



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



LEANDRO MARQUES PAIM

**AVALIAÇÃO DO REUSO DE EFLUENTE TRATADO DE UMA INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA RIO-GRANDENSE EM UMA ETA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA
CLARIFICADA**

PORTO ALEGRE

2017

LEANDRO MARQUES PAIM

**AVALIAÇÃO DO REUSO DE EFLUENTE TRATADO DE UMA INDÚSTRIA
SIDERÚRGICA RIO-GRANDENSE EM UMA ETA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA
CLARIFICADA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado à Escola de Engenharia da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
como requisito parcial para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Liliana Amaral Feris

PORTO ALEGRE

2018

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| SUMÁRIO | I |
| AGRADECIMENTOS | II |
| RESUMO | III |
| LISTA DE FIGURAS | IV |
| LISTA DE TABELAS | V |
| LISTA DE GRÁFICOS | VI |
| LISTA DE SÍMBOLOS | VII |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS | VIII |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS | 2 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 3 |
| 2.1 CICLO HIDROLÓGICO | 3 |
| 2.2 IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO E A ESCASSEZ DA ÁGUA | 5 |
| 2.2.1 Disponibilidade hídrica | 6 |
| 2.2.2 Legislação dos Recursos Hídricos | 6 |
| 2.3 REUSO DE ÁGUA INDUSTRIAL | 7 |
| 2.3.1 Formas de usos e especificações | 8 |
| 2.3.2 Torres de Resfriamento | 9 |
| 2.3.2.1 Ciclos de Concentração | 10 |
| 2.3.2.2 Problemas em torres de resfriamento | 11 |
| 2.4 ÁGUA DE PROCESSO E A SIDERURGIA | 13 |
| 2.4.1 Moldes | 15 |
| 3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 17 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 20 |
| 5 RESULTADOS | 22 |
| 6 CONCLUSÕES | 33 |
| 7 REFERÊNCIAS | 35 |

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer à minha família, por ter tornado possível o sonho de me tornar engenheiro, tanto financeiramente, quanto em afeto e apoio. À minha namorada, Débora, que, mesmo à distância, ouviu minhas ânsias e preocupações durante o último ano de curso, e soube prover lucidez às minhas angústias. Ao engenheiro José Thiago, por ter me guiado a este tema apresentado. E, também, à minha orientadora e professora Liliana, por ter me dado a oportunidade de trabalhar em um projeto de iniciação científica durante o curso, e ao final, me instigado a dar o meu melhor na elaboração deste trabalho de conclusão de curso.

RESUMO

A indústria é, em termos de consumo, o segundo maior consumidor de água do planeta. Levando em consideração o expressivo problema de escassez de água, técnicas de reutilização hídrica são cada vez mais estudadas e incentivadas. Em vista de redução de custos e maior apelo ambiental, o mercado fabril vem aplicando algumas formas de reutilização da água, que pode ser desde o reuso não planejado, até a reciclagem. Destacam-se, na indústria, a reutilização em trocadores de calor e em torres de resfriamento, responsáveis pela redução de temperatura da água no processo produtivo. Uma forma de avaliação do desempenho de uma torre de resfriamento é o cálculo do ciclo de concentração, que indica quantas vezes determinado parâmetro é concentrado por perdas por evaporação no sistema; tais parâmetros necessitam de controle para evitar problemas em equipamentos e sistemas. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho consiste em avaliar a viabilidade de reuso de efluente gerado em uma indústria siderúrgica do Rio Grande do Sul, como água de abastecimento da estação de tratamento de água (ETA) da própria empresa, a fim de ser utilizada nas torres de resfriamento. Para isso foram avaliadas amostras dos sistemas de água industrial da empresa (WI-1, WI-2, WI-3 e WI-4), de água bruta, após primeira filtragem da água captada do Rio dos Sinos, e do efluente industrial, objeto de interesse de reuso. Foram analisados os parâmetros pH, condutividade elétrica, sólidos suspensos, durezas total e cálcica, alcalinidade, sílica, cloretos, sulfatos e ferro, de agosto a novembro de 2017. Os resultados mostraram que o sistema de torres de resfriamento, WI-1 representou o limitante da análise realizada, cuja água é destinada aos moldes de cobre do lingotamento contínuo, da aciaria, com ciclo de concentração de 1,2. Tal conclusão é decorrente de simulações das taxas de entrada de efluente industrial e água bruta para cada sistema, comparando-se a concentração resultante de cada parâmetro, com diferentes relações de entrada, com o especificado por cada sistema. Obteve-se, como teor máximo na corrente de entrada da ETA, a taxa de 30% de efluente industrial e 70% de água bruta, em vazão, sem prejuízos aos sistemas, a partir do parâmetro dureza total. Em vista de obter-se um limite máximo para um parâmetro de fácil medição, comparou-se a dureza total, parâmetro limite, com a condutividade, propondo-se, assim, uma forma de operação com interrupção de fornecimento de efluente para condutividades acima de 300 μmhos . Estimou-se uma economia de $21,6 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{mês}$, com este *modus operandi*. Desta forma, confirmou-se a viabilidade técnica do reaproveitamento de efluente gerado pelo processo siderúrgico para a indústria de estudo, agregando valor ecológico à empresa.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Ciclo Hidrológico..... | 3 |
| Figura 2 – Produção do Aço..... | 14 |
| Figura 3 - Fluxograma do processo atual (sem retro lavagens de filtros) | 19 |
| Figura 4 - Fluxograma do processo proposto (sem retro lavagens de filtros) com reutilização de 30% da vazão de entrada da ETA com Efluente Industrial..... | 32 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Parâmetros aceitáveis para molde de cobre da KME | 16 |
| Tabela 2 – Tratamento dos sistemas de águas | 18 |
| Tabela 3 - Local e método de análise, parâmetros analisados e frequência | 20 |
| Tabela 4 - Valores médios obtidos de 1º de agosto à 06 de novembro, de 2017, do efluente industrial (WR), água bruta (WB) e sistemas de água industrial (WI's)..... | 24 |
| Tabela 5 - Ciclos de concentração médios, calculados a partir de todos os parâmetros medidos no período de análise. | 24 |
| Tabela 6 - Ciclos de concentração escolhidos para o cálculo, obtidos a partir do parâmetro dureza cálcica. | 25 |
| Tabela 7 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-1, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial. | 26 |
| Tabela 8 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-2, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial. | 27 |
| Tabela 9 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-3, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial. | 27 |
| Tabela 10 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-4, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial. | 28 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|----|
| Gráfico 1 - Valores de pH do efluente industrial em função do tempo em dias. | 22 |
| Gráfico 2 - Valores de condutividade elétrica do efluente industrial, em μ mhos, em função do tempo em dias..... | 22 |
| Gráfico 3 - Valores de sólidos suspensos totais do efluente industrial, em mg/L, em função do tempo em dias..... | 23 |
| Gráfico 4 - Dureza total do efluente industrial, medida em mg/L, através do tempo, em dias. | 30 |
| Gráfico 5 - Condutividade elétrica do efluente industrial, medida em μ mhos, através do tempo em dias..... | 30 |
| Gráfico 6 - Condutividade elétrica do efluente industrial, medida em μ mhos, através do tempo em dias, com limite de especificação. | 31 |

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_m : vazão de água de make-up (L/min)

C_m : Concentração de sal no make-up (mg/L)

Q_p : vazão de purga (L/min)

C_p : Concentração de sal na purga (mg/L)

Q_d : vazão de arraste (L/min)

C_d : Conc. de sal no arraste (mg/L)

Q_e : perda por evaporação (L/min)

C_e : Concentração de sal na perda por evaporação (mg/L)

Q_t : Vazão total de entrada na ETA (L/min)

C_t : Concentração da vazão total de entrada da ETA (mg/L)

Q_b : Vazão de água bruta na entrada da ETA (L/min)

C_b : Concentração de água bruta na entrada da ETA (mg/L)

Q_r : Vazão de efluente industrial (água recirculada) na entrada da ETA (L/min)

C_r : Concentração de efluente industrial na entrada da ETA (mg/L)

X_b : Razão entre vazão de alimentação de água bruta e vazão total

X_r : Razão entre vazão de alimentação de efluente industrial e vazão total

DT: Dureza total (mg/L)

DCa: Dureza cálcica (mg/L)

AT: Alcalinidade total (mg/L)

CC: Ciclo de concentração

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas

BU: Bloco de Utilidades

Cetel: Centro de tratamento de efluentes líquidos

CNRH: Conselho Nacional de recursos Hídricos

ETA: Estação de tratamento de água

Fepam: Fundação Estadual de Proteção Ambiental

SINGREH: Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

WB: Água bruta

WI-1: Sistema de água industrial 1

WI-2: Sistema de água industrial 2

WI-3: Sistema de água industrial 3

WI-4: Sistema de água industrial 4

WR: água recirculada ou efluente industrial

WZ-Laminação: água cinza, de contato direto com o aço, da área da laminação

WZ-Aciaria: água cinza, de contato direto com o aço, da área da aciaria

WZ-3: água cinza, de contato direto com o aço, da área da ampliados

1 INTRODUÇÃO

A escassez da água é tema recorrente quando o assunto é consciência ambiental, e motiva diversas iniciativas para minimização desse problema. Um dos principais consumidores de água no planeta é a indústria, sendo mandatórios estudos para reutilização de águas de processo e redução da emissão de efluentes.

A descarga de poluentes causa degradação orgânica, alta toxicidade às vidas aquáticas e eutrofização, juntamente com uma grave destruição ecológica (XIA ET AL., 2017). Milhares de pessoas são vítimas de doenças relacionadas à falta de tratamento de água e efluentes, no mundo, sendo necessário seu correto tratamento e controle de emissão (DA SILVA & COSTA CALHEIROS, 2015).

Apenas 3% de toda disponibilidade hídrica do planeta é composta de água doce, sendo menos da metade disponível para o ser humano, com 1,7% armazenada em geleiras e 0,76% em águas subterrâneas. Entre os setores com maior consumo dessa pequena parcela de água doce, destacam-se três: a agricultura, representando cerca de 70% do consumo, a indústria, com cerca de 20%, e o consumo doméstico, com utilização de aproximadamente 8% do total (DA SILVA & COSTA CALHEIROS, 2015). Como forma de controle do consumo, foram estabelecidas políticas nacionais, como a Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), que define o regime de outorga, com objetivo de assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água.

A reutilização da água é parte integrante da gestão hídrica sustentável, pois permite que a água permaneça no ambiente e seja preservada. Embora a implementação de técnicas de reutilização represente altos custos financeiros, a variada gama de opções de reutilização permite uma redução de custo nos processos (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012). As aplicações do reuso em nível industrial incluem abastecimento de caldeiras, sistemas de resfriamento de usinas energéticas e uso em sistemas de torres de resfriamento, cujas operações se baseiam em transferência de massa e calor entre a água e o ar. O reuso de efluente industrial reduz o descarte de água previamente tratada, evita impactos de construção de novos métodos de suprimentos d'água, além de representar uma alternativa sustentável de abastecimento (MILLER, 2006).

1.1 OBJETIVOS

Em virtude disso, o presente trabalho tem como objetivo o estudo da viabilidade de reuso de efluente gerado em uma indústria siderúrgica do Rio Grande do Sul, como água de abastecimento da estação de tratamento de água (ETA) da própria empresa, a fim de ser utilizada nas torres de resfriamento.

Os objetivos específicos foram:

- a) Avaliar as condições de operação da estação de tratamento de efluentes e dos sistemas de águas de contato indireto e a caracterização do efluente industrial e da água bruta;
- b) Com base nos dados obtidos, calcular os ciclos de concentração de cada sistema de água de contato indireto, abastecidos pela água produzida na ETA, através da determinação de um parâmetro representativo;
- c) Identificar o sistema e parâmetro limitantes do processo e obter a proporção máxima permitida entre efluente industrial e água bruta na entrada da ETA;
- d) Identificar, a partir de comparação de comportamento com o parâmetro limitante, uma característica do efluente, a qual seja possível ser analisada de forma constante visando a manutenção da qualidade da água de processo produzida, e estabelecer um limite de operação para esta;
- e) Propor regime de reutilização de efluente industrial.

