2015. **Water**

Sources Diagram in Multiple Contaminant Industrial Case Studies: Adoption of a Decomposition Approach. Ind. Eng. Chem. Res. 54, 10040–10053.

doi: 10.1021/acs.iecr.5b01749

CASTRO, P.; MATOS, H.; FERNANDES, M. C.; PEDRO NUNES, C. **Improvements for mass-exchange networks design.** Chemical Engineering Science, [S. l.], v. 54, n. 11, p. 1649–1665, jun. 1999.

[CBIE] CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA. **Como ocorre a produção industrial de álcool/etanol?** Rio de Janeiro, 27 mar. 2ª20a. Disponível em:

<https://cbie.com.br/artigos/como-ocorre-a-producao-industrial-de-alcool-etanol/>.

Acesso em: 22 mar. 2022.

[CBIE] CENTRO BRASILEIRO DE INFRA ESTRUTURA. **O que são os biocombustíveis?** Rio de Janeiro, 17 jul. 2020b. Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/o-qbemsao-biocombustiveis/> . Acesso em: 11 out. 2021.

CHAVEZ-RODRIGUEZ, M. F.; NEBRA, S. A. **Avaliação das emissões de GEE, pegada ecológica e ligação de água para diferentes combustíveis.** Environ Sci Technol, [S. l.], v. 44, n. 24, p. 9252–9257, 2010.

Chavez-Rodriguez MF, Mosqueira-Salazar KJ, Ensinas AV, Nebra SA. **Water reuse and recycling according to stream qualities in sugarethanol plants.** Energy Sustain Dev 2013; 17:546

CORTÉS, Meilyn González *et al.* **Simultaneous energy and water minimization applied to sugar process production.** Chemical Engineering Transactions, [S. l.], v. 25, p. 177-182, 2011.

CRUZ, L. F. L. S. **Viabilidade técnica/econômica/ambiental das atuais formas de aproveitamento da vinhaça para o Setor Sucroenergético do Estado de São Paulo.** 2011. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola de engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-04052012-104315/publico/DissertacaoFinalCorrigida.pdf>. Acesso em: 22 out. 2021.

CUNHA, F.R., MIRRE, R.C., SANTOS, R.P., **Minimização de efluentes aquosos na indústria de processos químicos: o caso de uma refinaria de petróleo.** 2005. Projeto final de curso de graduação, Escola de Química / UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

DELGADO, Bernadete Elizardo Pereira da Costa. **Minimização de efluentes aquosos em plantas industriais – Extensão do algoritmo diagrama de fontes de água para regeneração diferenciada.** 2003. Dissertação (Mestrado) - EQ/DEQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

DENG, C.; FENG, X. **Optimal Water Network with Zero Wastewater Discharge in an Alumina Plant** (L. Trilling, D. Perkins, D. Dionysios, L. Perlovsky, K. Davey, D. Landgrebe, M. A. Marino, D. L. Russell, S. H. Collicott, M. Ceccarelli, & J. W. Lund, Eds.) Proceedings of the 4th IASME / WSEAS International Conference on ENERGY & ENVIRONMENT. **Anais...**Cambridge, UK: WSEAS Press, 2009. Disponível em: <http://www.wseas.us/e-library/transactions/environment/2009/28-842.pdf>

DUHBACI, Tuba Budak; ÖZEL, Semih; BULKAN, Serol. Water and energy minimization in industrial processes through mathematical programming: A literature review. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 284, p. 124752, 2021.

ECYCLE. **Sequestro de carbono:** o que é e como ocorre. São Paulo, 2021c. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/sequestro-de-carbono/>. Acesso em: 13 abr. 2022.

EES. **Engineering equation solver**. F-Chart software; 2007
[<http://www.fchart.com/ees/>].

ELIA NETO, A. **Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar**. In: MACEDO, Isaías de Carvalho (org.). **A Energia da Cana-de-Açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. São Paulo: Unica, 2005. p. 108-115.

EMBRAPA. **Árvore do Conhecimento: Cana-de-Açúcar**. Brasília: ageitec, 2017. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html. Acesso em: 15 jun. 2021.

Ensinas, A. V. **Thermal integration and thermoeconomic optimization applied to the industrial process of sugar and ethanol production from the sugar cane**. 2008. Tese (Doutorado) –University of Campinas, Campinas, 2008.
[EPE] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2021: ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/bemico-596/BEN2021.pdf>. Acesso em: 22/03/2022.

[EPE] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanco Energético Nacional 2022: ano base 2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2022. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico631/BEN_S%C3%ADntese_2022_PT.pdf

ERENO, D. **Etanol de mandioca doce**. Biocombustíveis. Pesquisa FAPESP, [S. l.], v. 144. 2008. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/etanol-de-mandioca-doce/>. Acesso em: 16 set. 2022.

FARIA, D.C. **Reuso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo**. 2004. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

Foo, D.C.Y. 2012. **Process integration for resource conservation**. Boca Raton, Florida: CRC Press.

[FIESP] FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Conservação e Reuso da água em Edificações**. São Paulo, 2005.

FOO, Dominic Chwan Yee. **State-of-the-art review of pinch analysis techniques for water network synthesis**. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 48, n. 11, p. 5125-5159, 2009.

Foo, D.C.Y. 2012. **Process integration for resource conservation**. Boca Raton, Florida: CRC Press.

FRANCISCO, Flávio da Silva, Bagajewicz, M.J., Pessoa, F.L., Queiroz, E.M., 2015. **Extension of the water sources diagram method to systems with simultaneous fixed flowrate and fixed load processes**. Chemical Engineering Research and Design 104, 752-772.

FRANCISCO, Flávio da Silva. **Aperfeiçoamento e extensão do Diagrama de Fontes visando a sustentabilidade**. 2017. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - EQ/DEQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <http://tpqb.eq.ufrj.br/download/aperfeiçoamento-e-extensao-do-diagrama-de-fontes-visando-a-sustentabilidade.pdf>. Acesso em: 28 set. 2022.

FRANCISCO, F. S.; MIRRE, R. C.; CALIXTO, E. E.; PESSOA, F. L.; QUEIROZ, E. M. **Water sources diagram method in systems with multiple contaminants in fixed flowrate and fixed load processes**. Journal of Cleaner Production, [S. l.], v. 172, 2018, p. 3186-3200.

FRANCISCO, Flávio S. *et al.* **Developing Water Source Diagram method for effective utilization of regeneration unit in water networks: Multiple-contaminant problems**. Journal of Water Process Engineering, [S. l.], v. 47, p. 102758, 2022.

GIORDANO, G. **Tratamento e controle de efluentes industriais**. UERJ, 2004. Disponível em: <http://metalcleanaguas.com.br/pdf/tratamento-controle-efluentes-industriais.pdf> Acesso em 10 de novembro de 2022.

GOMES, J. F. S. **Procedimento para Minimização de efluentes aquosos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - EQ/DEQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, J.F.S., QUEIROZ, E.M., PESSOA, F.L.P., “**Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant**”, Journal of Cleaner Production, 15, 474-485, 2007.

GOMES, J. F. S.; MIRRE, R. C.; DELGADO, B. E. P. C.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. **Water Sources Diagram in Multiple Contaminant Processes: Maximum Reuse**. Industrial & Engineering Chemistry Research, [S. l.], v. 52, n. 4, p. 1667–1677, 30 jan. 2013.

GROSSI, Elton Carlos. **Produção de etanol de segunda geração a partir de um derivado de celulose**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Química e Biológica do Instituto de Química da Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2015. Disponível em: https://repositorio.unb.br/bitstream/10482/18579/3/2015_EltonCarlosGrossi.pdf. Acesso em: 19 jun. 2022.

ULSON DE SOUZA, Selene Maria de Arruda Guelli *et al.* **Water reuse and wastewater minimization in chemical industries using differentiated regeneration of contaminants**. Industrial & engineering chemistry research, v. 50, n. 12, p. 7428-7436, 2011.

- HALLALE, N.; LIU, F. **Refinery hydrogen management for clean fuels production**. *Advances in Environmental Research*, v. 6, n. 1, p. 81-98, 2001.
- Liu, H.; Ren, L.; Zhuo, H.; Fu, S. **Water Footprint and Water Pinch Analysis in Ethanol Industrial Production for Water Management**. *Water* 2019, 11, 518.
- HIGA, C. M.; PENHA, N. P. **Minimização de efluentes aquosos: o caso de uma refinaria de petróleo**. 2006. Projeto final de curso de graduação, Escola de Química / UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- HIGA, C. M. *et al.* **Minimização do consumo de água: o caso de uma refinaria de petróleo**. *Revista de Ciência & Tecnologia, Nova Iguaçu*, v. 8, n. 1, p. 34-46, 2008.
- Huang, C-H., Chang, C-T., Ling, H-C., 1999. **A mathematical programming models for water usage and treatment network design**. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 38, 2666-2679.
- INGARAMO, A.; HELUANE, H.; COLOMBO, M.; CESCA, M. **Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry**. *Journal of Cleaner Production*, [S. l.] v. 17, n. 4, p. 487-495, 2009.
- JANNUZZI, G. M. Uso da água na produção de etanol de cana-de-açúcar. *In: CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (coord.). Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade*. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2010. parte 2, cap. 8, p. 271-278.
- Klemes J, Friedler F, Bulatov I, Varbanov P. **Sustainability in the process industry**. 1st ed. McGraw-Hill Professional, United States of America; 2011.
- KUSHWAHA, Jai Prakash. **A review on sugar industry wastewater: sources, treatment technologies, and reuse**. *Desalination and Water Treatment*, [S. l.], v. 53, n. 2, p. 309-318, 2013.
- LLANES, Junior Lorenzo *et al.* **Integración de la red de agua en la producción de azúcar crudo**. *Revista Centro Azúcar*, [S. l.], v. 44, n. 3, p. 10-10, 2017.
- LEONE, A. A. M. **Proposição de reuso da água residuária de uma usina sucroalcooleira situada no interior de São Paulo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2018. Disponível em: <https://www.unaerp.br/documentos/3124-dissertacao-aline-miguel-versao-final/file>. Acesso em: 13 out. 2021.
- LINNHOFF, Bodo; HINDMARSH, Eric. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, [S. l.], v. 38, n. 5, p. 745-763, 1983.
- MAGALHÃES, C. C.; **Minimização de efluentes aquosos em refinarias usando DFA – Análise da utilização de Processos de Regeneração**. 2005. Projeto Final de Curso de Graduação, EQ/UFRJ, 2005.

MARTÍN, Mariano; AHMETOVIC, Elvis; GROSSMANN, Ignacio E. Optimization of water consumption in second generation bioethanol plants. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, [S. l.], v. 50, n. 7, p. 3705-3721, 2011.

MARTINEZ-HERNANDEZ, Elias; SADHUKHAN, Jhuma; CAMPBELL, Grant M. **Integration of bioethanol as an in-process material in biorefineries using mass pinch analysis**. *Applied energy*, [S. l.], v. 104, p. 517-526, 2013. MIRRE, R. C. *Recuperação e Reuso de Água na Indústria de Petróleo: Síntese de Redes de Transferência de Massa*. Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

MIRRE, R. C. YOKOYAMA, L., PESSOA, F. L. P. **Diagrama de Fontes de Água: Uma Ferramenta Sustentável para a P+L na Minimização de Águas e Efluentes Industriais**. *Internacional Workshop Advances in cleaner production*. São Paulo, maio de 2009.

MOSQUEIRA-SALAZAR, K. J. *et al.* Reduction of water consumption in an integrated first-and second-generation ethanol plant. **Energy for Sustainable Development**, [S. l.], v. 17, n. 5, p. 531-535, 2013.

Mountraki A,D., Nikolakopoulos A., Mlayah B,B., Kokossis A,C. **BIOCORE- A SYSTEMS INTEGRATION PARADIGM IN THE REAL-LIFE DEVELOPMENT OF A LIGNOCELLULOSIC BIOREFINERY**. *Computer Aided Chemical Engineering* 29, 1381-1385

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável*. 2022. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em 16 set. 2022.

NCBI, Britannica, Repositório Unicamp, Sugar, Cana-de-açúcar e tradição, A trajetória da cana de açúcar no Brasil, WWF, Farmer.gov. *Cana-de-açúcar: impactos, usos e benefícios*. São Paulo^a 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/cana-de-acucar/> . Acesso em 8 abr. 2022.

N. Hallale, **A new graphical targeting method for water minimisation**, *Adv. Environ. Res.* 6 (3) (2002) 377–390.

NEMAT-AMIRKOLAI, Keivan; ROMDHANA, Hedi; LAMELOISE, Marie-Laure. **Pinch methods for efficient use of water in food industry: a survey review**. *Sustainability*, [S. l.], v. 11, n. 16, p. 4492, 2019.

