PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS
MESTRADO PROFISSIONAL

REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA CONDENSADA DOS COMPRESSORES NAS TORRES DE RESFRIAMENTO EM UMA INDÚSTRIA DE MANAUS

Diana Rolo Nomura

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Edinaldo José de Sousa Cunha

Belém

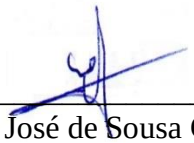
Dezembro de 2019

REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA CONDENSADA DOS COMPRESSORES NAS TORRES DE RESFRIAMENTO EM UMA INDÚSTRIA DE MANAUS

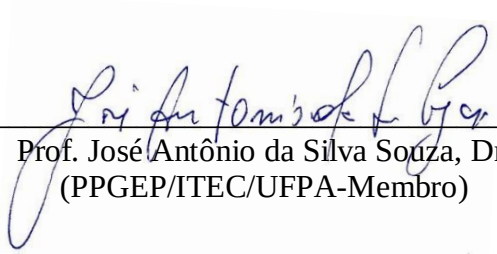
Diana Rolo Nomura

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

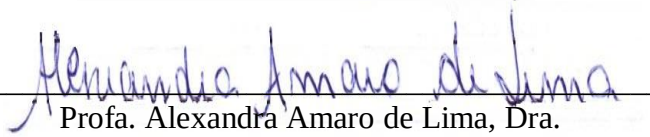
Examinada por:



Prof. Edinaldo José de Sousa Cunha, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



Prof. José Antônio da Silva Souza, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



Profa. Alexandra Amaro de Lima, Dra.
(UNIP-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

DEZEMBRO DE 2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Nomura, Diana Rolo, 1982

Reaproveitamento de água condensada de compressores nas torres de resfriamento em uma indústria de Manaus /Diana Rolo Nomura – 2019.

Orientador: Edinaldo José de Sousa Cunha

Dissertação (Mestrado Profissional) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2019.

1. Água-Reuso 2. Torres de resfriamento 3. Compressores 4. Água-Consumo I. Título

CDD 23. ed.628.162.

Dedico este trabalho a Deus, autor e consumador da minha fé e ao melhor pai que Deus me deu, Anilton de Souza Filho (in memorian), meu primeiro orientador na vida acadêmica e quem sempre dedicou o seu tempo para me ensinar os primeiros passos da minha profissão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, sem isso eu jamais poderia estar aqui, bem como me prover de recursos financeiros para financiar este sonho. Ao meu orientador pela paciência e disposição em ajudar sempre. À Prof. Msc. Tereza, Prof. Dr. Jandecy, Prof. Alberto pelo entusiasmo e incentivo nessa jornada de confecção desta dissertação. Aos meus orientadores Dr. Jose Antonio e em especial ao Dr. Edinaldo Cunha pela paciência, primor nas orientações e por ensinar-me a amar cada dia mais a docência. Ao meu esposo Lúcio Júnior e ao meu filho Heitor Hiroshi, por compreenderem a minha ausência em muitos momentos. À minha avó Marina Rolo e mãe Izabel Rolo pelos anos de investimento na minha formação. Aos meus sogros Lúcio e Francisca Nomura e minha cunhada Luna Nomura por sempre acreditarem no meu trabalho e dedicação. Aos meus irmãos Anilton Neto e Lucas, e cunhada Aline por torcerem pelas minhas conquistas. A todos os amigos da turma de mestrado, em especial ao Dimas, Priscilla, Lee Marcos, Hugo, Eriana e Raul. Aos meus amigos da igreja, Oristela, Larissa, Daniel, Sônia, Luiz Costa, Suzany e William que me sustentaram em oração em muitos momentos. Ao amigo querido Armando, meu parceiro na indústria, e quem muito me incentivou e apoiou para realizar este sonho. Aos amigos antigos de laboratório e da faculdade Dr. Spartaco Astolfi Filho, Dra. Enedina Assunção, Msc. Roberto Filho, Dra. Évelyn Lira e Dr. Edmar Andrade por me ajudarem nos primeiros passos da minha carreira. Às minhas amigas de Escola Técnica, Haline, Vanessa, Lizandra e Carla por caminharem comigo tantos anos. À minha prima e amiga Marina Rolo e sua mãe Inês por sempre incentivarem meus estudos em meio as adversidades. Aos amigos de farda Maira, Liene, Pâmela, Helbere Diego Rabelo, pela garra e alegria de todos os dias. À Professora Carolina Paiva, pela ajuda nas correções dos textos em português e à querida Gilmara por auxílio brilhante na tradução para o inglês. Às minhas amigas Cristiane Sena e Andreia Guerreiro por presenciarem desde o início dessa jornada. Às minhas queridas amigas Suzzie Lindoso, Creuza Marques e Kenia Nobre por acompanharem a minha formação acadêmica e profissional por muitos anos. À UFPA que disponibilizou este mestrado em Manaus. Ao ITEGAM por dar-nos o suporte necessário mediante às distâncias entre Manaus e Belém e por disponibilizar seu espaço para pesquisas bibliográficas e orientações. E por fim, a todos aqueles cujos

nomes não foram citados, mas que foram essenciais na minha formação como pessoa e como profissional.