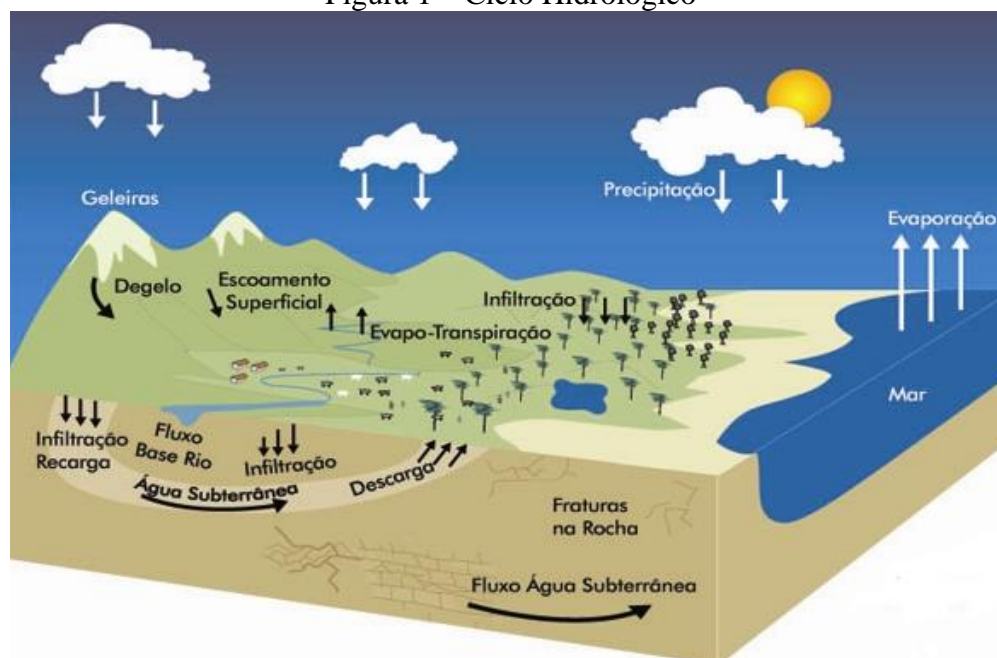
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLO HIDROLÓGICO

O ciclo hidrológico consiste em um fenômeno de troca contínua de água entre litosfera, atmosfera e biosfera, responsável por circular cerca de 0,01% de toda a água do planeta, constituindo fonte de vida para todos seres com vida da Terra. O ciclo hidrológico possui influência direta sobre a geologia terrestre e sobre a atmosfera, através do tempo, sendo a divisão da água entre os componentes do ciclo, determinante para o balanço hídrico de determinado local (NARASIMHAN, 2009).

As trocas envolvidas neste importante ciclo biogeoquímico, em geral, são evapotranspiração, precipitação, escoamento, sublimação, infiltração, derretimento de geleiras, escoamento de águas subterrâneas (KUNDZEWICZ, 2008). O ciclo, representado pela Figura 1, tem início na evaporação da água presente em superfícies líquidas e no solo que, somada à transpiração das plantas (evapotranspiração), forma o vapor d'água presente na atmosfera. Ao ser resfriado, ocorre a formação de nuvens e precipitação, em forma de chuva e neve (DA SILVA & COSTA CALHEIROS, 2015).

Figura 1 – Ciclo Hidrológico



Fonte: <http://www.aquafluxus.com.br/wp-content/uploads/2015/10/MA-CicloHidrologico.jpg>

Observa-se que parte da água precipitada pode evaporar antes mesmo de atingir o solo, sendo a porção a atingir a superfície passível de ser interceptada por vegetações e superfícies impermeáveis de áreas urbanas, de rápida evaporação (DA SILVA & COSTA CALHEIROS,

2015). Outra parte escoar sobre a superfície em direção aos oceanos, coletada pelo caminho por rios e lagos. Há, ainda, a porção que infiltra o solo entre a superfície e os lençóis freáticos, as águas subterrâneas, que mesmo sob ação da gravidade, o movimento descendente é resistido por camadas de terra de baixa permeabilidade, desviando a água em direção à corpos d'água superficiais (NARASIMHAN, 2009).

A força motriz do ciclo hidrológico é, em geral, a energia solar, com pequena contribuição de calor geotermal. A capacidade da água de realizar modificações mecânicas, interação química com rochas e minerais e transporte de sólidos dissolvidos e suspensos é o que permite a existência de erosão terrestre e ciclos biogeoquímicos. De forma geral, os ciclos hidrológico, biogeoquímicos e de erosão constituem os ciclos vitais que sustentam a vida (NARASIMHAN, 2009).

A água está intimamente ligada ao clima. As mudanças climáticas afetam o sistema hidrológico de muitas formas, através da transferência de massa e calor da atmosfera com os oceanos e com a superfície terrestre (KUNDZEWICZ, 2008). Segundo Zbigniew W.Kundzewicz (2008) a mudança climática afetará os recursos hídricos tanto de forma quantitativa, quanto qualitativa, aumentando seu potencial destrutivo nos próximos anos.

Como causadores potenciais dessa mudança climática, estão a industrialização e a exploração de recursos naturais de forma não controlada, afetando a vida humana em inúmeros aspectos. Um exemplo dessa mudança, é o clima no sul e centro da Europa, onde pode ser observada ondas de calor e secas mais frequentes, modificando o padrão de precipitação da região (BURGHILA, DORU, SARBU, & CIMPEANU, 2015).

Outro exemplo dessa mudança é a China, país com maior população do mundo e, conseqüentemente, o maior problema hídrico do planeta. A ação conjunta de poluição por gases de efeito estufa e variabilidade natural contribuem para as mudanças nas precipitações da Região da Monção Oriental da China (EMRC), sendo a primeira responsável por 30% das mudanças. Com o avanço das emissões de CO₂, haverá, no norte da China, um aumento de 4% no consumo de água na agricultura. E nesse ritmo, sem ações para modificação do cenário, a mudança no clima será um fator importante na mudança do ciclo hidrológico (XIA et al., 2017).

De forma alternativa à destruição, podem ser obtidos meios de minimizar os prejuízos através dos subciclos do ciclo hidrológico, aqueles que envolvem os transportes projetados de água. Entre eles, destacam-se a recuperação de água, o reciclo e o reuso em meios urbanos, industriais e em áreas agrícolas (METCALF & EDDY, 2003).

Os principais caminhos para o reuso da água incluem irrigação, uso industrial e os reabastecimentos de águas superficiais e subterrâneas. A quantidade de água transferida por

cada caminho depende das características da bacia hidrográfica, fatores climáticos e hidrogeológicos, o grau de utilização de água para diferentes aplicações e o tipo de reuso, indireto ou direto. Como tendência futura, a recuperação planejada da água se apresenta como fonte alternativa no contexto de gestão integrada dos recursos hídricos (METCALF & EDDY, 2003).

2.2 IMPORTÂNCIA DA CONSERVAÇÃO E A ESCASSEZ DA ÁGUA

Durante muitos anos a água foi considerada um recurso ilimitado. Porém, a redução de volume de água limpa no planeta preocupa especialistas e autoridades ambientais, pela importância que a água possui não apenas às necessidades biológicas, como também à geração de energia, ao saneamento básico, às indústrias e à inúmeras outras aplicações. A escassez da água é algo danoso para as formas vivas terrestres, sendo de suma importância para o desenvolvimento e manutenção dos ecossistemas. O seu fator vital a torna imprescindível para toda a população terrestre. Nos seres vivos, a água é o constituinte predominante, atuando como mantenedor da temperatura corporal e como veículo de assimilação e eliminação de inúmeras substâncias por seus organismos (COSTA & TELLES, 2007).

Em pesquisa de 2017, sobre a escassez da água e sua relação com fatores econômicos, os autores explicitam que os fatores responsáveis pela crise do recurso hídrico variam de acordo com a região observada e o seu nível de desenvolvimento econômico. A escassez da água, devido à efeitos das mudanças climáticas, já pode ser observada em países como Austrália e Brasil, e aqueles que já passaram por este tipo de situação estão mais propícios a sofrerem com mudanças socioeconômicas, como a Índia (DISTEFANO & KELLY, 2017).

Este problema hídrico é dominado por variáveis socioeconômicas, e exacerbado pela combinação com a mudança climática. Países como Índia e China, que têm seu crescimento ligado à sobre-exploração da água, tendem a enfrentar dificuldades para obter crescimento econômico. Tanto países desenvolvidos e em desenvolvimento, quanto àqueles com abundância em água, como Canadá, Rússia e Brasil, irão sofrer do mesmo problema, e terão que investir em tecnologias para melhoria na eficiência hídrica de seus países, bem como, incentivar mudanças nos padrões de consumo (DISTEFANO & KELLY, 2017).

2.2.1 Disponibilidade hídrica

Considera-se que apenas 3% da água do planeta terra seja doce, sendo os 97% restantes compostos por oceanos e mares. Desses 3%, a maior porção (1,7% do total) encontra-se na forma de geleiras ou em bancos de gelos nas calotas polares e 0,76% é água subterrânea. Assim, apesar de abundante, apenas pequena parte da água do planeta está acessível para consumo humano, adicionalmente ao fato de encontrar-se de forma irregular no tempo e espaço, sendo escasso em muitas regiões. A escassez da água possui um fator agravante, que é a má distribuição dos recursos hídricos no espaço em relação à concentração populacional, o volume per capita, apresentando baixos valores, principalmente nos continentes africanos e asiáticos. Isso pode ser evidenciado na má distribuição da densidade populacional dominante, no Brasil, que cresce de forma exacerbada em áreas de pouca disponibilidade hídrica (DA SILVA & COSTA CALHEIROS, 2015).

Ainda, cerca de 12% de toda água doce do planeta encontra-se em território nacional, distribuídas em 12 regiões hidrográficas, como as bacias de São Francisco, do Paraná e a Amazônica (a mais extensa do mundo). E, apesar de possuir um grande potencial hídrico, o país não possui uma distribuição homogênea de seus recursos, sendo necessário, assim, um consumo consciente (BRASIL, 2017).

A região metropolitana de São Paulo é um exemplo da má distribuição populacional, onde se apresentam graves problemas de disponibilidade de água para distribuição, devido à alta concentração populacional e má qualidade dos corpos d'água. Essa crise, pelo qual o planeta está passando, exige mudanças de gerenciamento para garantia de água para as próximas gerações (COSTA & TELLES, 2007).

2.2.2 Legislação dos Recursos Hídricos

Criado pela Lei nº 9.433/1997, o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH), tem por objetivo coordenar a gestão das águas do Brasil, implementar a Política Nacional de Recursos Hídricos, controlar a utilização e proteção dos recursos hídricos e promover a cobrança pelo seu uso. Neste sistema estão inseridos o Conselho Nacional de recursos Hídricos (CNRH) e a Agência Nacional de Águas (ANA), assim como os Conselhos Estaduais. Entre os usos sujeitos à outorga dos recursos hídricos, pelo Poder Executivo Federal ou do Estado, está a captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo, como também o

lançamento de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos em corpos d'água, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final (POMPEU, 2008).

Devido à sua grande importância, a Lei nº 9.433, de 1997, estabelece a água como um bem de domínio público e como um recurso natural limitado, dotado de valor econômico. Em situações de escassez, o uso prioritário é para o consumo humano e para saciar os animais. A lei estabelece, ainda, em seu capítulo II, artigo 20, que é dever da população assegurar a qualidade da água às gerações futuras, com promoção de uso racional e integração dos recursos hídricos (BRASIL, 1997).

Em sua seção IV, explicita que a cobrança do uso de recursos hídricos tem por objetivo reconhecer a água como bem econômico e de incentivar a racionalização da água. Em seu artigo 21, determina que devem ser analisadas quantidades de captação e lançamentos, e suas respectivas variações, bem como características físico-químicas, biológicas e de toxicidade do afluente (BRASIL, 1997).

Segundo a ANA, agência responsável pela outorga dos Recursos Hídricos da União, estados como Ceará, São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais possuem sistemas oficiais de cobrança pelo uso de recursos hídricos. O primeiro estado a realizar este tipo de ação é o Ceará, captando em 2016, aproximadamente, 100 milhões de reais. Atualmente, nos rios de domínio da União, a cobrança está implementada nas Bacias do Rio Paraíba do Sul, nas Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, na Bacia do Rio São Francisco, na Bacia do Rio Doce, na Bacia do Rio Paranaíba e na Bacia do Rio Verde Grande (BRASIL, 2017).

2.3 REUSO DE ÁGUA INDUSTRIAL

A reutilização de recursos hídricos é um tema cada vez mais importante e como qualquer outro investimento, há sempre a necessidade de avaliação da relação custo x benefício. Porém, o assunto “água” transcende esse tipo de abordagem, pois uso consciente e formas de reaproveitamento de águas residuais é o caminho para que não falte este recurso para as gerações futuras (COSTA & TELLES, 2007).

Na indústria, a racionalização da água, seja ela através de consumo consciente ou pela reutilização de efluentes gerados, pode trazer grandes benefícios ambientais, pois mantém uma maior disponibilidade hídrica para outros usos e tende a reduzir a chance de poluição, através de seu descarte. Além disso, há a possibilidade de redução de custos de captação de água, visto que há uma forte tendência em serem cobradas remunerações pelo uso de Recursos Hídricos,

conforme Lei nº 9.433, que define a água como um bem de domínio público e dotado de valor financeiro (FIRJAN & SEBRAE-RJ, 2015).

As águas residuais podem ter diferentes finalidades, quando não o seu descarte, como em atividades agrícolas (irrigação de plantas), usos domésticos (descargas sanitárias), processos industriais (sistemas de resfriamento), entre outros. Sendo assim, a técnica de reuso deve ser realizada de forma responsável, para que não tragam riscos à sociedade, ou ao sistema ao qual será aplicado. Para isso, devem ser avaliados certos parâmetros de qualidade, exigidos pelos fins específicos de utilização (RODRIGUES et al., 2017).