Nikolakopoulos, A., Kokossis, A., 2016. **A problem decomposition approach for 14 developing total water networks in lignocellulosic biorefineries**. *Process Saf. 15 Environ. Prot.* doi: 10.1016/j.psep.2016.12.007

Pacheco, L.C. (2014). **Síntese da rede de água e do sistema de tratamento distribuído de efluentes em refinarias** [Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. http://epqb.eq.ufrj.br/wpcontent/uploads/2021/04/14_06.pdf

PIACENTE, Fabrício José; SILVA, V. de C.; BIAGGI, Dennys Eduardo. **Produção de bioetanol a partir do milho**: estudo de prospecção tecnológica a partir de bases de patentes. Anais do 1º Encontro da Nacional de Economia Industrial e Inovação. São Paulo: Blucher, p. 1211-1225, 2016. Disponível em: <http://pdf.blucher.com.br/bem-sa-east-1.amazonaws.com/engineeringproceedings/1enei/067.pdf>. Acesso em: 16 set. 2022.

PINA, Eduardo A. *et al.* **Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane—Evaluation of different plant configurations**. Energy, [S. l.], v. 138, p. 1263-1280, 2017.

PODDAR, K. P.; SAHU, O. **Quality and Management of Wastewater**. Springerlink, [S. l.], 2015.

SAHU, Om Prakash; CHAUDHARI, Parmesh Kumar. **The characteristics, effects, and treatment of wastewater in sugarcane industry**. Water Quality, Exposure and Health, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 435-444, 2015.

SANTOS, R. P. **Extensão e automatização do Diagrama de Fontes de Água usado no gerenciamento e redução do consumo de água em plantas industriais**. 2007. 161 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2007.

SANTOS, D. F. L.; BASSO, L. F. C.; KIMURA, H.; SOBREIRO, V. A. Eco-innovation in the Brazilian sugar-ethanol industry: a case study. **Brazilian Journal of Science and Technology**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 1-15, 2015.

SAUTCHUK, C.; FARINA, H.; HESPANHOL, I.; OLIVEIRA, L. H.; COSTI, L. O.; ILHA, M. S. O.; GONÇALVES, O. M.; MAY, S.; BONI, S. N.; SCHIMIDT, W. **Conservação e reuso da água em edificações**. São Paulo: [ANA] Agência Nacional de Águas; [FIESP] Federação das Indústrias do estado de São Paulo; [SINDUSCON SP] Sindicato da Indústria da Construção Civil do estado de São Paulo, 2005. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2006/ConservacaoEReusoDaAguaEdificacoes.pdf>. Acesso em: 13 out. 2021.

Savelski, M.; Bagajewicz, M. **On the necessary conditions of optimality of water utilization systems in process plants with multiple contaminants**. Chem. Eng. Sci. 2003, 58, 5349–5362.

Sustainable Process Integration Research Group, —RCNet (**Resource Conversation Networks**) **Software User Guide for version 4.0II**, Centre of Excellence for Green Technologies, University of Nottingham Malaysia.

Ullmer, C., Kunde, N., Lassahn, A., Gruhn, G., Schulz, K., 2005. **WADOTM: Water design optimization – methodology and software for the synthesis of process water systems**. Journal of Cleaner Production, 13, 485-494.

UNICA. Uso do etanol evita 515 milhões de toneladas de co2. Junho de 2020. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/uso-do-etanol-evita-515-milhoes-de-toneladas-de-co2-na-atmosfera/>

UNICA. **Histórico de produção e moagem, 2021.** Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=2493&safra=2019%2F2020&estado=RS%2CSC%2CPR%2CSP%2CRJ%2CMG%2CES%2CMS%2CMT%2CGO%2CDF%2CBA%2CSE%2CAL%2CPE%2CPB%2CRN%2CCE%2CPI%2CMA%2CTO%2CPA%2CAP%2CRO%2CAM%2CAC%2CRR> Acesso em: 06/10/2022.

UNIVERSIDADE DE CORNELL E SCIENTIFIC REPORTS. **O que é biocombustível?** São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.ecycle.com.br/o-que-e-biocombustivel/>. Acesso em 8 abr. 2022.

VALDERRAMA, Claudia; QUINTERO, Viviana; KAFAROV, Viatcheslav. **Energy and water optimization of an integrated bioethanol production process from molasses and sugarcane bagasse: A Colombian case.** Fuel, [S. l.], v. 260, p. 116314, 2020.

WANG, Ya-Ping; SMITH, Robin. Design of distributed effluent treatment systems. **Chemical Engineering Science**, [S. l.], v. 49, n. 18, p. 3127-3145, 1994a.

Wang, Y. P.; Smith, R. **Minimização de Águas Residuais.** Química Eng. Sci. 1994b, 49, 981-1006.

WANG, Y. P.; SMITH, R. **Wastewater minimization with flowrate constraints. Transactions of the Institution of Chemical Engineers.** Chemical Engineering Research & Design, [S. l.], v. 73, n. 8, 889-904, 1995. Disponível em: <https://www.cheric.org/research/tech/periodicals/view.php?seq=51690>. Acesso em 13 out. 2021.

Yee, T.F., Grossmann, I.E., 1990. **Simultaneous optimization models for heat integration. II.** Heat exchanger network synthesis. Comput. Chem. Eng. 14, 1165–1184.

ZARPELON, F. **Redução do volume de vinhoto.** Stab: Açúcar, Álcool e Subp., v. 1, n. 2, p. 28-35, 1982.

ZHANG, Qiao; FENG, Xiao; CHU, Khim Hoong. Evolutionary graphical approach for simultaneous targeting and design of resource conservation networks with multiple contaminants. **Industrial & engineering chemistry research**, [S. l.], v. 52, n. 3, p. 1309-1321, 2013.

ZHAO, Zhenhui; LIU, Guilian; FENG, Xiao. The integration of the hydrogen distribution system with multiple impurities. **Chemical Engineering Research and Design**, [S. l.], v. 85, n. 9, p. 1295-1304, 2007.

ZHELEV, T. K.; NTLHAKANA, J. L. Energy-environment closed-loop through oxygen pinch. **Computers & Chemical Engineering**, [S. l.], v. 23, p. S79-S83, 1999.

ZVER, L. Žbontar; GLAVIČ, Peter. **Water minimization in process industries: case study in beet sugar plant.** Resources, conservation and recycling, [S. l.], v. 43, n. 2, p. 133-145, 2005.

**ARTIGO EM INGLÊS REFERENTE A
DISSERTAÇÃO A SER SUBMETIDO**

OPTIMIZATION OF THE WATER SOURCES DIAGRAM THROUGH IDEAL REGENERATION IN A SUGARCANE PLANT

Rayssa da Costa Cabral ¹, Eduardo Mach Queiroz ², Flávio da Silva Francisco ³.

Federal University of Rio de Janeiro- Programa de Pós-Grauação em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. Rio de Janeiro, Brazil, 2022.

ABSTRACT

Among the environmental issues that are gaining importance every day is the management of water resources, and this fact has pressured industries to seek more sustainable ways to carry out their processes. Water was generally treated as an unlimited resource, which becomes worrisome because it can run out of the planet if its use continues abundantly and irresponsibly. Given this scenario, industries must take measures to minimize water consumption within their processes. Among the industries with great relevance in the use of water resources, the sugarcane industry is an activity that presents a high potential for pollution and uses large water flows throughout the production process generating a significant volume of wastewater. Several methodologies have been developed to reduce water consumption in an industrial process, and the Water Source Diagram (WSD) has proved to be a very effective tool in this regard. The objective of this work is to apply the WSD method considering the options of regeneration and reuse and regeneration and recycling in sugarcane plants to reduce freshwater consumption; by applying the methodology considering these options, the water consumption was reduced between 49.9% and 100%, confirming the tool's effectiveness to reduce water consumption in sugarcane plants.

Keywords: water resources management, water sources diagram, sugarcane plants, reuse, regeneration

1. INTRODUCTION

The water scarcity on the planet has constantly concerned environmentalists and researchers around the world; with this, the search for mechanisms for its rational use is the subject of numerous research and applications in the various industrial sectors that use water in their processes (LEONE, 2018).

The sugarcane industry has great relevance in the use of water resources since the industrial plants use large water flows throughout the production process, especially in the washing of sugarcane, generating a significant volume of wastewater with a high potential for pollution (INGARAMO et al., 2009; SAHU; CHAUDHARI, 2015).

According to Elia Neto (2005), the effluents generated in a sugarcane refinery are the washing water used to wash the sugarcane when it arrives at the industrial unit; water from barometric and multi-jet condensers; water for cooling vats and condensers; in addition to wastewater used for cleaning the equipment, the industrial yard, and the industry's domestic utilities. However, there has been a decrease in the amount of water collected for ethanol production of ethanol, due to some "simple" changes in the process, such as the substitution of replacement of sugarcane washing with dry washing and modification of the cooling circuits of mill bearings and turbogenerators, which are now closed with cooling towers in systems involving cogeneration (JANNUZZI, 2010).

A sugarcane plant with an attached distillery and a production mix of 50% sugar and 50% ethanol consumes an average of 22 m³/t of sugarcane (Elia Neto, 2005). In the process of producing sugar and alcohol, around 3.6 billion liters of water are consumed annually, and it is estimated that for each ton of hydrated alcohol produced, 125 tons of water are consumed (ALMEIDA, 2009).

This sector has been improving its processes to meet market specifications regarding environmental issues, already introducing practices focused on minimizing water and energy consumption (UNICA, 2021). In the effluents of these plants, the most common pollutants are chemical oxygen demand (COD), biological oxygen demand (BOD), total dissolved solids (TDS), sulfates, and heavy metals (KUSHWAHA, 2013). If the effluent is discarded into the environment without prior treatment, it will cause pollution in terrestrial and aquatic environments. To avoid this situation, it is necessary to use effluent treatment units such as, for example,

filtration, sedimentation, and biological methods, among others (KUSHWAHA, 2013). Reusing treated or untreated effluents within the processes are also possible. In conjunction with internal reuse, this kind of reuse emerges as an important option to reduce freshwater consumption and wastewater discharge to the environment. The water reuse with regenerated and internal sources enables greater integration of the production process, leading to a more significant reduction in water consumption to promote sustainability in the industrial stages.

For Nemati-Amirkolaii, Romdhana, and Lameloise (2019), in the food industry, there is little knowledge about: (a) process integration, (b) data on pollutant indicators, and (c) volumes of water used and discarded in specific stages of the processing line. According to the authors, mass pinch analysis focused on water systems is a conceptual and systematic approach to minimize water consumption and wastewater generation in industries that are large consumers of this resource, such as sugarcane mills, that can generate products from both the food sector and the energy sector.

The pinch analysis was initially developed to optimize heat exchanger networks, while the mass pinch analysis began in the mid-1990s to minimize water consumption by proposing alternatives for the retrofit of the water network. Wang and Smith (1994) applied this method to reduce water consumption for the first time, naming it Water Pinch Analysis.

Therefore, several tools employing pinch analysis have been developed since then. The pinch concept has also been applied in different areas since its first development, such as the consumption of hydrogen in refineries (HALLALE; LIU, 2001), the supply of oxygen (ZHELEV; NTLHAKANA, 1999), the control of CO₂ emissions (LINNHOFF; HINDMARSH, 1983), among others.

One of the essential applications of pinch analysis is the reduction of water consumption, which tries to find an optimal balance between different water sources (fresh, reused, recycled, etc.) and water demands in different industrial sectors (NEMATI-AMIRKOLAII; ROMDHANA; LAMELOISE, 2019).

Zver and Glavič (2005) developed and tested a systematic approach to minimizing water consumption in a sugarcane mill. A heuristic approach was used considering selection criteria such as costs, technical capacity of freshwater sources, reliability, complexity, impact on process/product quality, generation of secondary waste, etc. However, based on the results obtained and the heuristic rules, the

method suggested taking into account wastewater regeneration procedures, which are simple, such as disinfection, and neutralization, among others, which made the method limited by only working with this type of system.

Much research has been carried out to develop methodologies based on pinch analysis in situations of water consumption; however, until then, they were applied to assume the presence of only one contaminant. Zhao, Liu, and Feng (2007) developed work to minimize hydrogen consumption in refineries with multiple contaminants; however, the developed methodology can also be applied to minimize water consumption. This methodology only obtains the water consumption target, requiring another tool (or method) to generate the structure of the water network.

