

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA
ENGENHARIA QUÍMICA**

JOÃO ANTÔNIO VIANA NETO

**APLICAÇÃO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA (DFA) PARA REDUÇÃO DO
CONSUMO DE ÁGUA DE PROCESSO EM UMA INDÚSTRIA DE
BENEFICIAMENTO DE ARROZ NA REGIÃO DA CAMPANHA**

**Bagé
2022**

JOÃO ANTÔNIO VIANA NETO

**APLICAÇÃO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA (DFA) PARA REDUÇÃO DO
CONSUMO DE ÁGUA DE PROCESSO EM UMA INDÚSTRIA DE
BENEFICIAMENTO DE ARROZ NA REGIÃO DA CAMPANHA**

Trabalho de Conclusão de Curso II apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Alexandre Denes Arruda,
UNIPAMPA

Coorientador: Reinaldo Coelho Mirre, SENAI-BA

**Bagé
2022**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

N469a Neto, João Antônio Viana

Aplicação do Diagrama de Fontes de Água (DFA) para redução
do consumo de água de processo em uma indústria de
beneficiamento de arroz na região da campanha / João Antônio
Viana Neto.

54 p.

Trabalho de Conclusão de Curso(Graduação)-- Universidade
Federal do Pampa, ENGENHARIA QUÍMICA, 2022.

"Orientação: Alexandre Denes Arruda".

1. Diagrama de Fontes de Água. 2. Integração de processos.
3. water-pinch. 4. MINEA. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal do Pampa

JOÃO ANTÔNIO VIANA NETO

APLICAÇÃO DO DIAGRAMA DE FONTES DE ÁGUA (DFA) PARA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA DE PROCESSO EM UMA INDÚSTRIA DE BENEFICIAMENTO DE ARROZ NA REGIÃO DA CAMPANHA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Química.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em 25 de março de 2022.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Denes Arruda
Orientador
UNIPAMPA

Prof. DSc. Reinaldo Coelho Mirre
Co-orientador

SENAI CIMATEC

Profa. Dra. Maria Alejandra Liendo

UNIPAMPA

Profa. Dra. Tânia Regina de Souza

UNIPAMPA



Assinado eletronicamente por **ALEXANDRE DENES ARRUDA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2022, às 14:09, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **MARIA ALEJANDRA LIENDO, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 26/03/2022, às 15:55, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Reinaldo Coelho Mirre, Usuário Externo**, em 26/03/2022, às 16:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **TANIA REGINA DE SOUZA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 28/03/2022, às 11:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0761373** e o código CRC **86593CBB**.

Referência: Processo nº 23100.004128/2022-33 SEI nº 0761373

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a todos professores e colegas que auxiliaram tanto na minha formação acadêmica como pessoal, pois sem vocês jamais conseguiria trilhar esse caminho e chegar até aqui. Agradeço, também, a UNIPAMPA, por ter me acolhido durante estes anos de graduação. Ao corpo docente da Engenharia Química, por todos os ensinamentos e por serem tão receptivos, não sendo apenas professores, mas sim conselheiros, colegas e amigos. Um agradecimento especial ao prof. Alexandre Arruda, por ser além de um excelente professor, que não mede esforços para ajudar os alunos, ser também um amigo na qual lembrarei durante toda minha carreira. Ao prof Reinaldo Mirre, por toda ajuda e empenho e que foi fundamental para chegar até aqui. Por fim, fica um agradecimento aos meus amigos, e família, em particular a minha mãe Vera que tanto lutou para me dar educação e que sempre sonhou em me ver formado.

RESUMO

A cada ano que passa a escassez dos recursos naturais fica ainda mais em evidência. Dentro destes recursos, a água é um dos principais afetados. Visto isso diversos estudos estão sendo realizados buscando a sua utilização racional e sustentável. Um dos setores que mais impacta na utilização desse recurso é o fabril, estima-se que aliado ao setor energético, consomem cerca de 19% de toda água doce do Brasil. A integração de processos (IP), seja por programação matemática ou algoritmo-heurístico, pode servir como importante ferramenta para atingir esse objetivo. O Diagrama de Fontes de Água (DFA) é uma metodologia algorítmico-heurístico baseada no *water-pinch* que analisa o atual circuito hídrico buscando encontrar cenários de reuso com ou sem processo regenerativo. O DFA já teve utilização em diversos segmentos industriais como refinarias, papel e celulose e cervejarias. Porém, na indústria de beneficiamento de grãos, a metodologia ainda está em fase de implementação, mas logo deve ficar em expansão pois é uma área que necessita de um alto volume de água. O software MINEA 2.0, é uma ferramenta em linguagem .NET, que permite uma resposta rápida e eficaz conseguindo gerar vários cenários de reuso. No trabalho em questão, para verificar a aplicabilidade e a eficácia o parâmetro de estudo foi a condutividade elétrica tendo o pH como componente participativo. Como resultado foi gerado o percentual de redução de água em dois cenários, modificando os valores de condutividade elétrica da fonte externa de água (FEA) buscando ter um comparativo sobre as vantagens da utilização de uma FEA mais limpa. Como uma das operações era a turbina, que necessita de volume alto de água para transformar trabalho hidráulico em mecânico o percentual de redução foi baseado nas operações dos parboilizadores e da caldeira. No primeiro cenário a redução foi de 57,23% e no segundo de 54,79%. Salienta-se que apesar dos resultados terem bons números um estudo com uma maior quantidade de contaminante deve ser necessário para verificar a possibilidade de implementação de reuso no processo estudado.

Palavras chaves: MINEA. Diagrama de Fontes de Água. Water-pinch. Integração de Processos.

ABSTRACT

With each passing year, the scarcity of natural resources becomes even more evident. Among these resources, water is one of the main affected. Given this, several studies are being carried out seeking its rational and sustainable use. One of the sectors that most impacts the use of this resource is the manufacturing sector, it is estimated that together with the energy sector, they consume about 19% of all fresh water in Brazil. Process integration (IP), either by mathematical programming or algorithm-heuristic, can serve as an important tool to achieve this goal. The Water Source Diagram (WSD) is an algorithmic-heuristic methodology based on the water-pinch circuit that analyzes the current to find reuse scenarios with or without regenerative process. The WSD has already been used in several industrial segments such as refineries, pulp and paper and breweries. However, in the grain processing industry, the methodology is still in the implementation phase, but it should soon be expanding because it is an area that needs a high volume of water. The MINEA 2.0 software is a tool in .NET language, which allows a quick and effective response, managing to generate several reuse scenarios. In the work in question, to verify the applicability and effectiveness, the study parameter was the electrical conductivity with pH as a participatory component. As a result, the percentage of water reduction was generated in two scenarios, modifying the electrical conductivity values of the external water source (FEA) seeking to have a comparison on the advantages of using a cleaner FEA. As one of the operations was the turbine, which requires a high volume of water to transform hydraulic work into mechanical work, the percentage of reduction was based on the operations of the parboilers and the boiler. In the first scenario, the reduction was 57.23% and in the second, 54.79%. It emphasizes that despite the results having good numbers, a study with a greater amount of contaminant should be necessary to verify the possibility of implementing reuse in the studied process.

Keywords: MINEA. Water Source Diagram. Water pinch. Process Integration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Indicadores brasileiros para as ODS.....	19
Figura 2 – Produção dos indicadores globais por porcentagem de objetivo.....	19
Figura 3 – Etapas do beneficiamento do arroz.....	23
Figura 4 – Contaminantes por transferência de massa.....	25
Figura 5 – Perfil de água limitante.....	26
Figura 6 – Contaminante por transferência de massa das operações.....	28
Figura 7 – Obtenção de curva limitante.....	29
Figura 8 – Ponto Pinch Mássico.....	30
Figura 9 – Exemplo do Diagrama de Fontes de Água.....	31
Figura 10- Primeiros passos no MINEA.....	33
Figura 11 – Local de coleta de efluentes.....	36
Figura 12 – Mapeamento do circuito atual de água.....	38
Figura 13 - Demonstrativo prévio do DFA.....	40
Figura 14- Representação DFA.....	42
Figura 15- Representação final DFA.....	43
Figura 16 - Tabela de Oportunidades contaminante A.....	44
Figura 17- DFA para condutividade.....	45
Figura 18- Fluxograma resultante do DFA condutividade.....	46
Figura 19 - DFA para condutividade cenário 2.....	47
Figura 20- Fluxograma final para cenário II.....	47
Figura 21- Percentual de redução por cenário.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Uso de água por segmento.....	18
Tabela 2 – Subitens da ODS.....	21
Tabela 3 – Tabela de oportunidades para exemplo de um contaminante.....	27
Tabela 4 – Comparativo de metodologias.....	34
Tabela 5 – Exemplo de montagem de tabela de oportunidades.....	39
Tabela 6 – Valores de pH para operação 1.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CNI – Conferência Nacional das Indústrias

DFA – Diagrama de Fontes de Água

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU- Organização das Nações Unidas

PNRH - Política Nacional de Recursos Hídricos

TCC – Trabalho de Conclusão de Curso

WSD – *Water Sources Diagram*

FEA- Fonte externa de água

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
2 OBJETIVOS.....	16
2.1 Objetivo Geral.....	16
2.2 Objetivos Específicos.....	16
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
3.1 Água na indústria.....	17
3.2 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.....	18
3.2.1 ODS para preservação do meio ambiente nas indústrias.....	20
3.3 Reuso de água.....	21
3.4 Processo de beneficiamento na indústria de arroz.....	22
3.5 Tecnologia Pinch.....	24
3.5.1 Tecnologia Pinch Mássico.....	25
3.5.2 Diagrama de Fontes de Água.....	30
3.5.3 Origem Diagrama de Fontes de Água.....	31
3.5.4 O Software MINEA 2.0.....	32
3.6 Comparativo entre os métodos.....	33
3.7 Contaminantes no beneficiamento de arroz.....	34
3.8 Ações sustentáveis na indústria.....	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1 Mapeamentos do circuito de água.....	36
4.1.1 Indústria de beneficiamento de grãos.....	36
4.2 Diagrama de Fontes de Água.....	37
4.2.1 Escolha dos componentes/parâmetros representativos.....	37
4.2.2 Carga mássica de contaminantes e tabela de oportunidades.....	38
4.2.3 Elaboração do DFA.....	39
4.2.4 Fluxograma resultante do DFA.....	42
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
5.1 Restrições de reuso.....	44
5.2 DFA para parâmetro condutividade elétrica.....	44
5.3 DFA para parâmetro condutividade elétrica segundo cenário.....	46
5.4 Comparativo dos cenários.....	48
5.4.1 Sobre o parâmetro pH.....	48
5.4.2 Sobre o percentual de redução	48

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

A água, além, de um elemento fundamental para a manutenção da vida, possui diversas aplicações desde a utilização diária nas residências até mesmo para processos industriais. Devido a tal importância e sabendo que o Brasil possui uma parcela considerável da água doce disponível no mundo, cerca de 12%, foi criada a lei N° 9.433 de 8 de janeiro de 1997 que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), que por sua vez, deu origem ao Sistema Nacional de Recursos Hídricos que tinha como objetivo majoritário buscar uma gestão descentralizada, democrática e sustentável das águas.

O planeta terra é cerca de 70% recoberto por água. Porém, a água utilizável, ou seja, doce, é uma pequena fatia, em torno de 2%, ocasionando que se busque alternativas viáveis para o uso mais sustentável e eficiente da porcentagem deste recurso natural. (MAYS, 1996). Os processos como a dessalinização da água do mar, embora já estejam sendo utilizados em alguns lugares, ainda não possuem uma viabilidade técnica e econômica para ser realizado em larga escala.

A escassez de água é um problema que afeta muitos países e consequentemente um número elevado de pessoas. Atualmente, algumas regiões são mais afetadas por estes fenômenos que outras, como por exemplo, o sul da África e o norte da Índia, porém, mesmo que de modo sazonal, pode ser vista em praticamente todos os continentes do mundo, até mesmo no Brasil. (TRAN, KONCAGUL, CONNOR, 2016).