2.3.1 Formas de usos e especificações

Para que se possa definir de forma mais clara os tipos e formas de reuso, dividiu-se o reuso em direto e indireto, de forma planejada ou não (COSTA, 2007):

a) Reuso indireto não planejado da água: se dá, quando a água utilizada em alguma atividade humana é descartada no meio ambiente e, então, utilizada a jusante de forma não intencional e não controlada, podendo estar sujeita a ações naturais do ciclo hidrológico, como diluição e autodepuração.

b) Reuso indireto planejado da água: é quando um efluente tratado é lançado de forma planejada em um determinado corpo d'água para ser utilizado controladamente a jusante. O corpo receptor intermediário não pode ser poluído, para que ocorra a diluição do efluente sem contaminação.

c) Reuso direto planejado de águas: ocorre quando o efluente é descarregado em seu ponto de descarga e retornado diretamente, de forma planejada, ao local de reuso, sendo este o caso de maior ocorrência nas indústrias.

d) Reciclagem de água: forma de reuso direto planejado, porém sem passar por tratamento e descarte. Trata-se de um reuso interno da água, sendo reciclada internamente no processo.

Para avaliação da natureza dos despejos industriais, devem ser analisados os casos, individualmente, pois não há possibilidade de padronização de qualidade e de especificações para reuso. Os padrões de qualidade da água, para os sistemas onde o reuso é pretendido, são limitados por padrões administrativos ou operacionais, podendo ser devido à aparência do efluente ou de sua inconveniência de utilização. Entre eles, pode-se destacar a dureza, alcalinidade e salinidade excessiva (COSTA & TELLES, 2007).

Tais variações de padronizações são explicitadas pelas diversas aplicações possíveis para águas de reuso que englobam diversos tipos de indústrias, como as usinas de energia, de celulose e papel, e aquelas que demandam altas taxas de utilização de água. Reciclo de água em circuitos fechados para reaproveitamento em um mesmo sistema e água recuperada de uso municipal, por exemplo, com aplicação em indústrias, como em torres de resfriamento, são algumas das aplicações do conceito de reuso. Esta reutilização, como reposição em sistemas de torres de resfriamento, é, inclusive, a principal aplicação de reuso de água na indústria, já que representa de um quarto à mais da metade do uso total de água de uma indústria (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.2 Torres de Resfriamento

Torres de resfriamento são sistemas de resfriamento utilizados para remoção de energia térmica de águas de processo através da evaporação parcial e de calor sensível. As torres de resfriamento são utilizadas, geralmente, para prover água resfriada para sistemas de ar-condicionado, indústrias, e geração de energia elétrica (BAHADORI, 2016).

Existem, basicamente, dois tipos de torres de resfriamento: as de circulação natural e de tiragem mecânica. O primeiro tipo engloba os primeiros sistemas de torres a serem construídos, onde a água é bombeada até o alto e, então, pulverizada por bicos sobre a torre, aumentando a área de contato água/ar. O ar, por sua vez, tem sua admissão através de venezianas laterais. A água, em contato com o ar, evapora parcialmente e a água resfriada remanescente, sob a ação da gravidade, é coletada em uma bacia de água fria na qual é, então, reutilizada para o processo. A adição de obstáculos internos intensificam a distribuição de energia térmica da água, aumentando a superfície de contato entre o ar e a água, induzindo a evaporação (BAHADORI, 2016).

A circulação de ar nas torres pode ser por tiragem forçada, as quais possuem ventiladores situados na base ou lateral da torre, ou de tiragem induzida, as quais possuem ventilador localizado em seu topo. A circulação de ar pode, ainda, ser de forma cruzada ou contracorrente. Neste, a torre possui venezianas em sua base para que o ar seja direcionado em movimento ascendente à sua estrutura, efetuando contato com a água descendente de forma contracorrente. Nas torres de circulação cruzada, o ar se movimenta de forma horizontal através dos obstáculos internos, enquanto a água flui em movimento descendente (BAHADORI, 2016).

As torres de resfriamento, em geral, exigem água de make-up para repor a massa líquida perdida durante seus ciclos de operação, possuindo uma alta eficiência, em torno de 1,5% de água é perdida por evaporação a cada 6°C de redução de temperatura. Porém, devido à evaporação, o sistema tende a apresentar uma grande elevação de determinados parâmetros, como sólidos suspensos e dureza, sendo necessária a remoção ou tratamento da água para prevenir grandes acúmulos no sistema e possível prejuízo no processo. Este efeito de concentração excessiva de sais pode ser evitado ou minimizado por purgas do sistema, que se tratam da remoção de parte da água concentrada de sais e, simultânea, adição de água de make-up. Essa variação da purga controla a concentração dos parâmetros da água da torre, e é medido pelos ciclos de concentração (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2012).

2.3.2.1 Ciclos de Concentração

Sob condições normais de operação, as torres de resfriamento perdem água por arraste, evaporação e purgas do sistema. O arraste se dá pela ação do vento no topo da torre, onde ocorre o arraste das gotículas de água. Na evaporação ocorre apenas a perda de água pura, ocasionando um aumento na concentração de sais no sistema. Sendo assim, necessárias as purgas do sistema, que consistem na descarga de uma porção de água de resfriamento com maiores concentrações de sais (METCALF & EDDY, 2003).

Para que haja equilíbrio no balanço de concentrações, há a necessidade de adição de água no sistema, a água de make-up (de reposição), resultando no seguinte balanço:

$$Q_m C_m = Q_p C_p + Q_d C_d + Q_e C_e \quad (1) \quad (\text{METCALF \& EDDY, 2003}).$$

A vazão de arraste é, normalmente, desprezível, assim como a perda por evaporação, como apresentado anteriormente, na porcentagem evaporada a cada unidade reduzida de temperatura, em graus celsius (METCALF & EDDY, 2003). Assim, obtém-se:

$$Q_m C_m = Q_p C_p \quad (2)$$

Observa-se na equação 2, que a magnitude da vazão de purga é diretamente proporcional à concentração de potenciais sais precipitantes na água de make-up. Assim, a relação entre a concentração de sal C_p na purga e a concentração de sais na reposição C_m é conhecida como ciclos de concentração (CC) (Metcalf & Eddy, 2003).

$$CC = C_p / C_m \quad (3)$$

A partir da definição acima, são feitas análises de parâmetros e de eventuais problemas que podem ser desencadeados no sistema. Um exemplo é quando o ciclo resultante está entre 3

e 7. Nesta faixa, os sólidos na água de circulação podem exceder seus limites de solubilidade e precipitar, formando depósitos no sistema (METCALF & EDDY, 2003).

2.3.2.2 Problemas em torres de resfriamento

Em termos gerais, as torres de resfriamento estão passíveis à quatro problemas principais: (a) Corrosão, (b) Deposição, (c) Crescimento Biológico e (5) Fouling (METCALF & EDDY, 2003).

a) Corrosão: é a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio, com a presença ou não de esforços mecânicos. Esta deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o meio pode causar modificações estruturais, impossibilitando seu uso (GENTIL, 1996). A qualidade da água afeta significativamente esse fenômeno, principalmente contaminantes como sólidos suspensos dissolvidos, que acabam por aumentar a condutividade elétrica da solução. Outros fatores, como temperatura, pH e presença de certos metais podem intensificar a corrosão. Para controle, é necessário o uso de inibidores de corrosão, que formando-se assim uma película protetora sobre a superfície dos materiais (METCALF & EDDY, 2003).

b) Deposição: é um acúmulo de materiais que pode ocorrer nas superfícies do sistema, como incrustações, podendo reduzir a eficiência da troca térmica. Depósitos de cálcio e magnésio (carbonatos e fosfatos, p.e.) são grandes responsáveis por deposições. Depósitos de silicatos também são fontes de acúmulo nas superfícies e representam grande dificuldade de remoção (METCALF & EDDY, 2003). Adições de dispersantes (como polímeros) formam substâncias não aderentes, quando em contato com impurezas, diminuindo as taxas de deposição, e podem servir como solução para o problema.

c) Crescimento Biológico: ambientes quentes, úmidos e com presenças de nutrientes como compostos de nitrogênio e fósforo, estimulam o crescimento biológico de microrganismos, levando à indesejáveis problemas aos trocadores de calor. Corrosão, entupimento, redução de eficiência de troca térmica são alguns dos sintomas causados por um crescimento microbiológico acelerado. Assim, são necessários tratamentos com biocidas, limpezas periódicas para retiradas de resíduos do sistema, para que os problemas citados sejam minimizados. Um fator agravante deste problema é a presença de sólidos suspensos em águas de resfriamento, o que incorre em problemas anteriormente apresentados (METCALF & EDDY, 2003).

d) Fixação e crescimento de depósitos (entupimento): o fenômeno de crescimento e fixação de depósitos sólidos resultantes de crescimento de algas, de deposições de sólidos suspensos, materiais de corrosão, é outro problema que reduz a eficiência do trocador de calor, e deve ser evitado com a adição de dispersantes ao sistema para remoção de constituintes indesejáveis (METCALF & EDDY, 2003).

Cabe ser destacado, que cada sistema possui exigências específicas, porém, entre os parâmetros pertinentes, alguns surgem com maior ou menor importância, no que diz respeito aos limitadores do sistema. Como:

a) Condutividade elétrica: representa a habilidade da água em conduzir corrente elétrica. Efeito gerado pela presença de íons em solução, dependente dos sais dissolvidos (METCALF & EDDY, 2003; RICHTER, 1991).

b) pH: importante parâmetro de qualidade em águas residuais, representa a concentração do íon hidrogênio (METCALF & EDDY, 2003; RICHTER, 1991).

c) Dureza: propriedade, responsável por incrustações em sistemas de água quente, representada pela presença de alguns íons metálicos, como os de cálcio (Ca^+) e magnésio (Mg^+). A dureza é expressa em termos de CaCO_3 e é distinguida pela dureza do cálcio e dureza do magnésio. Classificação do grau de dureza (RICHTER, 1991):

- Moles: Dureza < 50 mg/L em CaCO_3 ;
- Dureza moderada: 50 < Dureza < 150 mg/L em CaCO_3 ;
- Duras: 150 < Dureza < 300 mg/L em CaCO_3 ;
- Muito Duras: Dureza > 300 mg/L em CaCO_3 .

d) Alcalinidade: é resultante da presença de hidróxidos (OH^-), carbonatos (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-) de elementos como cálcio e magnésio. Mais comumente expressa em concentração de carbonato de cálcio (CaCO_3). A alcalinidade ajuda na resistência à mudanças de pH, causadas pela adição de ácidos, e é medida pela quantidade de ácido adicionada até se atingir determinado valor de pH (METCALF & EDDY, 2003; RICHTER, 1991).

e) Cloretos: parâmetro de preocupação em efluentes, pois impacta nas aplicações de reúso. Em águas naturais, são provenientes de lixiviação de rochas contendo cloretos (METCALF & EDDY, 2003).

f) Sulfatos: íons sulfato aparecem naturalmente em corpos d'água. O enxofre é necessário na síntese da proteína e é lançado em sua degradação. Sob condições anaeróbias, o sulfato é reduzido biologicamente em sulfeto, que pode combinar-se com hidrogênio para formar sulfeto de hidrogênio (H_2S). Este gás tende a ocupar espaços vazios da tubulação, acumulando-se no topo, podendo oxidar-se biologicamente em ácido sulfúrico, causando

corrosão em tubos de concreto. O sulfeto de hidrogênio, ao misturar-se com os gases da água residual (CH_4 e CO_2), são corrosivos à tubulações de gás (METCALF & EDDY, 2003).

g) Ferro: em seu estado férrico (Fe^{+3}), ao ser exposto ao ar ou em adição à oxidantes, o ferro pode hidrolisar formando óxido férrico hidratado com aspecto avermelhado e insolúvel. Na ausência de formação de complexo com íons, o íon férrico não é significativamente solúvel, a não ser que o pH seja reduzido. Elevados níveis de ferro na água podem causar manchas na tubulação (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION et al., 2012).

h) Sílica: as formas aquosas mais comuns são H_4SiO_4 e H_3SiO_4 que, em presença de magnésio, podem formar deposições em caldeiras e trocadores de calor (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION et al., 2012).

i) Sólidos Totais: é uma das características físicas mais importantes, composta principalmente por sólidos suspensos totais e sólidos dissolvidos. Em geral, caracteriza-se por matéria em suspensão, matéria sedimentável, coloidal e em solução. Os sólidos suspensos totais são medidos após a passagem da amostra por um filtro com determinada porosidade. Os sólidos retidos são medidos, em massa, após terem sido secos e os sólidos suspensos totais são obtidos. A massa de sólidos que passa pelo filtro é caracterizada como sólidos dissolvidos (METCALF & EDDY, 2003).