Systems involving the presence of multiple contaminants are more common and realistic, so, thinking about it, Zhang, Feng, and Chu (2013) presented a way to direct and design a water network in a process with multiple contaminants using a graphical methodology.

Martinez-Hernandez, Sadhukhan, and Campbell (2013) developed a graphical approach based on pinch analysis in an integrated ethanol-producing plant, using wheat as raw material to minimize water consumption through reuse with recycling. According to the authors, this approach enabled a system with greater efficiency, flexibility, profitability, and sustainability.

Mosqueira-Salazar et al. (2013) used energy and mass integration to estimate the increase in water consumption and external water collection in a sugarcane ethanol plant due to the introduction of second-generation ethanol production through the sugarcane hydrolysis process bagasse and also identified opportunities for water reuse. Three cases were evaluated: a conventional first-generation ethanol production plant and two second-generation ethanol plants, differing only by glucose concentration in the processes. Mass and energy balances were made through the Aspen Plus software, highlighting the importance of practices to reduce water and energy consumption in this industry and the high reduction potential based on the concept of mass and energy integration.

Poddar and Sahu (2015) studied the physicochemical characteristics of wastewater in the sugar industry and used a hybrid method (pinch methodology with mathematical optimization) to minimize water consumption in this industrial plant. The authors concluded that the developed methodology is flexible and can handle complex processes, but several steps need to be performed.

Pina et al. (2015) carried out a study to evaluate the reduction of steam demand and water use in processes of the sugar and alcohol industry through thermal integration. The authors analyzed two plant configurations: 1) with production focused only on ethanol and 2) with a mix of 50% for sugar and 50% for ethanol production. Using the Aspen Plus software, simulations were performed to evaluate mass and energy balances. The mass and energy integrations were performed by the pinch methodology using the composite curve diagram (KLEMES, 2011) to minimize the consumption of utilities. The results obtained were a reduction in steam consumption due to thermal integration and a reduction in water consumption. However, the methodology obtained a complex and expensive heat exchanger network.

Cortés et al. (2016) proposed a systematic procedure to simultaneously design a network with minimal water and energy consumption in an industrial sugar mill plant, considering the reduction of water consumption through an energy-based perspective. However, the integration was carried out sequentially, initially determining the minimum water consumption through water pinch analysis and, later, the minimum energy consumption using the composite curve diagram. A two-dimensional network diagram was also used to explore different options for water system configuration and allow for reducing the complexity of power and water networks. However, the project proposed by this methodology implies changes in the configuration of the original project that, from the water point of view, can restrict the potential of new solutions to reduce the consumption of this resource.

Llanes et al. (2017) studied mass integration based on pinch analysis between the different operations of the raw sugar production process to reduce the consumption of external water, considering a hybrid-type problem and dissolved sugar as a contaminant. The integration strategy is divided into two fundamental stages: determining the minimum external water requirements and redesigning the network. In the first one, the sources and demands composite curves are constructed, and then the network is redesigned through an algorithm that considers the sources must have a concentration lower than or equal to that of the demands. The integration methodology used by the authors managed to eliminate external water consumption and reduce the discharge of the effluent. However, to identify the pinch in this problem, it is necessary to obtain the composite curve diagram first, which means that there are more steps to obtain the desired result.

Balla, Rabah, and Abdallah (2018) also used pinch analysis and mathematical optimization to obtain the minimum water consumption in a sugarcane mill. The water cascade method was used to obtain the water consumption target (FOO, 2012), and the Resource Conservation Networks software (Sustainable Process Integration Research Group) was used to design the water networks. As noted, this methodology involves many steps to reach the ultimate goal.

Martin et al. (2011) studied the optimization of water consumption in plants producing second-generation ethanol, using thermochemical, thermobiochemical, or biochemical routes, through a method with three steps divided into (i) optimization of energy consumption in production processes, reducing cooling needs and water losses through evaporation, and (ii) possibilities of partial replacement of the use of water as a cooling agent are analyzed, and, finally, (iii) the projection of ideal water networks for each ethanol production process, determining the minimum consumption of water with reuse, recycle and necessary treatment using a superstructure optimization methodology.

As seen, most works consist of mathematical programming methodologies, graphical methods, algorithmic procedures, or procedures based on heuristics that involve several steps, which can generate complex procedures that are not easy to apply. In this context, the Water Source Diagram (WSD) stands out as a simple and effective algorithmic-heuristic tool. In addition, it can be easily used by the process engineer, allowing him to have control of the calculations at all stages, which simultaneously provides the minimum water consumption (target) and the structure of the corresponding network.

2. METHODOLOGY

The methodology used in this research was based on applying the WSD method from Francisco et al. (2022), which considered only regeneration and recycling. To fill the gaps related to regeneration cases, the present work extended the previous method considering the regeneration and reuse cases. The presented methodology covers fixed load problems and fixed flow rate problems with multiple contaminants and considers regeneration recycling and regeneration reuse proposed in the present research. This study involves minimizing water consumption and wastewater generation using the WSD method for three scenarios: a) without regeneration – maximum reuse/recycle, b) with regeneration recycling, and c) with

regeneration reuse. In the third scenario, the WSD method is upgraded. The methodology will be described in detail for scenarios b and c.

2.1 Regeneration with recycling

Some steps are described more comprehensively in Francisco (2022) for the application of the methodology. The first step is to develop the scenario without regeneration, i.e., maximum reuse. This step will not be shown here for brevity questions, and more details can be found in Francisco et al. (2012 and 2015) and Gomes et al. (2013).

The results obtained when applying WSD for maximum reuse include the reference contaminant and the mass pinch point. When is considered the regeneration case, it is necessary to a) determine the optimal concentration of contaminants in the post-regenerated water stream, b) select the most appropriate wastewater stream(s) for treatment, and c) determine the optimal regenerated water flow rate.

With the results from the maximum reuse case, step 1 is started.

Step 1: Determining the location of the regenerator.

When the regenerator outlet concentration is low, more quality regenerated water is generated, which offers more possibilities for reuse, reducing costs associated with primary water consumption and the volume of effluent to be treated and disposed. However, this situation leads to increased regeneration costs associated with a high degree of treatment to achieve small regenerator outlet concentrations for a given contaminant j .

The general rule for problems based on the pinch methodology states that the streams to be regenerated should have a concentration above the pinch point and should be regenerated to a concentration below or equal to the pinch, i.e., the location of the regenerator discharge should be between the primary source water concentration and the pinch point concentration (Hallale, 2002).

To use regeneration unit(s), it is necessary to determine the limiting regenerator outlet concentration (post-regeneration concentration) to reduce primary water consumption without increasing treatment costs. To this end, the outlet concentration of the regenerator(s) should be located between the input values of the operation(s) (or demands) below the pinch point. With the pinch point as a guide, the operations (or demands) of the problem can be divided into 3 groups (A, B, and C), namely:

A. Operations (demands) supplied entirely by internal sources: they do not use regenerated water;

B. Operations (demands) partially supplied by internal sources and external sources: the ideal concentration of the reference contaminant in the regenerate is equal to the inlet limit concentration of the operation(s) in this group that has the highest value of cumulative flow rate for the same limit concentration value;

C. Operations (demands) entirely supplied with water from the external source: the ideal concentration of the reference contaminant in the regenerate is equal to the inlet limit concentration of the operation(s) of this group that has the highest value of accumulated flow for the same value of limit concentration.

Step 2: Selecting the regenerator's outlet concentration (post-regeneration concentration)

Operations (demands) that are entirely supplied by internal sources (Group A) are removed from the analysis because it does not make sense to use regenerated water sources for operations in this group, as they are already entirely supplied by internal sources. Among the remaining operations, if there are group C operations and group B operations simultaneously, the group C operations are removed from the analysis.

If there are only group B operations, the ideal concentration of the reference contaminant is considered equal to the operation's limit concentration with the highest cumulative flow rate sum for a given concentration. By defining this concentration, the WSD is generated, including the regenerated stream based on the concentration of the reference contaminant with the highest sum of accumulated flow for a given concentration.

Step 3: Calculation of flows for each interval in each operation;

The WSD has performed again, considering the regenerated stream as an available unlimited source. Thus, the required flow rate of the regenerated stream(s) and the external source(s) at each operation interval is calculated according to Equations 1 and 2. The algorithm follows the same rules presented in the maximum reuse section; however, the difference is that because of the presence of a regenerator in the system, the WSD for regeneration recycling is similar to the WSD for multiple external sources (FRANCISCO et al., 2022). In this case, the regenerator concentration is considered an external source, which has priority of use over the freshwater source (external), aiming to reduce the consumption of the last one.

Moreover, because it is regeneration recycling, the flow rate of regenerated water is considered unlimited in this method, prioritizing the maximum possible use of regenerated water.

$$f_k = \frac{\Delta m_{k,j}}{(C_{k,j,out} - C_{k,j,in})} \quad (1)$$

$$f_k = \frac{[\Delta m_{k,j} - f_{k,j} \cdot (C_{k,j,out} - C_{k,j,in})]}{C_{k,j,out} - C_{k,sr,out}} \quad (2)$$

Step 4: Performing the mass balance;

With the WSD completed and the network structure defined, the mass balance for the other contaminants in all operations(demands) is done to check for violations.

Step 5: Inspection of operations for violations;

In this step, there are two distinct paths to follow. If there are violations, they should be removed by adjusting the primary source water flow rates and/or the outlet flow rates of the operation where the violation occurs. If there are still violations after that, it is necessary to adjust the concentrations of the remaining contaminants in the regenerated stream and perform a mathematical optimization for each remaining operation (or demand), considering the primary and regenerated water streams.

If the primary water consumption increases after this procedure, the concentration adjustment step for the other contaminants is repeated. Otherwise, the sources above the pinch point and a new minimum fresh water consumption are identified.

It is important to clarify that no water loss is considered in the regeneration process, and it is assumed that the regenerated concentrations of each contaminant are limited by the value determined by the mass balance and the lowest value of fresh water.

Step 6: Selection of the streams to be regenerated

Identifying which streams are to be sent to the regeneration process is necessary. For this identification, the pinch point is important because the sources above the pinch point are evaluated. The removal rate of contaminant j is determined for each source, according to Equation 3.

$$RR_{SRs,J} (\%) = \left[\frac{C_{SRs,J} - C_{J,Reg}^{out}}{C_{SRs,J}} \right] \times 100 \quad (3)$$

If $C_{SRs,J} \leq C_{J,Reg}^{out}$, then there is no need for regeneration, and RR will be zero.

For each source above the pinch point, calculate the $RR_{SR_S}^{Total}$ from Equation 4:

$$RR_{SR_S}^{Total}(\%) = \sum_J RR_{S,J}(\%) \quad (4)$$

Sources that have the lowest $RR_{SR_S}^{Total}(\%)$ value will be selected for regeneration. If this source has an available flowrate greater than the amount required for the regeneration system, it is not necessary to use another source; otherwise, the other source with the lowest $RR_{SR_S}^{Total}(\%)$ must be chosen until the regeneration system flow rate is fully supplied.

Step 7: Construction of the final network.

Construction of the final network of the problem considering the regeneration system.

2.2 Regeneration reuse

The regeneration reuse methodology is similar to that of regeneration recycling, differing in the availability of regenerated stream. In the case of regeneration reuse, the regenerated stream is not considered unlimited as in regeneration recycling. In this situation, there will only be a regeneration of the stream coming from an operation when some operation of the system is finished in the WSD, in the case of the problems described as operations, having its value limited to the flow rate value of the operation's outlet (GOMES, 2002). For the case of the problem described by sources/sinks, in principle, any source in the system can be considered to be regenerated because it is considered available at any time in the system.

Steps 1, 2, 4, and 5 are exactly the same as the case for regeneration recycling. In this sense, only the steps in which there is some modification will be addressed.

Step 3: Generation of the WSD considering the regenerated stream

The WSD is performed again, considering the presence of the regenerated stream. However, its use can only be considered at the end of an operation, making its outlet stream available to be regenerated (GOMES, 2022). The regenerated stream is considered an external source of the process, with its use privileged over external water (freshwater).

At each interval, using Equations 5 and 6, the required flow rate(s) of the regenerated stream(s) and the external source(s) at each interval of each operation is calculated. The rules of the WSD for maximum reuse are employed; however, the difference is that there is the presence of a regenerated stream in the system with limited quantity, similar to the WSD for multiple sources (FRANCISCO et al., 2022).

