

## II-613 - REÚSO DE ÁGUA EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS UTILIZANDO O SOFTWARE DE SIMULAÇÃO WATER PINCH

**Jonathan Cawettiere Espíndola<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Doutor em Engenharia do Ambiente pela Universidade do Porto (UP). Pós-doutorando da Universidade de São Paulo (USP).

**José Carlos Mierzwa<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Químico pela Universidade de Mogi das Cruzes. Mestre em Tecnologia Nuclear pela USP. Doutor em Engenharia Civil pela USP. Professor pesquisador da USP.

**Míriam Cristina Santos Amaral<sup>(2)</sup>**

Engenheira Química pela UFMG. Mestre e Doutora em Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da UFMG. Professora e pesquisadora da UFMG.

**Laura Hamdan de Andrade<sup>(3)</sup>**

Engenheira Química pela UFMG. Mestre e Doutora em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela UFMG. Professora e pesquisadora da PUC Minas.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Centro Internacional de Referência em Reúso de Água da Universidade de São Paulo (CIRRA-USP), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (PHA), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), 05508-020, São Paulo, SP, Brasil - [jonathan.espindola@hotmail.com](mailto:jonathan.espindola@hotmail.com). **Endereço<sup>(2)</sup>:** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais. PO Caixa 1294, 30.270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil. **Endereço<sup>(3)</sup>:** Departamento de Engenharia Química, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 30.535-901, Belo Horizonte, MG, Brasil.

### RESUMO

O principal objetivo deste estudo é avaliar possíveis rotas de reúso de efluentes de uma indústria de laticínios. Primeiramente, foi avaliada a vazão de água na indústria. Toda água consumida e efluentes gerados pelo processo industrial foram quantificados e caracterizados. Além disso, foram avaliados os parâmetros de qualidade da água necessários para diferentes atividades industriais. Após esta etapa, os dados relacionados à eficiência do tratamento utilizando um biorreator de membrana (BRM) e sistemas de nanofiltração (NF) previamente conduzidos pelos autores foram considerados. Em seguida, foi realizada a análise pinch por meio da aplicação dos dados coletados no *software Water Pinch*. Ambos os esquemas de reúso/reciclagem direta e regeneração foram investigados. Nesse contexto, embora o reúso/reciclagem direta de efluentes tenha se mostrado capaz de reduzir o uso de água potável para o processo *clean-in-place* (CIP) em 33,4%; os esquemas com a regeneração dos efluentes apresentaram até 66,7% e 95,4% de redução de água potável para o CIP e processos gerais, respectivamente. Por fim, foram propostas quatro rotas de reúso de água. A rota proposta combinando as mais avançadas tecnologias de tratamento estudadas apresentou o melhor desempenho em termos de redução do consumo total de água potável (69,5%) na indústria de laticínios.

**PALAVRAS-CHAVE:** Reúso de água, biorreator de membrana, nanofiltração, rota de reúso, análise pinch.

### INTRODUÇÃO

Considerando todas as atividades industriais, o setor alimentício é o que apresenta maior consumo de água e geração de efluentes, por unidade de produção. Seguindo os setores químico e de refinaria, o setor de laticínios ocupa o terceiro lugar em volume de uso de água e produção de efluentes [1]. Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a produção mundial de leite em 2019 foi de 852 milhões de toneladas, um aumento de 1,4 vezes em relação a 2018. O Brasil, quinto maior produtor mundial de leite, foi um dos os países responsáveis por esse crescimento devido ao aumento de 3,1% no volume produzido [2]. Apesar de ser uma atividade de grande importância social e econômica, a indústria de laticínios possui muitos processos que apresentam alta demanda hídrica, o que resulta em quantidade significativa de efluentes em praticamente todas as etapas do processo produtivo, uma grande preocupação ambiental. Os efluentes gerados são ricos em compostos orgânicos como gorduras, proteínas, lipídios, e apresentam altos valores de “demanda bioquímica de oxigênio/demanda química de oxigênio” (DBO/DQO), que apresentam alto potencial poluidor (por exemplo, eutrofização de corpos hídricos) se liberados no meio ambiente sem tratamento adequado [3]. No entanto, o cenário

de menor disponibilidade de água para uso nos processos produtivos, aliado às legislações cada vez mais rígidas quanto ao lançamento de efluentes em corpos hídricos, tem incentivado o setor industrial a desenvolver melhores práticas de gestão hídrica [4, 5]. Nesse contexto, as rotas de tratamento e reúso de efluentes aparecem como uma opção para minimizar o uso de água potável e a geração de efluentes na indústria [6].

Várias abordagens têm sido aplicadas para o tratamento de efluentes de laticínios, que envolvem principalmente a remoção de matéria orgânica e nutrientes por meio de processos biológicos. No entanto, para promover um esquema seguro de reúso de água, é necessário usar tecnologias de tratamento complementares para melhorar a remoção de contaminantes específicos, como sais dissolvidos e resíduos orgânicos [7]. Tecnologias como osmose reversa, eletrodialise, troca iônica e nanofiltração podem ser utilizadas como uma etapa de polimento para esta finalidade [7-9]. Andrade *et al.* [10] estudaram uma abordagem híbrida aplicando um reator biológico com membranas de microfiltração seguido de um pós-tratamento com membranas de nanofiltração (NF). Esse sistema pode ser considerado uma alternativa de tratamento avançado, pois é bastante eficiente na remoção de poluentes residuais, gerando um efluente de alta qualidade que pode ser reaproveitado em diferentes etapas do processo industrial. Vale ressaltar que as tecnologias de membranas estão presentes na maioria dos planos de reúso de água industrial [11-13]. Isso se deve ao fato dessa tecnologia ser capaz de produzir água reciclada altamente purificada, pois funciona como uma barreira de poluentes, permitindo apenas a permeação de pequenas moléculas e água através dos poros da membrana [11].