Dentro dos locais onde mais se utiliza água, destaca-se o segmento industrial. Este segmento compõe diversas áreas como as indústrias de base, as refinarias de petróleo, as cervejarias, as de tintas, têxteis e de papel e celulose (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006). Para exemplificar o grande consumo hídrico causado por esta área, estima-se que, juntamente com o setor energético, aproximadamente 19% de toda água doce disponível do Brasil, seja utilizada com esta finalidade, principalmente, em processos de lavagem e refrigeração. (TRAN, KONCAGUL, CONNOR, 2016).

Diante deste cenário, algumas metodologias começaram a ser pensadas para buscar a minimização de consumo hídrico. Wang e Smith (1984) propuseram uma metodologia para minimização de águas residuais através do ponto Pinch Mássico, que tem o embasamento no Pinch de Energia, que leva em conta a transferência de

contaminante entre as correntes buscando utilizar ao máximo vazões internas, através de reuso ou reuso com regeneração. Com o avanço destas técnicas surgiu o Diagrama de Fontes de Água (DFA), que é uma ferramenta que auxilia na otimização de um circuito de água existente realizando, também, sua síntese de rede e buscando pontos possíveis de reuso. (GOMES *et al*,2007).

Sendo assim, o presente trabalho realizou o mapeamento do circuito de água, levando em conta suas condições operacionais, em uma planta de beneficiamento de grãos, localizado na região da campanha do Rio Grande do Sul, com o intuito de aplicar o Diagrama de Fontes de Água e buscar pontos de reuso minimizando, assim, fontes de água externa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aplicar a Metodologia do Diagrama de Fontes de Água no processo de beneficiamento de uma planta de arroz.

2.2 Objetivos Específicos

- a) Realizar a visita de campo para coleta de dados na indústria de beneficiamento de grãos;
- b) Elaborar o fluxograma do circuito de água existente na planta de beneficiamento de grãos;
- c) Aplicar o Diagrama de Fontes de Água (*Water Sources Diagram- WSD*) para um contaminante com os dados obtidos no item (a),
- d) Comparar cenários gerados em termos de redução de consumo de água;
- e) Elaboração do novo fluxograma de circuito de água baseado no item (c);

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Água na indústria

Um dos principais problemas nos últimos anos é a utilização racional e sustentável da água, pois nas últimas décadas, cada vez mais, os recursos naturais estão ficando limitados. A escassez de água doce está atrelada a diversos fatores, entre eles: o avanço da industrialização, a poluição e o desaparecimento de algumas fontes de água. (NOLETO, *et al.* 2015).

Para buscar um melhor gerenciamento dos recursos hídricos, e sabendo que o Brasil tem cerca de 12% de toda água doce disponível no mundo, foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) em 8 de janeiro de 1997 que estabeleceu como fazer a melhor gestão democrática de águas, e tinha como um dos principais propósitos a participação e descentralização na tomada de decisões. (MADEIRO, 2015).

Para a construção destas leis, sobre o gerenciamento hídrico, foram obtidos os denominados cadernos sensoriais que foram produzidos em alguns setores como: Saneamento, indústrias, turismo entre outros. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2006).

Dentro das indústrias brasileiras, a utilização consciente dos recursos naturais está, cada vez mais, em pauta nas reuniões sobre o futuro do segmento. Esse relato é retratado conforme a pesquisa realizada na Confederação Nacional das Indústrias (CNI) que demonstrou que mais de 85% das empresas, de médio e grande porte, já possuem alguma ação sustentável. (RAFAUL. JUCHEM. CAVALHEIRO, 2010). Sobre a utilização hídrica nas indústrias existe uma disparidade muito grande entre o consumo de água nos diferentes processos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 – Uso de água por segmento industrial

Segmento Industrial	Mínimo	Máximo
Indústria química	0,3 m ³ /t	11 m ³ /t
Cervejarias	5m ³ /m ³	13m ³ /m ³
Açúcar e álcool	15m ³ /t cana	32m ³ /t cana
Celulose e papel	25m ³ /t	216m ³ /t
Petroquímica	150m ³ /t	800m ³ /t
Têxteis	160m ³ /t tecido	680m ³ /t tecido
Refinarias	78 m ³ /t álcool	760m ³ /t álcool
Siderúrgicas	50 m ³ /t aço	200m ³ /t aço

Fonte: Ministério do Meio ambiente (2006)

Como pode ser visto na Tabela 1, os segmentos onde existem processos de lavagem, como nas indústrias têxteis, e os que usam torres de resfriamento, como no caso das refinarias, utilizam uma quantidade considerável de água. Dentro dos processos que necessitam de lavagem, se enquadra a indústria de beneficiamento de grãos, como por exemplo o arroz, que necessita cerca de 2500 litros de água para a produção de 1kg do produto. (ECOLTEC, 2021).

3.2 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

Na 69ª Assembleia Geral da ONU, realizada em Nova York no ano de 2015, ficou em pauta e foi decidido um plano de ação para transformar o mundo, denominado Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Este plano também tinha como objetivo fortalecer a paz mundial. Para conseguir obter com êxito este plano de ação, foram criados os 17 indicadores brasileiros para os ODS, cada um com seus subitens para atingir o objetivo. A Figura 1, apresenta estes objetivos.

Figura 1 - Indicadores brasileiros para as ODS

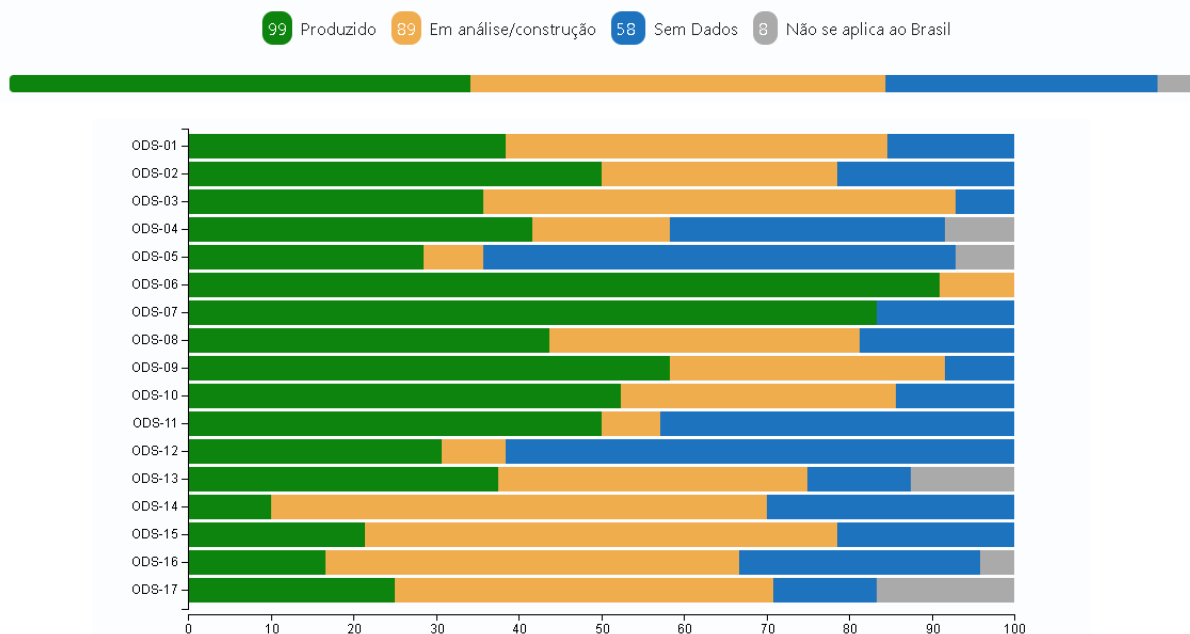


Fonte: ODS Brasil

Como foi demonstrado na Figura 1, estes indicadores compõem diversos objetivos desde a erradicação da pobreza, até estratégias para evitar a mudança climática. Para a área industrial, com ênfase no meio ambiente, os indicadores que são de maior relevância são as OSD 6,9,12,13,14,15, pois elas possuem itens para a redução de emissão de poluentes, melhor utilização de água doce e proteção aos animais terrestres e aquáticos.

Para um maior acompanhamento destes objetivos, a fim de realizá-los até o ano de 2030, o governo disponibiliza a produção de cada um dos indicadores, apresentando seu grau de implementação. A Figura 2 demonstra esta síntese da produção.

Figura 2 - Produção dos indicadores globais por porcentagem de objetivo



Fonte: ODS Brasil

3.2.1 ODS para preservação do meio ambiente nas indústrias

O Fórum Econômico Mundial, em 2017, realizou um estudo e apontou que seriam necessários de 2,5 trilhões de dólares para que os indicadores fossem cumpridos no tempo determinado, 2030. Este valor, embora apoiado pelos países participantes, não será possível sem a iniciativa privada. Então, as indústrias devem cada vez mais investir para os cumprimentos dos 17 indicativos (WAYCARBON,2019). Conforme relatório disponibilizado pela ONU Brasil, de maio de 2021, foi mostrado que apesar de termos avançado em algumas áreas como a de saneamento, manejo florestal e energia, ainda estamos longe de alcançar a meta até 2030. Além disso, conforme o relatório, se seguirmos nesse ritmo, não iremos alcançar a meta e em alguns casos pode haver até retrocesso. (ONU, 2021).

A iniciativa privada, principalmente industrial, pode tentar cumprir várias destas ODS, entre elas a 6,9,12,13,14.A Tabela 2 ilustra alguns indicadores que podem ser incorporadas pelas empresas.

Tabela 2- Subitens das ODS

ODS	Itens
6	<ul style="list-style-type: none"> ● 6.3.1 - Proporção do fluxo de águas residuais doméstica e industrial tratadas de forma segura ● 6.3.2 - Proporção de corpos hídricos com boa qualidade ambiental ● 6.4.1 - Alteração da eficiência no uso da água ao longo do tempo
9	<ul style="list-style-type: none"> ● 9.4.1 – Redução na Emissão de CO2 pelo PIB
12	<ul style="list-style-type: none"> ● 12.2 - Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais ● 12.4 - Até 2020, alcançar o manejo ambientalmente saudável dos produtos químicos e todos os resíduos, ao longo de todo o ciclo de vida destes, de acordo com os marcos internacionais acordados, e reduzir significativamente a liberação destes para o ar, água e solo, para minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e o meio ambiente
13	<ul style="list-style-type: none"> ● 13.2.2 – Reduzir as emissões totais de gases de efeito estufa por ano
14	<ul style="list-style-type: none"> ● 14.2 - Até 2020, gerir de forma sustentável e proteger os ecossistemas marinhos e costeiros para evitar impactos adversos significativos, inclusive por meio do reforço da sua capacidade de resiliência, e tomar medidas para a sua restauração, a fim de assegurar oceanos saudáveis e produtivos

Fonte: Adaptado de ODS Brasil (2021)

3.3 Reuso de água

Há algumas décadas, as indústrias começaram a focar suas pesquisas em metodologias e processos para a reutilização da água. Logo, começaram a surgir as primeiras redes de sistemas de água para a alocação de água e esgoto. A partir disto existem basicamente duas grandes áreas para estas redes de sistema, sendo elas: as de programação matemática e as algorítmicas, também conhecidas como gráficas. (GOMES *et al.*, 2013). Indiferente da classe a ser estudada, no setor industrial não existem soluções únicas para obter essa rede de reuso de água, visto que cada ramo industrial tem suas características como a vazão, quantidade de contaminantes e efluentes gerados além de diferentes fontes de abastecimento. (MIRRE *et al.*, 2012). Então, o objetivo maior da metodologia é localizar os pontos onde estão ocorrendo o descarte inadequado, ou não necessário, de correntes de

efluente que poderiam ser reutilizadas em outras etapas do processo, fornecendo, assim, uma configuração mais eficiente possível. (MIRRE *et al*, 2012).