2.4 ÁGUA DE PROCESSO E A SIDERURGIA

A metalurgia é um processo que integra diversos tratamentos físico-químicos, a partir de diferentes minerais para extração de metais, como o ferro (MOURÃO et al., 2007). A metalurgia para obtenção do aço é conhecida como siderurgia; processo iniciado por volta de 1200 a.c., e que chegou ao Brasil na década de 1810 nos estados de Minas Gerais e São Paulo (INSTITUTO AÇO BRASIL, n.d.). O processo siderúrgico induz intensivo consumo de ferro, carvão e água, causando impactos significativos ao meio ambiente; problema crescente até a década de 90 que, com a realização da Rio 92, houve intensificação no conceito de *eco-eficiência* para controle de emissões atmosféricas e tratamento de efluentes, tornando o reuso de água uma prática recorrente, com taxa de recirculação atual de 96% (FALLIS, 2013).

Para a produção do aço, liga constituída basicamente de ferro e carbono, há duas rotas de produção, as ditas usinas integradas e as usinas semi-integradas, conforme apresentado na Figura 2. Nas primeiras, o processo é composto por três etapas: a redução, o refino e a laminação, sendo a redução a etapa diferenciadora entre os dois processos. Nas usinas

integradas, a etapa de redução é destinada para a formação do ferro-gusa, através do contato do carvão com oxigênio, fornecendo energia para a redução do minério de ferro em metal líquido. Já nas semi-integradas, utilizam-se gusa sólido e sucata metálica para aplicação nas etapas de refino e laminação (INSTITUTO AÇO BRASIL, n.d.).

Figura 2 – Produção do Aço



Fonte: Gerdau, 2007.

No refino, a aciaria transforma o gusa líquido ou sólido e a sucata em aço líquido, para formar produtos semiacabados, lingotes e blocos. Estes vão para a etapa de laminação onde são processados em laminadores para produção de diversos produtos siderúrgicos, como os tarugos e fio máquina; para estas etapas, há a utilização de águas de processo de contato direto, para resfriamento do aço e as águas de contato indireto, para resfriamento de equipamentos (INSTITUTO AÇO BRASIL, n.d.).

Um exemplo de água de contato indireto, é a utilizada no lingotamento contínuo, etapa intermediária entre a preparação do aço e a laminação. O princípio deste método é simples, e se baseia na fundição do aço, em uma panela, a qual descarrega o aço líquido no equipamento de lingote. O aço líquido flui a uma taxa controlada através do funil e por um bocal de entrada submerso tem sua admissão em um ou mais moldes (LOUHENKILPI, 2014).

A primeira solidificação ocorre na interface metal/molde, este constituído, geralmente, de cobre e refrigerados à água. A solidificação ocorre progressivamente com a saída do aço através da máquina, e, conseqüentemente, a espessura da “casca” é aumentada na mesma taxa.

Ao sair do molde, a casca deve ser suficientemente espessa para suportar o contato direto com a água. Abaixo do molde, a casca é arrefecida por spray d'água. O resfriamento do molde é dito primário, e o por pulverização, o secundário. Ao final desse processo, o lingote é cortado e transferido aos laminadores (LOUHENKILPI, 2014).

Para garantir um processo de lingotamento sem problemas, um grande desafio é mantê-lo de forma contínua, sem interrupções. Alguns parâmetros devem ser controlados para garantir uma correta solidificação, como a química do aço, as oscilações do molde, a temperatura do aço, as condições secundárias de resfriamento, entre outras (LOUHENKILPI, 2014). Tais exigências, tornam a água de resfriamento dos moldes, um fator limitante do processo.

2.4.1 Moldes

No processo do lingotamento contínuo há diferentes tipos de equipamentos para solidificar o aço. Entre eles, estão os simples verticais, os curvos com moldes retos e os curvos com moldes curvos. Em todos os casos, as etapas de arqueamento e endireitamento podem ser subdivididos, reduzindo o stress mecânico e o risco de quebra do lingote. Sendo mais comum, o equipamento tipo arco com molde curvado (LOUHENKILPI, 2014).

Segundo Louhenkilpi, o molde é o coração do lingotamento. Sua função principal é produzir uma casca que seja sólida, com poucos defeitos e consistente o suficiente para conter o líquido central, enquanto o tarugo continua a ser solidificado (KME CC SEMINAR, 2003). Devido à grande importância do molde para o processo de lingotamento, deve se ter um grande controle nesse processo (LOUHENKILPI, 2014).

Um dos parâmetros que deve ser controlado, é a água de refrigeração. Segundo a fabricante KME, a velocidade de contato de água, deve ser superior à 9 m/s, para que não haja formação de vazios dentro do lingote, e não deve exceder 15 m/s, pois a partir dessa velocidade, o escoamento passa a ser turbulento, causando perdas na remoção do calor (KME CC SEMINAR, 2003). Além da velocidade de escoamento, alguns outros parâmetros da água devem ser atendidos, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros aceitáveis para molde de cobre da KME

| Parâmetro | | Unidade | Limite |
|-----------------------|--|---------|---------|
| Tamanho de partícula | Sólidos Suspensos | mm | 0,2 |
| Sólidos Totais | Suspensos e dissolvidos | mg/L | 20 |
| pH | | - | 7 - 8 |
| Sulfato | Conteúdo de sulfato | mg/L | 150 |
| Cl | Cloreto como Cl | mg/L | 50 |
| Dca | Dureza cálcica, total como CaCO ₃ | mg/L | 18 |
| Óleo | Conteúdo de óleo | mg/L | 1 |
| Salinidade | Salinidade total | mg/L | 400 |
| Temperatura | Temperatura de entrada | °C | 40 |
| Temperatura | Temperatura recomendada | °C | 25 – 35 |
| prodeltaT | Gradiente de temperatura | °C | 10 |
| Perda de água | | % | 0,5 |
| Pressão de escoamento | Sílica total como SiO ₂ | bar | > 6 |

Fonte: KME CC Seminar, 2003.

3 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho foi realizado em uma Indústria Siderúrgica do Rio Grande do Sul, mais especificamente na área de Utilidades. Área de apoio às demais áreas da Usina, é responsável pelo tratamento de águas e efluentes, distribuição de ar comprimido, controle de gases e manutenção de subestações de energia.

A indústria abordada é do tipo semi-integrada, onde são operadas duas fases da siderurgia, o refino e a laminação. Também conhecida como mini-mill, possui uma Aciaria com fornos elétricos a arco que fundem a matéria-prima para produção de aço. São utilizados ferro-gusa e sucata metálica como matérias-primas para a realização do primeiro passo da produção do aço, a fundição. Após a fundição, o processo segue pelo lingotamento contínuo, para formação do tarugo, pela laminação e trefilaria, gerando produtos finais. Como área de apoio, a Utilidades é responsável pelo abastecimento de água em praticamente todos os processos internos da empresa, sendo utilizada para refrigeração de equipamentos e produtos. O processo é realizado em circuito fechado, o que permite um reaproveitamento de, aproximadamente, 97% da água utilizada no processo.

A água para refrigeração de equipamentos é conhecida como água industrial, de contato indireto, e a água para refrigeração de aço no processo é chamada de água cinza, de contato direto. Estes sistemas são compostos por torres de resfriamento e filtros de areia para resfriamento e tratamento físico da água, além de piscinas para tratamento químico e remoção mecânica de carepa, resíduo formado no contato da água com o tarugo sob altas temperaturas. O excedente destes sistemas compõe o efluente industrial que, depois de tratado, volta ao Rio dos Sinos.

A indústria estudada situa-se às margens do Rio dos Sinos, o que torna prática a técnica de captação de água bruta. A água captada é utilizada para reposição de alguns sistemas, acima mencionados, e parte tratada em uma ETA, em floco-decantadores e filtros de areia, para produção de água clarificada. A água clarificada é utilizada para reposição dos sistemas de água industrial, como reposição dos sistemas de torres de resfriamento. Uma parte desta é utilizada como água de descarga dos vasos sanitários da Usina.

Os sistemas de água de refrigeração de contato indireto, água industrial, é subdividida em quatro sistemas. Tais sistemas, de 1 a 4, abastecem aciaria, laminações e trefilarias para resfriamento de rolos de laminação, moldes de lingotamento, entre outros. A água, dita água cinza, é composta por dois sistemas, o de resfriamento do aço na aciaria, e para arrefecimento

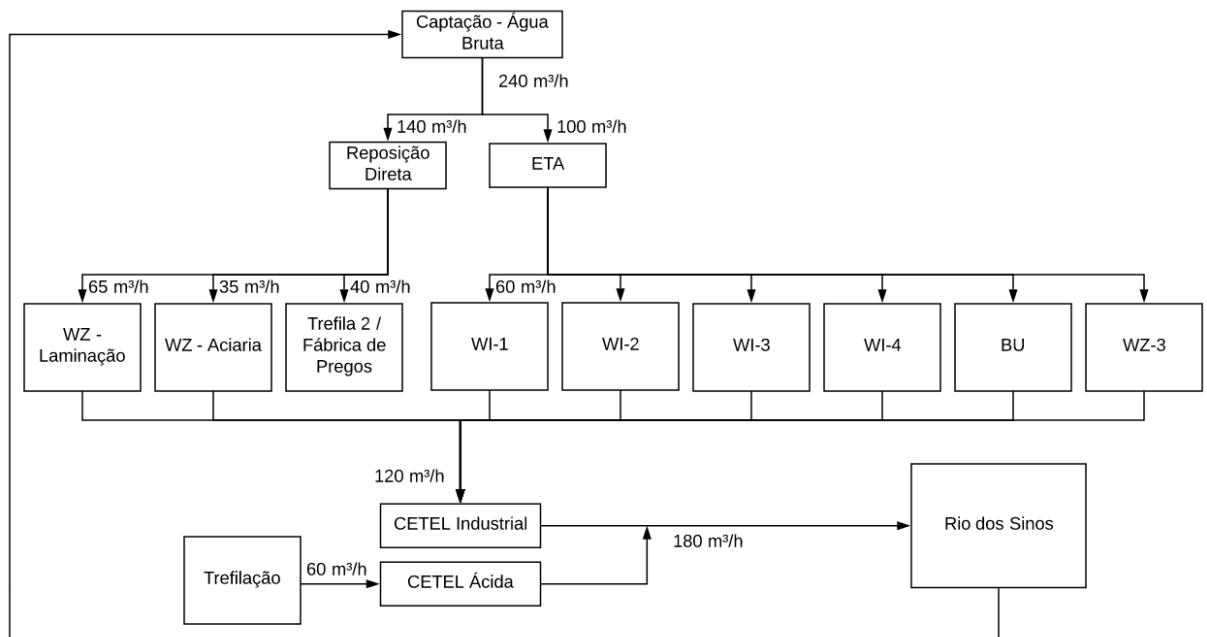
do tarugo nas laminações. O excedente de ambas classes de água gera, aproximadamente, 120 m³/h. Junto à esse montante, são produzidos cerca de 60 m³/h de efluente na galvanização de arame, na trefilaria, efluente composto por solução de ácido clorídrico e água de processo. Somados à estes valores, estão os efluentes pluviais e sanitários que, em vertedouro independente, geram em média 65 m³/h, totalizando 245 m³/h, em média, de retorno ao Rio dos Sinos. Antes de atingirem o rio, os efluentes ácido e industrial, passam por uma lagoa de segurança. O esquema de águas, representadas na Figura 3, recebem tratamento contínuo de químicos, conforme apresentação de produtos utilizados na Tabela 2. Da água produzida na ETA, cerca de 60% é destinada ao sistema WI-1, e o restante dividido entre os sistemas, conforme Figura 3.

Tabela 2 – Tratamento dos sistemas de águas

| Sistema | Produtos Utilizados | Função |
|--|--|---|
| Água Bruta (WB) | Hipoclorito de Sódio | Desinfetante |
| ETA | Sulfato de Alumínio ¹ (5%), Soda Barrilha ² (5%) e Polímero ³ | Floculante ¹ , ajuste de pH ² e floculante ³ |
| WI-1 (4 torres) | Gengard GN7118 ¹ , Hipoclorito de Sódio ² , Inibidor AZ8104 ³ , GN7004 ⁴ , Depositrol SF7120 ⁵ | Inibidor de corrosão ¹ , bactericida ² , anticorrosão ao cobre ³ , complemento ao GN7118 ⁴ |
| WI-2 (2 torres), 3 (4 torres) e 4 (3 torres) | Hipoclorito de Sódio ¹ , GN7004 ² , Inibidor AZ8104 ³ , Flogard MS6209 ⁴ | Bactericida ¹ , inibidor de corrosão fosfatos ² , anticorrosão ao cobre ³ , inibidor de corrosão ao aço carbono ⁴ |
| WZ Laminações (3 torres) | Klaraid IC1176L ¹ , Hipoclorito de Sódio ² , Solisep MPT150 ³ , Soda Barrilha ⁴ , Depositrol SF7120 ⁵ | Coagulante ¹ , bactericida ² , floculante ³ , coagular óleo ⁴ , ajuste de pH ⁵ |
| Efluente Industrial | Policloreto de Alumínio ¹ , Polímero ² | Coagulante ¹ e floculante ² |

Fonte: Suez; Gerdau, 2017.

Figura 3 - Fluxograma do processo atual (sem retro lavagens de filtros)



Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Para controle do processo, são realizadas análises físico-químicas periódicas por uma empresa terceira contratada para tal fim. O escopo de trabalho é a análise dos sistemas de circuito fechado (água cinza e industrial), sendo realizadas análises de pH e sólidos suspensos para todos os sistemas, além de ortofosfato total e cloro livre para os sistemas de água industrial, três vezes por semana.

