

ESTUDO DA VIABILIDADE ECONÔMICA PARA O CONDICIONAMENTO DE UM SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE REPOSIÇÃO EM CONDENSADORES EVAPORATIVOS DE UMA AGROINDÚSTRIA

Lucas Fernando Fabro*
José Carlos Azzolini**

Resumo

Nos mais variados processos industriais, há a necessidade de remoção de calor ou carga térmica oriunda de equipamentos e correntes de processo. Para tal, normalmente, utiliza-se água como fluido de resfriamento. O setor industrial vem trabalhando fortemente para encontrar soluções que englobem a redução no consumo de água aliada ao maior desempenho e vida útil dos equipamentos envolvidos com seu uso. A utilização de água nos condensadores evaporativos representa uma fonte considerável de problemas, tanto em aspectos ambientais em razão do elevado volume de água captado, das perdas por evaporação e do volume de efluentes descartados, quanto, por aspectos estruturais, em decorrência das patologias que podem se desenvolver nos equipamentos em virtude das propriedades peculiares da água, que sem o devido tratamento podem ocasionar danos irreversíveis ao sistema e prejuízos consideráveis. O presente artigo se insere nesse contexto por meio do estudo para a avaliação de viabilidade econômica do tratamento de água de reposição do sistema de resfriamento de gases frigoríficos de uma agroindústria da região Meio-Oeste de Santa Catarina. Os resultados obtidos demonstram que a partir da determinação do balanço mássico do sistema, bem como do ciclo concentração ideal e do condicionamento químico adequado é possível reduzir consideravelmente a vazão de água de reposição do sistema e, conseqüentemente, os custos aliados ao tratamento dela, promovendo redução do volume captado e tratado, reduzindo custos, garantindo maior vida útil dos equipamentos e maior segurança operacional. Palavras-chave: Viabilidade. Condensadores evaporativos. Tratamento. Água.

1 INTRODUÇÃO

As agroindústrias representam, hoje, um setor de extrema importância econômica, em âmbito nacional, estadual e, principalmente, regional. Na região Meio-Oeste do Estado de Santa Catarina, a agroindústria é um dos carros-chefes da economia, bem como foi a grande responsável pelo crescimento e desenvolvimento da região. Focadas na alta produtividade e na qualidade de seus produtos, buscam a melhoria contínua de seus processos, tudo isso aliando tecnologia à preservação e à conservação do meio ambiente, atitudes imprescindíveis nos dias atuais.

A qualidade da água aplicada nos sistemas de resfriamento industrial, em especial, o processo de resfriamento de gases frigoríficos por condensadores evaporativos, é um dos principais fatores a ser controlado no processo, uma vez que os elementos presentes nesses sistemas são constituídos de materiais metálicos, que em contato com a água tendem a sofrer patologias, como corrosões e incrustações, as quais dependem principalmente das impurezas presentes nela. Assim, pode-se afetar de modo adverso a eficiência da operação nesses sistemas, evidenciando a necessidade de tratamentos adequados da água.

* Graduando do Curso de Engenharia de Produção Mecânica da Universidade do Oeste de Santa Catarina; lcsfabro@gmail.com

** Orientador e Professor do Curso de Engenharia de Produção Mecânica na Universidade do Oeste de Santa Catarina; jose.azzolini@unoesc.edu.br

A problemática deste estudo visou saber qual a melhor alternativa de tratamento para o sistema em questão frente às reais condições de operação, o que proporciona aos equipamentos maior vida útil e segurança, além de redução no consumo de energia e custo operacional.

Nesse contexto, o presente artigo apresenta um estudo experimental relacionado à qualidade da água utilizada no sistema de resfriamento de gases frigoríficos de uma agroindústria localizada no Meio-Oeste de Santa Catarina, abordando a partir dos resultados de análises de parâmetros físico-químicos e biológicos da água, a necessidade da realização de tratamentos específicos para o respectivo sistema, bem como propondo programas padronizados e eficazes, a partir de uma visão técnica relacionada às características da água utilizada, assim, fornecendo subsídios necessários para a viabilidade de implantação de um sistema capaz de manter a qualidade e os padrões desejáveis para o seu funcionamento, garantindo a inexistência de agressões aos materiais constituintes do respectivo sistema.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Inúmeros processos industriais dependem de remoção de calor utilizando a água como meio de resfriamento, em razão de suas propriedades físicas peculiares como elevado potencial de condutividade térmica e de calor específico.

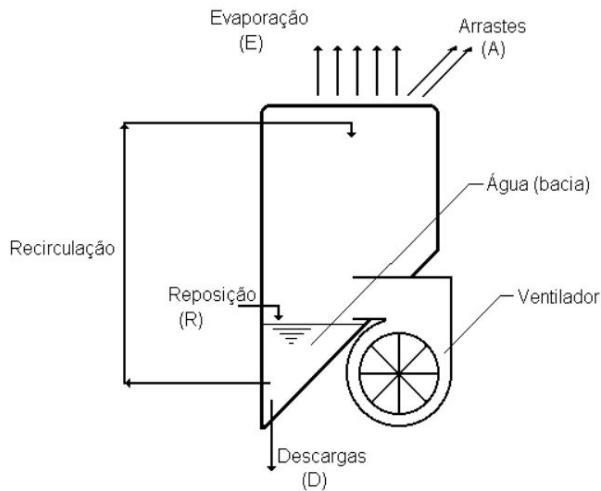
2.1 SISTEMAS DE RESFRIAMENTO

Dentro do ciclo de refrigeração, ocorre o processo de rejeição de calor do fluido frigorífico para o meio de resfriamento. De acordo com Argal Química (2007), os sistemas de resfriamento à água são classificados em três tipos:

- a) Sistema Aberto de Resfriamento: usualmente aplicado em locais com ampla disponibilidade de água, com qualidade e temperatura aceitáveis, capazes de atender aos requisitos do processo satisfatoriamente. A água é utilizada em passagem única promovendo baixo decréscimo de temperatura sendo descartada na conclusão do ciclo;
- b) Sistema Fechado de Resfriamento: caracterizado quando se objetivam quedas acentuadas de temperatura de refrigeração, sendo necessária água com boas propriedades, isentas de sólidos em suspensão e de baixa condutividade. A reposição é esporádica, basicamente em razão de vazamentos e das perdas naturais do ciclo. O tratamento químico resume-se à água de reposição;
- c) Sistema Semiaberto de Recirculação: em trânsito pelos equipamentos de troca térmica que devem resfriar fluidos ou mesmo gases e demais equipamentos, a água aquecida entra em curso de máquinas de resfriamento para reduzir sua temperatura e se tornar própria para o reuso, possibilitando menor volume de captação. Em virtude de sua concepção de projeto é o sistema mais empregado, considerando-se que promove a reutilização da água e permite tratá-la objetivando manter o sistema em condições operacionais correspondentes às desejadas. Tal sistema é pertinente ao resfriamento de gases frigoríficos por condensadores evaporativos, sendo estes o foco deste trabalho.

Esquemáticamente, um sistema de resfriamento semiaberto de recirculação pode ser representado no Esquema 1.

Esquema 1 – Fluxos de água em um sistema de resfriamento



Fonte: Trovatti (2004, p. 17).

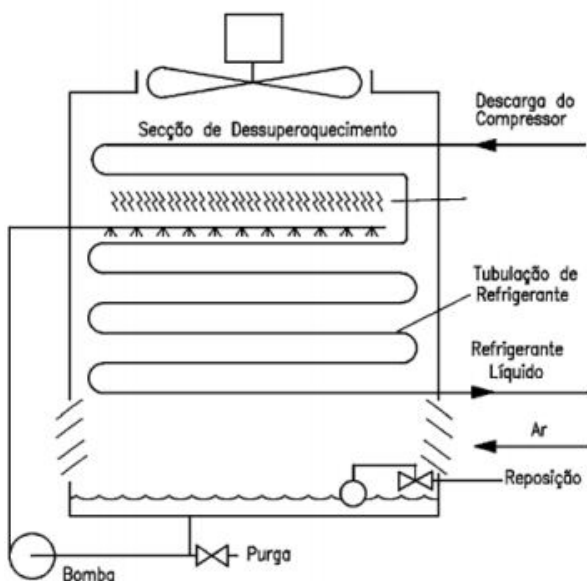
2.1.1 Caracterização dos condensadores evaporativos

Segundo Mebrafe (2011) os condensadores evaporativos são constituídos de uma série de tubos, pelos quais escoo o fluido frigorífico. Bicos injetores instalados acima da tubulação do fluido frigorífico pulverizam água sobre ela, que, por sua vez, escoo, em contracorrente com o ar, em direção à bacia do condensador.

O contato da água com a tubulação por onde escoo o refrigerante provoca a condensação dele, e interligada a esse processo ocorre a evaporação de uma parcela da água. Esse mecanismo, combinado com a transferência de calor e massa entre a água e o ar que escoo em contracorrente resulta no resfriamento da água que chega à bacia do condensador, sendo ela recirculada por uma bomba; a quantidade de água é mantida por meio de um controle de nível, acoplado a uma tubulação de reposição (MEBRAFE, 2011).

O Esquema 2 resume, basicamente, o funcionamento de um condensador evaporativo.

Esquema 2 – Esquema de um condensador evaporativo



Fonte: Ferraz (2008, p. 33).

O sistema de resfriamento em estudo é composto por condensadores evaporativos, que sem a devida manutenção e tratamento adequado da água, estão sujeitos a problemas como a incrustação, a corrosão e a proliferação de micro-organismos que afetam seu desempenho e podem paralisar o processo fabril.

2.1.2 Perdas no sistema

A evaporação da água no sistema de resfriamento implica a necessidade de sua reposição; ademais, a evaporação promove aumento na concentração de sais dissolvidos tornando-se implícito o cuidado com um regime adequado de descargas a fim de evitar uma concentração excessiva deles. A perda por evaporação é diretamente proporcional à variação de temperatura; por estimativas genéricas, a evaporação correspondente à 10 °C de resfriamento obtido é equivalente a cerca de 1,7% da vazão de recirculação (TROVATTI, 2004).

O fluxo de ar presente no sistema fornece impulso às pequenas gotículas de água que, por sua vez, são arrastadas por ele e também causam perda de água do sistema. A perda por arraste é expressa como uma percentagem da vazão da água de circulação sendo estimado empiricamente de uma faixa que varia de 0,1 a 0,2 para condensadores evaporativos. Existem, ainda, outras perdas indeterminadas de líquido, como vazamentos, outros usos, etc. (ARGAL QUÍMICA, 2007).

Para Trovatti (2004), a purga, também conhecida pelo termo em inglês *blowdown*, é utilizada para a manutenção da concentração de sais ou outras impurezas na água de recirculação e consiste no descarte de certa quantidade de água, que passa a ser caracterizada como efluente inorgânico.