Os fluxos de água potável e de efluentes podem ser reduzidos simultaneamente (recuperação de água na planta) quando a reutilização da água é adotada, levando a melhores valores de pegada hídrica [14]. Para isso, várias ferramentas de integração de processos e análise pinch foram desenvolvidas para criar redes de reúso de água. A técnica consiste em duas etapas: 1) determinação das vazões mínimas de água potável e efluente necessárias para um processo baseado no princípio do balanço de massa; e 2) projeto da rede para atingir as metas de vazão mínima [15]. Nesse contexto, vale destacar três conceitos importantes: (i) reúso – a água aplicada em um determinado processo é reaproveitada em outro processo; (ii) reciclagem – a água aplicada em um processo é parcial ou totalmente reciclada para o mesmo processo; e (iii) regeneração – as águas são tratadas total ou parcialmente para melhorar sua qualidade antes de serem direcionadas para esquemas de reúso/reciclagem [4].

Até o momento, várias técnicas de análise pinch de água foram desenvolvidas e aplicadas para melhorar a gestão da água nas indústrias [4, 5, 16-18]. No entanto, não há estudos abrangentes com foco na compreensão da correlação entre eficiências de tratamento de água e oportunidades de reúso de água, em uma indústria de laticínios, para criar a melhor rota de reúso.

Portanto, o objetivo principal deste trabalho é avaliar possíveis rotas de reúso dos efluentes de uma indústria de laticínios, considerando os requisitos de qualidade da água para cada uso. Este estudo é justificado pelo cenário de estresse hídrico vivenciado em diferentes áreas do mundo (por exemplo, na área onde a indústria está localizada). Primeiramente, foi descrito o estudo de caso da indústria de laticínios. Toda água consumida e efluentes gerados pelo processo industrial foram quantificados. Amostras desses efluentes foram coletadas e caracterizadas. Além disso, foram avaliados os parâmetros de qualidade da água necessários para diferentes atividades industriais. Os dados relacionados à eficiência do tratamento usando um biorreator de membrana (BRM) e sistemas NF previamente conduzidos pelos autores [10] foram considerados. Os sólidos totais dissolvidos (STD) e a demanda química de oxigênio (DQO) foram considerados como os principais parâmetros de qualidade da água nos cursos de água. Por fim, foi realizada a análise pinch por meio da aplicação dos dados coletados no *software Water Pinch* para avaliar o potencial de redução do uso de água industrial e geração de efluentes. Ambos os esquemas de reúso/reciclagem direta e regeneração foram investigados e rotas de reúso de água foram propostas.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Uma grande indústria de laticínios localizada no estado de Minas Gerais, Brasil, foi escolhida como local para investigação. A planta industrial selecionada atende às suas necessidades de água usando principalmente água doce (água potável, água superficial ou água subterrânea ocasionalmente), com exceção de uma parte da água usada no processo de limpeza no local (CIP), que é recirculado. Considerando as principais atividades desenvolvidas na indústria de laticínios foi possível identificar 6 principais usos da água: (i) CIP's; (ii) sanitários; (iii) processamento de alimentos; (iv) resfriamento; (v) aquecimento; e (vi) outros (usos diversos). A **Figura 1** mostra um esquema do macro-balanço hídrico na indústria de laticínios estudada.

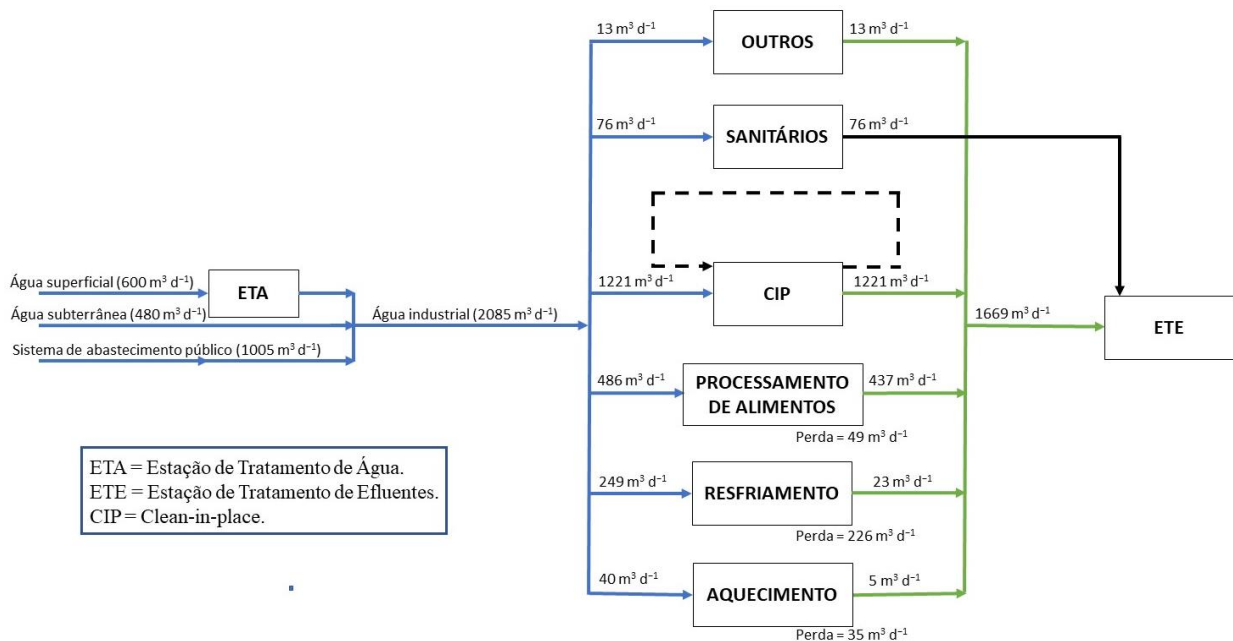


Figura 1. Esquema do macro-balanço hídrico na indústria de laticínios.