Além disso, são feitas análises mais detalhadas no laboratório de São Paulo da empresa contratada, com frequência de uma vez por semana nos sistemas de água industrial, como condutividade, alcalinidade, cloretos, dureza, ferro, zinco, sílica e enxofre. A análise do efluente final (industrial e ácido) gerado é realizada, externamente, por laboratório credenciado e, então, reportados os resultados à Fepam.

Na central de tratamento de efluentes são monitorados o pH, temperatura e vazão de escoamento, de forma contínua, pela presença de pHmômetros, termômetros e medidores de vazão nas linhas, permitindo ações corretivas à equipe de operação.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliadas amostras dos sistemas de água industrial (1,2,3 e 4), de água bruta, do Rio dos Sinos após primeira filtragem da água captada, e de efluente industrial da indústria de estudo e objeto de interesse de reuso. As análises foram realizadas pela empresa SUEZ, em seus laboratórios interno à empresa estudada e em Cotia, SP, para avaliação mais detalhada. Os resultados foram divulgados em valor único, sem divulgação do desvio padrão das análises.

Em agosto de 2017 iniciaram-se as coletas de efluente industrial, realizadas pelos operadores da Central de Tratamento de Efluentes (Cetel), às segundas, quartas e sextas-feiras, para análises de pH, condutividade e sólidos suspensos até setembro de 2017; essas análises foram realizadas internamente à usina siderúrgica. Paralelamente à esta avaliação, todas as segundas-feiras eram realizadas coletas de amostras de água bruta, dos quatro sistemas de água industrial e, também, de efluente industrial, para envio ao laboratório da SUEZ, localizado em Cotia, SP, de agosto a novembro de 2017. Os parâmetros analisados estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 - Local e método de análise, parâmetros analisados e frequência

| Local | Coletas | Parâmetros Analisados | Método de Análise |
|--|----------------|--|--|
| Laboratório SUEZ, Sapucaia do Sul - RS | seg, qua e sex | pH | Análise em pHmetro digital microprocessado, com precisão de 0,01 unidades de pH. |
| | | Sólidos suspensos totais (mg/L) | A amostra bem homogeneizada é filtrada através de um filtro de fibra de vidro previamente pesado e o resíduo retido no filtro é seco até uma massa constante a 103° C. |
| | | Condutividade (µmhos) | Análise em condutivímetro. |
| Laboratório SUEZ, Cotia - SP | segunda-feira | pH | Vide pH acima. |
| | | AT (mg/L CaCO ₃) | Análise por titulador Mettler, com 0,02N de H ₂ SO ₄ |
| | | Condutividade (µmhos) | Vide Condutividade acima |
| | | DT (ppm), Dca (ppm), Sulfato (ppm), SiO ₂ (ppm) e FeT (ppm) | Espectrometria de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente. |
| | | Cl (ppm) | Espectrometria de Absorção Molecular na região do visível com equipamento automatizado – Easychem |

Fonte: SUEZ,2017.

A possibilidade de reuso foi analisada avaliando o conjunto de parâmetros, apresentados na Tabela 3, selecionados de acordo com o escopo da empresa SUEZ, junto à indústria

siderúrgica estudada; foram analisadas as águas dos quatro sistemas de água industrial abastecidos pela ETA para observação do sistema limitante do processo, a partir de referências internas. Para fins de verificação, uma relação de alimentação entre água bruta e efluente industrial foi simulada, calculando-se a concentração resultante através de:

$$Q_t = Q_b + Q_r \quad (4)$$

$$Q_t C_t = Q_b C_b + Q_r C_r \quad (5)$$

$$X_b = Q_b / Q_t \quad (6.1)$$

$$X_r = Q_r / Q_t \quad (6.2)$$

$$C_t = X_b \cdot C_b + X_r \cdot C_r \quad (7)$$

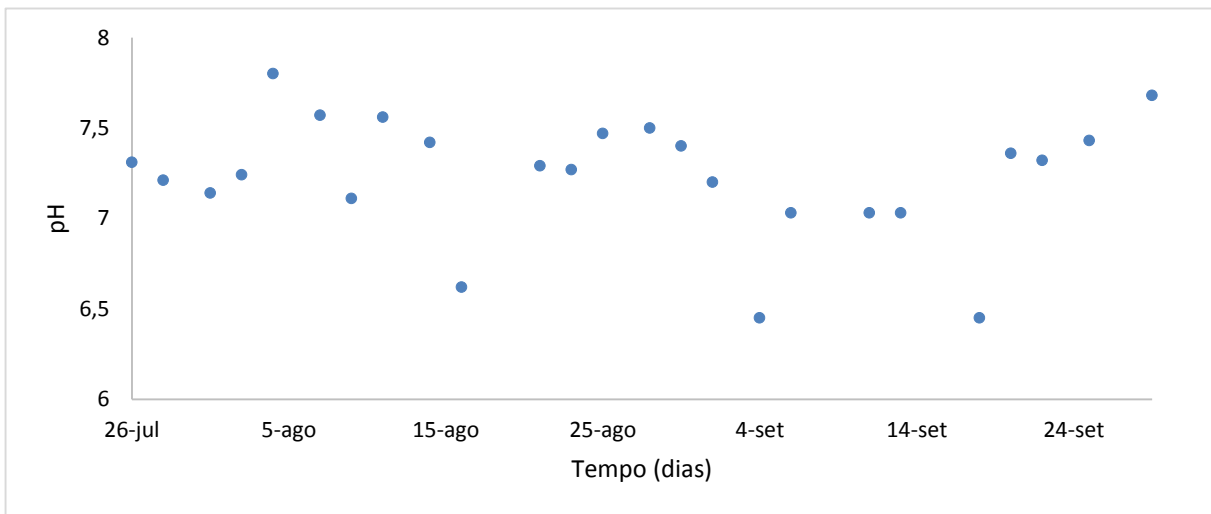
$$C_{final} = C_t \cdot CC \quad (8)$$

Obtém-se assim uma relação de mistura entre água bruta e efluente industrial. Então, é feita uma correção multiplicando-se a concentração resultante pelo ciclo de concentração, através da equação 8. A concentração final é, então, comparada com os valores de referência de cada sistema.

5 RESULTADOS

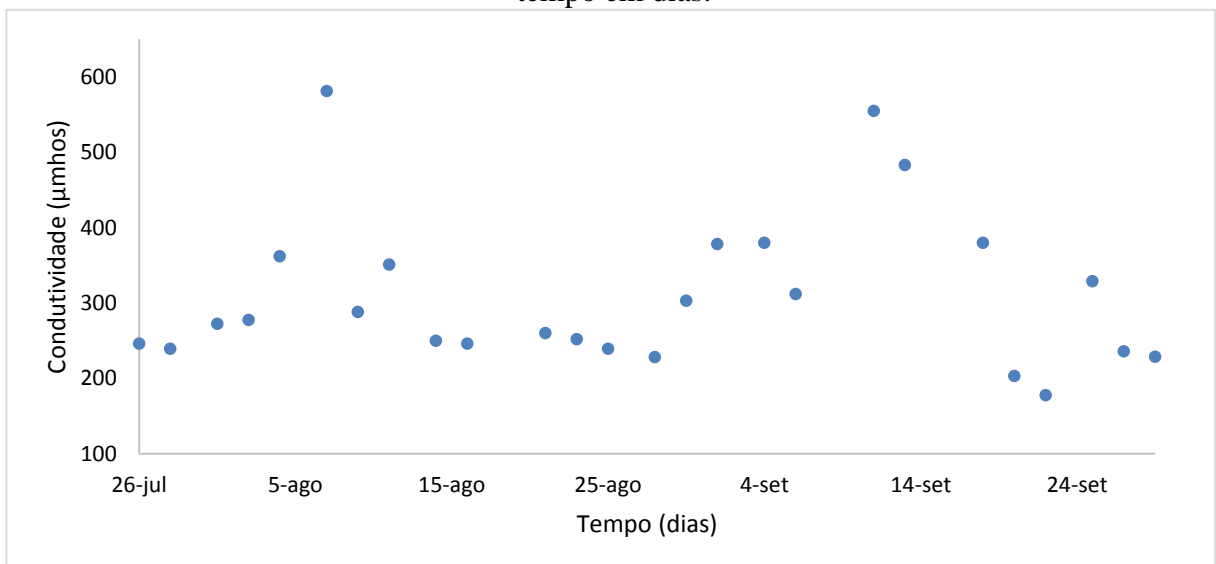
As análises das amostras coletadas com a frequência de três vezes por semana, possibilitaram um acompanhamento mais continuado do efluente de estudo, fornecendo caracterização para três parâmetros importantes exigidos por órgãos ambientais e pelo processo. Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam os perfis de pH, condutividade e sólidos suspensos totais, respectivamente.

Gráfico 1 - Valores de pH do efluente industrial em função do tempo em dias.



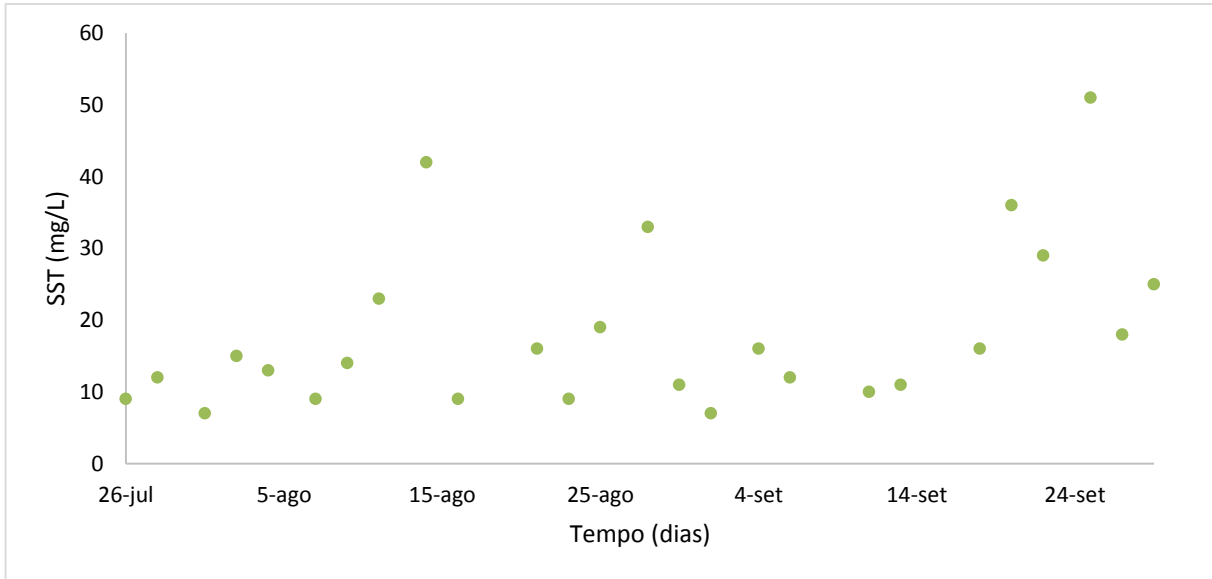
Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Gráfico 2 - Valores de condutividade elétrica do efluente industrial, em μmhos , em função do tempo em dias.



Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Gráfico 3 - Valores de sólidos suspensos totais do efluente industrial, em mg/L, em função do tempo em dias



Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Visto que o efluente industrial é lançado ao Rio dos Sinos, foi monitorado o seu pH para certificação de atendimento as exigências da Fepam para lançamento de efluentes em corpos d'água. Observou-se, a partir da do Gráfico 1, que 20,8% dos dados obtidos estão acima do valor de 7,5, recomendado no processo, sendo a média do conjunto de dados analisados igual à 7,24, com um desvio padrão de 0,33, o que indica que, mesmo acima do limite superior, não houveram valores significativamente fora da faixa permitida (limite inferior igual à 6), o que não confere problema ambiental, devido a diluições com o efluente ácido e pluvial, antes do lançamento final. O Gráfico 2 apresenta os valores de condutividade observados no período de julho a setembro, com média de 309,88 μ mos e desvio padrão de 102,20, o que corrobora com uma manobra atípica realizada em meados de setembro, o que elevou a condutividade em até 79,10% na data de 11 de setembro, em relação à média. Para as análises de viabilidade de reuso, foram excluídos tais valores contaminados. O Gráfico 3 apresenta o perfil de sólidos suspensos totais no período de observação, tendo como média valor de 18,15 mg/L, considerado aceitável, já que o efluente passaria por um clarificador antes de chegar aos sistemas de torres de resfriamento, os quais exigem média de 10 mg/L do mesmo parâmetro.

As análises semanais conduzidas pelo laboratório da SUEZ em Cotia, SP, avaliaram um número maior de parâmetros e sistemas, gerando uma caracterização abrangente no período de primeiro de agosto a seis de novembro de 2017. Com os valores obtidos, permitiu-se o cálculo dos ciclos de concentração e comparação com os valores exigidos pelos sistemas no processo

siderúrgico. Na Tabela 4 estão apresentados os valores médios dos parâmetros analisados no período mencionado, com a exclusão dos dados contaminados.