Vale ressaltar, segundo Argal Química (2007), que as perdas variam conforme os critérios de construção, a localização e o gradiente térmico; em termos analíticos o balanço mássico a seguir indica a quantidade de água a ser repostada no sistema:

$$R = E + A + D \tag{1}$$

Onde:

- R: água de reposição (m³/h)
- E: perdas por evaporação (m³/h)
- A: perdas por arraste (m³/h)
- D: perdas por descargas e por outros vazamentos (m³/h)

Na visão de Trovatti (2004), o cálculo de balanço de massa e de energia para condensadores, muitas vezes, é impreciso em razão da quantidade de variáveis ambientais e de processo envolvidas. Embora exerça importância nas condições operacionais do processo, é um equipamento de pouca atenção no setor industrial, exceto nas fases de projeto da fábrica e especificação do sistema; porém, em face da importância das interações envolvidas, o condensador e a água empregados no processo merecem atenção na análise sistêmica do processo.

2.1.3 Ciclos de concentração

A fabricante de equipamentos para tratamentos de águas industriais Argal Química (2007) cita que em decorrência dos sólidos dissolvidos que se concentram na água circulante ocorre um ponto de saturação no qual não há mais condições físicas de aumento de concentração em decorrência da equivalência entre a concentração de substâncias perdidas no ciclo e a concentração oriunda da reposição. A determinação do ciclo de concentração máximo teórico deriva dessa limitação física e indica a quantidade de vezes que o fluido pode se concentrar em um sistema por evaporação parcial ou total, sem a ocorrência de purgas.

Conforme Trovatti (2004), considerando que não existam perdas indeterminadas no sistema, bem como outras fontes de alimentação sejam nulas e que durante a evaporação somente água de boa qualidade esteja saindo do sistema, o Ciclo de Concentração (CC) é definido como:

$$CC = \frac{E+A+D}{A+D} = \frac{R}{A+D} = CC = \frac{E}{A+D} + 1 \quad (2)$$

De acordo com a Equação 2, verifica-se que com o aumento da evaporação da água (E), maior é o ciclo de concentração do sistema. Em contrapartida, com o aumento das descargas (D), ocorre uma diminuição dos ciclos. Assim, as descargas são utilizadas para manter a água de resfriamento em níveis aceitáveis de concentração de sais. (TROVATTI 2004).

A equação 2 pode ser rearranjada a fim de permitir a solução direta da vazão de purga necessária para a manutenção de determinado ciclo de concentração.

$$D = \frac{E}{CC-1} - A \quad (3)$$

A Equação 3 é importante, pois modificações no processo produtivo alteram a carga térmica do sistema e, conseqüentemente, aumentam a taxa de evaporação no condensador, culminando no aumento da concentração de impurezas na água, gerando necessidade de aumento no descarte de água (TROVATTI, 2004).

Em vista disso, pode-se mencionar que por meio de análises laboratoriais da água e da determinação do ciclo teórico permissível é possível otimizar a aplicação de descargas no sistema, promovendo menores desperdícios e maior controle operacional.

Os principais parâmetros de controle para o balanço mássico dos sistemas e suas faixas sugeridas anteriormente apresentadas têm por base informações de manuais, recomendações de fabricantes de equipamentos, dados empíricos e na média normalmente praticada pelas empresas especializadas em tratamento de água. No entanto, alguma companhia ou consultor em particular pode adotar valores diferentes dos aqui apresentados.

2.2 FINALIDADE DO TRATAMENTO DA ÁGUA DE RESFRIAMENTO

Relatando-se ao tratamento da água de resfriamento, este pode ser efetuado a partir do emprego de inúmeras técnicas e métodos químicos, físicos ou uma combinação de ambos. A seleção do melhor método deve estar fundamentada na sua eficiência e, evidentemente, no seu custo fixo e operacional, bem como considerar os efeitos ambientais e a respectiva legislação de controle (ARGAL QUÍMICA, 2007).

Segundo Trovatti (2004), essencialmente, os objetivos do tratamento da água de resfriamento são: evitar a formação de incrustações; minimizar os processos corrosivos e controlar o desenvolvimento microbiológico. Todavia, a solução completa ou a eliminação desses problemas torna-se tecnicamente difícil ou inviável do ponto de vista financeiro. Assim, o tratamento pode ter por objetivo minimizar as conseqüências do problema, possibilitando a convivência com ele e otimizando a relação custo-benefício do processo.

2.3 PATOLOGIAS ASSOCIADAS ÀS IMPUREZAS PRESENTES NA ÁGUA

As operações de resfriamento são imprescindíveis nas agroindústrias em geral, pois o processo produtivo é interdependente dessas operações. As patologias frequentemente encontradas nesses sistemas, geralmente simultâneas, são a corrosão, a incrustação ou formação de depósitos e a proliferação de micro-organismos, como conceituado a seguir.

2.3.1 Corrosão

Existem inúmeras definições para o processo de corrosão. Para Dantas (1988), “[...] corrosão é a deterioração de material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos.” Consonante a este, Gemelli (2001) define a corrosão como “[...] uma reação de interface irreversível em que ocorrem reações de oxidação e de redução entre o metal e um agente oxidante.” Gentil (2003) aduz que as formas de corrosão podem ser apresentadas, considerando-se a aparência ou forma de ataque. Basicamente, pode-se ter corrosão segundo a morfologia, as causas ou mecanismos, os fatores mecânicos e o meio corrosivo, sendo predominantes em sistemas de resfriamento semiabertos: corrosão uniforme, corrosão puntiforme ou por pite, corrosão em razão do oxigênio dissolvido, corrosão por ataque cáustico, corrosão em razão dos sais dissolvidos, entre outras.