A indústria de laticínios estudada, além de processar o leite cru coletado, fabrica diversos derivados lácteos como iogurte, queijo, requeijão e *petit suisse*. A indústria requer uma média de 2.085 m<sup>3</sup> de água por dia. O processamento de produtos lácteos envolve uma utilização diária de 486 m<sup>3</sup>. O uso de banheiros consome 76 m<sup>3</sup> de água por dia. A necessidade de água para a torre de resfriamento e alimentação da caldeira é de 249 e 40 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Os 13 m<sup>3</sup> de água utilizados por dia na lavagem de pavimentos, lavagem de viaturas e outras utilizações afins são contabilizados na rubrica “Outros” do programa. *Clean-in-place* representa o consumo máximo de água potável que é de 1221 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup>.

O CIP é um processo de três etapas: (i) primeira etapa - enxágue do equipamento com água, (ii) segunda etapa - lavagem do equipamento com soluções de hidróxido de sódio e detergentes para eliminar os micro-organismos, (iii) terceira etapa - lavagem dos restos químicos com água. Normalmente, o sistema CIP reaproveita a água de lavagem utilizada em sua segunda e terceira etapas para o enxágue do equipamento em sua primeira etapa. De fato, o processo CIP da indústria estudada consome 610,5 m<sup>3</sup><sub>água</sub> d<sup>-1</sup> em cada uma das 3 etapas, porém, como a água da primeira etapa é água de reúso, o consumo total de água do processo CIP é de 1221 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup> (Figura 1).

As amostras de efluentes avaliadas neste estudo foram coletadas de uma indústria de laticínios, localizada no estado de Minas Gerais, Brasil. Essas amostras foram coletadas por amostragem aleatória em três pontos de amostragem diferentes, a saber: (i) SP1 - após a primeira lavagem do processo CIP; (ii) SP2 - no tanque de reúso de água (efluentes da segunda e terceira lavagem do processo CIP); e (iii) SP3 - efluente final da indústria após as etapas de peneiramento e flotação com ar comprimido (efluentes de todos os processos exceto o de sanitários). As amostras coletadas foram preservadas por acidificação nos frascos das amostras e condicionadas sob refrigeração.

Todas as análises físico-químicas foram realizadas nos laboratórios do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais, seguindo a metodologia dos "Standard methods for the examination of water and wastewater" [19]. As análises realizadas e seus respectivos códigos de identificação foram: Demanda Química de Oxigênio – DQO (Código 5220), Série de Sólidos (Código 2540), pH (Código 4500) e Condutividades (Código 2510).

Os dados referentes ao tratamento de efluentes lácteos por um biorreator de membrana e um sistema de nanofiltração foram obtidos de um trabalho anterior [10]. O sistema BRM foi composto por um módulo de microfiltração de fibra oca submersa (polieterimida, tamanho médio de poro de 0,5 µm, área de membrana de 0,044 m<sup>2</sup>, densidade de empacotamento de 500 m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>) e três tanques de acrílico: (i) um armazenamento de alimentação de 40 L tanque, (ii) um tanque biológico de 4,4 L, no qual foi alojado o módulo de membrana, e (iii) um tanque de 5 L para armazenamento do permeado. O sistema de nanofiltração era constituído de uma membrana comercial NF90

inserida em uma célula de aço inoxidável (área de filtração de 62 cm<sup>2</sup>), e a taxa de recuperação do tratamento de nanofiltração é de 50%. A permeabilidade à água da membrana apresentou valor médio de 2,3 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> bar<sup>-1</sup>. A **Tabela 1** apresenta os dados referentes às eficiências de tratamento dos efluentes da indústria de laticínios utilizando os sistemas avaliados.

**Tabela 1: Eficiências de tratamento dos efluentes da indústria de laticínios usando o sistema BRM e com o sistema BRM + NF (adaptado de Andrade *et al.* [10]).**

PARÂMETROS	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO (%)	
	BRM	BRM + NF
DQO	99,0	99,9
STD	23,2	90,0

A análise pinch de água (WPA) foi adotada para determinar os requisitos mínimos de água potável e o máximo de reciclagem/reúso (com e sem regeneração) por meio da integração de atividades ou processos de uso de água. A solução WPA típica é baseada em duas etapas: definir as metas de água, seguidas pelo projeto de rede para atingir as metas. DQO e STD foram selecionados como alvos de água. Esses parâmetros foram considerados “restritivos” para a avaliação do reúso de água de acordo com as possíveis aplicações na indústria [17]. Ambas as propriedades (parâmetros alvos) foram analisadas considerando a abordagem de alvo único (uma propriedade por vez no processo) e duplo (duas propriedades juntas ao mesmo tempo). Para atingir os requisitos mínimos de utilidade e localizar os pontos de estrangulamento, foi utilizado um método gráfico, nomeadamente curvas compostas de “concentração vs carga de massa” para realizar o objetivo pretendido.

Nesta etapa, os dados quantitativos e qualitativos das águas utilizadas nos processos industriais e dos efluentes tratados foram inseridos no *software* "Water Pinch". O software foi disponibilizado pelo "Virginia Polytechnic Institute and State University" gratuitamente para download e sem a necessidade de qualquer documentação, na página da universidade (<https://www.vt.edu/>). A avaliação dos esquemas de reúso/reciclagem e regeneração foi realizada através da análise da qualidade das águas exigida para cada processo e da qualidade dos efluentes com e sem tratamento. Em seguida, foram propostas possíveis rotas de reúso da água.