Tabela 4 - Valores médios obtidos de 1º de agosto à 06 de novembro, de 2017, do efluente industrial (WR), água bruta (WB) e sistemas de água industrial (WI's).

| Parâmetro | WR | WB | WI-1 | WI-2 | WI-3 | WI-4 |
|---|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| pH | 7,1 | 6,8 | 7,7 | 7,7 | 7,5 | 7,9 |
| Alcalinidade Total (mg/L CaCO₃) | 36,1 | 28,7 | 52,3 | 108,2 | 55,2 | 84,7 |
| Condutividade (µmhos) | 235,7 | 127,3 | 239,5 | 635,7 | 397,8 | 595,8 |
| Dureza Total (mg/L) | 39,2 | 29,1 | 35,1 | 81,9 | 60,3 | 72,0 |
| Dureza Cálcica (mg/L) | 26,2 | 19,1 | 22,9 | 57,0 | 44,4 | 47,3 |
| Cloretos (mg/L) | 30,8 | 11,1 | 25,1 | 98,4 | 31,7 | 60,7 |
| Sulfato (mg/L) | 13,4 | 6,8 | 12,5 | 88,0 | 24,1 | 75,2 |
| Sílica - SiO₂ (mg/L) | 13,6 | 15,3 | 19,0 | 34,4 | 22,3 | 30,2 |
| Ferro Total (mg/L) | 1,8 | 1,5 | 1,9 | 3,2 | 1,8 | 1,1 |

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Com os valores dos parâmetros de água industrial e água bruta (Tabela 4), foi possível a obtenção dos ciclos de concentração de cada sistema, apresentados na Tabela 5, calculados pela equação 3. Então, foram avaliados os parâmetros elegíveis para o cálculo, para posterior escolha do ciclo de concentração a ser utilizado na correção da concentração resultante. Além dos parâmetros de água industrial e água bruta, a Tabela 4 apresenta os valores médios obtidos para o efluente industrial (WR), no período de análise.

Tabela 5 - Ciclos de concentração médios, calculados a partir de todos os parâmetros medidos no período de análise.

| Parâmetro | WI-1 | WI-2 | WI-3 | WI-4 |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| DT (mg/L) | 1,2 | 2,9 | 2,1 | 2,5 |
| Dca (mg/L) | 1,2 | 3,1 | 2,3 | 2,5 |
| Cl (mg/L) | 2,4 | 9,9 | 2,7 | 5,5 |
| Sulfato (mg/L) | 2,0 | 15,8 | 3,9 | 13,4 |
| SiO₂ (mg/L) | 1,2 | 2,3 | 1,5 | 2,0 |
| FeT (mg/L) | 1,3 | 2,3 | 1,4 | 0,8 |

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

A Tabela 5 apresenta os ciclos de concentração para todos os parâmetros estudados, com exceção ao pH e à alcalinidade total, que foram desconsiderados da análise dos ciclos, pois na estação de tratamento de água (ETA) da planta industrial, etapa anterior às torres de

resfriamento, há adição de soda barrilha, alterando seus valores, devido ao seu caráter alcalino, antes de sofrerem influência nos sistemas de torres de resfriamento. A condutividade elétrica é afetada da mesma forma, pois pela adição de químicos na ETA, é difícil prever seu comportamento. Os íons cloretos, também, não servem como referência, pois em todos os sistemas de torres de resfriamento há adição de hipoclorito de sódio. Os íons sulfato são alterados pela adição de sulfato de alumínio na ETA e a análise de ferro é contaminada pelo próprio processo siderúrgico. Os parâmetros que sofreram a menor influência por fatores externos são as durezas totais e cálcica e a quantidade de sílica, porém esta pode ficar retida na etapa de clarificação, não sendo considerada válida. Com isso, a dureza cálcica foi utilizada como base de cálculo para os ciclos de concentração, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ciclos de concentração escolhidos para o cálculo, obtidos a partir do parâmetro dureza cálcica.

| Ciclos de Concentração | | | |
|-------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| WI-1 | WI-2 | WI-3 | WI-4 |
| 1,2 | 3,1 | 2,3 | 2,5 |

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

A partir dos dados da Tabela 6, observou-se que o sistema de água industrial WI-1, de abastecimento das áreas de laminação e aciaria, é o que possui o menor tempo de retenção de contaminantes, possivelmente decorrentes de grande número de perdas no sistema, devido à purgas e vazamentos. O sistema WI-2 possui o maior ciclo de concentração, pois trata-se de um sistema dedicado a duas menores áreas produtivas da usina siderúrgica – produtoras de arames e pregos – sendo assim, de menores dimensões, com maior propensão à aumento de concentração de parâmetros como dureza e sólidos suspensos durante o processo de resfriamento da água. Os sistemas WI-3 e WI-4, responsáveis pelo resfriamento de equipamentos da área produtora de arame galvanizado e resfriamento da água do sistema de despoejamento da aciaria, respectivamente, apresentam valores intermediários. Sendo assim, obtém-se os fatores de correção para a simulação dos limites operacionais de cada sistema; simulações apresentadas nas Tabelas 7 a 10, obtidas através dos cálculos de concentração pelas Equações 7 e 8.

Tabela 7 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-1, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial.

| WI-1 | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|--------|
| Parâmetros | Relação Xb(%)/Xr(%) | | | | | | Limites de Operação | |
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 | Mínimo | Máximo |
| DT (mg/L) | 35,4 | 36,6 | 37,9 | 39,1 | 40,3 | 47,6 | 0,0 | 40,0 |
| Dca (mg/L) | 23,2 | 24,1 | 24,9 | 25,8 | 26,6 | 31,8 | 0,0 | 30,0 |
| Cl (mg/L) | 13,5 | 15,9 | 18,3 | 20,7 | 23,1 | 37,5 | 0,0 | 100,0 |
| Sulfato (mg/L) | 8,2 | 9,0 | 9,8 | 10,6 | 11,5 | 16,3 | 0,0 | 100,0 |
| SiO ₂ (mg/L) | 18,6 | 18,4 | 18,2 | 18,0 | 17,8 | 16,6 | 0,0 | 500,0 |
| FeT (mg/L) | 1,8 | 1,8 | 1,9 | 1,9 | 1,9 | 2,1 | 0,0 | 1,0 |

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

De acordo com a Tabela 7, observou-se que há uma redução da qualidade da água, quando aumentada a fração de entrada de efluente industrial na corrente a montante da ETA, em relação à água bruta. Constatou-se que, em todos os parâmetros, quando da utilização apenas de água bruta, a água atende os requisitos do sistema, exigidos pelos moldes de cobre do lingotamento contínuo da aciaria do aço, com exceção à quantidade de ferro, que, mesmo sem a reutilização de efluente, encontrou-se acima do limite máximo estabelecido. Porém, foram realizadas análises (anteriores ao período estudado), e constatado que o tratamento físico e químico empregado nas piscinas das torres de resfriamento eram suficientes para compensação da elevada quantidade de ferro na água, a troco de maiores custos financeiros. Os limites utilizados na Tabela 8 divergem daqueles apresentados na Tabela 1, da KME, devido à verificação de atendimento das demandas do processo da empresa.

Realizou-se simulações, via Excel, apresentadas na Tabela 7, com o aumento gradativo na proporção de vazão de entrada de água bruta e efluente industrial até que se atingisse um valor inferior ou superior ao estabelecido para o sistema, utilizando-se o balanço de massa representado na Equação 7. Constatou-se que, no sistema WI-1, a utilização de efluente industrial em uma razão de 37,6% da vazão, todos os parâmetros permaneceram dentro das faixas exigidas pelo processo, e constatou-se na dureza total, o parâmetro limitante para o sistema WI-1. Essa proporção alcançada, entre água bruta e efluente industrial, necessita que o ciclo de concentração permaneça próximo ao valor calculado, sendo necessária, para isso, a manutenção da rotina de purgas atual do sistema, e manutenção periódica nos componentes das torres, para que não haja perda de eficiência. Considerando possíveis erros de análises e coletas, considerar-se-á uma vazão composta de 30% de efluente industrial e 70% de água bruta, como relação limite de entrada na ETA, para o sistema WI-1. Para verificação da relação limite entre efluente industrial e água bruta para o sistema WI-2, analisou-se os dados da Tabela 8.

Tabela 8 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-2, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial.

| WI-2 | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|--------|
| Parâmetros | Relação Xb(%)/Xr(%) | | | | | | Limites de Operação | |
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 | Mínimo | Máximo |
| DT (mg/L) | 89,6 | 92,7 | 95,8 | 98,9 | 102,0 | 120,6 | 40,0 | 600,0 |
| Dca (mg/L) | 58,7 | 60,9 | 63,1 | 65,3 | 67,5 | 80,5 | 40,0 | 500,0 |
| Cl (mg/L) | 34,1 | 40,2 | 46,3 | 52,4 | 58,4 | 94,9 | 0,0 | 200,0 |
| Sulfato (mg/L) | 20,8 | 22,9 | 24,9 | 27,0 | 29,0 | 41,3 | 0,0 | 200,0 |
| SiO₂ (mg/L) | 47,0 | 46,5 | 46,0 | 45,5 | 45,0 | 42,0 | 0,0 | 100,0 |
| FeT (mg/L) | 4,5 | 4,6 | 4,7 | 4,8 | 4,9 | 5,4 | 0,0 | 2,0 |

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

A Tabela 8 apresenta as simulações do sistema WI-2, variando-se, também, a proporção, em vazão, entre efluente industrial e água bruta. Percebeu-se que, no sistema de resfriamento de água indireta de processo das áreas produtoras de arames e pregos, é exigida uma faixa de operação mais ampla, o que permitiria se trabalhar com 100% de efluente industrial na entrada da estação de tratamento de água. Porém, como a estação de tratamento de água é de abastecimento de todos os sistemas, a condição de operação fica restringido ao estabelecido no sistema WI-1, com 30% em proporção, em termos de vazão, de efluente industrial. Assim como no sistema WI-1, o nível de ferro encontrou-se acima do limite permitido, sendo afetado de forma mais intensa devido ao sistema WI-2 possuir maior ciclo de concentração, o que requer um tratamento químico mais robusto, causando maior oneração à empresa. Em vista de uma redução de custos e menor desperdício de água, percebeu-se a possibilidade de aumento do ciclo de concentração da WI-2, com uma menor frequência de purgas no sistema, e consequente redução na quantidade de efluente gerado; caso, este, semelhante ao apresentado na Tabela 9, para o sistema WI-3.

Tabela 9 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-3, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial.

| WI-3 | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|--------|
| Parâmetros | Relação Xb(%)/Xr(%) | | | | | | Limites de Operação | |
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 | Mínimo | Máximo |
| DT (mg/L) | 68,3 | 70,7 | 73,1 | 75,4 | 77,8 | 92,0 | 50,0 | 530,0 |
| Dca (mg/L) | 44,8 | 46,4 | 48,1 | 49,8 | 51,4 | 61,4 | 50,0 | 500,0 |
| Cl (mg/L) | 26,0 | 30,6 | 35,3 | 39,9 | 44,5 | 72,4 | 0,0 | 200,0 |
| Sulfato (mg/L) | 15,9 | 17,4 | 19,0 | 20,6 | 22,1 | 31,5 | 0,0 | 200,0 |
| SiO₂ (mg/L) | 35,8 | 35,4 | 35,1 | 34,7 | 34,3 | 32,0 | 0,0 | 100,0 |
| FeT (mg/L) | 3,5 | 3,5 | 3,6 | 3,7 | 3,7 | 4,1 | 0,0 | 2,0 |

Fonte: Elaboração do autor, 2017.

De acordo com a tabela 9, identifica-se, para o sistema de resfriamento de água de contato indireto da área produtora de arame galvanizado, situação semelhante ao sistema WI-2, onde os limites operacionais para os parâmetros indicados são mais brandos. Estes resultados corroboram com a indicação do sistema WI-1 como limitante do nível de reutilização de efluente industrial, pois, mesmo com a utilização de apenas efluente industrial na entrada da ETA, o único parâmetro fora de especificação é o nível de ferro, necessitando de tratamento mais robusto para ser compensado. Para o sistema em questão, também existe a possibilidade de aumentar-se o ciclo de concentração, diminuindo-se a frequência de purgas. A diminuição no número de purgas do sistema pode gerar um maior acúmulo de sólidos nas piscinas das torres de resfriamento, porém acarretaria em redução de consumo de químicos pelo descarte indireto de água e, ainda, economia de água, tornando o processo mais sustentável. Verificou-se tal tendência, de otimização do processo, em praticamente todos os sistemas, como se observa na Tabela 10.