2.3.2 Incrustações e formações de depósitos

Com a evaporação da água, há um aumento na concentração das substâncias dissolvidas que tendem a se precipitar de forma aderente nas superfícies dos equipamentos.

Para Trovatti (2004) é pertinente fazer uma distinção entre os termos *depósito* e *incrustação* normalmente empregados:

- a) Depósitos: são acúmulos de materiais sobre determinada superfície que podem ser removidos manualmente com facilidade. Embora menos aderidos que as incrustações, os depósitos também prejudicam a troca térmica e o escoamento da água;
- b) Incrustações: caracterizam-se por um acúmulo de material fortemente aderido sobre uma superfície, necessitando de esforços consideráveis para a sua remoção (limpezas mecânicas ou químicas). Normalmente, as incrustações são formadas por precipitação de sais e/ou óxidos na forma cristalina, que geram incrustações altamente coesas e aderidas.

Nesse contexto, Argal Química (2007) enfatiza que os principais problemas dessa natureza estão geralmente associados e ocorrem de forma simultânea, sendo causados pelos seguintes fatores: produtos de corrosão, contaminação microbiológica, sólidos em suspensão, contaminações oleosas, produtos insolúveis, incrustações inorgânicas, contaminações por hidrocarbonetos e outros depósitos diversos característicos das propriedades presentes na água.

2.3.3 Proliferação de micro-organismos

O desenvolvimento ou o crescimento exagerado de micro-organismos na água utilizada em circuitos de resfriamento, em destaque algas, bactérias e fungos é, certamente, um dos grandes problemas encontrados nesses sistemas. Os prejuízos de ordem técnica e econômica são significativos e, algumas vezes, catastróficos (TROVATTI, 2004).

Em suas pesquisas, Videla (2003) enfatiza que os micro-organismos são os principais responsáveis pela biocorrosão, um processo eletroquímico de dissolução metálica, bem como pelo *biofouling*, formação e acúmulo indesejável de depósitos sobre superfícies de equipamentos ou instalações industriais.

Sobre um metal em contato com águas industriais ou naturais, ocorrem processos biológicos, que produzem o *biofouling*, e processos inorgânicos, cujo resultado é a corrosão. Ambos os fenômenos modificam de forma intensa o comportamento da interface metal/solução, todavia, o *biofouling* é um processo de acumulação que se dirige do meio do líquido para a superfície metálica, já a corrosão transcorre no sentido oposto, da superfície metálica para o meio do fluido (VIDELA, 2003).

3 METODOLOGIA

Primeiramente, para a realização do estudo, foi levantado o problema de pesquisa com a indústria. Em um segundo momento, foram identificadas as principais características a respeito do sistema de resfriamento de gases refrigerantes, bem como as variáveis envolvidas no processo.

Posteriormente, em uma terceira etapa do estudo, a partir da observação *in loco* na respectiva empresa, foi definido o ponto de coleta de amostras de águas submetidas às análises físico-químicas em laboratório, denominado água de reposição (para o condicionamento químico do sistema e a determinação do ciclo de concentração máximo). Os parâmetros de qualidade analisados foram pH, alcalinidade, condutividade, dureza, sílica, cloretos, sulfatos, fosfatos e magnésio. As técnicas de análise da água seguiram-se à metodologia do Standard Methods 21ª edição e os métodos empregados foram potenciométrico, espectrofotométrico, condutância e membrana filtrante, realizados em laboratório especializado, com periodicidade semanal totalizando quatro coletas realizadas no mês de outubro.

Os cálculos desenvolvidos para permitir a máxima *performance* no condicionamento do sistema foram realizados a partir de *software* específico para essa natureza, por meio de parceria empresa-fornecedora, para a simulação dos parâmetros do sistema de resfriamento por meio da análise da água de reposição, do balanço material do sistema e das suas condições operacionais, permitindo uma operação segura, sem potenciais de deposição e de incrustação, controlando-se o ciclo concentração de modo a não atingir os limites de solubilidade dos silicatos.

Após a impressão de saída de dados do *software* com os respectivos resultados do balanço de material do sistema e o ciclo máximo teórico determinado, foram desenvolvidos por meio do *software* Microsoft Office Excel, os cálculos de economia e viabilidade de implementação do tratamento da água dispostos na forma de gráficos e tabelas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO ATUAL SISTEMA

Atualmente, o sistema de resfriamento de gases refrigerantes presente na empresa em estudo apresenta patologias inerentes da falta de tratamentos específicos para a água de reposição que abastece o sistema.

Em razão das patologias existentes, verificou-se que somente o processo convencional de tratamento aplicado à água de alimentação do sistema voltado à clarificação dela não é suficiente para adequar todos os parâmetros de qualidade conforme a faixa padrão de valores estabelecida em bibliografias especializadas para a água de resfriamento. Por esse motivo, o sistema opera, atualmente, com baixo ciclo de concentração de água para manter concentrações reduzidas de silicatos nela, promovendo elevado consumo de água e energia.