## **AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA E CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS.**

A área onde a indústria está localizada está passando por um estresse hídrico significativo. Não é incomum que durante o horário de funcionamento da indústria ocorram momentos de falta de água sendo abastecida pela rede pública de abastecimento de água, o que restringe o funcionamento de algumas áreas industriais. Também vale a pena mencionar que o uso apenas de água de rede deve, em geral, ser evitado, pois além de aumentar o custo operacional da estação, o tratamento para atingir os padrões de qualidade da água potável requer alto consumo de energia sendo que muitas vezes a alta qualidade da água não é necessária para alguns processos. Este último fator indica que rotas de reúso de água podem ser viáveis na indústria. Para avaliar as possíveis rotas de reúso, foi feito um levantamento dos padrões de qualidade da água exigidos (parâmetros de entrada) para cada processo industrial. Adicionalmente, os efluentes também foram caracterizados (parâmetros de saída). Detalhes sobre os diferentes processos de uso de água, conforme ilustrado na **Figura 1**, são fornecidos na **Tabela 2**. DQO e STD foram considerados parâmetros restritivos para possíveis aplicações na indústria [20].

**Tabela 2: Valores médios de DQO e STD na entrada e saída de todos os processos que utilizam água na indústria de laticínios.**

	FLUXO (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	PARÂMETROS DE ENTRADA		PARÂMETROS DE SAÍDA	
		DQO (mg L <sup>-1</sup> )	STD (mg L <sup>-1</sup> )	DQO (mg L <sup>-1</sup> )	STD (mg L <sup>-1</sup> )
<b>OUTROS</b>	13	10	500	*	*
<b>SANITÁRIOS</b>	76	10	500	*	*
<b>CIP</b>	<b>ETAPA 1</b>	610,5	6000	10000	320000
	<b>ETAPA 2</b>	610,5	10	500	3045 <sup>a</sup>
	<b>ETAPA 3</b>	610,5	0	1000	
<b>PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS</b>	486	0	1000	*	*
<b>RESFRIAMENTO</b>	249	75	500	*	*
<b>AQUECIMENTO</b>	40	5	200	*	*
<b>EFLUENTE FINAL</b>	1699 <sup>b</sup>	-	-	4393	3504

Adaptado da FIESP [20].

\* Não medido.

<sup>a</sup> Valor referente ao tanque de reúso (efluentes da segunda e terceira etapas misturados).

<sup>b</sup> Este valor corresponde a todos os efluentes gerados na indústria, considerando também as perdas nos processos.

O sistema de tratamento de efluentes da indústria recebe o efluente gerado em todos os processos industriais mencionados. O sistema é composto por uma etapa preliminar de peneiramento, seguida de flotação por ar dissolvido e tratamento biológico em reator de lodo ativado. Para permitir um reúso mais seguro, os efluentes sanitários não foram considerados para fins de reúso neste estudo. O efluente final utilizado neste estudo foi coletado no ponto de amostragem 3 (SP3), após as etapas de peneiramento e flotação. Este efluente pode ser diretamente reutilizado/reciclado ou regenerado (usando o sistema BRM ou BRM + NF) e depois reutilizado em processos industriais. Como os efluentes gerados no processo CIP possuem alto potencial de reaproveitamento (ou seja, grandes quantidades e possivelmente boa qualidade), eles foram caracterizados separadamente dos demais processos. A primeira etapa do processo CIP produz um efluente com grande carga de massa (conforme observado na **Tabela 2**) e não é direcionado para o tanque de reúso, sendo coletado no ponto de amostragem (SP1). Ambos os efluentes da segunda e terceira etapas são encaminhados para o tanque de reúso (SP2). Como esperado, este efluente possui valores de DQO e STD bem menores quando comparado ao efluente da primeira etapa (ou seja, primeira lavagem) (**Tabela 2**).

Considerando o cenário de escassez hídrica na área onde está localizada a indústria de laticínios e as oportunidades de reúso de água observadas, foi desenvolvido um plano de gestão/reúso de água.

## APLICAÇÃO DA ANÁLISE PINCH ÁGUA PARA REDUÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL

Para fins de análise pinch, foi considerado que a água da rede, as águas subterrâneas e as águas superficiais podem ser usadas como fontes de água potável dentro da planta, conforme descrito acima; e quando a água regenerada é necessária, uma quantidade suficiente é provida pelo tanque de reúso.

Três esquemas de reúso de água foram avaliados: (i) reúso/reciclagem direta, (ii) regeneração com o sistema BRM, e (iii) regeneração com os sistemas BRM + NF. Em seguida, foram propostas rotas de reúso para ver sua contribuição na redução da pegada hídrica para os processos industriais.

## REÚSO/RECICLAGEM DIRETA DE ÁGUA DE PROCESSO

Para avaliar o potencial de reúso/reciclagem direta da água, as unidades de tratamento propostas na indústria (sistemas BRM e NF) foram excluídas da análise. Assim, considerou-se a utilização do efluente final da indústria, após as etapas de peneiramento e flotação com ar comprimido. Para realizar a análise pinch, os parâmetros limitantes da água precisavam ser extraídos corretamente para todos os “consumidores de água” e “fontes de água”. “Consumidores de água” referem-se a unidades/processos que consomem água (geralmente os fluxos de entrada para as unidades de processo). Nesse caso, os parâmetros da água de entrada precisam ser considerados (consulte a **Tabela 2**). Por outro lado, “fontes de água” referem-se à água potável utilizada e também aos fluxos de água que saem das unidades industriais (fluxos de saída) que podem ser reutilizados. Neste caso, é importante verificar os parâmetros de saída dos fluxos efluentes de cada unidade (**Tabela 2**).