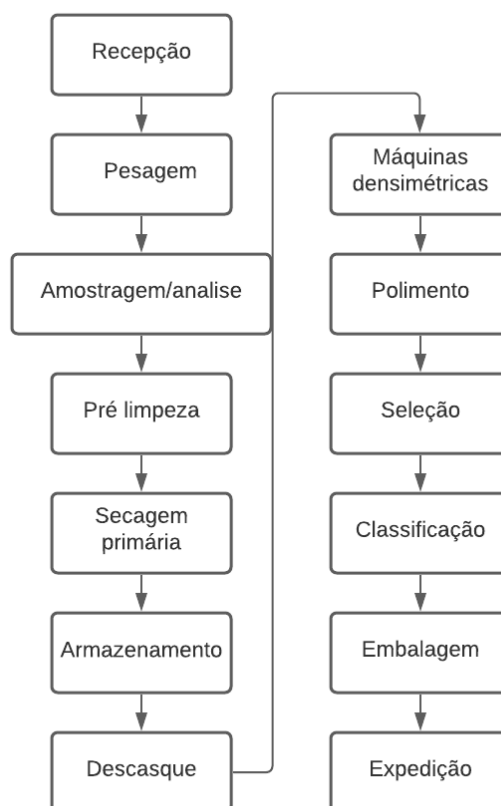
Existem alguns processos para reduzir as águas residuais industriais, porém, duas acabam sendo mais empregadas: o reuso e a reutilização com regeneração. O reuso tradicional é retirar o efluente residual e utilizá-lo diretamente em outra operação, ou apenas mistura-la com outras correntes, desde que os contaminantes presentes não sejam prejudiciais à nova operação na qual ele será empregado. Dentro deste reuso, também são comumente utilizado misturadores para minimização no nível dos contaminantes. A reutilização com regeneração da água residual é aproveitada, porém, ela deverá ser tratada para redução de contaminantes existentes. (WANG, SMITH, 1993). (MIRRE *et al*, 2012).

Destas duas áreas de estudo sobre redes de síntese de água, no segundo ramo, soluções algorítmicas, surge o Diagrama de Fontes de Água (DFA) que tem sua origem baseada na tecnologia Pinch.

3.4 Processo de beneficiamento na indústria de arroz

O processamento para obtenção do arroz compreende uma série de etapas desde a recepção do grão até o processo de embalagem e expedição final. A Figura 3 exibe estas etapas.

Figura 3- Etapas do beneficiamento do arroz



Fonte: Autor (2021)

Para a melhor compreensão possível do processo de beneficiamento do arroz, as etapas serão escritas de maneira mais detalhada a seguir, conforme mostrados por Saidelles *et al*, 2012.

Na etapa inicial, recepção, os veículos de carga trazem o grão *in natura* que será encaminhado para os primeiros processos, nos quais o grão será analisado para verificar se ele está cumprindo os requisitos da empresa e também os da instrução normativa nº 6, de 16 de fevereiro de 2009, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento que trata sobre arroz. Após verificação do peso da carga, é realizada a coleta para a amostragem, para verificar se o grão segue os padrões exigidos.

Nesta etapa de amostragem e análise, devem ser coletados aproximadamente 500 gramas, totalizando no mínimo 10 quilogramas, para cada 500 toneladas de grãos em intervalos de tempos regulares. Estas amostras devem ser homogêneas e quarteadas para permitir a representatividade da coleta

(MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009). No artigo 30, desta mesma normativa, diz que deve ter uma amostra para a fiscalização, uma para permanecer com o fiscalizado, para pedido de perícia e uma última para caso contenha problemas com as anteriores (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009). Dentro das análises, os principais parâmetros são os testes de umidade e pureza.

Após a aprovação dos processos anteriores, a carga é aceita e é feita a pré-limpeza, em peneiras, para retirar sujidades pequenas como por exemplo a poeira é em seguida é realizado, então, a secagem para diminuir o teor de umidade. Porém, deve-se cuidar para que a temperatura muito elevada não seja prejudicial ao grão (SAIDELLES et al, 2012).

A partir dos processos já realizados, começa a parte do beneficiamento, que é onde o grão é modificado em busca do produto final. Neste beneficiamento ocorrem basicamente três etapas majoritárias que são: descasque, polimento e a seleção. No processo de descasque o grão é passado por dois roletes, onde deve-se cuidar para que ele não seja quebrado. E após esta etapa é obtida a casca e os grãos esbramados, ou seja, o grão que contém todas as camadas internas. O arroz que não for descascado irá passar por um reciclo e encaminhado novamente para o descasque. Logo em seguida, os grãos já descascados serão encaminhados para o polimento para retirada, principalmente, do farelo do arroz, produzindo a cor característica branca do grão. (EIFERT, 2009). Por fim, o selecionador irá verificar os grãos que estão dentro das classes para serem encaminhados para a embalagem e a expedição final.

3.5 Tecnologia Pinch

A integração é uma área de estudo que tem como objetivo principal realizar a otimização de processos produtivos. Dentre as tecnologias existentes a de Pinch é um método heurístico para se obter integrações, principalmente energética, de processos buscando minimizar o consumo de utilidades e de energia e consequentemente reduzindo o impacto ambiental causado pelas indústrias. (HUGENTHOBLE, 2020). Um dos propósitos na análise Pinch é o conceito de metas, que são estabelecidas todos os anos nos diversos ramos e setores industriais para minimizar o consumo energético e de geração de efluentes das

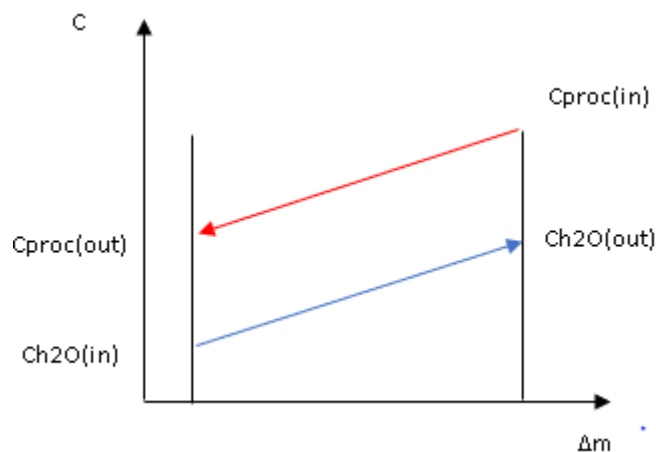
indústrias buscando deixá-las mais competitivas no mercado. Porém, para conseguir atingir essas metas em indústrias, que já passaram por melhorias contínuas, precisam utilizar síntese de rede para cumpri-las, esta síntese de rede serve para encontrar pontos de descartes desnecessários.

Para encontrar a rede de água, uma das principais metodologias é a análise Pinch, por ser um método heurístico e não uma programação matemática gerou uma certa dúvida na efetividade da sua aplicação. Com os avanços no estudo sobre esse método de análise, e as programações matemáticas se tornando cada vez mais complexas, a metodologia se tornou mais relevante pois consegue gerar *insights* que não seriam vistos pelos responsáveis pela melhoria na planta industrial. (CALIXTO *et al*, 2020).

3.5.1 Tecnologia Pinch Mássica

A Integração Mássica tem como propósito a redução na quantidade de água utilizada de fonte externa. Para buscar a melhor visualização do ponto de estrangulamento mássico (PEM), ou seja, o ponto onde acontece a menor transferência de massa possível. A Figura 4 representa um trocador de massa, apresentando em termos de concentração de contaminantes por carga máxima transferida. Na mesma, pode-se observar que a corrente do processo, ou produto, tende a diminuir sua contaminação, enquanto a corrente contrária, de água limpa, recebe essa carga de contaminante (WANG, SMITH, 1994).

Figura 4 – Contaminante por transferência de massa realizada



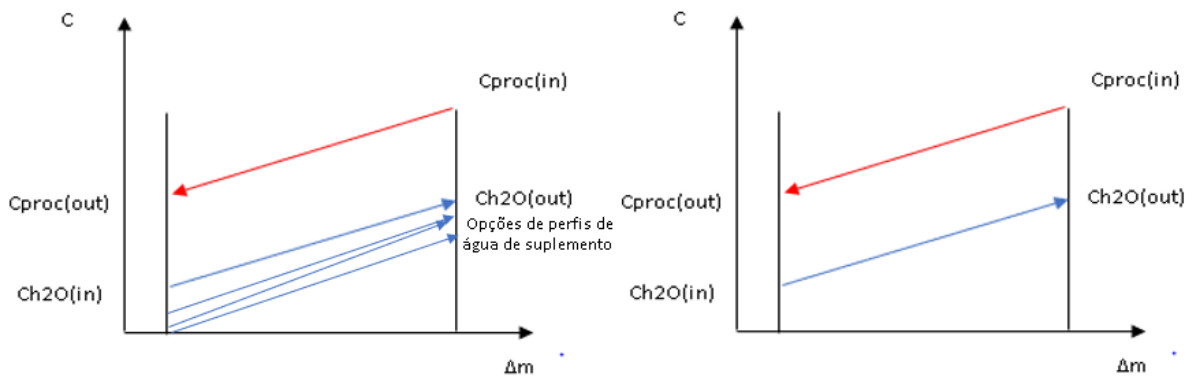
Fonte: Adaptado de Wang, Smith, (1994)

O Pinch Mássico, também denominado *Water-Pinch*, deu início ao conceito de perfil de água limitante. Esse perfil de água limitante é a água de fonte externa, ou seja, limpa que iniciará com uma taxa de contaminante baixa e irá se contaminar ao longo do processo, conforme demonstrado na Figura 4. Porém, esta curva pode apresentar várias inclinações, sendo que a que deve ser escolhida é a de maior concentração de entrada, pois ele conseguirá atender os outros perfis de água existentes (ARGAEZ, KOKOSSIS, SMITH, 2006). A Figura 5 a mostra as linhas de suprimento de água disponíveis na indústria e a Figura 5 b representa a que deve ser escolhida para atender o processo.

Figura 5- Perfil de água limitante

a) Perfis disponíveis de água

b) Linha de suplemente de água escolhida



Fonte: Adaptado de Wang, Smith, (1994)

A concentração do perfil de água limitante necessita de algumas considerações como: força motriz mínima, máxima solubilidade e limitações de corrosão. Para buscar uma maior compreensão do Ponto Pinch Mássico, os autores Wang, Smith (1994), realizaram um estudo de caso. A Tabela 3 apresenta as operações existentes, neste estudo de caso, bem como seus dados de vazão e taxa de contaminantes. No estudo em questão, o ponto Pinch Mássico apontou que 90 t/h já seriam necessários para suprir as operações apresentando uma redução de 19,64%.

Tabela 3- Tabela de oportunidades para exemplo de um contaminante.