A falta de tratamentos químicos internos para o controle de dureza, sílica, alcalinidade e crescimento microbológico, foram determinantes para a formação de patologias hoje encontradas nesse sistema. Por esse motivo, propõe-se o condicionamento químico adequado do sistema para o controle do desenvolvimento microbológico, bem como para manter as concentrações dos silicatos solúveis facilitando sua eliminação pelo processo de purgas, evitando a formação e o agravamento de depósitos, incrustações e corrosões no respectivo sistema.

O sistema de resfriamento de gases refrigerantes compreende quatro condensadores evaporativos trabalhando em regime integrado durante 21 horas/dia, recebendo a descarga de nove compressores a parafuso, condensando amônia que abastece evaporadores de 15 câmeras refrigerantes, duas estocagens de produtos congelados, uma estocagem de matéria-prima, um túnel de congelamento contínuo, máquina de gelo, trocadores de calor e diversos outros equipamentos.

Considerando as informações técnicas de cada condensador, seu regime de trabalho e que operam na capacidade nominal, todas as variáveis necessárias para o balanço mássico do sistema são conhecidas e ficam estabelecidas conforme dados do Quadro 1.

Quadro 1 – Dados operacionais do sistema para o balanço de material

Parâmetro	Quantidade
Número de equipamentos	4
Vazão de recirculação total (m³/h)	950
Volume estático total do sistema (m³)	34
Gradiente de temperatura na condensação NH ₃ (°C)	45
Diferencial de temperatura no ciclo (°C)	4
Percentual de arraste do sistema (%)	0,3
Percentual de evaporação do sistema (%)	0,85
Capacidade nominal do sistema (Kcal/h)	8.800.000
Tempo de operação (horas/dia)	21

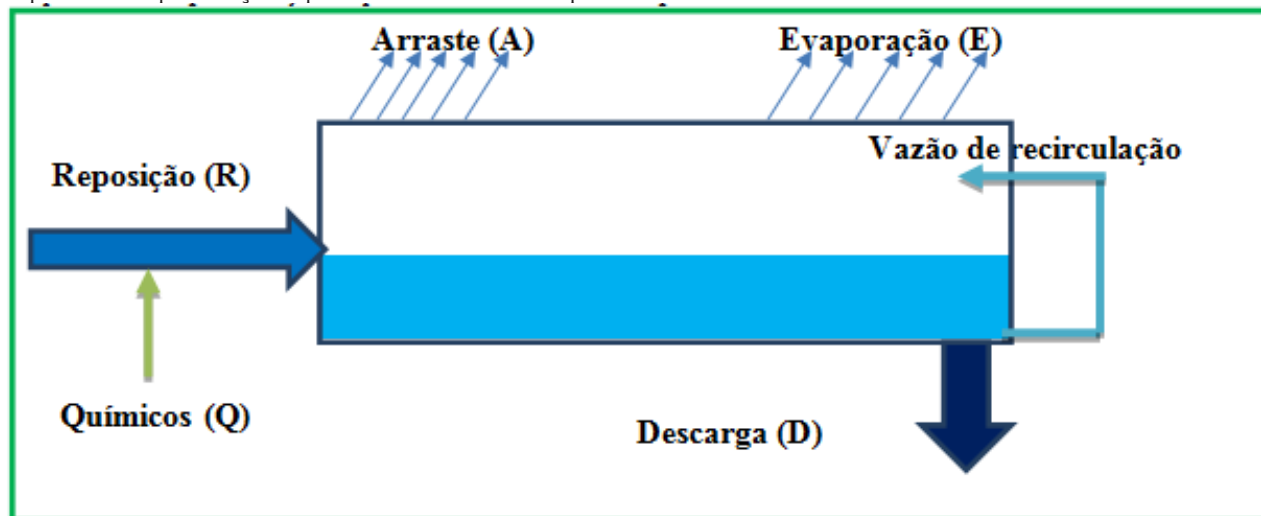
Fonte: os autores.

4.2 AVALIAÇÃO DA ÁGUA DE REPOSIÇÃO *VERSUS* CICLOS DE CONCENTRAÇÃO

Grande parte da transferência de energia calorífica ocorrida em condensadores evaporativos se refere à troca de calor latente causada pela vaporização de uma parcela de água. O restante da remoção de calor é resultante da troca de calor sensível. Faz-se necessário mapear e caracterizar as correntes do sistema em estudo para que seja possível estimar os tratamentos necessários para a água de reposição.

Para o balanço mássico do sistema em questão, a fim de determinar as vazões envolvidas no processo, tomou-se como base para os cálculos o Esquema 3 apresentado a seguir.

Esquema 3 – Representação esquemática das correntes de processo nos condensadores



Fonte: os autores.

A partir das análises físico-químicas da água e das principais características do sistema em estudo como vazão de recirculação, volume estático do sistema, diferencial de temperatura, metalurgia e tempo de operação, foram simuladas e calculadas as perdas por evaporação e o arraste do sistema, bem como o ciclo de concentração máximo teórico, para permitir a máxima *performance* no condicionamento químico a ser aplicado.

Foram considerados para efeito de cálculo os valores médios obtidos das análises laboratoriais da água de reposição (*make-up*), conforme descrito no Quadro 2.

Quadro 2 – Características físico-químicas da água de reposição (*make-up*): parâmetros principais

Item de controle	Unidade	Resultado médio
pH	-	7
Alcalinidade total	ppm CaCO ₃	26
Dureza total	ppm CaCO ₃	15
Dureza cálcio	ppm CaCO ₃	12
Sílica solúvel	ppm	14
Cloretos	ppm	7
Sulfato	ppm SO ₄	5
Condutividade	us/cm ²	86

Fonte: os autores.