In the sources/sinks case, there are two distinct options to be considered: 1) use the selection rules of the streams to be regenerated according to those presented in Step 6 for the regeneration recycling methodology, or 2) consider any source in the system to be regenerated. The first option seeks to increase the internal reuse of the system streams since it privileges the regeneration of streams above the pinch concentration of the reference contaminant. The second option is the possibility of selecting streams with a concentration below the pinch concerning the reference contaminant. This fact can lead to a reduction of internal reuse when evaluating the reference contaminant increasing the regenerated water consumption; however, when evaluating the regeneration of contaminants other than the reference contaminant, in situations where the use of a stream with a low concentration of the reference contaminant presents a high concentration value for the other contaminants, which would lead to a violation in the network for such contaminants.

The choice of sources to be regenerated in sources/sinks problems will be selected according to the contaminant concentration other than the reference one. In this sense, streams below the reference contaminant pinch concentration can be selected in multi-contaminant problems. For the case of only one contaminant, the rule for the case of regeneration recycling is followed for choosing the streams.

Step 7 of the regenerate recycling case will be Step 6 (final) of the regenerate reuse case.

3. RESULTS

3.1 Case study 1

This case study is based on data presented by Liu (2019) for a Chinese cassava ethanol plant, which produces 106.06 tons of ethanol per day and consumes 1156.17 tons of water per day. The data for the plant under study is shown in Table 1. In addition, there is unlimited availability from an external source at 0 ppm. The process will be presented in steps to be more illustrative.

3.1.1 WSD for maximum reuse

Step 1: Obtaining problem data to build the Opportunities Table.

Table 1 - Data from the plant under study.

OPERATION	DESCRIPTION	FLOW (T/H)	C_{in} COD (PPM)	C_{out} COD (PPM)	ΔM (G/H)
OP.1	Cooling circuit	2,42	5	100	229,9
OP.2	Oficinas de limpeza	1,09	60	1500	1569,6
OP.3	Condensed	2,7	0	20	54
OP.4	Cleaning the facilities	2,58	50	1000	2451
OP.5	Sterilization	0,5	50	400	175

Step 2: Organization the problem for maximum reuse, and Step 3: Identify whether the operation limit data is in the form of fixed load operations or sources/demands

The problem is described in the form of fixed load operations, as seen in Table 1. Furthermore, it is a problem that involves only one contaminant, and it is not necessary to carry out Step 4 as described in the methodology presented in Section 2.1.

Step 5: Constructing the WSD

Step 5.1 (Fixed Load Operations)

The operations are positioned according to their inlet concentration, and the mass transfer in each interval is represented in parentheses under the line of each operation in its respective interval, as shown in Figure 1.

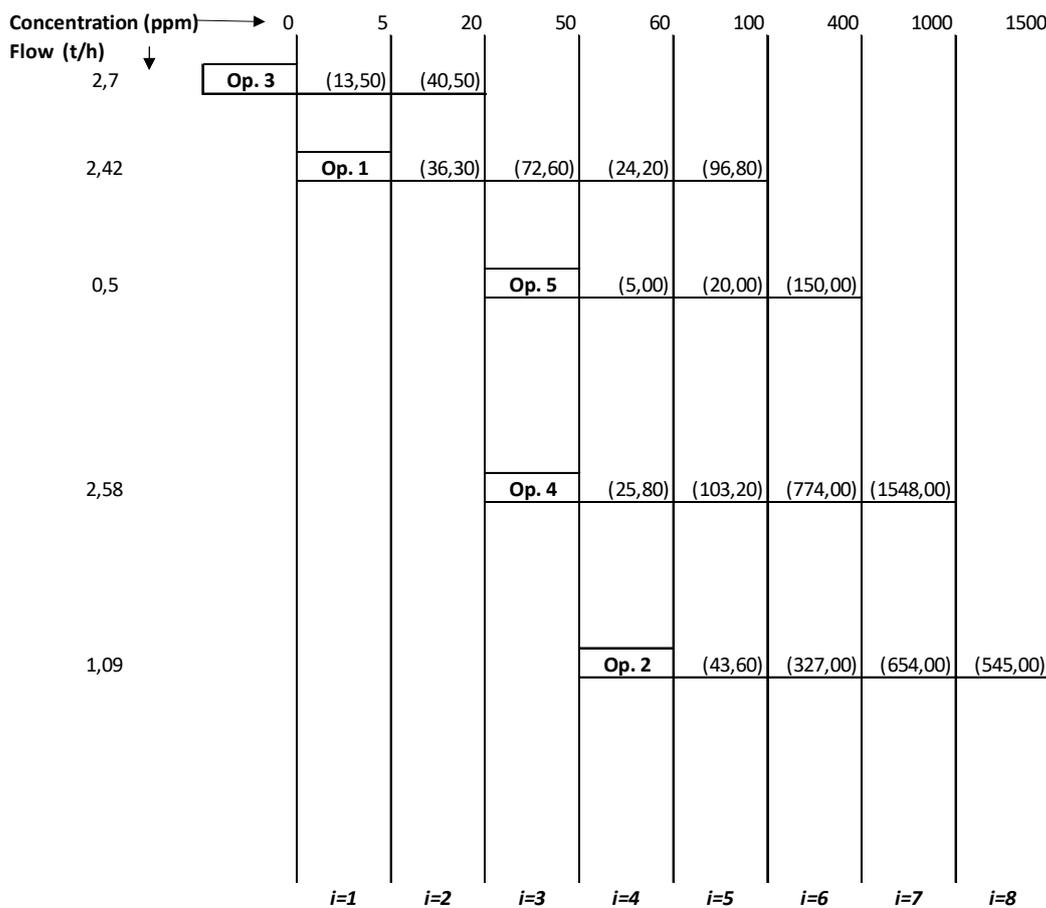


Figure 1 - Representation of the water sources diagram.

Step 6: Performing the WSD

Starting the procedure, only operation 3 is present in the first concentration interval and uses only fresh water at 0 ppm, which is the only available source with an acceptable concentration for this operation.

In the second interval, in addition to operation 3, which has already had its flow rate supplied. Operation 1 is also present, which used 1.815 t/h of fresh water at 0 ppm, the only source available in intervals 1 and 2, despite this operation being able to use water with a concentration of 5 ppm.

In the third interval ($i=3$), there is only operation 1, which still needs water to carry out the mass transfer of the contaminant in this interval. External sources at 0 ppm and 2.7 t/h from operation 3 (20 ppm) are available. By the WSD rule, the priority is to use the internal source, so 0.605 t/h of water from the source of operation 3 is used.

In the fourth interval, operations 1, 4, and 5 are present. Operation 1 is already satisfied concerning mass transfer when using the internal source of the operation

itself from the previous interval ($i=3$). For operation 5, the external source (0 ppm) and the internal source of operation 3 are available. The priority is to use the internal source of operation 3, using a total of 0.125 t/h (Equation 5). For operation 4, the same sources are available, as well as the prioritization of the source of operation 3, using a total of 0.645 t/h.

In the fifth interval, operations 1, 2, 4, and 5 are present. Operations 2, 4, and 5 still need other water sources to have the contaminant mass transfer supplied, unlike operation 1, which has already reached its flow rate limit value. According to Equation 6, these operations use, respectively, 0.17 t/h, 0.1875 t/h, and 0.9675 t/h of water from operation 3. However, the amount of this source is insufficient to remove the contaminant load of operation 2, requiring an external source (0 ppm) in an amount of 0.3 t/h.

In the sixth interval, operations 2, 4, and 5 are present. The sources available in this interval are the external source (0 ppm) and the internal source of operation 1 (100 ppm). The internal source of operation 1 is used in operation 2 with 0.62 t/h, in operation 4 with 0.9675 t/h, and in operation 5 with 0.1875 t/h, to transfer the contaminant load.

In the seventh concentration interval, there are operations 2 and 4. However, these operations have already reached the flow limit values, managing to transfer the mass load of contaminant with the internal flow of each operation. In the last interval ($i=8$), only operation 2 is supplied by the internal source coming from itself.

In Figure 2, it is possible to observe the final diagram obtained for the maximum reuse from the procedure described above, indicating the streams used in each operation.

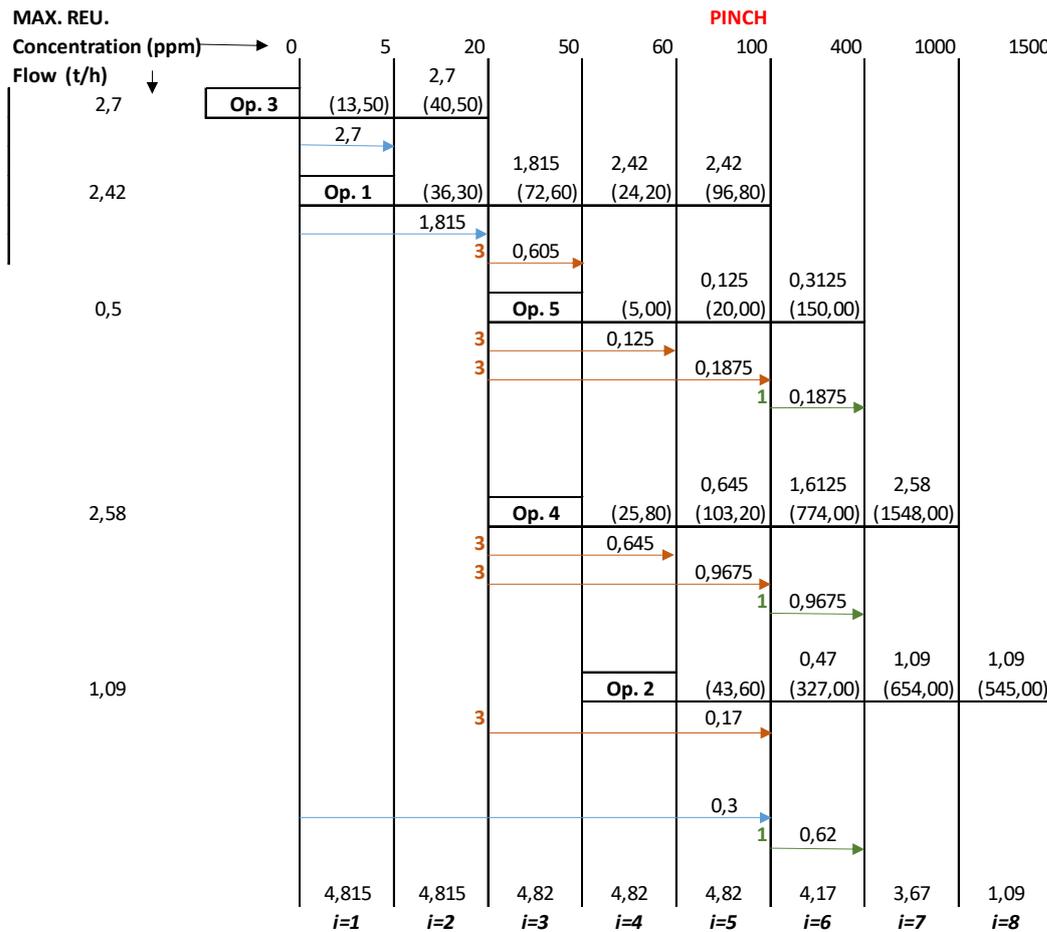


Figure 2 - Execution of the diagram of water sources for maximum reuse.

According to Francisco (2017), the last interval to use water from the external source indicates the pinch point, which in the present case study represents the value of 100 ppm. The consumption of the external source (0 ppm) was 4.815 t/h, which represents a reduction of 48.2% about the sum of the flow rates in each operation in the original data (9.29 t/h).

Step 7: Inspection for violations

Because it is a problem of a single contaminant, there is no violation of concentration at the inlet of the operations. No violations were found in the outlet flow rates of operations either.

Step 8: Construction of the final network.

Figure 3 corresponds to the final network obtained for the WSD represented in Figure 2. In this flowchart, the outlet streams are mixed in a unit represented as EDTI, which is not in the WSD, being one of the options for managing effluents.