Como mostrado, existem oito consumidores e três fontes. Os consumidores de água são: (1) sanitários, (2) CIP – etapa 1, (3) CIP – etapa 2, (4) CIP – etapa 3, (5) resfriamento, (6) aquecimento, (7) outros, e (8) processamento de alimentos. Este último não será considerado nos esquemas de reúso por ser um processo industrial de alimentos, não sendo permitido o uso de água de reúso. Para facilitar a análise pinch, os processos industriais foram divididos em dois grupos: (i) CIPs – incluindo os consumidores 2, 3 e 4; e (ii) Processos gerais – incluindo consumidores 1, 5, 6 e 7. Três fontes de água estão disponíveis para uso neste caso. Além da fonte de água potável (concentração de STD e DQO = 0 mg L<sup>-1</sup>), a água do tanque de reúso e o efluente final da indústria também podem ser reaproveitados (com ou sem regeneração). Observe que a vazão total da fonte de água é menor que a dos consumidores totais (**Figura 1** e **Tabela 2**), pois parte da água adicionada é perdida durante o processo industrial (por exemplo, evaporação e incorporação do produto). Além disso, os efluentes sanitários não são considerados para fins de reúso.

O reúso/reciclagem direta de efluentes em “processos gerais”, sem regeneração, não foi avaliada porque os efluentes não atenderiam aos requisitos de qualidade da água para esta finalidade. Os resultados para o esquema de reúso/reciclagem direta considerando o processo CIP e STD ou DQO como parâmetros restritivos são apresentados na **Tabela 3**.

**Tabela 3. Dados de reúso/reciclagem direta obtidos através do software *Water Pinch*.**

CIP			
PARÂMETRO RESTRITIVO		DQO	STD
PROCESSO	FLUXO NECESSÁRIO (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	REÚSO DE ÁGUA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	
CIP – ETAPA 1 (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	610,5	610,5	610,5
CIP – ETAPA 2 (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	610,5	2,0	110,7
CIP – ETAPA 3 (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	610,5	0	0
ÁGUA TOTAL NECESSÁRIA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )		1831,5	1831,5
ÁGUA TOTAL REUTILIZADA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )		612,5	721,2
CONSUMO TOTAL DE ÁGUA POTÁVEL (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )		1219,0	1110,3
DIMINUIÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA POTÁVEL (%)		33,4	39,4

O resultado indica que a vazão mínima de água necessária para o CIP, com reúso/reciclo direto, é de 1219,00 ou 1110,3 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, considerando DQO ou STD como parâmetros restritivos, respectivamente. Portanto, considerando o parâmetro mais restritivo, DQO neste caso, a vazão de água necessária é de 1219,0 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>. Este é um valor de vazão consideravelmente menor do que a vazão necessária considerando o uso apenas de água potável (1831,50 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>), o que representa uma redução de 33,4 % no consumo de água potável. Porém, sabe-se que a indústria de laticínios já reaproveita os efluentes do tanque de reúso (etapas 2 e 3) para a etapa 1; assim, seu consumo médio de água potável para o processo CIP é de 1.221,0 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>. A pequena redução observada através do esquema de reúso direto proposto (1219,0 ao invés de 1221,0 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>) se deve ao fato de que além do reúso de efluentes na fase 1, o esquema também propõe uma mistura de efluentes com água potável para a fase 2.

## REGENERAÇÃO DE ÁGUA DE PROCESSO

Após esgotado o potencial de redução da vazão de água potável por meio de reúso/reciclagem direta, os esquemas com regeneração de água foram avaliados para reduzir a pegada hídrica da indústria de laticínios. Nesse caso, o efluente final da indústria de laticínios (após peneiramento e flotação) seria direcionado para um sistema de tratamento composto por um biorreator de membrana e um sistema de nanofiltração. Os dados referentes ao tratamento de efluentes de laticínios pelo referido sistema foram obtidos de nosso trabalho anterior [10]. A **Tabela 4** apresenta as concentrações dos parâmetros restritivos considerados neste estudo de efluentes quando submetidos aos dois sistemas de tratamento avaliados (ou seja, BRM e BRM + NF).

**Tabela 4. Concentração de parâmetros restritivos da água de diferentes fontes de água na indústria de laticínios.**

FONTE DE ÁGUA	DQO (mg L <sup>-1</sup> )	STD (mg L <sup>-1</sup> )
EFLUENTE FINAL	4393,0	3504,0
PERMEADO DO SISTEMA BRM	39,5	2691,1
PERMEADO DO SISTEMA BRM + NF	4,4	350,4
CONCENTRADO DO SISTEMA BRM + NF	98,4	4656,5

Ao contrário do caso de reúso/reciclagem direta, o esquema de reutilização com regeneração permite a utilização da água tratada não só para o processo CIP, mas também para processos gerais. A **Tabela 5** resume os esquemas de reúso com ambos os sistemas de tratamento (ou seja, BRM e BRM + NF) para o processo CIP, enquanto a **Tabela 6** apresenta os resultados para os processos gerais.