O Quadro 2 apresenta os resultados médios dos parâmetros de qualidade da água de reposição do sistema em estudo. É importante salientar que o processo convencional de tratamento aplicado à água de resfriamento de gases frigoríficos por parte da empresa em estudo não possui a função de remover sílica, dureza e alcalinidade, pois a eliminação destes não é finalidade da existência dos tratamentos convencionais voltados à clarificação da água. Contudo, os resultados médios das análises laboratoriais no período de estudo considerado demonstram que os parâmetros de qualidade estão dentro da faixa padrão de valores estabelecida em bibliografias, porém, o sistema opera com baixo ciclo de concentração para o controle dos respectivos parâmetros, promovendo desperdícios de água e energia.

Por meio do condicionamento químico proposto para a água de reposição do sistema, é possível aumentar os ciclos de concentração sem potenciais de deposição e de incrustação, controlando-se os parâmetros de qualidade da água de modo a não atingir seus limites de solubilidade.

Para manter uma operação segura do sistema, controlando-se o ciclo de concentração, faz-se necessário o controle dos silicatos presentes na água por meio dos tratamentos propostos. O Quadro 3 a seguir contempla os principais parâmetros de controle para o sistema de resfriamento, bem como a faixa de concentração requerida e os meios de ajuste para manter o condicionamento adequado do sistema.

Quadro 3 – Parâmetros de controle sistema de resfriamento

Item de controle	Condensador evaporativo	Meio de ajuste
pH	8,5 a 9,20*	Descargas
Alcalinidade total	Máx. 250 ppm CaCO ₃ *	Descargas/Dispersante
Dureza total	Máx. 150 ppm CaCO ₃ *	Descargas/Dispersante
Sílica solúvel	Máximo 200 ppm*	Descargas/Dispersante
Cloretos	Máximo 100 ppm*	Descargas
Condutividade	Máximo 900 µs/cm*	Descargas
Controle microbiológico	Máximo 50.000 UFC*	Biocidas

Fonte: adaptado de Argal Química (2007).

Nota: *Os valores aqui apresentados são os recomendados por Argal Química (2007).

Após a inserção dos dados no *software* respeitando o descrito no Quadro 1, a realização dos cálculos e a simulação dos parâmetros, foram obtidos os resultados expressos na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados do balanço mássico do sistema e do cálculo do ciclo concentração máximo teórico

												VOL	34	(m ³)
												RR	950	(m ³ /hr)
												DT	4,0	(deg C)
												EVAP	5,8	(m ³ /hr)
												F	0,85	
												Drift:	2,9	(m ³ /hr)
													45 °C (Hottest Bulk Water)	
													0,30% Drift (0.05-0.2%)	
Legenda														
M.U – Vazão de reposição						VOL – Volume estático								
B.D – Perdas líquidas						RR – Vazão recirculação								
RT75 – Tempo de retenção						DT – Diferencial de temperatura								
Evap. – Perdas evaporação						Drift – Perdas por arraste								
CYCLES	pH	M-ALK (ppmas CaCO3)	Ca (ppmas CaCO3)	Mg (ppmas CaCO3)	SiO2 (ppmas SiO2)	COND (unhos)	Cl (ppmas Cl)	SO4 (ppmas SO4)	LSI CaCO3 Index	MgSi	CMSi	RT75 (Retention Time in days)	B.D. (m3/hr)	M.U. (m3/hr)
MAKEUP	7,00	26	12	3	14	86	7	5	-1,73	ok	ok			
1,5	7,58	39	18	5	21	129	11	8	-0,82	ok	ok	0,17	11,6	17,4
2,0	7,86	52	24	6	28	172	14	10	-0,32	ok	ok	0,33	5,8	11,6
2,5	8,07	65	30	8	35	215	18	13	0,07	ok	ok	0,50	3,9	9,7
3,0	8,24	78	36	9	42	258	21	15	0,40	ok	ok	0,67	2,9	8,7
3,5	8,39	91	42	11	49	301	25	18	0,67	ok	ok	0,83	2,3	8,1
4,0	8,52	104	48	12	56	344	28	20	0,90	ok	ok	1,00	1,9	7,8
4,5	8,63	117	54	14	63	387	32	23	1,11	ok	ok	1,17	1,7	7,5
5,0	8,73	130	60	15	70	430	35	25	1,29	ok	ok	1,33	1,5	7,3
5,5	8,82	143	66	17	77	473	39	28	1,46	ok	ok	1,50	1,3	7,1
6,0	8,90	156	72	18	84	516	42	30	1,61	ok	ok	1,67	1,2	7,0
6,5	8,98	169	78	20	91	559	46	33	1,75	ok	ok	1,84	1,1	6,9
7,0	9,05	182	84	21	98	602	49	35	1,88	ok	ok	2,00	1,0	6,8
7,5	9,12	195	90	23	105	645	53	38	2,01	ok	ok	2,17	0,9	6,7
8,0	9,18	208	96	24	112	688	56	40	2,12	ok	ok	2,34	0,8	6,6
8,5	9,24	221	102	26	119	731	60	43	2,23	ok	ok	2,50	0,8	6,6
9,0	9,29	234	108	27	126	774	63	45	2,33	*****	ok	2,67	0,7	6,5
11,0	9,48	286	132	33	154	946	77	55	2,68	*****	ok	3,34	0,6	6,4
14,0	9,71	364	168	42	196	1204	98	70	*****	*****	*****	4,34	0,4	6,3

Fonte: os autores.