"*Ensina-nos a contar os nossos dias, de tal maneira que alcancemos corações sábios...*"

(Bíblia Sagrada - Salmos 90:12)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

REAPROVEITAMENTO DE ÁGUA CONDENSADA DOS COMPRESSORES NAS TORRES DE RESFRIAMENTO EM UMA INDÚSTRIA DE MANAUS

Diana Rolo Nomura

Dezembro/2019

Orientador: Edinaldo José de Sousa Cunha

Área de Concentração: Engenharia de Processos

A água no meio industrial é força motriz para qualquer processo de fabricação, sendo esta um recurso natural escasso e finito. Para que seu uso seja racional, muitas medidas no ambiente fabril devem ser tomadas a fim de preservar esse bem. Na indústria, a água de condensação dos compressores é canalizada para a galeria de águas pluviais. Por sua vez, nas torres de resfriamento, a água da bacia evapora e é necessária a sua reposição com água de poço artesiano. Em ambos os processos a água é desperdiçada. Objetivando elucidar essas situações, os procedimentos podem ser desenvolvidos por meio da canalização dos drenos da purga dos compressores para uma cisterna e bombeio da água para a bacia das torres de resfriamento. A metodologia da presente pesquisa configura-se como experimental, uma vez que foram utilizados compressores para a recuperação de águas até então inservíveis. Sendo assim, a água que era outrora descartada nos compressores será reaproveitada nas torres que não exigem tanta qualidade. Essa reutilização poderá solucionara problemática de reposição contínua para manter o nível de água na bacia exigido pela torre. A aplicação deste recurso permitirá reduzir os gastos com produtos químicos em águas de arrefecimento em aproximadamente 59%, porque não será necessário tratar a agressividade dos sais presentes, pois os mesmos estarão em quantidades ínfimas. Com isso, a reutilização desse bem favorecerá não só a preservação de um recurso natural, mas também a

redução do consumo de produtos químicos na torre, bem como a diminuição de custos com manutenções e limpezas nesses equipamentos.

Abstract of Dissertation presented to PPGEP/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

CONDENSED WATER RECOVERY OF COMPRESSORS IN COOLING TOWERS IN A MANAUS INDUSTRY

Diana Rolo Nomura

December/2019

Advisor: Edinaldo José de Sousa Cunha

Research Area: Process Engineering

Industrial water is a driving force for any manufacturing process, which is a scarce and finite natural resource. For its use to be rational many measures in the manufacturing environment must be taken in order to preserve this asset. In industry, condensation water from compressors is channeled into the stormwater gallery. In turn, in the cooling towers, the basin water evaporates and its replacement with artesian well water is necessary. In both processes water is wasted. In order to elucidate these situations, the procedures can be developed by channeling the compressor purge drains into a cistern and pumping water into the cooling tower basin. The methodology of the present research is configured as experimental, since compressors were used for the recovery of previously unserviceable waters. Thus, the water that was once discarded in the compressors will be reused in towers that do not require such quality. This reuse may solve the problem of continuous replacement in order to maintain the basin water level required by the tower. The application of this feature will reduce the costs of chemicals in cooling water by approximately 59%, because will not be necessary treating the aggressiveness of the salts present, as they will be in very small quantities. Hence the reuse of this asset will favor not only the preservation of a natural resource, but also the reduction of chemical consumption in the tower, as well as the reduction of maintenance and cleaning costs in these equipments.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... 1
1.1 - MOTIVAÇÃO..... 4
1.2 - OBJETIVOS..... 6
1.2.1 - Objetivo geral..... 6
1.2.2 - Objetivos específicos..... 6
1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO..... 6
1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO..... 7
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA..... 9
2.1 - O USO DA ÁGUA DE CONDENSADO NOS COMPRESSORES..... 9
2.1.1 - Composição do ar comprimido..... 12
2.1.2 - Umidade do ar..... 14
2.1.3 - Taxa volumétrica em um escoamento..... 15
2.1.4 - Relação entre massa, pressão, temperatura e volume de um gás..... 15
2.1.5 - Tipos de compressores..... 17
2.1.6 - Purgadores..... 18
2.1.7 - Importância da torre de resfriamento no ambiente fabril..... 19
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS..... 23
3.1 - MATERIAIS..... 23
3.2 - EQUIPAMENTOS..... 23
3.3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL..... 26
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 31
4.1 - RESULTADOS DA QUANTIDADE DE ÁGUA COLETADA ORIUNDA DO PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DOS COMPRESSORES..... 31
4.2 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO – QUÍMICA DA ÁGUA COLETADA DOS COMPRESSORES..... 32
4.3 - QUANTIDADE DE PRODUTOS QUÍMICOS APLICADOS NAS TORRES DE RESFRIAMENTO COM A ÁGUA DO POÇO E A ÁGUA REAPROVEITADA DA CONDENSAÇÃO DOS COMPRESSORES..... 33
4.4 - ÍNDICES DE SATURAÇÃO E ESTABILIDADE..... 35
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... 38
5.1 - CONCLUSÕES..... 38
5.2 - SUGESTÕES..... 39