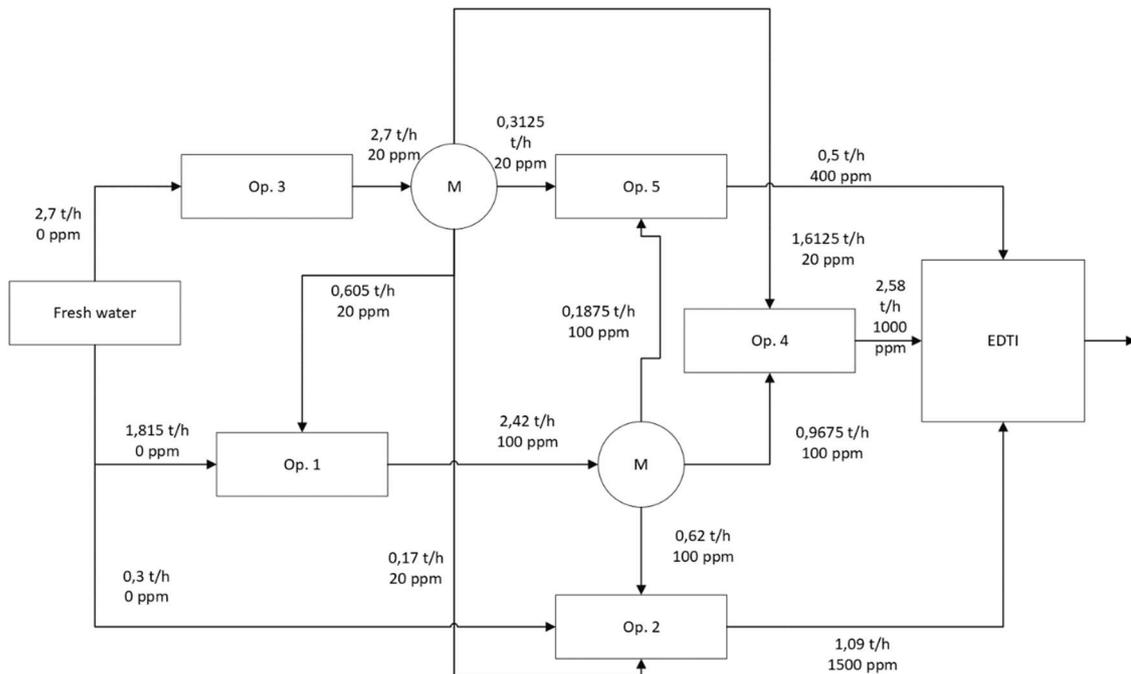


Figure 3 - Representation of the water network for the maximum reuse option.

3.1.2 Application of the WSD for regeneration with recycling

Step 1: Determining regenerator location and Step 2: Selecting Regenerator outlet concentration

Following the methodology described in Section 2.1, based on the diagram obtained for maximum reuse (Figure 2), with a pinch point of 100 ppm, the operations can be separated into group A (operations 2, 4, and 5), in group B (operation 1) and group C (operation 3). Following the methodology adopted by Francisco et al. (2022), the operations in groups A and C are removed from the analysis, as there are operations belonging to group B. As there is only one operation in group B (operation 1), the ideal concentration of the regenerator outlet is equal to the limit concentration of operation 1 (5 ppm).

Step 3: Generation of the WSD considering the regenerated stream

In the first interval, there is only operation 3, which needs water from an external source (0 ppm), using 2.7 t/h from this source to supply the demand for this operation. In the second interval, in addition to operation 3, satisfied by the internal source coming from itself, there is operation 1, which has external sources and regenerated water at 5 ppm as available sources. As water from the regenerated source is prioritized, in operation 2, 2.42 t/h of this source is used.

Only operation 1 is present in the third interval, which already has the contaminant mass transfer satisfied, as it has reached its limit flow rate. In the fourth interval, operations 1, 4, and 5 are present. However, operation 1 has already been satisfied, and operations 4 and 5 have their flow rates supplied by using the internal source from operation 3 at 0.125 t/h and 0.645 t/h, respectively.

In the fifth interval, operations 1, 2, 4, and 5 are present. Operation 1 is already satisfied. For the remaining demands, external (0 ppm), regenerator (5 ppm), and operation 3 (20 ppm) sources are available. In operation 5, 0.1875 t/h of water from operation 3 is used; for operation 4, 0.9675 t/h of water from operation 3 is used. For operation 2, the remainder of the flow rate from operation 3 is used (0.775 t/h); being necessary to use the regenerated source to assimilate the remainder of the contaminant from this interval, then using a total of 0.133 t/h from this source.

In the sixth interval, operations 2, 4, and 5 are present and external sources, regenerator and operation 1 are available as sources. The source of operation 1 is used in each operation in the interval to assimilate the amount of contaminant required. The water flow rate from the internal source of operation 1 is 0.182 t/h, 0.9675 t/h, and 0.1875 t/h in operations 2, 4, and 5, respectively.

In the seventh interval, operations 2 and 4 are already satisfied in terms of flow rates and assimilation of the contaminant mass load by the respective internal sources.

Figure 4 shows the WSD obtained for the regeneration with recycling case according to the calculations described above.

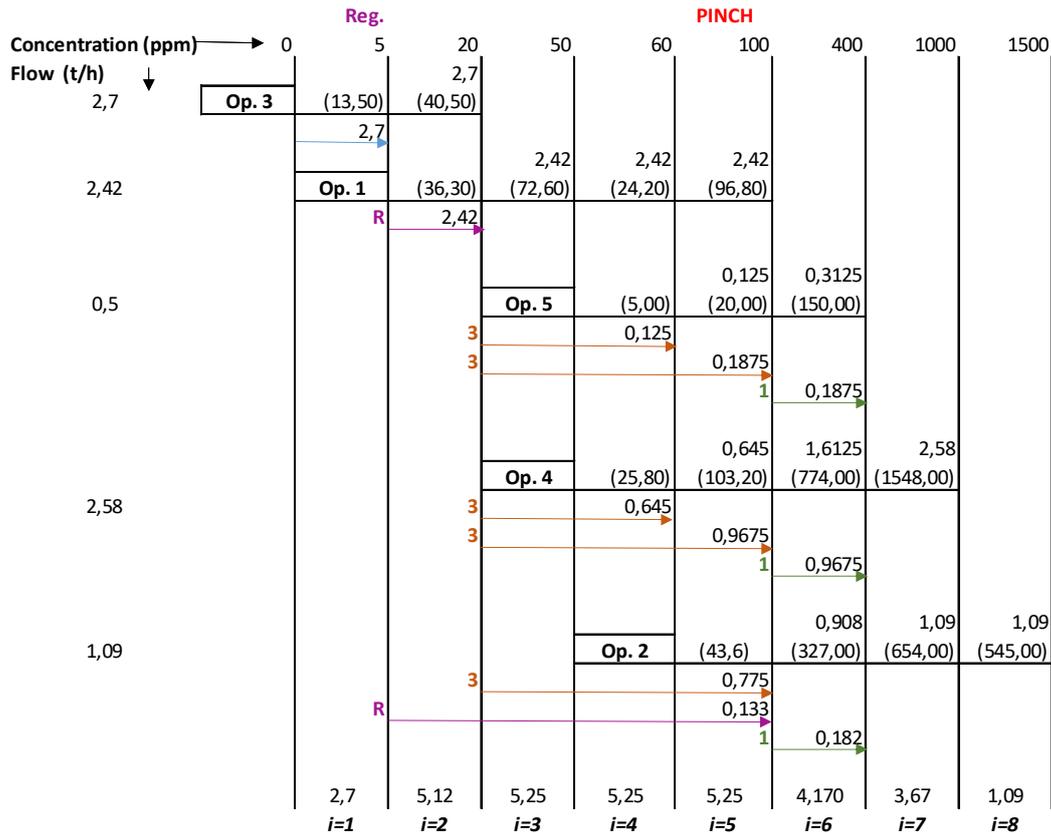


Figure 4 - Representing diagram of water sources with regeneration and recycling case.

The consumption of the external source (freshwater – 0 ppm) was 2.7 t/h, and the amount of regenerated water was 2.553 t/h. Regarding the case of maximum reuse, the reduction in freshwater consumption was 43.92%.

Step 4: Performing the mass balance

As the problem presents only one contaminant, it is unnecessary to perform a mass balance to determine the concentrations.

Step 5: Inspection of operations for violations

Since the problem does not present a concentration violation, the possibility of a flow rate violation was verified, which also did not exist in this case study. All operations had their flow rates fully supplied, but if they were smaller than their limits, there would also be no violation.

Step 6: Selection of streams to be regenerated

The contaminant removal rate is calculated according to Equations 3 and 4, which defines the process streams' regeneration priority. The evaluated streams are those above the pinch point (100 ppm) and are represented by the outlet concentrations of operations 1, 2, 4, and 5. The stream regeneration order is

determined by the increasing order of RR_{TOTAL} . Table 2 presents the contaminant removal rate, indicating the streams that will be regenerated.

Table 2 - COD
removal rate.

contaminant

SOURCES	$C_{SR,C1}$ (PPM)	$RR_{SR,C1}$ (%)	RR_{TOTAL} (%)
OP.1	100	95%	95%
OP.2	1500	100%	100%
OP.4	1000	100%	100%
OP.5	400	99%	99%

Operation 1 is the best option to be regenerated, as it had the lowest value for RR_{TOTAL} . Now it must be analyzed whether the water flow rate of operation 1 is sufficient to meet the regenerated water demand of the system. In this case, it is observed that operation 1 does not have enough flow rate to produce regenerated water to the system ($2.42 \text{ t/h} < 2.553 \text{ t/h}$), being necessary to use another source, which in this case comes from operation 5.

Operation 5 is ideal to complement the regeneration flow rate because it has RR_{TOTAL} smaller than the remaining operations (2 and 4), and its flow is sufficient to complement the flow rate of operation 1 for regeneration.

Step 7: Construction of the final network

Figure 5 corresponds to the final network obtained for the WSD shown in Figure 4. Analogously to Figure 3, it also shows an EDTI to gather all the effluents streams from operations.

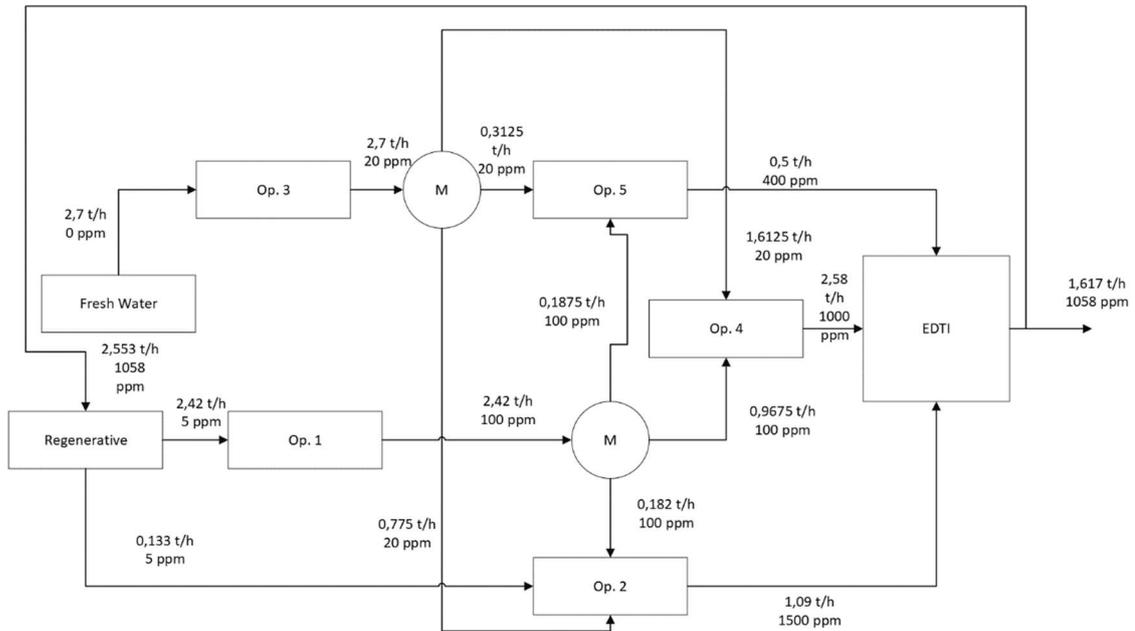


Figure 5 - Representation of the water network for the option of regeneration with recycling.

3.1.3 WSD application for regeneration and reuse

Step 1: Determining regenerator location and Step 2: Selecting regenerator outlet concentration

Steps 1 and 2 are identical to WSD with regeneration with recycling. Following the methodology described in Section 2.2, the ideal concentration of the regenerator outlet is equal to the limit concentration of operation 1 (5 ppm).

Step 3: Generation of the WSD considering the regenerated stream

In the first interval, there is only operation 3, which needs 2.7 t/h of water from the external source (0 ppm), the only source available in this interval. In the second interval, in addition to operation 3, there is operation 1, and the only source available is the external source. Note that although there is an indication of the concentration of the regenerated source in the diagram, it is still not possible to use it, as no operation has been completed. Thus, there is no operation outlet that will provide a stream to be regenerated up to the indicated concentration. Therefore, 1.815 t/h of water from the external source is used in operation 3. In this interval, operation 3 is completed, making its stream available to be regenerated up to a limit of 2.7 t/h.