Tabela 10 - Concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração do sistema WI-4, em diferentes proporções de água bruta e efluente industrial.

| WI-4 | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|--------|
| Parâmetros | Relação Xb(%)/Xr(%) | | | | | | Limites de Operação | |
| | 100/0 | 90/10 | 80/20 | 70/30 | 60/40 | 0/100 | Mínimo | Máximo |
| DT (mg/L) | 73,9 | 76,4 | 79,0 | 81,5 | 84,1 | 99,4 | 50,0 | 500,0 |
| Dca (mg/L) | 48,4 | 50,2 | 52,0 | 53,8 | 55,6 | 66,4 | 50,0 | 500,0 |
| Cl (mg/L) | 28,1 | 33,1 | 38,1 | 43,2 | 48,2 | 78,2 | 0,0 | 200,0 |
| Sulfato (mg/L) | 17,1 | 18,8 | 20,5 | 22,2 | 23,9 | 34,1 | 0,0 | 200,0 |
| SiO₂ (mg/L) | 38,7 | 38,3 | 37,9 | 37,5 | 37,1 | 34,6 | 0,0 | 100,0 |
| FeT (mg/L) | 3,7 | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,0 | 4,5 | 0,0 | 2,0 |

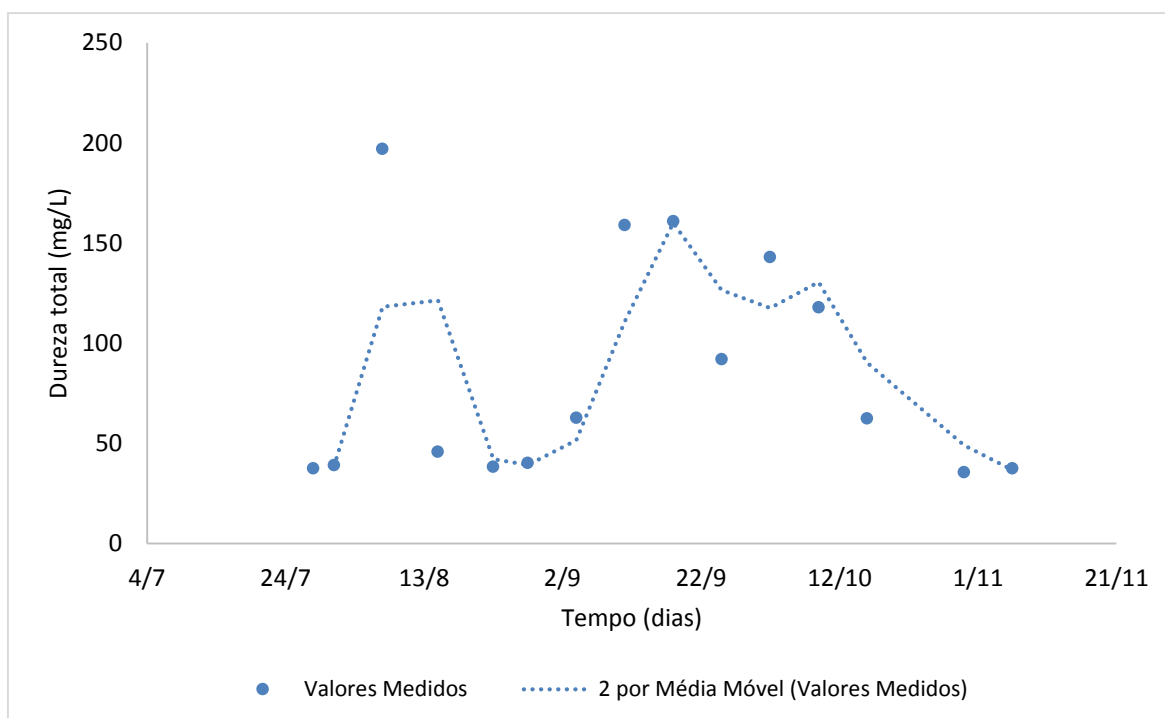
Fonte: Elaboração do autor, 2017.

A Tabela 10 apresenta as concentrações corrigidas pelo ciclo de concentração para o sistema WI-4, segundo tabela 7. As piscinas de água de contato indireto das torres de resfriamento destinadas ao sistema de despoejamento da aciaria exigem uma qualidade de água baixa, mantendo um patamar semelhante aos sistemas WI-2 e WI-3. O único parâmetro fora de especificação é, novamente, o teor de ferro, o que demandaria um maior custo com abrandadores químicos para os íons férricos, sendo o único limitante para uma reutilização infinda de efluente industrial na ETA. Apesar disso, todos os outros parâmetros analisados, mesmo quando da utilização de 100% de efluente industrial, permaneceram em um limite aquém ao limite máximo permitido. Sendo assim, o aumento do ciclo de concentração mostra-se como possibilidade para redução de consumo de água, pela diminuição do número de purgas.

Considerando-se erros experimentais de coleta, análise e de interferências externas, como o clima, delimitou-se a relação em fração volumétrica entre efluente industrial e água bruta, como 30 e 70%, respectivamente. Com estas quantidades, respeita-se os limites operacionais do sistema WI-1, de abastecimento dos moldes de cobre do lingotamento contínuo, que possui maior sensibilidade aos parâmetros analisados. Para tanto, é necessária uma avaliação contínua de, pelo menos, um dos parâmetros estudados, para predição do comportamento do efluente em casos esporádicos de contaminação com efluente ácido, graxas, óleos ou erros de dosagens de químicos, para que problemas de tal natureza não cheguem ao processo produtivo.

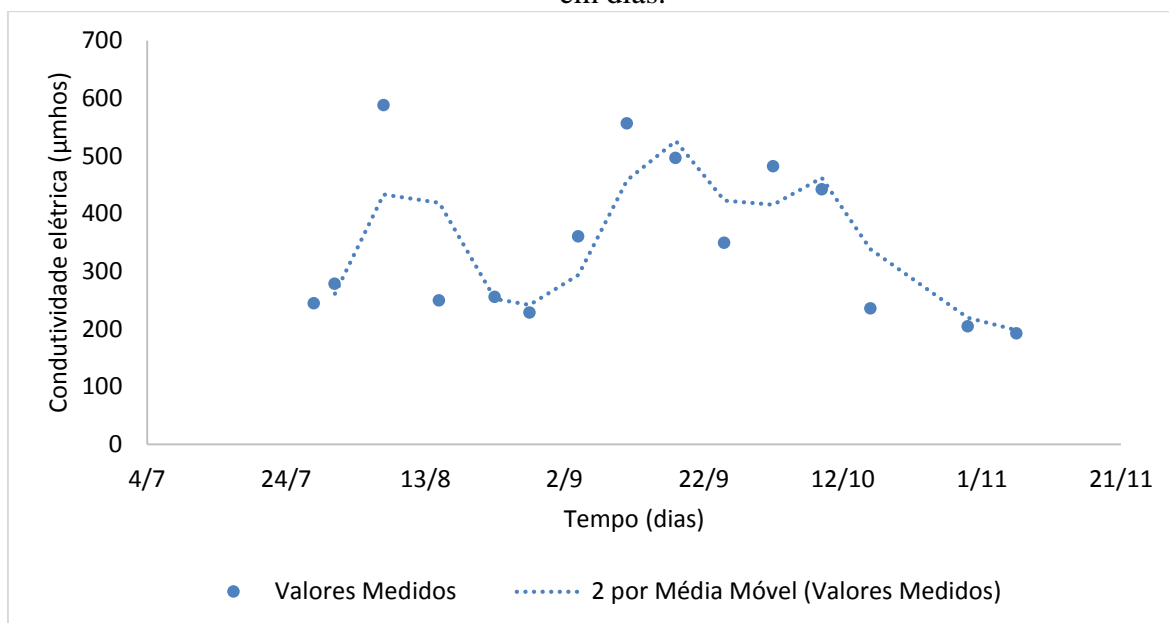
Dessa forma, analisou-se os padrões de variação de todos os parâmetros analisados para verificação de semelhança de comportamentos entre as variáveis. Uma possibilidade para análise contínua do efluente seria a instalação de medidores de pH e condutividade, próximos a bomba de retorno do efluente para a área produtiva, e à montante da ETA, devido à facilidade de leitura de tais equipamentos, para monitoramento de anormalidades. Porém, o pH não pode ser utilizado para avaliação, pois é um parâmetro controlável pela adição de químicos reguladores de alcalinidade. A condutividade não possui comportamento de fácil predição, pois é afetada pelo tratamento físico e químico recebido pelas águas da usina, porém há condutivímetros viáveis economicamente e de análise automática, gerando constante informação sobre a qualidade do efluente industrial aos operadores da área. Sendo assim, procurou-se semelhança de comportamento entre condutividade e os demais parâmetros analisados e, assim, encontrou-se na dureza total, limitante do sistema WI-1, semelhança de variação, conforme Gráficos 4 e 5. A comparação tem como objetivo obter relação entre uma variável de boa representatividade com outra de fácil medição.

Gráfico 4 - Dureza total do efluente industrial, medida em mg/L, através do tempo, em dias.



Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Gráfico 5 - Condutividade elétrica do efluente industrial, medida em μmhos , através do tempo em dias.



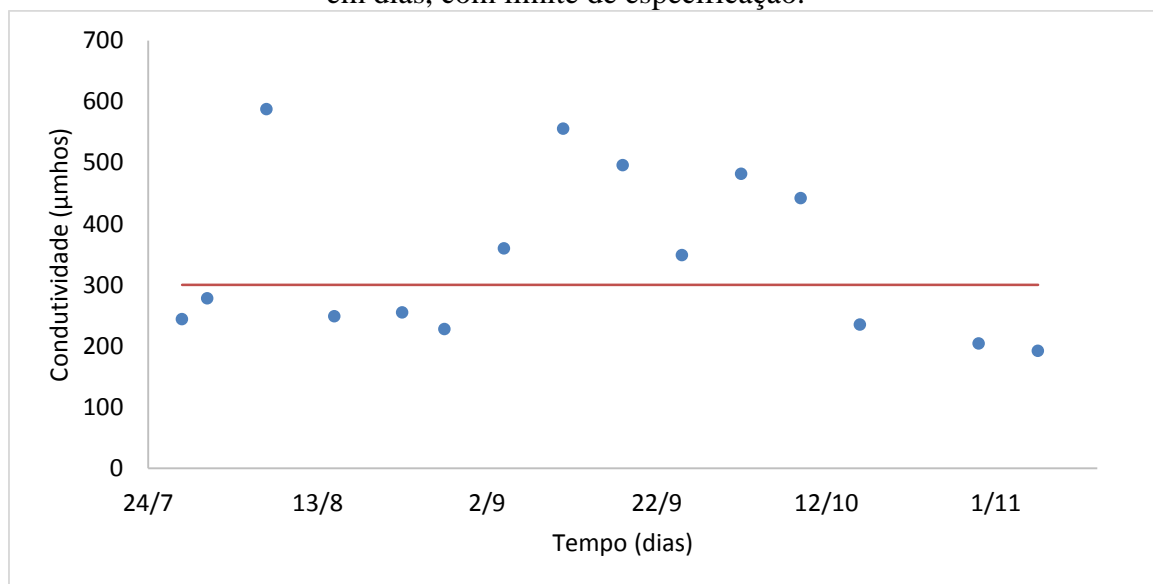
Fonte: Elaboração do autor, 2017.

A partir dos Gráficos 4 e 5, observou-se semelhança de comportamento entre os valores de dureza total e condutividade, medidos ao longo do período de 28 de julho à 6 de novembro. Para comparação de parâmetros, utilizou-se todos os valores obtidos, por tratarem-se de dois parâmetros analisados a partir de mesma amostra, não sendo necessária a exclusão dos dados

contaminados. Foram traçadas linhas de tendência de médias móveis, para melhor visualização dos perfis, de forma qualitativa.

Dessa forma, a partir dos valores analisados, considerados válidos, excluindo-se os valores obtidos nas datas 07/10, e de 04/09 a 16/10, por terem sido contaminados por reposição indevida de efluente ácido na linha industrial, fato voluntário, sem precedentes, e de reconhecido dano ao tratamento de efluente, foi estabelecida uma condutividade limite, para que pudesse servir de balizador da reposição de efluente industrial na ETA. De acordo com a Tabela 4, o patamar médio de dureza total dos dados válidos, utilizado na base de cálculo da fração volumétrica limite de entrada do efluente industrial, é de 39,2 mg/L, com uma condutividade média de 235,7 mg/L. Observou-se, também, que em todos os dados analisados, apenas aqueles retirados dos cálculos apresentaram condutividade acima de 300 μmhos . Sendo assim, utilizou-se o limite de 300 μmhos de condutividade, como pré-requisito para reutilização do efluente industrial, conforme Gráfico 6.

Gráfico 6 - Condutividade elétrica do efluente industrial, medida em μmhos , através do tempo em dias, com limite de especificação.