Operação	Massa transferida de contaminante (kg/h)	Concentração de entrada (ppm)	Concentração de saída (ppm)	Vazão limite (t/h)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

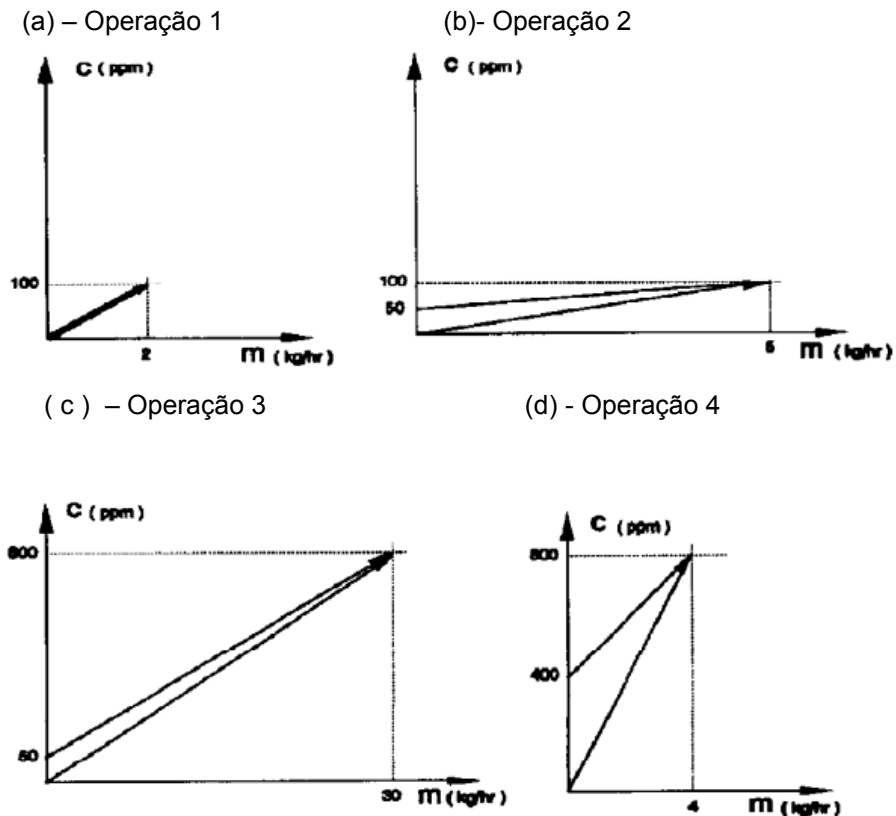
Fonte: WANG, SMITH, 1994

Para a montagem da Tabela 3, denominada Tabela de Oportunidades, é necessário conhecer a quantificação dos contaminantes. As operações são os processos existentes na planta, que possuem sua taxa de transferência de massa estabelecidas. Com estes dados foi possível calcular a vazão limite, que também está disposta nesta mesma tabela, conforme Equação 1. Para obtenção do (PEM), a linearidade entre a taxa de transferência de massa e a concentração de contaminante deve existir. Após esta consideração, é colocado na Figura 6, a concentração de contaminante por massa transferida da operação 1, representada pela Figura 6a, da segunda operação, representada pela Figura 6b, da 3, representada pela Figura 6c e da 4 apresentada na Figura 6d. A Equação 1 representa a taxa de transferência de massa em função da vazão e o gradiente de concentração da operação.

$$\Delta m = fk(C_{fmax} - C_{fmin}) \quad (1)$$

Onde: Δm é o termo de transferência de carga mássica em kg/h, fk é a vazão de cada operação em t/h e os termos de concentração (C_{fmax} , C_{fmin}) em ppm.

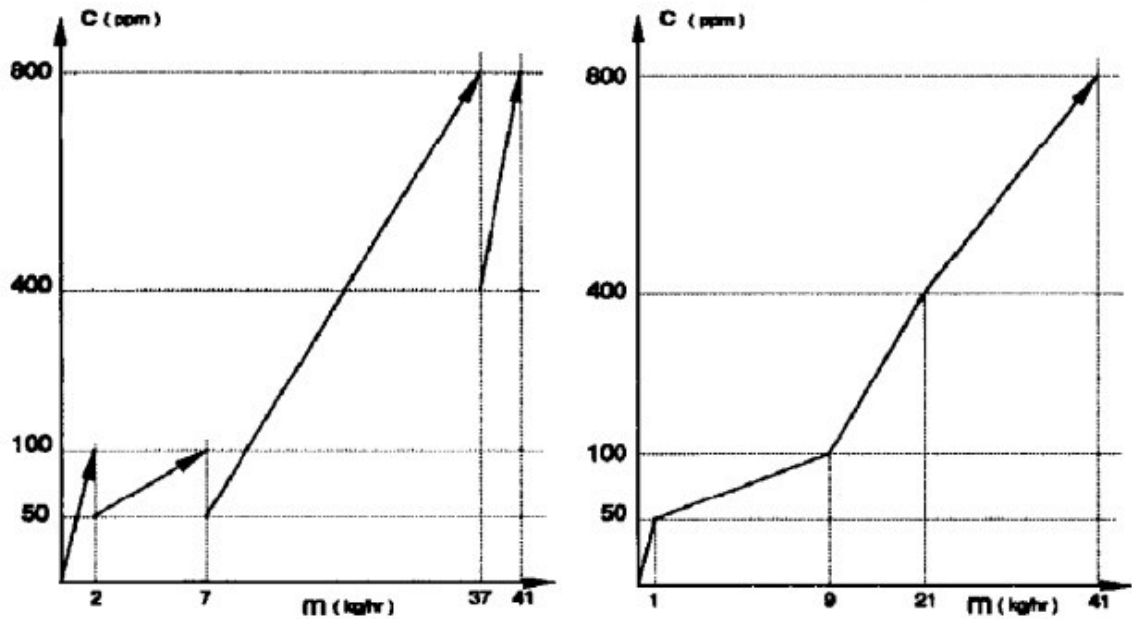
Figura 6 - Contaminante por transferência de massa das operações



Fonte: Wang, Smith, (1994)

A partir das curvas individuais de cada uma das operações, demonstradas na Figura 6, pode-se obter as curvas de águas limitantes em apenas um gráfico. Porém, para entender o comportamento geral da água elabora-se uma curva composta limitante, que representa o processo inteiro como se fosse uma única operação (ARGAEZ, KOKOSSIS, SMITH, 2006). A representação da curva de concentração adota uma série de restrições. (El-Halwagi, Manousiouthakis, 1989). A Figura 7a e 7b representa as operações separadas em apenas um gráfico e sua curva composta limitante, respectivamente, caso contenha mais de um processo existente naquela taxa de contaminante a angulação será a somatório destas.

Figura 7- Obtenção da curva composta limitante



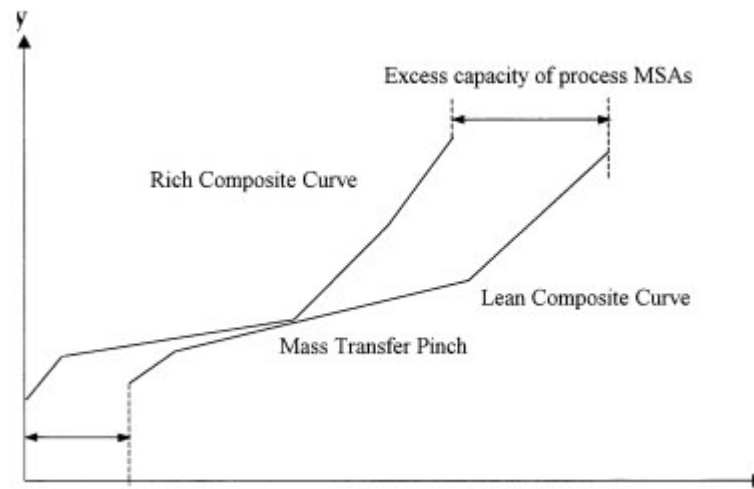
a) Operações separadas

b) Curva composta

Fonte: Wang, Smith, (1994)

A Figura 7, então, apresenta a curva composta das operações. Esta curva necessita ser comparada com a linha de suplemento de água. O ponto de estrangulamento mássico, Ponto Pinch Mássico, é o ponto onde a linha de suplemento de água encosta na curva composta limitante e este ponto representará a mínima vazão necessária para o processo. A Figura 8, representa um exemplo de ponto de estrangulamento mássico.

Figura 8- Ponto pinch mássico



Fonte: Hallale, Fraser (2000)

3.5.2 Diagrama de fontes de água

Como mencionado, existem algumas metodologias para encontrar os pontos ótimos para buscar a minimização de água de abastecimento utilizada. Dentre estas metodologias o Diagrama de Fontes de água (DFA) é uma importante ferramenta pois ela auxilia na procura deste arranjo ótimo das redes de água industrial, através da transferência de massa (LEÃO *et al*, 2019). Então, o Diagrama de Fontes de Água tem como objetivo otimizar e analisar o atual circuito de água gerando cenários de possíveis reusos de água.

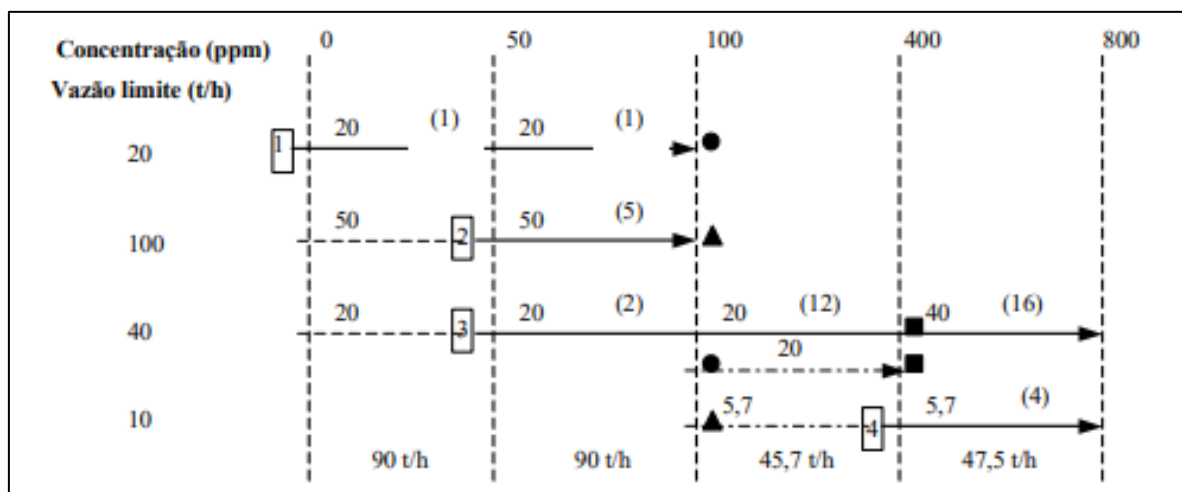
Gomes *et al* (2007), na classe dos métodos algoritmos, elaborou, inicialmente para apenas um contaminante o DFA partindo de alguns dados como vazão e concentração máxima de contaminantes em cada uma das operações participantes da integração. Essa metodologia, também, pode ser utilizada para mais de uma fonte externa de água, e mesmo que não seja a metodologia mais maleável, fornece *insights* rápidos para serem entendidos pelos engenheiros de processos.

Apesar do DFA ter sido bem aceito, a maioria dos processos de transformação química geram contaminantes múltiplos. Por este motivo, teve a adaptação do diagrama para mais de um contaminante partindo de uma operação e contaminante de referência. (GOMES *et al*. 2013). Logo, precisou-se adotar uma hipótese para conseguir desenvolver o diagrama, que seria a linearidade entre os

contaminantes, ou seja, a taxa de transferência de qualquer contaminantes vai ser proporcional ao de referência (WANG, SMITH,1994). Ainda de acordo com o autor, essa minimização gerada pelo diagrama pode-se apenas considerando reuso de água, que é a utilização do efluente em outra operação ou regenerada que sofreria algum tratamento para ser novamente utilizada dentro do processo. (WANG, SMITH,1994).

O diagrama de fontes de água tem como principais parâmetros demonstrativos as operações, quantidade de contaminantes e as vazões das correntes. A Figura 9 representa o DFA de um exemplo de processo com apenas um único contaminante.

Figura 9 – Exemplo do diagrama de fontes de água



Fonte: Mirre (2012)

3.5.3 Origens do Diagrama de Fontes de Água

O Diagrama de Fontes de Água (DFA), teve sua origem baseada na integração mássica de processos, que por sua vez, se originou da integração energética. Os primeiros trabalhos executados com o intuito de minimizar a utilização de água foram de WANG, SMITH (1994) que utilizaram conceitos do Ponto Pinch Mássico e curva composta limitante, ou seja, representar diferentes operações como se fossem apenas uma.