**Tabela 5. Dados de reúso após regeneração, para o processo CIP, obtidos através do software Water Pinch.**

CIP				
SISTEMA	BRM		BRM + NF	
PARÂMETRO RESTRITIVO	DQO	STD	DQO	STD
ÁGUA TOTAL NECESSÁRIA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	1831,5	1831,5	1831,5	1831,5
ÁGUA TOTAL REUTILIZADA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	764,9	950,8	1221,0	1831,5
CONSUMO TOTAL DE ÁGUA POTÁVEL (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	1066,6	880,7	610,5	0
DIMINUIÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA POTÁVEL (%)	41,8	51,9	66,7	100

**Tabela 6. Dados de reúso após regeneração, para os processos gerais, obtidos através do software Water Pinch.**

PROCESSOS GERAIS				
SISTEMA	BRM		BRM + NF	
PARÂMETRO RESTRITIVO	DQO	STD	DQO	STD
ÁGUA TOTAL NECESSÁRIA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	378,0	378,0	378,0	378,0
ÁGUA TOTAL REUTILIZADA (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	276,6	65,8	378,0	360,8
CONSUMO TOTAL DE ÁGUA POTÁVEL (m <sup>3</sup> d <sup>-1</sup> )	101,4	312,2	0	17,2
DIMINUIÇÃO NO CONSUMO DE ÁGUA POTÁVEL (%)	73,2	17,4	100	95,4

Foi observado grande potencial da regeneração dos efluentes para sua utilização no processo CIP. Ao usar o sistema BRM, o esquema de reúso apresentou uma redução de 41,8% no uso de água potável (**Tabela 5**). A maior parte da água de reúso é aplicada na primeira etapa da CIP (610,5 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>), enquanto uma parcela menor dessa vazão (154,4 m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>) é utilizada para uma solução misturada com água potável e aplicada na próxima CIP estágios. Por outro lado, ao utilizar o sistema BRM + NF, tanto a primeira quanto a segunda etapa do processo CIP operaram com água de reúso. Vale ressaltar que, conforme observado na **Tabela 5**, ao avaliar apenas STD como parâmetro restritivo, todo o volume de água necessário para o processo CIP poderia ser preenchido com água de reúso, pois o valor de STD é inferior a 500 mg L<sup>-1</sup> (ver **Tabela 2** e **Tabela 4**). Porém, como é preciso selecionar o parâmetro mais restritivo (neste caso DQO), a redução do consumo de água potável foi de 66,7%.

Seguindo o mesmo padrão, a regeneração dos efluentes para uso no processo geral da indústria também apresentou grande potencial (ver **Tabela 6**). Nesse caso, a combinação do biorreator de membrana com o sistema de nanofiltração foi capaz de produzir água de reúso com qualidade suficiente para promover uma redução de 95,4 % no uso de água na indústria.

## REDUÇÃO DA PEGADA HÍDRICA MEDIANTE ANÁLISE PINCH – AVALIAÇÃO DE ROTAS DE REÚSO

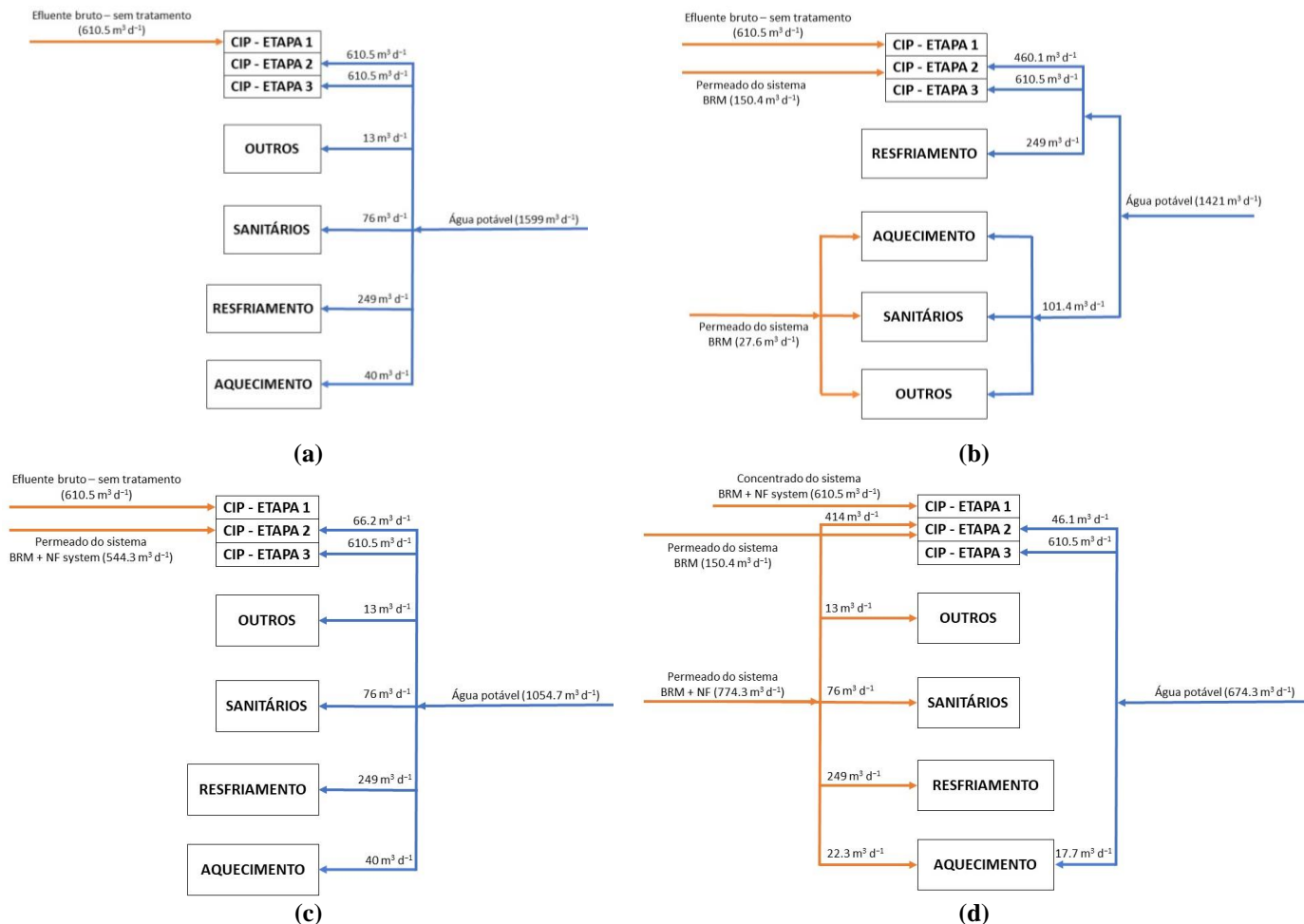
Os resultados da análise pinch mostraram que todos os esquemas de recuperação melhoram o consumo de água potável. Neste contexto, foram propostas quatro rotas de reúso: Rota 1 – Apenas reúso/reciclagem direta dos efluentes; Rota 2 – Reúso/reciclagem direta de efluentes no CIP e reúso após regeneração com BRM nos processos gerais; Rota 3 - Reúso/reciclagem direta de efluentes no CIP e reúso após regeneração com BRM + NF em processos gerais; Rota 4 - Reúso/reciclagem direta de efluentes no CIP, reúso após regeneração com BRM + NF nos processos gerais e reúso do concentrado de NF. Cada rota difere da outra devido ao uso de efluentes de um tratamento de água diferente. A seleção e avaliação destas rotas justificam-se pelo facto de nem sempre a rota que promove a máxima minimização de água potável ser a rota mais viável.