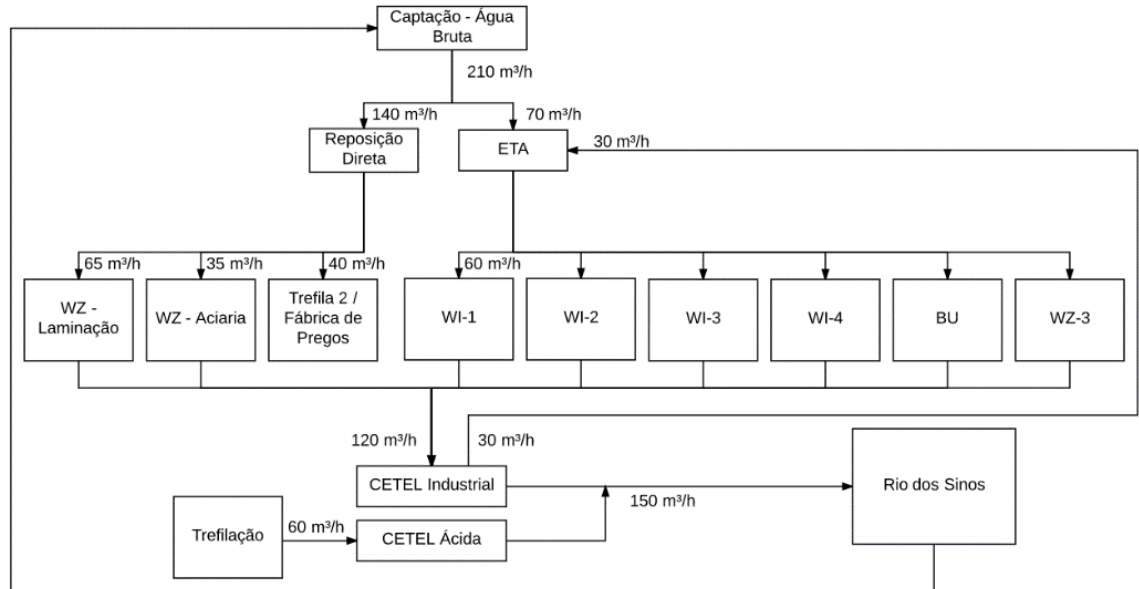


Fonte: Elaboração do autor, 2017.

Como apresentado no Gráfico 6, todos os dados analisados, considerados válidos, apresentaram valores de condutividade abaixo de 300 μmhos e, pela amostragem obtida, em condutividades de 280 μmhos , simulando-se a vazão entrada da ETA com efluente industrial e água bruta para os pontos individuais, observou-se valores dentro do permitido, concluindo-se que o efluente com valores abaixo de 300 μmhos de condutividade está apto para ser reutilizado no processo siderúrgico. Além disso, o sistema WI-1, limitante da análise, tem como especificação máxima de condutividade, à 25°C, o valor de 500 μmhos e, como apresentado na

Tabela 4, a água bruta possui condutividade média de 127,3 μ mos, o que indica uma boa margem de segurança na especificação de 300 μ mos como limite máximo para a água recirculada. A Figura 4 apresenta o processo com reúso de efluente industrial.

Figura 4 - Fluxograma do processo proposto (sem retro lavagens de filtros) com reutilização de 30% da vazão de entrada da ETA com Efluente Industrial.



Fonte: Elaboração do autor, 2017.

A Figura 4 representa um fluxograma, com indicações de vazões de entradas e saídas de cada sistema, com a proposta de reutilização de efluente industrial em 30% da entrada da ETA. O modelo proposto englobaria a utilização de uma bomba, já existente no sistema de tratamento de água, para transporte do efluente até a ETA, por tubulações aéreas. A montante dessa bomba, poderia ser colocado um condutivímetro, para garantia do limite superior de 300 μ mos, evitando-se o transporte de efluente com qualidade imprópria para os sistemas produtivos, pela colocação de uma válvula de controle, com atuador de fechamento para condutividades acima do limite estabelecido. Conforme relação de entrada da ETA estabelecida em 30% de efluente industrial e 70% de água bruta, assumindo-se requisitos de condutividade atendidos, ter-se-ia um reaproveitamento de 30 m³/h de efluente industrial, o que representaria uma economia de 21,6 milhões de litros de água bruta, em um mês.

6 CONCLUSÕES

As informações obtidas através das análises do efluente industrial, dos sistemas de águas de resfriamento de contato indireto e da água bruta serviram como base para avaliação do desempenho de cada sistema. O efluente industrial apresentou valores de pH entre 6 e 7,5, com exceção de 4 dias de análise que, apesar de erros experimentais, representaram valores próximos ao limite, sendo ajustados pela diluição do efluente ácido tratado e pelo tempo de residência na lagoa de segurança, a montante do Rio dos Sinos. As análises de sólidos suspensos também, encontraram-se em sua maioria dentro da faixa estabelecida para descarte, com longo tempo de residência para decantação antes de chegar ao rio. Quanto aos sistemas de resfriamento de águas de contato indireto, pôde-se concluir que, com exceção do sistema WI-1, todos apresentaram oportunidades de aumento do número de ciclos de concentração, com consequente economia de água, com possibilidade de redução nas purgas dos sistemas.

A partir da caracterização da água bruta, pôde-se obter os ciclos de concentração dos quatro sistemas de água de contato indireto, para todos os parâmetros elegíveis. Concluiu-se que apenas, os parâmetros dureza cálcica e total poderiam representar, com precisão, os ciclos de cada sistema de torres de resfriamento, por não haver interferências físicas e químicas. Nesse caso, optou-se pela dureza cálcica, com valores de 1,2, 3,1, 2,3 e 2,5 para os sistemas WI-1, WI-2, WI-3 e WI-4, respectivamente.

Em posse dos ciclos de concentração e dos valores médios de todos os tipos de águas analisados, nos tempos considerados válidos, simulou-se a concentração resultante a partir da composição de entrada de água bruta/efluente industrial de 100/0%, 90/10%, 80/20%, 70/30%, 60/40% e 0/100%. As concentrações resultantes foram corrigidas através dos ciclos de concentração, e obteve-se a concentração de todas condições de entrada após a passagem, dessa solução, pela ETA e pelas torres de resfriamento de cada sistema. Ao comparar-se com os limites especificados por cada conjunto de torres, verificou-se que para os sistemas WI-2, WI-3 e WI-4, apenas a quantidade de ferro extrapolou a especificação, sendo aceitável pela condição de tratamento empregado atualmente na empresa. Tais sistemas não apresentam limitação para a taxa de reaproveitamento de efluente industrial. Porém, para o sistema WI-1, percebeu-se, para a dureza total, além da quantidade de ferro, uma extrapolação do permitido, a partir de 30% de efluente industrial na entrada da ETA, limitando a taxa de reuso. Essa

limitação, do sistema WI-1, é esperada, por ser o sistema de abastecimento dos moldes de cobre do lingotamento contínuo, de maior sensibilidade a impurezas.

Tendo-se obtida a dureza total como parâmetro limitante do sistema, foi necessária a comparação deste parâmetro com outro de maior simplicidade de medição, visto a maior complexidade de análise da dureza total. Comparou-se o comportamento da dureza total com os outros parâmetros estudados, e foi encontrada semelhança com a condutividade elétrica. Esta comparação é justificada para proposição de uma análise contínua e automática do efluente, à montante de sua bomba de sucção, para medida de controle, obtendo-se, assim, o limite de 300 μ nhos, a partir do qual deve ser interrompido o fornecimento de efluente industrial na entrada da ETA, para impedir a contaminação do processo siderúrgico.

Conclui-se, assim, que a reutilização de efluente industrial é viável tecnicamente, para o período analisado, a partir do estabelecimento de apropriada forma de operação, utilizando-se efluente a uma taxa de no máximo 30% da vazão de entrada da ETA com valores de condutividade abaixo de 300 μ nhos. Estima-se uma redução de 30 m³/h na captação de água bruta do Rio dos Sinos, com esse modo de operação, gerando economia de cerca de 21,6 milhões de litros de água a cada mês, impactando positivamente a gestão hídrica da indústria de estudo.

7 REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION, & WATER ENVIRONMENT FEDERATION. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. *Standard Methods*, 541. Washington, 2012. Acesso online. Disponível em: <[https://doi.org/ISBN 9780875532356](https://doi.org/ISBN%209780875532356)>. Acesso em 03 de novembro de 2017.

BAHADORI, A. Cooling tower and cooling water circuits. In *Essentials of Oil and Gas Utilities*. Lismore: Elsevier, 2016, p. 159–192. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803088-2.00005-5>>. Acesso em 10 de dezembro de 2017.

BRASIL. Água. *Ministério do Meio Ambiente* Brasília, 2017. Acesso online. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua>>. Acesso em 29 de novembro de 2017.

_____. Lei nº 9.433, 8 de janeiro de 1997. Brasília, 1997. Acesso online. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acesso em 20 de novembro de 2017.

BURGHILA, Daniela. Climate Change Effects – Where To Next? *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 6, p. 405 – 412. Bucharest, 2015. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.AASPRO.2015.08.107>>. Acesso em 10 de outubro de 2017.

COSTA, R. H. P. G., & TELLES, D. D. *Reúso da Água - Conceitos, Teorias e Práticas*. 1ª ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2007.

DISTEFANO, T., & KELLY, S. Are we in deep water? Water scarcity and its limits to economic growth. *Ecological Economics*, Cambridge: Elsevier, 2017, p. 130–147. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.019>>. Acesso em 30 de outubro de 2017.

GENTIL, V. *Corrosão*. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. Acesso online. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B-QsgoGGiSYGd3k0azVmLTFUNFk/view>>. Acesso em 09 de dezembro de 2017.

HESPANHOL, Ivanildo; MIERZWA, José Carlos; RODRIGUES, Luana Di Beo; SILVA, Maurício Costa Cabral da. Manual de Conservação e Reúso de Água na Indústria. *Divisão de Documentação e Normas - Biblioteca Sistema FIRJAN*. Rio de Janeiro: DIM, 2006. 1ª Edição. Acesso online. Disponível em: <<https://goo.gl/hJZz3x>>. Acesso em 12 de novembro de 2017.

INSTITUTO AÇO BRASIL. *Site institucional*. Rio de Janeiro, 2015. Acesso online. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site2015/>>. Acesso em 10 de dezembro de 2017.

LOUHENKILPI, S. Continuous Casting of Steel. In *Treatise on Process Metallurgy*. Espoo: Elsevier, 2014, p. 373–434. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00007-9>>. Acesso em 02 de dezembro de 2017.

METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. Metcalf & Eddy, Inc.

Engineering. Londres, MCGraw-Hill Education - Europe, 2003. Acesso online. Disponível em: <<http://www.amazon.com/dp/007124140X>>. Acesso em 13 de outubro de 2017.

MOURÃO, M. B., YOKOJI, A., MALYNOWSKI, A., LEANDRO, C. A. DA S., TAKANO, C., & QUITES, E. E. C. *Introdução à Siderurgia*. São Paulo: ABM, 2007.

NARASIMHAN, T. N. Hydrological Cycle and Water Budgets. In *Encyclopedia of Inland Waters*. Los Angeles: Elsevier, 2009, p. 714–720. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/B978-012370626-3.00010-7>>. Acesso em 19 de novembro de 2017.

POMPEU, C. T. *O Direito de Águas no Brasil*. 1ª ed. Brasília: Revista dos Tribunais, 2008.

RICHTER, C. A. *Tratamento de Água: Tecnologia Atualizada*. 1ª ed. São Paulo: Blucher, 1991.

RODRIGUES, M. L. K., SOARES, M. R. K., RIBEIRO, G. V. B., LAUERMANN, A., MOHRCKIECK, F. G., CASTRO, R. C. DE, VOLQUIND, R. Diretriz Técnica referente ao Descarte e ao Reúso de Efluentes Líquidos no âmbito do estado do Rio Grande Do Sul. *FEPAM*. Porto Alegre, 2017. Acesso online. Disponível em: <<http://www.fepam.rs.gov.br/CENTRAL/DIRETRIZES/DT-005-2017.PDF>>. Acesso em 19 de novembro de 2017.

SILVA, B. C. da; COSTA CALHEIROS, H. Águas Superficiais. In *Ciências Ambientais para Engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015, p. 85–122. Acesso online. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535277395000040>>. Acesso em 10 de novembro de 2017.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guidelines for Water Reuse*. Washington: 2012. Acesso online. Disponível em: <<https://watereuse.org/wp-content/uploads/2015/04/epa-2012-guidelines-for-water-reuse.pdf>>. Acesso em 13 de novembro de 2017.

WADE MILLER, G. (2006). Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. *Desalination*. Wollongong: Elsevier, 2006, 187(1–3), p. 65–75. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2005.04.068>>. Acesso em 29 de outubro de 2017.

XIA, J., DUAN, Q.-Y., LUO, Y., XIE, Z.-H., LIU, Z.-Y., & MO, X.-G. Climate change and water resources: Case study of Eastern Monsoon Region of China. *Advances in Climate Change Research*. Beijing: ScienceDirect, 2017, 8-02, p. 63–67. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/J.ACCRE.2017.03.007>>. Acesso em 14 de outubro de 2017.

ZBIGNIEW, W. Kundzewicz. Climate change impacts on the hydrological cycle. *Ecohydrology & Hydrobiology*. Poznań: Elsevier, 2008, 8(2–4), p. 195–203. Acesso online. Disponível em: <<https://doi.org/10.2478/V10104-009-0015-Y>>. Acesso em 17 de outubro de 2017.