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 40

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Curvas de erro relativo entre densidades calculadas e medida....	16
Figura 2.2	Alguns exemplos de compressores de deslocamento positivo e compressão dinâmica.....	18
Figura 2.3	Esquema de funcionamento de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.....	21
Figura 2.4	Foto de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.....	21
Figura 2.5	Esquema de uma torre de resfriamento do tipo ar cruzado.....	21
Figura 2.6	Foto de uma torre de resfriamento do tipo ar cruzado.....	22
Figura 3.1	Caixa d'água de 1000 litros utilizada como recipiente coletor....	23
Figura 3.2	Especificação técnica das dimensões da caixa d'água.....	24
Figura 3.3	Bomba submersa utilizada para transferência de líquidos.....	25
Figura 3.4	Compressor VSD – 500.....	26
Figura 3.5	Local de onde foi coletada a água a ser reaproveitada.....	28
Figura 3.6	Fluxo do processo proposto no trabalho.....	29
Figura 3.7	Informações técnicas da torre de resfriamento escolhida para o projeto.....	29
Figura 3.8	Foto tridimensional da torre de resfriamento.....	30
Figura 4.1	Comparativo de águas condensadas dos compressores versus necessidade da torre de resfriamento.....	31
Figura 4.2	Custos com compras de produtos químicos para tratamento de torres de resfriamento.....	34
Figura 4.3	Percentual de redução de custos com insumos químicos.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Composição aproximada do ar comprimido.....	12
Tabela 3.1	Parâmetros e métodos ou equipamentos utilizados nas análises.	28
Tabela 3.2	Balanço de massa individualizado do sistema escolhido.....	30
Tabela 4.1	Parâmetros físico - químicos das amostras analisadas das purgas dos compressores e da água oriunda do poço artesiano da empresa.....	32
Tabela 4.2	Custos dos produtos químicos aplicados na torre de resfriamento.....	33
Tabela 4.3	Quantidade de produtos químicos aplicados na torre de resfriamento.....	33
Tabela 4.4	Classificação dos valores obtidos com a aplicação do LSI.....	37
Tabela 4.5	Classificação dos valores obtidos com a aplicação do RSI.....	37

NOMENCLATURA

ANA	AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS
ANVISA	AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA
APHA	"AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION" OU ASSOCIAÇÃO AMERICANA DE SAÚDE PÚBLICA
CNI	CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA
FIRJAN	FEDERAÇÃO DAS INDÚTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO
MS	MINISTÉRIO DA SAÚDE
NBR	NORMA TÉCNICA
PIM	POLO INDUSTRIAL DE MANAUS
PROCEL	PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
PVC	POLYVINYL CHLORIDE" OU POLICLORETO DE POLIVINILA
SI	SISTEMA INTERNACIONAL

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Pensar e discutir as questões de reutilização de água na sociedade é essencial para o futuro do planeta e dos seres vivos, pois tal futuro depende de como o ser humano interage com a natureza que o cerca. As reservas de água doce e potável no mundo hoje estão cada vez mais escassas. Segundo (FERREIRA, 2016), a água é vital para os ciclos biológicos, geológicos e químicos que mantém em equilíbrio os ecossistemas.

É um recurso natural essencial para a manutenção de todas as formas de vida. Entretanto, a água, por sua simples presença, não significa que esteja pronta para ser utilizada. É necessário que ela esteja apropriada para consumo humano, vida aquática, lazer, produção de alimentos e subsequentemente geração de energia elétrica.