Algum tempo depois, o estudo de YANG *et al*(2000) partiu de rede de água com múltiplos contaminantes, em que foi obtido um percentual de redução de

21,15% de água limpa, mostrando uma boa eficiência da integração mássica de processos e despertando um maior interesse do mercado.(BARRETO, 2019).

Com uma maior estruturação do DFA para um contaminante, alguns autores começaram a pensar em expandir a técnica para múltiplos contaminantes, visto que as empresas não possuíam apenas um contaminante significativo, mas sim, um conjunto deles. Silva *et al.* (2001) e Gomes (2002) estenderam e aplicaram o Diagrama de Fontes de Água para múltiplos contaminantes em operações que envolviam além de reuso, técnicas de regeneração. Com isso, o DFA conseguiu ter uma maior visibilidade sendo aplicado em diversos segmentos industriais.

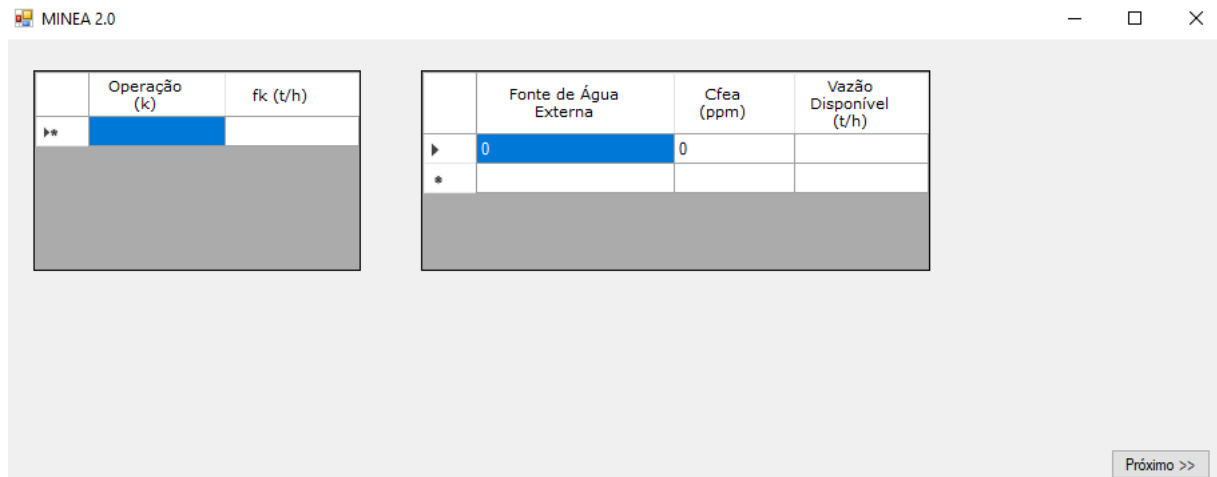
3.5.4 O Software MINEA 2.0

Segundo GOMES, (2007) são vários os passos para a elaboração do Diagrama de Fontes de Água (DFA). Devido a isto, Santos (2007) identificou a necessidade de gerar cenários de DFA de modo otimizado. Com isso elaborou o *Software* de Minimização de Efluentes Aquosos (MINEA) que utilizava como plataforma de trabalho o Microsoft Office Excel. (SANTOS,2007).

Apesar da versão, em Excel, do MINEA ter tido resultados satisfatórios, ainda apresentava possibilidades de otimização. As planilhas eletrônicas acabam se tornando complexas quando se utiliza cálculos maiores com uma quantidade grande de informações. Logo foi gerado o MINEA 2.0, que invés de ser em planilha eletrônica passou a ser uma ferramenta .NET, partindo de uma linguagem de programação C#. Vale salientar que o Software ainda não é capaz de gerar a Rede de Transferência de Massa, embora represente os valores de forma escrita. (NAICE, 2015).

A versão 2.0 do MINEA se tornou bem intuitiva e de fácil execução. É necessário o preenchimento de algumas etapas para a elaboração do DFA. Estas etapas são: o número de operações com suas respectivas vazões, dados de contaminante de fonte externa de água, restrições de reuso e a Tabela de Oportunidades. A Figura 10 representa os primeiros passos para utilização da ferramenta.

Figura 10- Primeiros passos no MINEA



Fonte: Autor (2022)

3.6 Comparativo entre métodos

Sobre os diferentes métodos para se obter o melhor arranjo possível do processo, o diagrama de fontes de água consegue gerar uma boa resposta. Em um exemplo de uma planta petroquímica foi realizada a otimização do consumo hídrico pelos dois modos, sendo eles: o DFA e a integração mássica por simulação matemática. Foram observadas e selecionadas as operações que mais necessitavam de uso de fonte externa de água, como as torres de resfriamento e as lavagens. O resultado gerado entre as duas metodologias foi similar, demonstrando que apesar de menos maleável o DFA, método heurístico, consegue solucionar o problema de maneira satisfatória. A Tabela 5 demonstra as duas metodologias e suas respectivas vazões que contempla o total de água clarificada (AC), água de resfriamento com sólidos (AR) e água filtrada (AF) (LEÃO *et al*, 2019).

Tabela 4 – Comparativo de metodologias

Operação	Dados operacionais (t/h)	Programação matemática (t/h)	Diagrama de fontes de água (t/h)
Fontes externas	1152	1120	1117,5
Fontes internas	0	21	15
Geração de efluentes	105	78	29

Fonte: LEÃO et al (2019)

3.7 Contaminantes no beneficiamento de arroz

A produção de arroz segue um regulamento técnico para obter um padrão de classificação. Para este padrão, a água utilizada deve seguir uma legislação específica quanto a quantidade de contaminantes, sanidade e metais pesados (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO, 2009). Foi realizado um estudo do arroz comercializado, em algumas cidades da região sul do Brasil, sobre a presença de metais pesados em que constou, para o arroz branco e integral um valor médio de 0,080 e 0,0157 mg kg⁻¹ de cromo e valores menores que 0,080 de cádmio (LIMA *et al*, 2015). Apesar desta presença de metais pesados, estes valores não ultrapassam o limite máximo da legislação que é 0,4 para cádmio e 0,1 para cromo em grãos de arroz segundo a ANVISA, 2015. Então parâmetros como sólidos suspenso e metais pesados são alguns dos contaminantes representativos para a produção de arroz.

3.8 Ações sustentáveis na indústria

O Brasil possui uma reserva considerável de água, pois possui uma fatia grande de água doce mundial. As indústrias, na área de alimentos e petroquímica, são alguns exemplos que necessitam de uma quantidade considerável de água. Por este motivo algumas ações estão sendo criadas para minimizar o consumo hídrico.

Segundo o portal A Voz da Indústria, em 2017, existem 4 principais ações para buscar o melhor gerenciamento deste recurso natural. As ações são:

mapeamento de utilização de água, soluções a gás, reuso e tratamento de água. O mapeamento tem como objetivo encontrar pontos de vazamento para que água não seja descartada indevidamente. A segunda ação é a utilização de gelo seco para a higienização de superfícies, pois é um composto que tem uma capacidade de limpeza satisfatória, até mesmo para materiais de difícil extração como o óleo. O tratamento de água busca diminuir o prejuízo ambiental, para que o descarte dos efluentes seja o mínimo possível. Por fim, a estratégia de reuso de água é um dos mais eficientes métodos para a redução do consumo hídrico, visto que localiza pontos onde acontecem descartes irregulares que poderiam ser reaproveitados dentro do próprio processo em que esta água já foi utilizada.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A proposta do trabalho tem como intuito aplicar o Diagrama de Fontes de Água, uma metodologia baseada no Pinch Mássico de processos, buscando a minimização de água de fonte externa em uma planta de beneficiamento de arroz.

4.1 Mapeamentos do circuito de água

Para aplicar a metodologia e buscar a mínima vazão de água necessária para o processo, necessita-se conhecer os processos existentes e elaborar o circuito de água existente. O mapeamento precisa conter, além do fluxograma do processo a quantidade de contaminante de entrada e saída das operações existentes. A Figura 11 apresenta imagem de uma das visitas de campo na empresa.

Figura 11 – Local de coleta de efluentes.



Fonte: Autor (2022)

4.1.1 Indústria de beneficiamento de grãos

A metodologia foi aplicada em uma indústria de beneficiamento de arroz sediada na cidade de Bagé -RS. A escolha pelo estudo deste segmento industrial se deve a alguns fatores como: o alto consumo de água, possibilidade de regeneração e a obtenção da quantificação de contaminantes. A empresa selecionada para a

coleta de dados trabalha com diferentes tipos de arroz, entre eles, o parboilizado, logo tem o processo de pré-cozimento e gelatinização, que migram as vitaminas e minerais da casca para o grão, e que necessitam de uma quantidade grande de água e foi um dos principais alvos da metodologia.

4.2 Diagrama de fontes de água

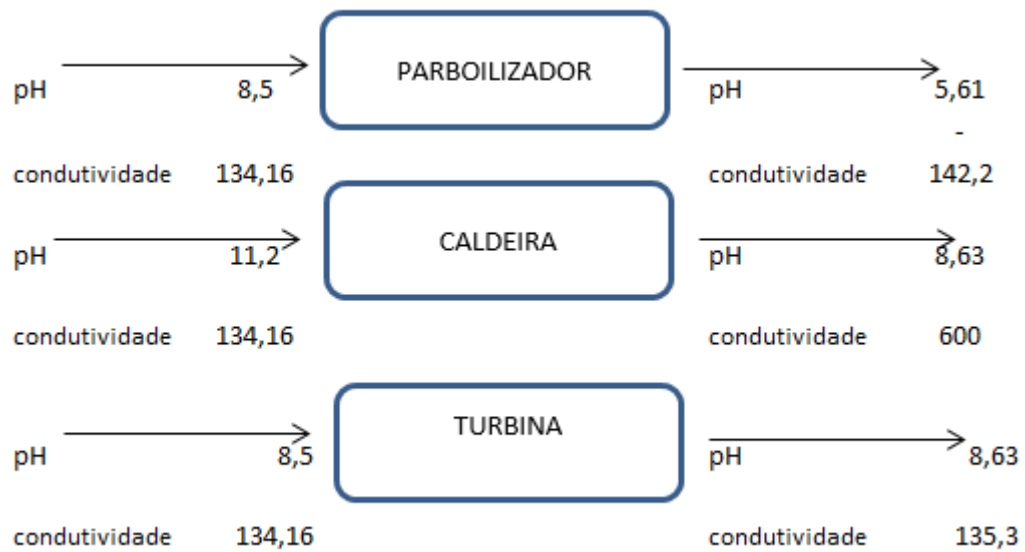
O Diagrama de Fontes de Água (DFA) necessita de algumas etapas para ser executado e no presente trabalho a metodologia de máximo reuso foi aplicada para sua obtenção.

4.2.1 Escolha dos componentes/parâmetros representativos

A primeira etapa para obtenção do Diagrama de Fontes de Água (DFA) é realizada logo após o fim do mapeamento. Após a obtenção do circuito hídrico foram identificadas três operações que necessitam de um alto volume de água que são a turbina, os parboilizadores e a caldeira.

Dentro das operações, alguns parâmetros são representativos para o processo, como por exemplo, a dureza para a caldeira. Porém os componentes que são quantificados pela indústria, ou por laboratório, são o pH e a condutividade elétrica. Logo o componente escolhido para a aplicação da metodologia foi a condutividade elétrica, tendo como parâmetro o pH que foi utilizado para a análises das correntes de água. A Figura 12 apresenta os valores dos componentes mapeados juntos a empresa.