A Tabela 1 mostra a impressão de saída de dados do *software* contendo os resultados do balanço mássico do sistema. Nota-se que o aumento na concentração dos parâmetros de qualidade da água é proporcional à variação dos ciclos de concentração, pois esse índice indica quantas vezes a concentração de sólidos na água em circulação é maior que a concentração de sólidos na água de reposição. Observa-se, ainda, que a variação positiva dos ciclos de concentração promove redução na vazão de reposição, as perdas no sistema regridem em decorrência das condições termodinâmicas e de transferência de calor presentes ao longo dos ciclos, influenciadas pela variação de temperatura no resfriamento promovido pela evaporação da água e por ventilação forçada. Os principais resultados determinados a partir da simulação foram as perdas por arraste de 2,9 m³/h, considerando um fator percentual de 0,3 da vazão de reposição. Sendo considerada a variação de temperatura de 45 °C durante a condensação do fluido frigorífico no condensador, bem como o gradiente de temperatura de 4 °C entre a temperatura da água do ciclo na bacia do condensador e a temperatura de bulbo úmido, associado a um fator percentual de evaporação de 0,85, as perdas por evaporação no sistema para esse caso são de 5,8 m³/h, para apenas um ciclo de concentração. Somando-se, ainda, as perdas por descargas, arraste e evaporação, a vazão média de água de reposição é de 17,4 m³/h. O ciclo de concentração máximo teórico calculado para o sistema foi de 8,5, ou seja, a água de reposição pode concentrar-se 8,5 vezes no sistema sem que atinja seus limites de solubilidade para os parâmetros considerados, reduzindo a vazão de reposição do sistema para 6,6 m³/h, bem como as perdas líquidas para 0,8 m³/h, por meio dos tratamentos aplicados e do controle de purgas. O tempo de retenção hidráulica do sistema utilizado para determinar a frequência de dosagem dos produtos químicos foi calculado em 2,5 dias, para manter seu condicionamento adequado.

4.3 ANÁLISE DE VIABILIDADE

As dosagens de produtos químicos recomendadas por fornecedor especializado, a partir dos resultados das análises laboratoriais nos pontos de coletas determinados, bem como a quantidade consumida e o custo deles são apresentados na Tabela 2, suas formulações e demais particularidades são de domínio exclusivo do fornecedor e, portanto, não divulgadas.

Tabela 2 – Custo do tratamento proposto para a água de reposição

Produto	Consumo (kg/dia)	Consumo (kg/mês)	Custo unitário (R\$)	Custo mensal (R\$)
Agente dispersante	1,95	43	15,15	651,45
Biocida	1,05	24	10,66	255,84
			Total**	907,29

Fonte: os autores.

**Nota: Para efeito de cálculo, foram considerados 22 dias de operação por mês.

A partir do balanço mássico do sistema, foram calculadas e simuladas as vazões de reposição na condição real de um ciclo de concentração, bem como na condição ideal de 8,5 ciclos de concentração. Após a realização do levantamento do custo do tratamento específico para a água de reposição, bem como do custo do tratamento para a clarificação da água de captação, tornou-se possível determinar a economia financeira obtida pela redução no consumo de água que abastece o sistema.

Para o sistema utilizado atualmente, foram considerados somente os custos referentes ao processo de tratamento para a clarificação da água que abastece o sistema, cujo valor é de 2,71 R\$/m³.

O custo do tratamento proposto para a água de reposição respeitando os valores apresentados na Tabela 2, é de 0,30 R\$/m³.

A Tabela 3 apresenta os resultados teóricos da economia financeira alcançada por meio da aplicação do tratamento proposto.

Tabela 3 – Economias esperadas com a aplicação de tratamento específico

Análise de viabilidade do tratamento da água do sistema de resfriamento de gases frigoríficos						
Panorama	Situação atual	Projeção futura	Economia de água (m³)		Economia em (R\$)	
Consumo (m ³ /h)	17,40	6,60	10,80	27,29	R\$/h	
Consumo (m ³ /dia)	417,60	158,40	259,20	654,91	R\$/dia	
Consumo (m ³ /mês)	9.187,20	3.484,80	5.702,40	14.408,06	R\$/mês	
Consumo (m ³ /ano)	110.246,40	41.817,60	68.428,80	172.896,77	R\$/ano	
Custo do tratamento convencional da água de captação R\$ 2,71 reais/m ³						
Custo do tratamento proposto da água de reposição R\$ 0,30 reais/m ³						

Fonte: os autores.