In the third interval, only operation 1 is present, and the external and regenerated sources. Operation 1 receives 0.403 t/h from the regenerated source to satisfy the contaminant mass transfer. In the fourth interval, operations 1, 4, and 5 are present. However, operation 1 has already been satisfied, and operations 4 and

5 have their flow rates supplied by using the regenerated water source at 0.091 t/h and 0.469 t/h, respectively.

In the fifth interval, operations 1, 2, 4, and 5 are present. Operation 1 is already satisfied and is completed in this interval; thus, the effluent from this operation can be directed to the regenerator. External (0 ppm) and regenerator (5 ppm) sources are available for the remaining demands. Again, in operations 2, 4, and 5, 0.459 t/h, 0.172 t/h, and 0.889 t/h of regenerator water are used, respectively.

In the sixth interval, operations 2, 4, and 5 are present, and external, regenerated, and operation 1 sources are available. Note that the effluent from operation 1 can be sent to the regenerator or be used directly in the other operations. To reduce the regeneration costs, the effluent from operation 1 will be directed to internal reuse in the other operations. Thus, the effluent from operation 1 is used in each operation represented in the interval concentration to assimilate the necessary amount of contaminant. The water flow rate from the internal source of operation 1 is 0.631 t/h, 1.222 t/h, and 0.237 t/h in operations 2, 4, and 5, respectively.

In the seventh interval, operations 2 and 4 are already satisfied regarding flow rate and assimilation of the contaminant mass load. Figure 6 shows the WSD obtained for the regeneration and reuse case.

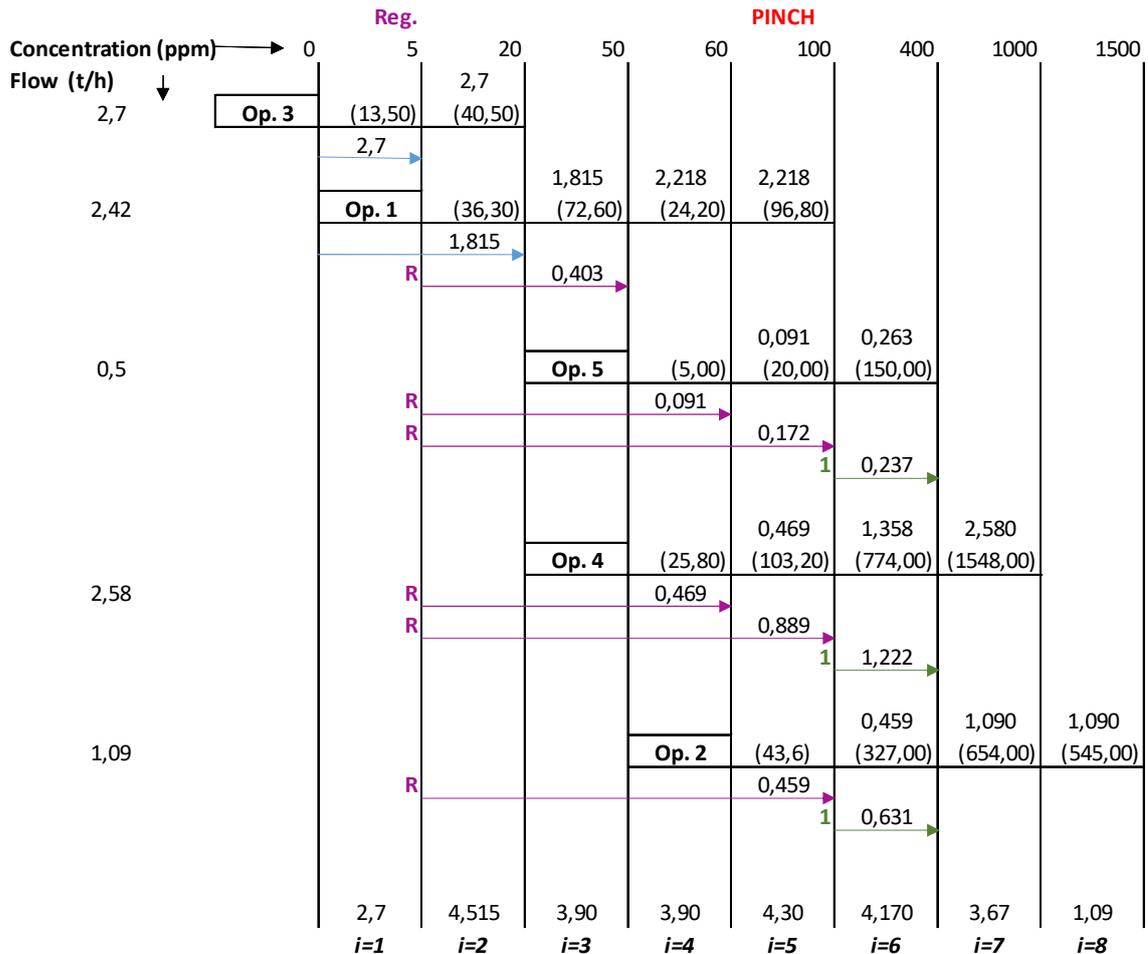


Figure 6 - Representation of the diagram of water sources with regeneration and reuse.

The consumption of the external source (freshwater – 0 ppm) was 4.515 t/h, and the amount of regenerated water was 2.483 t/h.

Step 4: Performing the mass balance

As the problem presents only one contaminant, performing the mass balance for the concentrations is unnecessary.

Step 5: Inspection of operations for violations

Since the problem does not present a concentration violation, the possibility of a flow rate violation was verified, which is also not present in this case study. All operations had their flow rates fully supplied.

Step 6: Construction of the final network

Figure 7 corresponds to the final network obtained for the WSD represented in Figure 6.

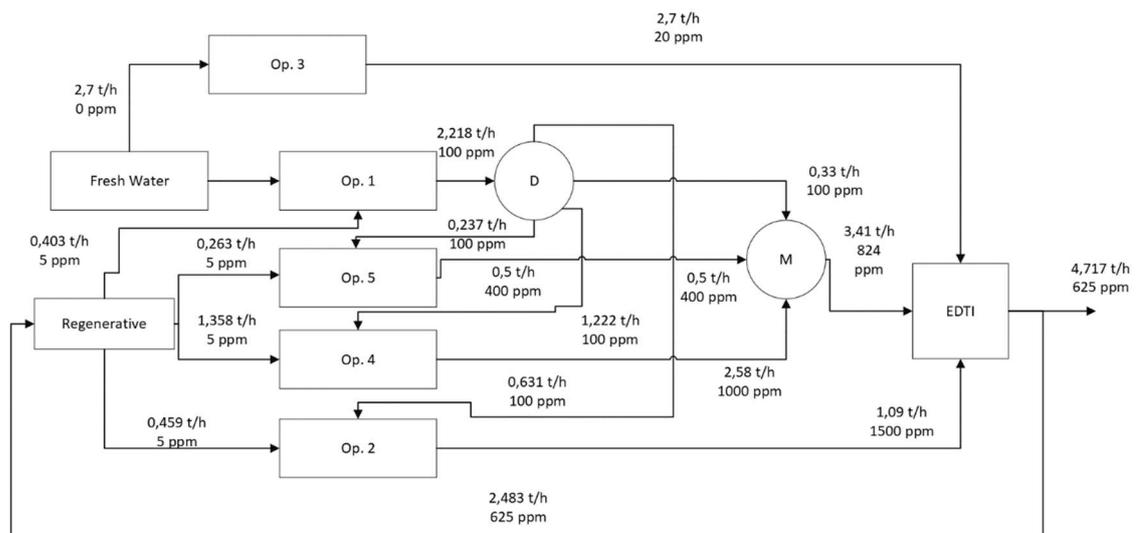


Figure 7 – Flowchart of the process corresponding to the WSD in Figure 6 – Option for regeneration with reuse.

3.1.4 Discussion - Case Study 1

Regarding the maximum reuse option, the reduction in freshwater consumption with regeneration with reuse was 6.2%. The volume of regenerated water concerning the case of regeneration with recycling was 2.7% lower.

Table 3 compares the results obtained through the proposed procedures (WSD) with the result presented in the work of Liu (2019) for the consumption of the external source at 0 ppm.

The result for maximum reuse was very close to that of Liu (2019), and is lower than that of Liu (2019) by 3.12%. Liu (2019) uses a methodology that combines a water footprint analysis with a pinch analysis.

Table 3 - Comparison of the results obtained for the different possibilities.

<i>WATER CONSUMPTION FROM THE EXTERNAL SOURCE (0 ppm)</i>	<i>MAXIMUM REUSE</i>	<i>REGENERATION WITH RECYCLE</i>	<i>REGENERATION WITH REUSE</i>
<i>This work</i>	4.815 t/h	2.7 t/h	2.7 t/h
<i>Liu (2019)</i>	4.97 t/h	-	-

3.2 Case study 2

The present study was conducted at the Al Guneid sugarcane refinery, which is responsible for processing about 230 tons of sugarcane per hour, where more than 95% of the sugar from crushing goes into juice, according to information collected by Balla; Rabah; Abdallah (2018). Besides being used in the sugar and ethanol production process, the water is also used as cooling water for pumps, replacement water to feed the boilers, feed water for the flue gases, and cleaning the plant. At this refinery, the cooling system is a single-pass system requiring a large amount of water, thus discharging much wastewater.

Table 1 presents the data for the system demands (SKi) with their system concentration values and limits, the flow rates, and the parameter $G_{j,k}^W$. Table 2 presents the system sources (SRi) data with their flow rate and concentration values. Two contaminants are considered in the system BOD and COD. The WSD tool was applied for this plant aiming to reduce water consumption in its processes.

Table 1 - Water demand (Sink) data. **Source:** Balla; Rabah; Abdallah (2018).

Sinks	Contaminant	$G_{j,k}^W$	f (t/h)	$C_{j,n}$ (ppm)	$C_{j,n}^{limit}$ (ppm)
SK1	BOD	9,17	55	25	150
	COD	10,31		75	400
SK2	BOD	0,36	2,182	25	150
	COD	0,41		75	400
SK3	BOD	5,78	34,67	25	150
	COD	6,50		75	400
SK4	BOD	26,02	78,06	50	150
	COD	14,64		75	400

Table 2 - Source data (Source) of water. **Source:** Balla; Rabah; Abdallah (2018).

Sources	Contaminant	f(t/h)	C_{in} (ppm)
SR1	BOD	65,24	150
	COD		400
SR2	BOD	5	20
	COD		80
SR3	BOD	2,67	20
	COD		80

The first step is to apply the WSD for maximum reuse, and it is necessary to determine the reference contaminant in multi-contaminant problems. The contaminant selected as the reference one is BOD, adopting the criteria in which the reference contaminant is the one that presents the lowest maximum concentration in more sinks. The reference contaminant is chosen in this form because there is no value measured and/or limit for the concentration of the sinks in the data used in this example. Following the methodology presented and described in detail by Francisco et al. (2018), it is possible to obtain the final diagram of the system represented in Figure 8. To ensure the minimum primary water flow rate, a set of rules is used in each of the demands in each concentration interval, starting at the lowest concentration interval. Following the WSD rules, the streams' internal sources are preferred over external sources (0 ppm) to reduce the consumption of external sources and maximize reuse.