Figura 12 – Mapeamento do circuito atual de água



Fonte: Autor (2022)

Como apresentado na Figura 12, os parâmetros escolhidos foram o pH e a condutividade elétrica. Vale salientar que para manter a linearidade dos contaminantes os valores de pH foram transformados em H^+ , através da equação 2.

$$pH = -\log[H^+] \quad (2)$$

4.2.2. Carga mássica do contaminante e Tabela de Oportunidades

A segunda etapa consiste, com base nos dados coletados, obter a carga máxima de contaminantes transferida em cada uma das operações, conforme Equação 1. Este valor de carga máxima (Δm) irá se tornar fixo para a análise do problema, indicando uma carga de assimilação de contaminantes constante, até a elaboração da Tabela de oportunidades, que é uma síntese dos dados necessários para execução final do DFA. A Tabela 5 apresenta um exemplo de Tabela de Oportunidades para o parâmetro escolhido.

Tabela 5- Exemplo de montagem de tabela de oportunidades

Operação	Massa transferida de contaminante (kg/h)	Concentração de entrada (ppm)	Concentração de saída (ppm)	Vazão limite (t/h)
1	2	0	100	20
2	5	50	100	100
3	30	50	800	40
4	4	400	800	10

Fonte: Wang, Smith (1984)

4.2.3. Elaboração do DFA

As próximas etapas para a metodologia de obtenção do Diagrama de Fontes de Água (DFA) foram descritas por Calixto *et al* (2020). O DFA é construído através de intervalos de concentração crescentes e em cada operação química deve-se ter conhecimento de concentrações máximas de entrada e saída de contaminantes, além da vazão limite calculada a partir da fixação do valor de carga de transferência de contaminante calculada com os dados da planta sem flexibilização, apresentadas nas tabelas de oportunidade. A Equação 3 é necessária para a obtenção desta vazão limite.

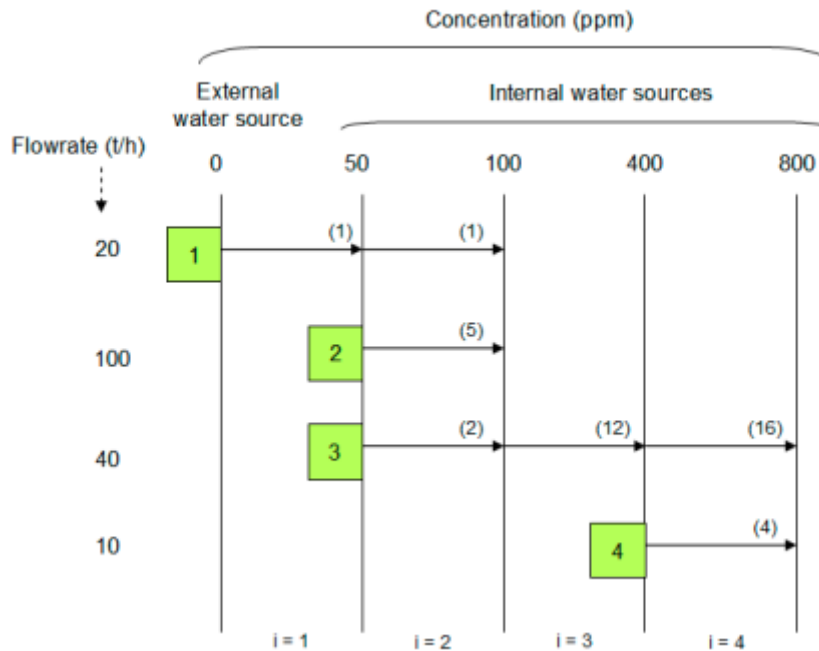
$$\Delta m = f k (C_{saída} - C_{entrada}) \quad (3)$$

Onde, Δm é a carga de transferência de contaminante e os termos “C” são a concentração máxima de saída e entrada do intervalo estabelecido.

Algumas etapas são necessárias para a execução final do DFA. A etapa 1 consiste em colocar os intervalos de concentração no diagrama, que são obtidos pelas concentrações de entrada e saída das operações. Realizado esse primeiro arranjo o passo 2 consiste em indicar, por meio de setas, onde uma operação da início e termina, em relação a quantidade de contaminante. A etapa 3 necessita da utilização da Equação 3 para obter a carga de transferência de massa (Δm) para as duas seções, ou seja, para a operação completa, já apresentada na tabela de oportunidades e para os intervalos estabelecidos. A partir destes cálculos, o diagrama começa a ter uma forma definida, conforme demonstrado na Figura 13, que

parte do princípio da água de fonte externa, que não possui contaminante, e as de fonte internas que são os efluentes das operações.

Figura 13 - Demonstrativo prévio do DFA.



Fonte: Calixto *et al.* (2020)

Na Figura 13, os quadrados, em verde, são as operações estudadas no exemplo. A vazão necessária para cada uma das operações em suas concentrações máximas também está disposta na coluna das abscissas. Os valores entre parênteses são a carga transferida naquele intervalo e serão necessárias para os futuros cálculos de vazão a ser utilizada.

Na etapa 4 é determinado a vazão da fonte de água, também através da equação 3, em que deve seguir algumas regras, que são:

Priorizar o uso da fonte interna de água para a mesma operação, ou seja, não fragmentar o intervalo;

- a) Uso de fonte externa de água só deve ocorrer na ausência de fontes de reuso, que são as fontes internas;
- b) A prioridade das fontes internas é sempre da fonte de maior concentração para a de menor concentração.

O cálculo para as duas seções, operação e intervalo, é obtido por meio das Equações 4 e 5 para vazão externa e interna, respectivamente.

$$f_{epki} = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=1}^{n_{fai}} (f_{jki}^i (C_{saida\ i} - C_{ij}))}{C_{fi} - C_{pe}} \quad (4)$$

Onde, C_{ij} é a concentração da fonte interna no intervalo, c_{pe} é a concentração da fonte externa, $C_{saida,i}$ é a concentração final do intervalo analisado, c_{fi} é a concentração final mais alta do intervalo e n_{fai} é o número de fontes internas disponíveis no intervalo i . Para as fontes internas teremos a seguinte relação demonstrada na Equação 5.

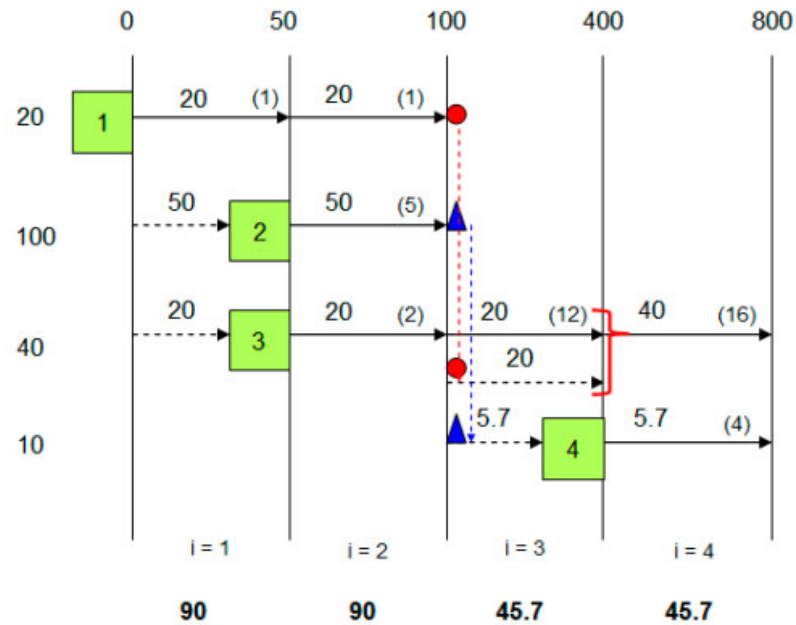
$$f_{ipki} = \frac{\Delta m_{ki} - \sum_{j=p-1}^p (f_{jki}^i (C_{saida\ i} - C_{ij}))}{C_{fi} - C_{pi}} \quad (5)$$

Por fim, para a mínima vazão de água de fonte externa, em cada intervalo pode ser calculado pela Equação 6.

$$f_p^e = \sum_{k=1}^{N_{op}} \sum_{i=1}^{n_i} f_{pki}^e \quad (6)$$

Após os respectivos valores de vazão de fonte externa para cada intervalo seja obtido o DFA começa a ter sua representação final. A Figura 14 ilustra esse diagrama.

Figura 14- Representação DFA

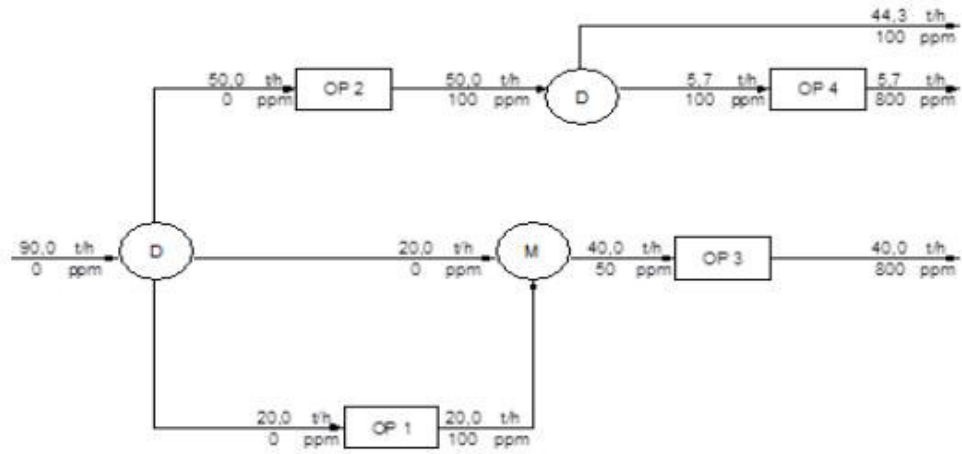


Fonte: Calixto *et al.* (2020)

4.2.4. Fluxograma Resultante do DFA

O último passo, etapa 5, é a síntese do DFA, que apresenta os pontos onde será aplicado o reuso, para assim, obter a mínima vazão de água de fonte externa. Na Figura 15 é apresentado um exemplo de resposta final da Aplicação do DFA. Os pontos D são pontos de divisor de corrente e os pontos M são chamados pontos de mistura onde são realizados os balanços de contaminantes em cada um destes pontos.

Figura 15- Representação final DFA



Fonte: MIRRE *et al.* (2013)

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O Diagrama de Fontes de Água (DFA) foi determinado e obtido em dois cenários. O primeiro deles com a água de fonte externa sem contaminação, ou seja a 0 ppm. No segundo cenário é realizado uma flexibilização na água de entrada, permitindo-a entrar com um grau de contaminação.

5.1 Restrições de reuso

As operações que foram escolhidas para a obtenção do DFA são caldeira, parbolização e turbina. Logo alguns cenários de reuso precisam ser restritos. No estudo em questão, foi restrito o reuso para a caldeira, pois é a operação que precisa ter a água com o mínimo de contaminação possível, para não prejudicar o equipamento, que pode ocasionar principalmente incrustações. Salienta-se, também, que a vazão inteira de água da caldeira foi utilizada para o DFA, não apenas o condensado. Outro ponto relevante, pode ser a implementação de um processo de regeneração na entrada da caldeira, possibilitando, assim, o reuso nessa operação. Essas observações podem servir de dicas para trabalhos e aplicações futuras. As operações de parboilização e turbina ficaram disponíveis para receber água de reuso.

5.2 DFA para parâmetro condutividade elétrica

Foi sintetizada as informações necessárias para obtenção do DFA para o contaminante condutividade elétrica mostrada na Figura 16, denominada Tabela de Oportunidades, conforme obtidos no MINEA.