A Rota 1 baseia-se no simples reúso/reciclagem dos efluentes, sem a necessidade de nenhum tipo de tratamento além de peneiramento e flotação. Nesta rota,  $610,50 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de efluente bruto são reutilizados diretamente na etapa 1 do CIP. De acordo com os cálculos do WPA,  $2,00 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  também poderiam ser reutilizados para uma solução de mistura com água potável e aplicados para a etapa do CIP 2. Porém, como a quantidade de efluente a ser reaproveitada para a solução não é significativamente relevante, ela foi desconsiderada para o projeto da Rota 1. Esta rota promoveu uma redução de 27,6 % no consumo de água potável, considerando que todos os fluxos de água necessários para os referidos processos da indústria eram provenientes de fontes de água potável, ou seja,  $2209,5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ .

Assim como na Rota 1, a Rota 2 foi construída pelo reúso/reciclagem direta de efluentes para a etapa 1 do CIP ( $610,5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ). Além disso, nesta rota,  $150,4 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  do permeado BRM são reaproveitados na etapa 2 do CIP e  $27,6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  nos processos gerais, promovendo uma minimização do consumo de água de 35,7%. Na rota 3, dos  $1.699,0 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de efluente bruto gerado pela indústria,  $610,5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  seriam reaproveitados diretamente na etapa 1 do CIP. Os  $1.088,5 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  restantes seriam direcionados para tratamento (BRM + NF). Como taxa de recuperação do tratamento de nanofiltração, foi considerado um valor conservador de 50%; assim, apenas  $544,3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de fluxo de permeado estariam disponíveis para serem reutilizados na etapa 2 do CIP. Vale ressaltar que a taxa de recuperação no local pode ser maior ao adotar estratégias para otimizar o processo de membrana. Essa rota pode reduzir em 52,3% o uso de água na indústria.

Por fim, a Rota 4 apresenta o percurso mais eficiente em termos de minimização do consumo de água. Nesta rota,  $150,4 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  da vazão total de efluentes produzidos pela indústria seriam tratados apenas com um sistema BRM e o permeado gerado seria utilizado na etapa 2 do CIP. O restante do efluente ( $1548,6 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$ ) seria ser tratado pelo sistema BRM + NF, gerando assim  $774,3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de permeado e  $774,3 \text{ m}^3 \text{ d}^{-1}$  de concentrado. O concentrado desse sistema seria direcionado para a etapa 1 da CIP, enquanto o permeado seria utilizado como água de entrada nos processos gerais da empresa e na etapa 2 da CIP. Com a aplicação dessa rota, 69,5% do consumo de água poderia ser reduzido. A **Figura 2** apresenta um fluxograma simplificado de todas as rotas propostas.





**Figura 2. Fluxograma de reúso de água pela (a) Rota 1, (b) Rota 2, (c) Rota 3 e (d) Rota 4.**

Como esperado, a Rota 4 foi a mais eficiente dentre as avaliadas, a minimização do uso de água potável pode chegar a 69,5% (de 2209,5 para 636,3 m³ d⁻¹); enquanto a redução no consumo de água das vias 1, 2 e 3 foi de 27,6%, 35,7% e 52,3%, respectivamente. No entanto, ao se elaborar um plano de reúso de água, muitos aspectos devem ser levados em consideração, como: custo do tratamento e tanques para armazenamento de efluentes, área necessária para sistemas de tratamento, tubulações separadas para cada tipo de efluente, pessoal para a gestão da água, entre outros. Assim, nem sempre a rota que apresenta maior eficiência na redução do consumo de água é a mais viável para a indústria. Além disso, os resultados confirmam que o reúso de água deve ser feito de forma sistemática; o plano de reutilização não pode ser conduzido sem a consideração de uma aplicação mais ampla. Além disso, a análise pinch é uma ferramenta importante para auxiliar na elaboração de planos de reúso de água.