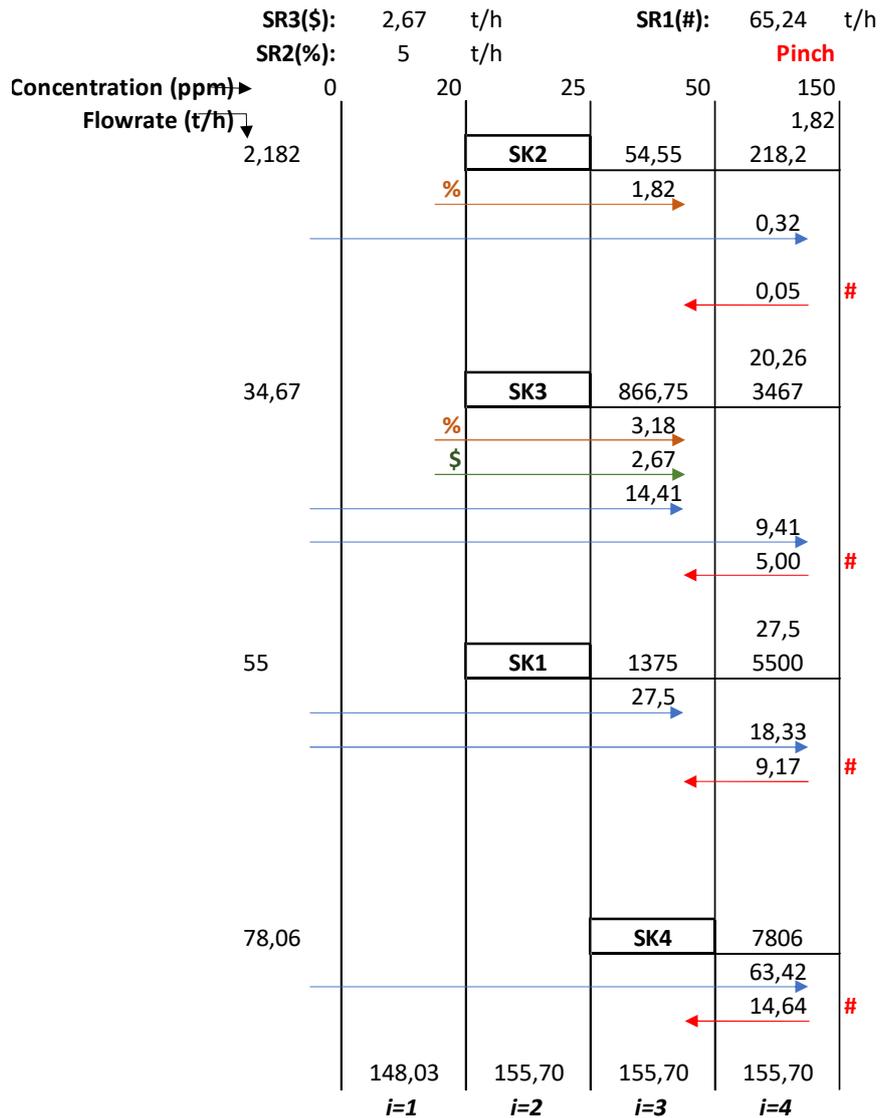


Figure 9- WSD referring to the COD contaminant without concentration violation - maximum reuse case

Using the available sources, the freshwater consumption used by the refinery was reduced from 169.91 t/h to approximately 133.9 t/h, representing a reduction of 21.5 %. Intervals 1 and 2 have no operations. The SR2 and SR3 sources were sufficient for the demands of SK2 and SK3. The pinch point was identified in the last interval that uses primary water, in this case, 150 ppm for BOD. Figure 10 presents the water allocation network for the WSD solution based on Figure 9.

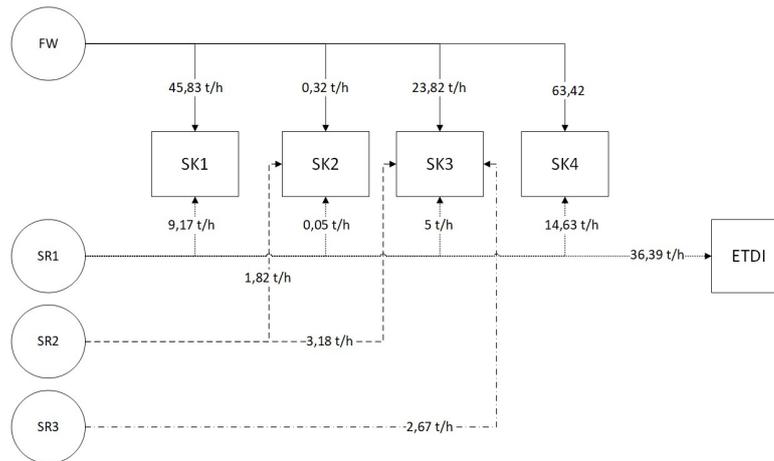


Figure 10 - Water network for maximum reuse case.

3.2.1 Regeneration with recycling case

Following the results obtained for the WSD for maximum reuse, such as the reference contaminant (BOD), the pinch point concentration at 150 ppm and evaluating the operations that will be part of the analysis, it is possible to identify the ideal post-regeneration concentration of the regenerator (Steps 1 and 2).

In this case, demand SK1 is on group B, representing the operation with the highest cumulative flow rate, leading to a post-regeneration concentration of 25 ppm.

In Step 3, the WSD is performed with the inclusion of the regenerated source. In the first and second concentration intervals, there are no demands. It is only from the third concentration interval that the demands SK1, SK2, and SK3 are presented and organized in ascending flow rate order since their input concentrations are the same.

As the post-regeneration concentration is present at this interval, the three demands could use this regenerated water source to transfer their contaminant mass loads. However, as the objective is to reduce fresh water consumption and the regenerated flow rate, it is privileged to use internal sources, SR2 or SR3. The demand SK2 receives water from source SR2 and is complete in this interval. SK3 uses the remaining from source SR2, the total SR3, and regenerated water to remove all the contaminant mass load in this interval. SK1 uses regenerated water at its limit capacity (55 t/h).

In the fourth interval, there are demands for SK1, SK2, SK3, and SK4. Only SK1 achieves its requirements. For SK2 and SK3, it is possible to use a regenerated source; if its limits are not achieved, it is possible to use source SR1. In both sinks,

SK1	16,52	16,52
SK2	20,79	66,74
SK3	24,16	33,44
SK4	0,00	0,00

Step 5: Inspection of operations for violations;

In this case, there are no concentration violations for this case study considering regeneration with recycling.

Step 6: Calculation of the contaminant removal rate;

The SR1 source is the only one that can be regenerated because it has a higher concentration than the regenerator, and its flow rate is enough, as it was considered a restriction for the regenerated water flow rate value. Table 4 shows the contaminant removal rate for case study 2.

Table 4 - Contaminant removal rate – case study 2.

SOURCES	$RR_{SR_S,BOD}$	$RR_{SR_S,COD}$	RR_{TOTAL}
SR1	83%	94%	177%
SR2	0%	0%	0%
SR3	0%	0%	0%

Step 7: Construction of the final network.

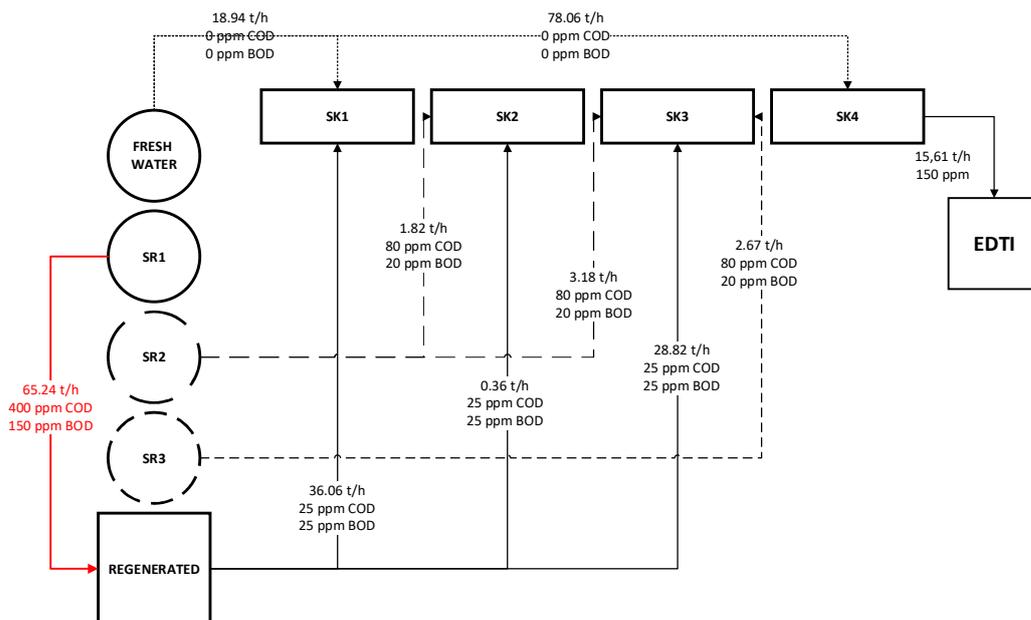


Figure 11 - New water network - regeneration with recycling

3.2.2 Regeneration with reuse

As discussed, for the case of the problem described by sources/sinks, in principle, any source in the system can be considered to be regenerated because it is considered available at any time in the system. If we choose source SR1 as the source to be regenerated, the results described for the regeneration with recycling case will be obtained.

3.2.3 Discussion Case Study 2

For the case considering maximum reuse, the effluent flow rate was minimized from 72.91 t/h to 36.39 t/h, representing a reduction of approximately 50% in the disposal of effluents from the system under analysis. The result in question, when compared with Balla et al. (2018), presents a different structure for allocating sources and consumption of primary water. In the network obtained by the WSD, the SR2 source was used in the SK2 and SK3 sinks, while Balla et al. (2018) employed this source only in the SK3 sink. Source SR3 was used in sink SK1, while the result generated by the WSD this source was used in sink SK3. The difference in allocation is due to the way the demands are arranged in the WSD, where the sinks are ordered in ascending order of inlet concentration up to the highest concentration value in the system and, in case of more than one sink, present the same value for inlet concentration, they must be sorted in ascending order of the flow rate value. It is possible to generate other networks with the WSD by changing the position of the sinks in the diagram; this will allow different sources to be allocated to different sinks. In addition, it is possible to consider restrictions throughout the development of the WSD, as shown. Another restriction example is not allowing streams with values smaller than a given value. Such a situation could lead to the non-use of a given internal source in a given sink.

Regarding water consumption, Balla et al. (2018) presented the same freshwater consumption using a hybrid method involving pinch analysis + mathematical optimization. In terms of waste effluent generated, the WSD and the hybrid method (Balla et al., 2018) obtained a 36.39 t/h concerning the SR1 source. In the system presented by Balla et al. (2018), it was necessary to evaluate the case for each contaminant separately, selecting the most restrictive case. However, using the WSD method, the water network is generated considering only the reference contaminant and performing the concentration adjustment in the demands that presented violation if described as operation. This approach reduces the need to

generate a water network for each contaminant. Furthermore, the water network is obtained directly by reading the diagram; in the method by Balla et al. (2018), it is necessary to initially determine consumption and disposal targets and generate the system's water network with other methods.

It is worth noting that the sources used for reuse are sources from the plant's cooling system: excess condensed water, purged water from the boiler, and purged water from the cooling tower. These streams are interesting for studies on minimizing water consumption in sugar and alcohol-producing plants.

In terms of regeneration, the work of Balla et al. (2018) did not consider it in this solution. For this specific case, the freshwater flow rate was reduced from 133.39 t/h to 97 t/h for both regeneration cases, and the regenerated water used was 65.24 t/h. Normally, the cost of regenerated water is calculated regarding the flow rate for a specific treatment unit. An estimated study is necessary to define the best economical option, but it is beyond the scope of this work. However, analyzing the water reduction regarding the base case, it was achieved a reduction of 42.91% in freshwater consumption, meeting the recommendations of Sustainable Development Goals, in special SDG 6 - "Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all" - which is highly relevant to this study and serves as a guide for the application of technological tools to minimize water consumption and effluents generation.

4. CONCLUSIONS

The present study evaluated the application of the WSD, considering maximum reuse, regeneration with recycling, and regeneration with reuse in industries producing sugar and ethanol from various raw materials, to evaluate possibilities to reduce water consumption in these industrial units. Thus, there is an intention to increase the sustainability of this segment, meeting the UN SDGs. Reducing water consumption in this segment is important, as this sector consumes a lot of water and generates effluents. To demonstrate the effectiveness of the WSD method considering of regeneration, two case studies were carried out with process data available in the literature.

The first case study addressed a cassava ethanol plant in China, describing operations with a fixed contaminant load. The actual consumption of this plant is 9.29 t/h of water from an external source. After applying the DFA method, consumption

was reduced to 4.815 t/h, representing about 52% reduction for the maximum reuse option. With the consideration of regeneration with recycling, considering the recent methodology of Francisco et al. (2022), it was possible to reduce water consumption to 2.7 t/h of water from the external source, a reduction of 70.93% compared to the base case.

In the second case study the WSD procedure for processes described as sources and sinks proved to be practical and flexible, in addition to allowing the engineer to have control of all the steps of calculating the problem, including or not process restrictions. In this sense, the tool is interesting to aid in retrofit or modification of production processes to minimize water consumption. The WSD was applied in a sugarcane refinery and the consumption of freshwater was reduced by about 21.5% compared to the initial consumption, as well as a reduction of approximately 50% in the disposal of effluents. Balla et al. (2018) reported the results using a hybrid method and were identical to those obtained by WSD. Considering the regeneration options, the reduction in freshwater consumption was about 43%.

Although economic calculations were not performed directly in the present study, the proposed WSD algorithm was designed to reduce the operating costs of water networks in retrofit projects of industrial projects. Plus, it is simple and effective.