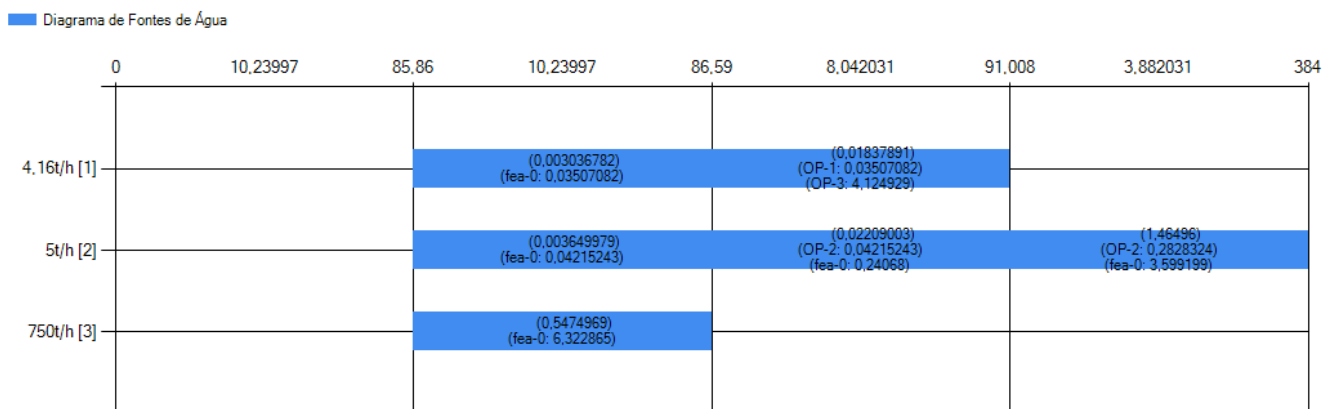
Figura 16 – Dados para o Cenário I, MINEA.

Operação	Contaminante	Ce (ppm) ▼	Cf (ppm)	Δm (g/h)
1	A	85,86	91,008	21,41569
2	A	85,86	384	1490,7
3	A	85,86	86,59	547,4968

Fonte: Autor (2022)

O software MINEA 2.0 utilizado na Figura 16, realiza o cálculo da carga máxima de contaminante para a operação completa, através da Equação 1. Salienta-se que os valores de vazão para cada operação foram 4,16, 5 e 750 t/h para parboilização, caldeira e turbina respectivamente. A partir deste ponto é definido os intervalos de concentração e gerado o DFA. A Figura 17 apresenta o DFA para o componente em questão.

Figura 17- DFA para condutividade

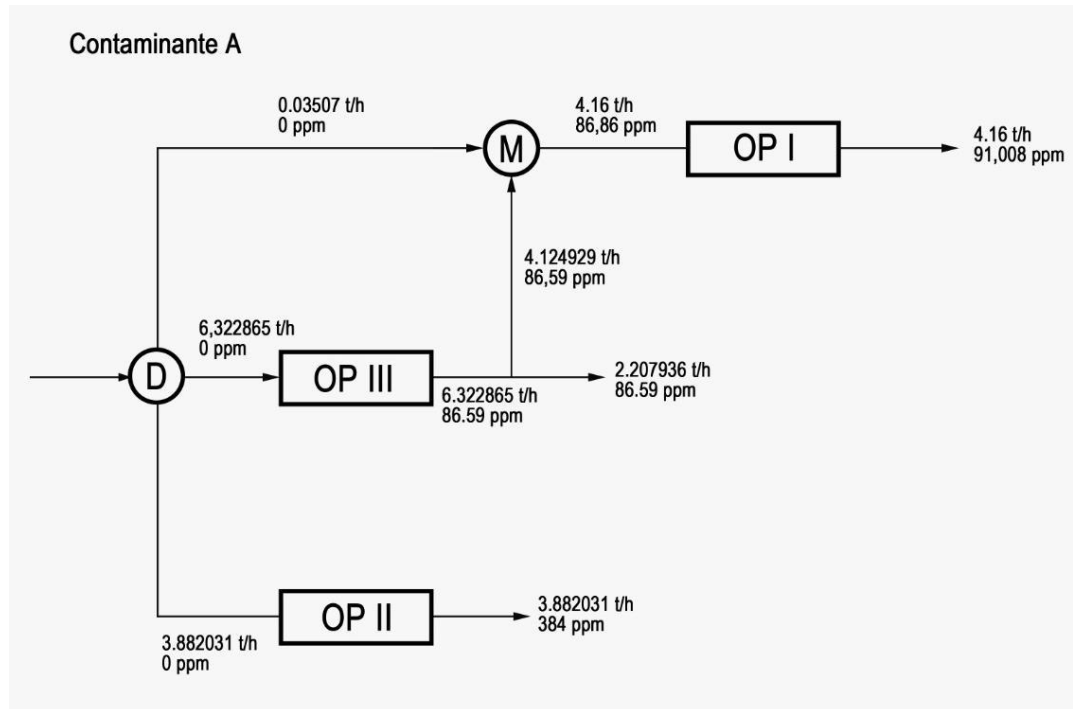


Fonte: Autor (2022)

As operações são simbolizadas, em intervalo, com a coloração azulada. No eixo das ordenadas ficam os valores de vazão utilizada em cada uma das operações. No eixo das abcissas ficam presente os intervalos de concentração de contaminação. Seguindo as regras de reuso disposta, no item da revisão bibliográfica, as opções de reuso ficam listada em cada um dos intervalos. Na Figura 18, a operação 1 e intervalo 2 apresenta um ponto de mistura entre água externa e operação 3, turbina.

Com o intuito de buscar uma maior compreensão do DFA, é originado o novo fluxograma do circuito hídrico referente a combinação das três operações. Durante o mapeamento enfatiza-se que atualmente a empresa não possui nenhuma técnica de reuso aplicada. A Figura 18 representa o novo circuito hídrico, para o contaminante A, bem como o balanço parcial nos seus pontos de mistura e divisão.

Figura 18- Fluxograma resultante do DFA condutividade



Fonte: Autor (2022)

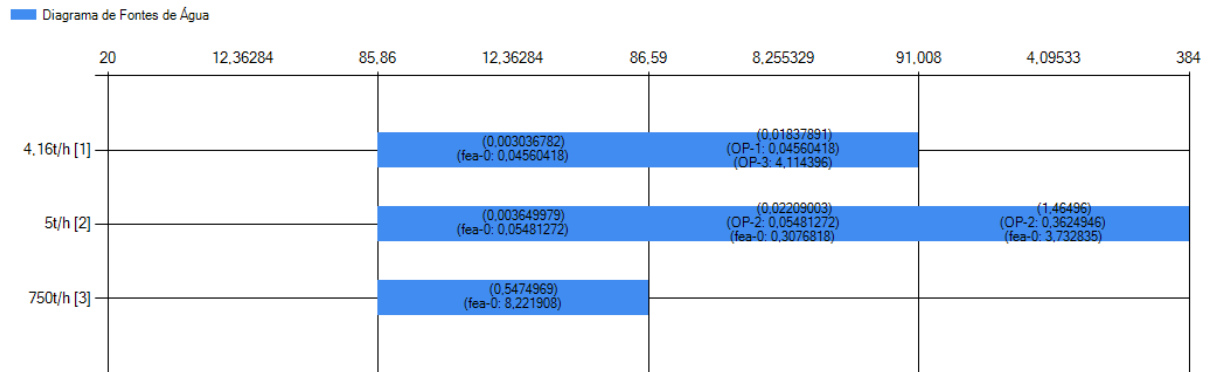
A partir da resposta gerada pelo DFA e o balanço hídrico divulgado no fluxograma da Figura 18, a técnica de reuso foi aplicada. A operação II, caldeira, teve restrição quanto a entrada de água de fontes internas, visto que ela requer uma maior atenção para não ocorrer incrustações. A operação I, os parboilizadores, receberam o reuso da operação III. Na operação I, foi utilizado 0,84% da água limpa que era utilizada anteriormente visto que o restante foi suprido pelo efluente da operação III, recomenda-se uma análise prévia sobre o contato com o arroz. Salienta-se que a operação III necessita de apenas 6,32 t/h para assimilar a transferência de contaminante. Porém, como ela é uma operação em circuito fechado ela segue recebendo os 750 t/h necessários para transformar energia hidráulica em trabalho mecânico. Analisando o circuito como um todo, o percentual de redução foi de apenas 0,69%. Porém, partindo do princípio que a operação III, turbina, tem sua própria reutilização, as operações remanescentes, I e II, tiveram uma redução de 57,23%.

5.3 DFA para parâmetro condutividade elétrica segundo cenário

De maneira similar ao item 5.2, foi realizado um segundo cenário, flexibilizando um pouco a água de entrada, permitindo que ela entre com um estágio

maior de contaminação. O valor de entrada para a água de fonte externa passou de 0 ppm para 20 ppm. A Figura 19 representa o DFA gerado neste novo cenário.

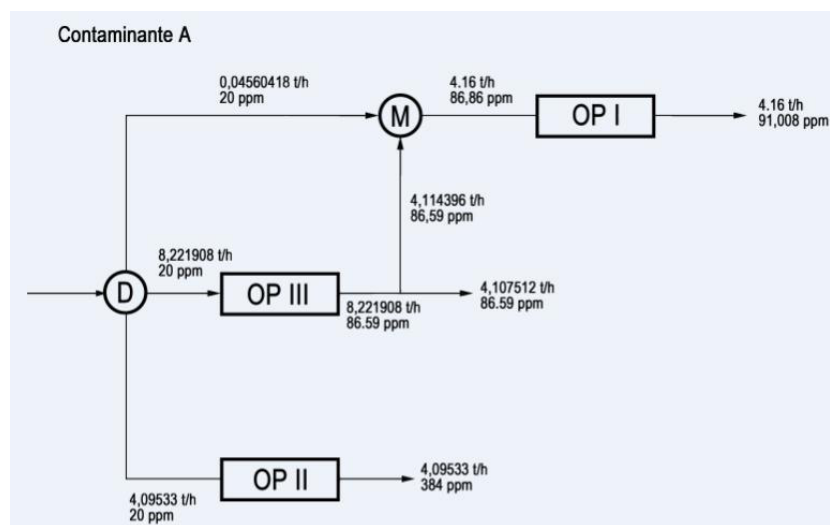
Figura 19 - DFA para condutividade cenário 2



Fonte: Autor (2022)

O fluxograma resultante do novo cenário está apresentado na Figura 20. De mesmo modo que no arranjo anterior a operação II não permitiu entrada de água de reuso. A operação I passou a utilizar apenas 1,1% do que utilizava de água limpa visto que o restante é oriundo da operação III. O circuito como um todo, teve uma redução de 0,66%. Porém, de mesmo modo que no primeiro cenário, a redução para as operações I e II foi de 54,79%.

Figura 20- Fluxograma final para cenário II



Fonte: Autor (2022)

5.4 Comparativo dos cenários

Para encontrar o melhor cenário para o reuso foi abordado duas análises, sendo elas: percentual de redução e variação de pH. O DFA elabora vários cenários, porém, nem sempre o cenário com maior percentual de redução de água será o mais viável visto que o pH pode afetar em diversos fatores das operações.

5.4.1 Sobre o parâmetro pH

O cenário I, sem flexibilização da água de fonte externa, e o cenário II, com flexibilização, não apresentaram grandes diferenças a respeito do pH de saída das operações. Devido ao sistema hídrico resultante ser similar a única variação de pH seria na operação I. A Tabela 6 apresenta a variação de pH para esta operação em ambos os cenários.