## CONCLUSÕES

Este estudo indica a viabilidade da aplicação de um sistema de tratamento baseado em tecnologias de membranas para a descontaminação de efluentes, provenientes de uma indústria de laticínios, para sua reutilização em processos industriais. Os requisitos de qualidade da água para os processos industriais, a qualidade dos efluentes gerados e as eficiências de tratamento dos sistemas de membrana desempenharam um papel importante no desenvolvimento de esquemas de reúso de água. O esquema de reúso/reciclagem direta dos efluentes da indústria de laticínios mostrou-se uma abordagem interessante, sendo capaz de reduzir o consumo de água potável para o processo CIP em 33,4% sem a necessidade de qualquer tratamento adicional. Porém, ao submeter os efluentes da indústria de laticínios ao tratamento por tecnologias de membranas, a água produzida possui qualidade para ser utilizada em diversos setores da indústria, bem como em maiores quantidades. Os esquemas com a regeneração dos efluentes apresentaram até 66,7% e 95,4% de redução de

água potável para o CIP e processos gerais, respectivamente. Por fim, uma rota proposta (Rota 4) que combinava o reúso/reciclagem direta de efluentes com a regeneração dos mesmos e o uso de fluxos de permeado/concentrado de sistemas BRM e BRM + NF apresentou o melhor desempenho em termos de redução de o consumo total de água potável (69,5%) na indústria de laticínios. No entanto, muitos aspectos devem ser levados em consideração na implantação de um plano de reúso de água (por exemplo, custo do tratamento e tanques para armazenamento de efluentes, área necessária para sistemas de tratamento, tubulações separadas para cada tipo de efluente, pessoal para a gestão da água, entre outros). Os resultados obtidos reforçam o potencial não só de consolidar tecnologias de membranas para o tratamento de efluentes de diversas origens, mas também de permitir o desenvolvimento de diretrizes para promover a viabilidade do reúso de efluentes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. B, R.K., S. Bhuvaneshwari, F. Majeed, M.M. M, E. Jose, and A. Mohan, Different treatment methodologies and reactors employed for dairy effluent treatment - A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2022. 46: p. 102622. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102622>.
2. Food and A.O.o.t.U. Nations, Overview of global dairy market developments in 2018. *Dairy Market Review*, 2019.
3. Wang, Y. and L. Serventi, Sustainability of dairy and soy processing: A review on wastewater recycling. *Journal of Cleaner Production*, 2019. 237: p. 117821. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117821>.
4. Skouteris, G., S. Ouki, D. Foo, D. Saroj, M. Altini, P. Melidis, B. Cowley, G. Ells, S. Palmer, and S. O'Dell, Water footprint and water pinch analysis techniques for sustainable water management in the brick-manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 2018. 172: p. 786-794. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.213>.
5. Kamat, S. and S. Bandyopadhyay, Bi-objective Pinch Analysis of heat integrated water conservation networks. *Journal of Cleaner Production*, 2021. 312: p. 127676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127676>.
6. Wan Alwi, S.R. and Z.A. Manan, 10 - Water Pinch Analysis for Water Management and Minimisation: An Introduction, in *Handbook of Process Integration (PI)*, J.J. Klemeš, Editor. 2013, Woodhead Publishing. p. 353-382. <https://doi.org/10.1533/9780857097255.3.353>.
7. Ahmad, N.N.R., W.L. Ang, Y.H. Teow, A.W. Mohammad, and N. Hilal, Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 2022. 45: p. 102478. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102478>.
8. Scandelai, A.P.J., J.P. Zotesso, J.C.M. Vicentini, L. Cardozo Filho, and C.R.G. Tavares, Intensification of supercritical water oxidation (ScWO) by ion exchange with zeolite for the reuse of landfill leachates. *Science of The Total Environment*, 2021. 794: p. 148584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148584>.
9. Sosa-Fernandez, P.A., J.W. Post, H. Bruning, F.A.M. Leermakers, and H.H.M. Rijnaarts, Electrodialysis-based desalination and reuse of sea and brackish polymer-flooding produced water. *Desalination*, 2018. 447: p. 120-132. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.09.012>.
10. Andrade, L.H., F.D.S. Mendes, J.C. Espindola, and M.C.S. Amaral, Nanofiltration as tertiary treatment for the reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor. *Separation and Purification Technology*, 2014. 126: p. 21-29. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.01.056>.
11. Tang, C.Y., Z. Yang, H. Guo, J.J. Wen, L.D. Nghiem, and E. Cornelissen, Potable Water Reuse through Advanced Membrane Technology. *Environmental Science & Technology*, 2018. 52(18): p. 10215-10223. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00562>.
12. Ghernaout, D., Y. Alshammari, A. Alghamdi, M. Aichouni, M. Touahmia, and N. Ait Messaoudene, Water reuse: Extenuating membrane fouling in membrane processes. *International Journal of Environmental Chemistry*, 2018. 2: p. 1-12. <https://doi.org/10.11648/j.ijec.20180201.11>.



13. Douglas Felipe, G., Membrane Technology and Water Reuse in a Dairy Industry, in Technological Approaches for Novel Applications in Dairy Processing, K. Nurcan, Editor. 2018, IntechOpen: Rijeka. p. Ch. 9. <https://doi.org/10.5772/intechopen.76464>.
14. Hogeboom, R.J., The Water Footprint Concept and Water's Grand Environmental Challenges. One Earth, 2020. 2(3): p. 218-222. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.02.010>.
15. Foo, D., Process integration for resource conservation. 2016: CRC press.
16. Chin, H.H., P.Y. Liew, P.S. Varbanov, and J.J. Klemeš, Extension of pinch analysis to targeting and synthesis of water recycling networks with multiple contaminants. Chemical Engineering Science, 2022. 248: p. 117223. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117223>.
17. Jia, X., J.J. Klemeš, S.R.W. Alwi, and P.S. Varbanov, Regional Water Resources Assessment using Water Scarcity Pinch Analysis. Resources, Conservation and Recycling, 2020. 157: p. 104749. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104749>.
18. Souifi, M. and A. Souissi, Simultaneous Water and Energy Saving in Cooling Water Networks Using Pinch Approach. Materials Today: Proceedings, 2019. 13: p. 1115-1124. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.04.079>.
19. Federation, W.E. and A. Association, Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA, 2005. 21.
20. Federação das Indústrias do Estado de São Paulo - FIESP, Conservação e reúso de água: Manual de orientações para o setor industrial. 2011.