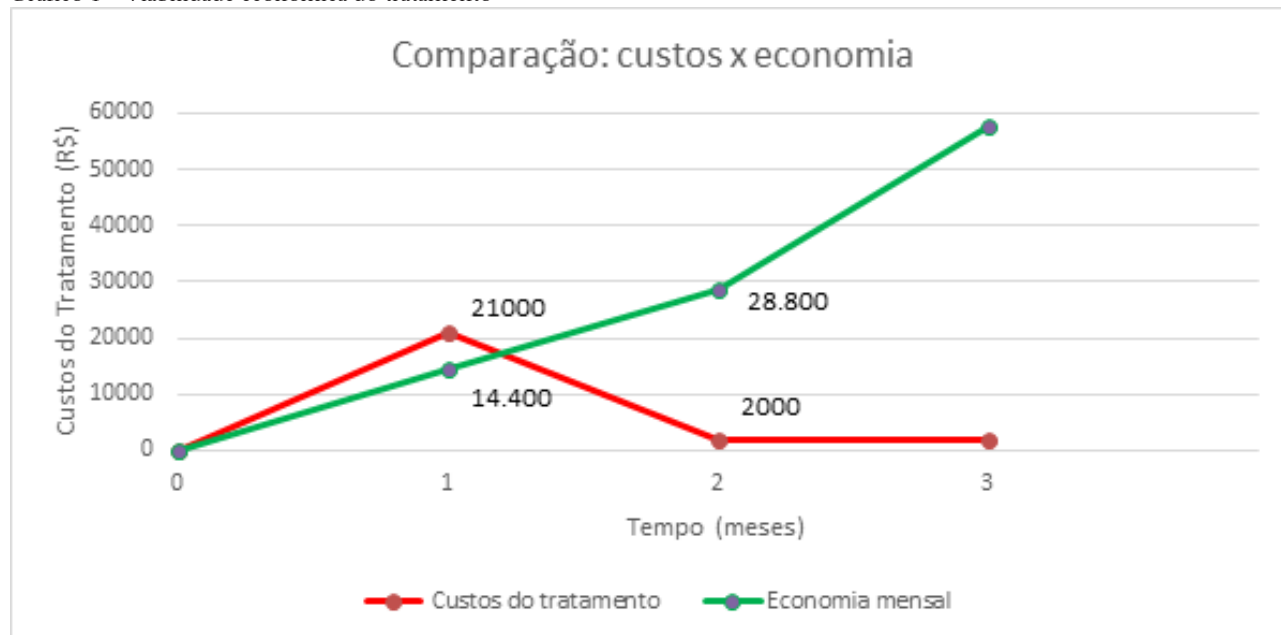
Observando a Tabela 3, nota-se que a economia de água anual é significativa, aproximadamente 68.428 m³, valor que representa aproximadamente 38% de redução em comparação ao consumo atual. Verifica-se, também, que a economia financeira anual é de aproximadamente R\$ 172.900,00 reais considerando apenas os custos com os produtos químicos para o tratamento da água de reposição.

A fim de levantar os outros custos relativos a tanques para armazenagem de produtos químicos, bombas dosadoras, *timer* para dosagens de produtos químicos e sistemas de purga automático, foram solicitados diversos orçamentos em empresas do ramo, dos quais o maior valor foi de aproximadamente R\$ 20.000,00. Os custos para análises laboratoriais periódicas dos principais parâmetros do sistema são de aproximadamente R\$ 1.000,00 reais mensais.

Considerando o investimento inicial, bem como o custo mensal dos produtos químicos e das análises laboratoriais e comparando-os à economia mensal referente à captação e ao tratamento da água clarificada do sistema, ou seja,

o quanto a empresa deixará de gastar para tratar a água de captação mensalmente, o retorno do investimento é rápido, em pouco mais de um mês os custos se diluem em razão da grande economia gerada, conforme mostra o Gráfico 1.

Gráfico 1 – Viabilidade econômica do tratamento



Fonte: os autores.

5 CONCLUSÃO

Com o aumento da cobrança por parte dos órgãos ambientais e governamentais, dos meios acadêmicos e econômicos, as organizações que almejam reconhecimento no mercado nacional e principalmente internacional, cada vez mais exigente com as questões ambientais, necessitam produzir de forma eficiente, controlando seus processos de maneira a obter maior rendimento com o menor impacto ambiental.

Com base nos resultados apresentados e desenvolvidos no decorrer deste estudo, pode-se constatar que é economicamente viável realizar tratamentos específicos na água de reposição dos condensadores evaporativos, visto que a determinação do ciclo de concentração máximo-teórico associado ao balanço mássico do sistema comprova significativa redução no consumo de água, resultando na diminuição de 38% na vazão de sua reposição. A empresa deixará de gastar anualmente aproximadamente R\$ 172.900,00 reais com o tratamento convencional para a clarificação da água, obtendo rápido retorno do investimento para a readequação do atual sistema; em pouco mais de um mês os custos se diluem em razão da grande economia gerada, tornando-se, portanto, uma alternativa bastante atrativa para o abatimento nos custos envolvidos na captação e no condicionamento da água que abastece o sistema.

Dessa forma, culmina-se em maior vida útil aos equipamentos, maior segurança operacional e indo ao encontro de atitudes de proteção ao meio ambiente, mantendo o crescimento econômico sem deixar de considerar a perpetuidade dos recursos naturais e as necessidades das gerações futuras.

REFERÊNCIAS

DANTAS, E. **Geração de vapor e água de refrigeração**: falhas, tratamento, limpeza química. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Corrosão, 1988.

FERRAZ, F. **Sistemas de refrigeração**. Apostila (Refrigeração). Centro Federal de Educação Tecnológica. 2008. Disponível em: <http://fabioferrazdr.files.wordpress.com/2008/09/ref1_total1.pdf>. Acesso em: 09 ago. 2012.

GEMELLI, E. **Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização**. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

MEBRAFE. **Manual Condensador Evaporativo**. Caxias do Sul, 2011.

QUÍMICA, A. Tipos de tratamento para torres de resfriamento. **Revista Hydro**, São Paulo, ano 1, n. 2, p. 24-33, ago. 2007.

TROVATTI, J. **Tratamento de água de resfriamento**. 2004. Disponível em: <http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2012.

VIDELA, H. A. **Biocorrosão, biofouling e biodeterioração de materiais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2003.