Tabela 6- Valores de pH para operação I

Cenário	I	II
Valor de pH	5,6345	5,6359

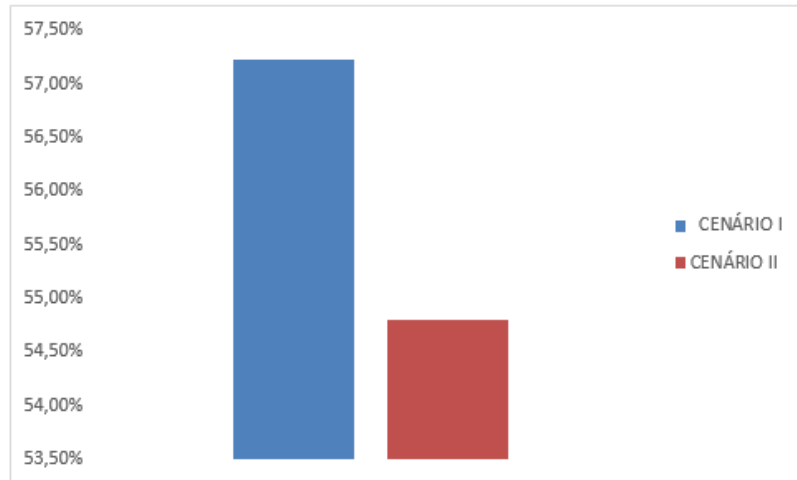
Fonte: Autor (2022)

Como apresentado na Tabela 5, não se obteve uma variação significativa no pH, embora seja notável que ao flexibilizar a água de entrada o pH ficará menos ácido. Logo para os cenários apresentados a escolha entre os dois cenários não passaria pela variação do pH.

5.4.2 Sobre o percentual de redução

Devido à operação III ser em circuito fechado o percentual de redução foi calculado em cima das demais operações, operação I e II. A Figura 21 representa o percentual de redução nos dois cenários. Baseado na resposta apresentada concluiu-se que ao flexibilizar a água de entrada o percentual de redução diminuiu.

Figura 21- Percentual de redução por cenário



Fonte: Autor (2022)

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia do Diagrama de Fontes de Água (DFA) conseguiu ser aplicada em uma indústria de beneficiamento de arroz. Os resultados para os dois cenários, sem e com flexibilização para as operações I e II, geraram boas respostas 57,23% e 54,79%, respectivamente, para o percentual de redução de água. A utilização do software MINEA 2.0 apresentou uma boa solução aliado a um layout de fácil execução para o tratamento dos dados. O pH com a flexibilização da água de fonte externa não teve uma grande variação, permitindo assim, obter resultados satisfatórios com diferentes valores para a condutividade elétrica da água. Apesar de resultados promissores recomenda-se para trabalhos futuros analisar o efeito do reuso no grão e aumentar o número de contaminantes, podendo aplicar o DFA para múltiplos contaminantes, como a dureza e sólidos suspensos, para avaliar os efeitos da aplicação para estes. Além disso, utilizar apenas a vazão do condensado da caldeira como vazão de operação.

REFERÊNCIAS

ALVA-ARGÁEZ, Alberto; KOKOSSIS, Antonis C.; SMITH, Robin. **The design of water-using systems in petroleum refining using a water-pinch decomposition**. Chemical Engineering Journal, v. 128, n. 1, p. 33-46, 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1385894706004116>. Acesso em: 17 ago. 2021

BARRETO, Arthur Esteves da Costa Mothé. **Proposta de minimização no uso de águas utilizando o Diagrama de Fontes de Água: avaliação técnica e econômica em uma cervejaria**. 2019. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/12715>. Acesso em: 10 de fev. 2022

BRASIL. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável. **Mundo precisa fazer mais para cumprir metas ambientais até 2030**. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/Home/Noticia?id=102>. Acesso em: 15 ago. 2021

BRASIL. Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. Gabinete do Ministro. **Instrução Normativa Nº 6, de 16 de fevereiro de 2009**. Brasília. DF Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/legislacao-1/normativos-cgqv/pocs/instrucao-normativa-no-6-de-16-de-fevereiro-de-2009-arroz/view>. Acesso em: 15 ago. 2021

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretária de Recursos Hídricos. **Caderno Setorial de Recursos Hídricos: Indústria e Turismo**. Brasília. DF: Ministério do Meio Ambiente, 2006. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/inserir-documentos-nos-artigos/pnrh/linha-do-tempo/2344-caderno-industria-e-turismo/file>. Acesso em: 8 set. 2021

CALIXTO, Ewerton Emmanuel da Silva et al. **Water sources diagram and its applications. Processes**, v. 8, n. 3, p. 313, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/3/313> Acesso em: 10 ago. 2021.

CF, O. D. D. S. **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. United Nations: New York, NY, USA, 2015. Disponível em: <https://odsbrasil.gov.br/home/agenda>. Acesso em: 4 set. 2021

ECOLTEC. Projeto para reuso de água na indústria. Disponível em: <http://www.ecoltec.com.br/elaboracao-de-projetos-para-reuso-de-agua-na-industria.html> .Acesso em: 17 jul. 2021.

EL-HALWAGI, Mahmoud M.; MANOUSIOUTHAKIS, Vasilios. **Synthesis of mass exchange networks**. AIChE Journal, v. 35, n. 8, p. 1233-1244, 1989. Disponível em: <https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aic.690350802>. Acesso em: 20 jul. 2021

EIFERT, E. da C. **Secagem, armazenamento e beneficiamento**. In: Embrapa Arroz e Feijão-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: BARRIGOSI, JAF (Ed.). Recomendações técnicas para a cultura de arroz irrigado no Mato Grosso do Sul. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2009., 2009. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/657013/1/p129.pdf>. Acesso em: 20 set. 2021

GOMES, Juliana FS et al. **Water sources diagram in multiple contaminant processes: maximum reuse**. Industrial & Engineering Chemistry Research, v. 52, n. 4, p. 1667-1677, 2013. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ie301537c>. Acesso em: 20 jul. 2021

GOMES, Juliana.; QUEIROZ, Eduardo.; PESSOA, Fernando. **Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant**. 2007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652605002519>. Acesso em : 20 jul. 2021

HALLALE, N.; FRASER, D. M. **Capital and total cost targets for mass exchange networks: part 1: simple capital cost models**. Computers & Chemical Engineering, v. 23, n. 11-12, p. 1661-1679, 2000. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0098135499003166> Acesso em: 5 set. 2021

HANSEN, Éverton et al. **Water and wastewater minimization in a petrochemical industry through mathematical programming**. Journal of Cleaner Production, v. 172, p. 1814-1822, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617329359> Acesso em: 5 set. 2021

HUGENTHOBLE, Matheus Wagner. **Integração energética de uma planta petroquímica de aromáticos através da técnica de sítio total**. 2020. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/212461>. Acesso em: 18 jul. 2021

LEÃO¹, Adriano Souza et al. **Minimização do uso de água e geração de efluentes através do método do diagrama de fontes de água (DFA)**. V Simpósio de Inovação e Tecnologia. Salvador.BA, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/EwertoCalixto/publication/336146214_MINIMIZACAO_DO_USO_DE_AGUA_E_GERACAO_DE_EFLUENTES_ATRAVES_DO_METODO_DO_DIAGRAMA_DE_FONTES_DE_AGUA_DFA/links/5e3f5c73458515072d8a9ce6/MINIMIZACAO-DO-USO-DE-AGUA-E-GERACAO-DE-EFLUENTESATRAVES-DO-METODO-DO-DIAGRAMA-DE-FONTES-DE-AGUA-DFA.pdf . Acesso em: 15 ago. 2021

LIMA, Christina Venzke Simões de; HOEHNE, Lucélia; MEURER, Egon José. **Cádmio, cromo e chumbo em arroz comercializado no Rio Grande do Sul**. Ciência Rural, v. 45, p. 2164-2167, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/cr/a/cRzxYkGvSrQYT3VnhWx6LxR/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 20 set. 2021.

MADEIRO, Carlos. **Com 12% da água doce mundial, o Brasil cuida bem dela? Entenda por que não.** Portal UOL. Maceió. 2015. Disponível em: <https://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2015/03/21/com-12-da-agua-doce-mundial-o-brasil-cuida-bem-dela-veja-respostas.htm>. Acesso em: 15 de Nov 2021.

MAYS, Larry W. **Water Resourcns.** 1996. Disponível em: http://sutlib2.sut.ac.th/sut_contents/64475.pdf. Acesso em: 15 set. 2021

MIRRE, Reinaldo Coelho et al. **Conservação e reuso de águas usando o método Diagrama de Fontes de Água para processos em batelada: estudo de casos.** Revista Ambiente & Água, v. 7, p. 182-203, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ambiagua/a/Xxr7VFFNVshv3PLfnbjVmSG/abstract/?lang=pt> 23553. Acesso em: 20 jul. 2021

MIRRE, Reinaldo et al. **MINEA, Software para a Minimização do Consumo de Água em Processos Químicos com Base no Diagrama de Fontes de Água (DFA).** Proceedings of the 11º Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, CAIP. 2013. p. 21-24. Disponível em: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/52752809/MINEA_Software_para_a_Minimizacao_do_Consumo2017042149045q1clwithcoverpagev2.pdf?Expires=1632774028&Signature=A0qxK9oRNKDqNTvdZn5K7gON3jgx0sg5kPPounQZ4z9XWX3SJEyTTjn9ay5vyTOV5ValCmfgeW0sSrQ2HgtOGYHnD4TS59dOaNIGvKpkc79t0DhwP3AGS~X3jQ-bOn0IMxx5AnSrSkWArly41MacUdY9AKDatGyHm9luN44coj3WCznjNYY3qqIS1WQH3agqFZN~DU6jE3VzDKg2rP2hTa-C77NQyCs73H13y7tXUERil8pMK3MepxLca-8e9guZQWDhvbPG3a~VQ7P7q1bGUJMNjRKRT06ixaDV2~jvPHQj5i6PJkzKgp9J8K0MiZShn0Dn~mqgTNT1AGIRCuQ__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA. Acesso em: 20 ago. 2021

NAICE, Flavia Pellegrini. **Automatização do Diagrama de Fontes de Água.** Universidade Federal do Rio de Janeiro - escola de Química. Disponível em: <http://epqb.eq.ufrj.br/download/automatizacao-do-diagrama-de-fontes-de-agua.pdf>. Acesso em: 15 fev. 2022

NOLETO, Marlova Jovchelovitch; ZAVALA, Rafael; PEREIRA, Carlos. **A água para o desenvolvimento sustentável e justo.** Jornal Folha de São Paulo. 2021. Disponível em: <https://www1.folha.uol.com.br/opiniaio/2021/03/a-agua-para-o-desenvolvimento-sustentavel-justo-e-igual.shtml>. Acesso em: 20 jul. 2021

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Mundo precisa fazer mais para cumprir metas ambientais até 2030, revela relatório.** 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/128602-mundo-precisa-fazer-mais-para-cumprir-metas-ambientais-ate-2030-revela-relatorio>. Acesso em 25 de fev.

Portal a Voz da Indústria. **Ações para recursos hídricos.** 2017 Disponível em: <https://avozdaindustria.com.br/> Acesso em: 15 de ago.

RAFUL, Nadja Fernandes; JUCHEM, Dionise Magna; CAVALHEIRO, Maria Eloisa. **Gestão Ambiental como diferencial competitivo empresarial.** Revista Gestão

Industrial, v. 6, n. 2, 2010. Disponível em: <https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/572>. Acesso em: 14 de Dez. 2021

SAIDELLES, Ana Paula Fleig et al. **Gestão de resíduos sólidos na indústria de beneficiamento de arroz**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, v. 5, n. 5, p. 904-916, 2012. Disponível em: <https://scholar.archive.org/work/qlpp4i72c5ffzmhmfaff6zbsli/access/wayback/https://periodicos.ufsm.br/reget/article/download/4314/2820>. Acesso em: 11 fev. 2022.

TRAN, Michael.; KONCAGUL, Engin.; CONNOR, Richard. **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2016: Água e emprego**. 2016.

WAYCARBON. **Como as ODS vem sendo incorporadas pelas empresas?**. Disponível em: <https://blog.waycarbon.com/2019/03/ods-incorporados-pelas-empresas/>. Acesso em: 17 jul. 2021.

WANG, Y.P.; SMITH, **Wastewater Minimisation**. Chemical Engineering Science. vol. 49, No. 7. pp. 981-1006, 1994.