According to the present work, it is possible to perceive the effectiveness of the WSD method applied to this industrial sector: industrial plants producing sugar and ethanol. The WSD proves to be an easy-to-apply method that brings results similar to the optimization methods commonly used to minimize water consumption from an external source in this sector. In addition, it has the advantage of the simplicity of generating water networks without major changes in the industrial process.

It can also be seen that the regeneration with recycling methodology proposed by Francisco et al. (2022) can further reduce freshwater consumption from the external source using regenerative processes. However, the costs of regenerative processes must be evaluated to assess the cost-effectiveness of implementing such systems against the option of maximum reuse. It is important, because, in certain situations, the necessary treatment to remove contaminants can generate considerable costs relating to the cost of acquiring water from an external source.

The WSD was presented as a tool that allows the process engineer to perform manual calculations without using computer programs. It is a simple and effective

tool that can be easily implemented in an industry when the necessary data is available for its implementation use.

6. REFERENCES

ALMEIDA, J. C. **A Indústria Sucroalcooleira-energética e os Recursos Hídricos: Rio Santo Antônio Grande, Alagoas. Maceió, 2009.** Available in:

<https://ctec.ufal.br/posgraduacao/ppgrhs/sites/default/files/dissertacaojoceline.pdf>

Access in: 10/10/2022.

BALLA, W. H.; RABAH, A. A.; ABDALLAH, B. K. **Pinch Analysis of Sugarcane Refinery Water Integration.** SugarTech, [S. l.], 2018, p. 122–134. DOI:

<https://doi.org/10.1007/s12355-017-0535-5>.

ELIA NETO, A. **Captação e uso de água no processamento da cana-de-açúcar.** In: MACEDO, Isaías de Carvalho (org.). **A Energia da Cana-de-Açúcar: Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade.** São Paulo: Unica, 2005. p. 108-115.

FRANCISCO, Flávio S. *et al.* **Developing Water Source Diagram method for effective utilization of regeneration unit in water networks: Multiplecontaminant problems.** Journal of Water Process Engineering, [S. l.], v. 47, p.102758, 2022.

GOMES, J. F. S. **Procedimento para Minimização de efluentes aquosos.** 2002. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) - EQ/DEQ/UFRJ, Rio de Janeiro, 2002.

GOMES, J. F. S.; MIRRE, R. C.; DELGADO, B. E. P. C.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. **Water Sources Diagram in Multiple Contaminant Processes: Maximum Reuse.** Industrial & Engineering Chemistry Research, [S. l.], v. 52, n. 4, p. 1667–1677, 30 jan. 2013.

INGARAMO, A.; HELUANE, H.; COLOMBO, M.; CESCA, M. **Water and wastewater eco-efficiency indicators for the sugar cane industry.** Journal of Cleaner Production, [S. l.] v. 17, n. 4, p. 487-495, 2009.

LEONE, A. A. M. **Proposição de reuso da água residuária de uma usina sucroalcooleira situada no interior de São Paulo.** 2018. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental) – Universidade de Ribeirão Preto – UNAERP, Ribeirão Preto, 2018. Available in: <https://tede.unaerp.br/bitstream/handle/12345/167/0000077d.pdf?sequence=1&isAlloved=y> Access in: 13 out. 2021.

Liu, H.; Ren, L.; Zhuo, H.; Fu, S. **Water Footprint and Water Pinch Analysis in Ethanol Industrial Production for Water Management.** *Water* 2019, 11, 518.

KUSHWAHA, Jai Prakash. **A review on sugar industry wastewater: sources, treatment technologies, and reuse.** Desalination and Water Treatment, [S. l.], v.53, n. 2, p. 309-318, 2013.

Pacheco, L.C. (2014). **Síntese da rede de água e do sistema de tratamento distribuído de efluentes em refinarias** [Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro]. Available in: http://epqb.eq.ufrj.br/wpcontent/uploads/2021/04/14_06.pdf Access in: 13 out. 2022.

SAHU, Om Prakash; CHAUDHARI, Parmesh Kumar. **The characteristics, effects, and treatment of wastewater in sugarcane industry.** Water Quality, Exposure and Health, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 435-444, 2015.

UNICA. **Histórico de produção e moagem, 2021.** Available in: <https://observatoriodacana.com.br/> Access in:06/10/2022.

**TRABALHOS DERIVADOS DA
DISSERTAÇÃO SUBMETIDOS PARA A
RIO OIL & GAS EXPO AND
CONFERENCE 2022**



Technical Paper

Aplicação do diagrama de fontes de água em usinas produtoras de açúcar e etanol

Application of the water sources diagram in sugar and ethanol-producing plants

Rayssa da Costa Cabral ¹ | Flavio da Silva Francisco ² | Eduardo Mach Queiroz ³

1. ESCOLA DE QUÍMICA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, ENGENHARIA DE PROCESSOS QUÍMICOS E BIOQUÍMICOS, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, rayssacabral@outlook.com 2. ESCOLA DE QUÍMICA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, PROGRAMA DE FORMAÇÃO DE RECURSOS HUMANOS DA ANP - PRH 3.1, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, flaviosfrancisco@gmail.com 3. ESCOLA DE QUÍMICA - UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA, . RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, mach@eq.ufrj.br

Resumo

O Brasil é atualmente o maior produtor de etanol e o segundo maior produtor de biocombustível do mundo (CLICK PETRÓLEO & GÁS, 2021). Água e energia são recursos significativos nos processos industriais do setor canavieiro. A água é utilizada tanto na produção de energia como agente de limpeza no processo produtivo, diluente da poluição ou como parte do produto final, ou seja, água e energia estão interligadas nos processos industriais (BUDAK DUHBACI; ÖZEL; BULKAN, 2021). Reciclagem e reúso de água são estratégias importantes para reduzir o consumo de água em processos industriais e diversas ferramentas vêm sendo desenvolvidas para reduzir o consumo de água nas indústrias. Uma delas é o Diagrama de Fontes de Água (DFA) (FRANCISCO *et al.*, 2018) que busca a otimização da destinação de correntes aquosas estabelecendo uma adequada configuração de reúso das correntes de processo, de modo a maximizar o reúso de modo a minimizar a geração de efluentes e o consumo de água. O objetivo desse estudo consiste em avaliar a eficácia da metodologia DFA no gerenciamento de recursos hídricos em uma refinaria de açúcar e álcool (BALLA; RABAH; ABDALLAH, 2018), buscando minimizar o consumo de água e a geração de efluentes. Na refinaria avaliada foi possível obter uma redução do consumo de água de 169,91 t/h para 133,39 t/h acompanhado de uma redução de efluente de 72,91 t/h para 36,39 t/h, gerando uma rede de água mais integrada e mostrando que o DFA se apresenta como uma ferramenta eficaz para desenvolvimento de estudos de minimização do consumo de água.

Palavras-chave: minimização do consumo de água, water pinch, reúso, refinaria de açúcar e álcool, recursos hídricos

Abstract

Brazil is currently the largest producer of ethanol and the second-largest producer of biofuel in the world (CLICK PETRÓLEO & GÁS, 2021). Water and energy are significant resources in the industrial processes of the sugarcane sector. Water is used both in energy production as a cleaning agent in the production process, pollutant thinner, or as part of the final product, or that is, water and energy are interconnected in industrial processes (BUDAK DUHBACI; ÖZEL; BULKAN, 2021). Recycling and reusing water are essential strategies to reduce water consumption in industrial processes, and several tools have been developed to reduce water consumption in industries. One of them is the Diagram of Water Sources (DFA) (FRANCISCO *et al.*, 2018) which seeks to optimize the destination of aqueous streams by establishing an adequate configuration of reuse of process streams in order to maximize reuse in order to minimize the generation of effluents and the consumption of water. This study aims to evaluate the effectiveness of the DFA methodology in managing water resources in a sugar and alcohol refinery (BALLA; RABAH; ABDALLAH, 2018), seeking to minimize water consumption and effluent generation. At the refinery evaluated, it was possible to obtain a reduction in water consumption of 169.91 t/h to 133.39 t/h accompanied by a reduction in effluent from 72.91 t/h to 36.39 t/h, generating a more integrated water network and showing that the DFA presents itself as an effective tool for the development of studies to minimize water consumption.

Keywords: minimization of water consumption, water pinch, reuse, sugar and alcohol refinery, water resources

Received: November 07, 2021 | **Accepted:** | **Available online:**

Article n°:

Cite as: Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022>



Rio Oil & Gas Expo and Conference 2022

ISSN 2525-7579

Conference Proceedings homepage: <https://biblioteca.ibp.org.br/rioilegas>

Technical Paper

Minimização da captação de água e da geração de efluentes industriais em uma refinaria de petróleo aplicando o diagrama de fontes de água.

Water consumption and wastewater generation minimization in an oil refinery applying water sources diagram

Rayssa da Costa Cabral ¹ | Flavio da Silva Francisco ² | Eduardo Mach Queiroz ³.

1. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, ESCOLA DE QUÍMICA, RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, rayssacabralc@outlook.com 2. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, ESCOLA DE QUÍMICA, RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, flaviosfrancisco@gmail.com 3. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, ESCOLA DE QUÍMICA, EPOB. RIO DE JANEIRO - RJ - BRASIL, mach@eq.ufrj.br

Resumo

Nos dias atuais no Brasil e no mundo, as indústrias têm sido pressionadas perante as questões ambientais, dentre elas, o consumo de energia, a gestão de recursos hídricos e da emissão de gases de efeito estufa, assim, promover a criação e a implantação de estratégias que viabilizem a racionalização do uso da água, contrapondo a tendência de se tratar este recurso natural como abundante é de fundamental importância, de modo a minimizar o consumo de água, através da maximização do reúso dos efluentes industriais. Algumas ferramentas podem ser utilizadas para o reúso de água nas indústrias, uma delas é o Diagrama de Fontes de Água (DFA) que busca a otimização da destinação de correntes aquosas estabelecendo uma adequada configuração de reúso das correntes de processo, sendo um procedimento algorítmico-heurístico de fácil execução que vem apresentando resultados excelentes na geração de Redes de Transferência de Massa em diversos setores industriais. O objetivo desse estudo consiste em avaliar a eficácia da metodologia DFA no gerenciamento de recursos hídricos em uma refinaria de petróleo, buscando minimizar o consumo de água e a geração de efluentes. Dois cenários foram obtidos: 1) DFA com as regras originais, 2) DFA com regras originais e restrição de distância entre as operações; foi possível determinar que a melhor solução é representada pelo cenário 2, obtendo uma redução em torno de 48,8% na captação de água fresca, concluindo que o DFA se mostra uma ferramenta eficaz para desenvolvimento de estudos de minimização do consumo de água em refinarias.

Palavras-chave: Minimização do consumo de água. Refinarias de petróleo. Diagrama de fontes de água

Abstract

Industries have been pressured by environmental issues in Brazil and worldwide, such as energy consumption, water resource management, and greenhouse gas emissions. Thus, it is of utmost importance to promote the creation and implementation of strategies that enable the rationalization of water use, counteracting the tendency to treat this natural resource as abundant, to minimize water consumption by maximizing the reuse of industrial wastewater. Some tools have been used for water reuse in industries, and the Water Sources Diagram (WSD) is one of them. This tool seeks to optimize the destination of aqueous streams by establishing an appropriate configuration for the reuse of process streams, being an algorithmic-heuristic procedure of easy execution that has been presenting excellent results in the generation of Mass Transfer Networks in various industrial sectors. This study aims to evaluate the effectiveness of the WSD methodology in the management of water resources in an oil refinery, seeking to minimize water consumption and effluent generation. Two scenarios were obtained: 1) WSD with the original rules, 2) WSD with original rules and distance restriction between operations; it was possible to determine that the best solution is represented by scenario 2, obtaining a reduction of around 48,8% in freshwater intake, concluding that WSD proves to be an effective tool for developing studies to minimize water consumption in refineries.

Keywords: Minimization water consumption. Oil refinery. water sources diagram

Received: November 03, 2021 | **Accepted:** | **Available online:**

Article n°:

Cite as: Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.48072/2525-7579.rog.2022>.

© Copyright 2022, Brazilian Petroleum and Gas Institute - IBP. This Technical Paper was prepared for presentation at the Rio Oil & Gas Expo and Conference, held in September 2022, in Rio de Janeiro. This Technical Paper was selected for presentation by the Technical Committee of the event according to the information contained in the final paper submitted by the author(s). The organizers are not supposed to translate or correct the submitted papers. The material as it is presented, does not necessarily represent Brazilian Petroleum and Gas Institute' opinion, or that of its Members or Representatives. Authors consent to the publication of this Technical Paper in the Rio Oil & Gas Expo and Conference 2022 Proceedings.