De acordo com a Declaração Universal dos Direitos da Água: Artigo 8º "Sua proteção constitui uma obrigação jurídica para todo homem ou grupo social que a utiliza. Esta questão não deve ser ignorada nem pelo homem nem pelo Estado". A utilização da água implica no respeito à lei, ela não deve ser desperdiçada, poluída, envenenada, dentre outros. De maneira geral, sua utilização deve ser feita com consciência e discernimento para que não chegue a uma situação de esgotamento ou de deterioração da qualidade das reservas disponíveis.

A água possui um valor inestimável. Além de ser um insumo indispensável à produção e um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico, a água constitui um fator determinante na manutenção dos ciclos biológicos, geológicos e químicos que garantem equilíbrio aos ecossistemas. É ainda um bem cultural e social indispensável à sobrevivência e à qualidade de vida da população.

As questões ambientais estão cada vez mais presentes no cotidiano da população em geral, principalmente no que se refere ao desafio de preservar a água. Neste âmbito, a Educação Ambiental surge como agente formador de uma consciência ambiental, a partir do momento que destaca a importância da água como um elemento vital para a existência dos seres vivos e do meio ambiente, e conscientizador da sociedade quanto à preservação e o uso adequado do recurso natural água (BUSTOS, 2003).

A água têm sido um dos principais assuntos relacionados às questões ambientais, por serem indispensáveis para todos os seres vivos, já que é um recurso essencial à

preservação da vida. Sem ela, nenhuma forma de vida conhecida atualmente existiria ousobreviveria. Em todos os organismos vivos, ela atua em funções importantes que são essenciais para o funcionamento adequado de um organismo. No corpo humano, essa substância exerce variadas atividades essenciais para garantir o equilíbrio e funcionamento adequado do organismo como um todo. É sabido que o planeta onde vivemos possui uma enorme extensão de água. Em dados mais abrangentes segundo (PHILIPPI JR *et al.*, 2005)a quantidade de água em todo o planeta corresponde a 75% de toda a superfície terrestre, variando de acordo com os 24 estados físicos em que ela está na natureza. Porém, deste total 97,3% é formada por água salgada e está em mares e oceanos, 2,7% é água doce e se encontra em lagos, rios, geleiras, vapor d'água e águas subterrâneas. Vale ressaltar ainda que dos 2,7% de água doce, 30% corresponde a águas subterrâneas.

Mediante estes dados, vemos a importância do desenvolvimento de ações de reutilização que incentivem o uso racional da água. Para SILVA (2019), A água está distribuída na superfície da terra entre água doce e água salgada. Apenas 2,5% se encontram na forma de água doce, cuja maior parte está em forma de gelo nas regiões do Ártico, da Antártica e das montanhas, aproximadamente 68,9%, em águas subterrâneas, cerca de 29,9%, e 0,9% está em pântanos, pergelisolo e umidade do solo. Somente 0,3% está na superfície. E a presença na superfície da terra se fundamenta no ciclo hidrológico, cujo resultado é o escoamento de 42.700 Km^3/ano de água pelos rios, distribuídos de forma irregular, gerando áreas de notável abundância como, por exemplo, a Amazônia e outras de elevado estresse hídrico como as regiões do norte da África e da Península Arábica.

O acesso à água potável é uma necessidade que tem acompanhado as diferentes civilizações desde as épocas mais remotas e, com o crescimento e desenvolvimento tecnológico da população humana começou a surgir os problemas, não só relativos à quantidade de água disponível, como também à sua qualidade (FILHO, 2011). Para ANANIAS e MARIN (2011), a carência de água potável em muitos lugares do planeta está relacionada ao desperdício e a poluição. Pois, com o avanço das cidades e o predomínio da população no meio urbano muitas pessoas possuem hábitos impróprios, como por exemplo, o mau uso em atividades diárias, que levam a ocorrência de desperdício. Assim, os recursos hídricos passaram a ser, cada vez mais, o alvo de medidas de mitigação e usos conscientes.

Pensando nesse cenário, foi importante criar medidas para minimização do desperdício de água, e consequentemente o seu reuso ou reaproveitamento, pois o sucesso nessa empreitada traria mais efeitos positivos do que qualquer outra política de uso da água, garantindo, assim, o seu uso sustentável. Nessa direção, vimos a geração de uma oportunidade para aprofundar em ideias práticas e acessíveis soluções para o reuso da água. Diante disso, foi possível desenvolver um sistema no qual ocorre a captação de água que é purgada do processo de funcionamento dos compressores de ar e posteriormente um sistema de armazenamento.

Estes aparelhos são utilizados diariamente para produção de ar comprimido de várias linhas de produção, por equipamentos pneumáticos responsáveis pela velocidade de montagem das peças de motocicletas na linha de produção de uma indústria do Pólo Industrial de Manaus (PIM). Segundo BREGA FILHO (2003) a quantidade de água purgada do compressor varia em diferentes épocas do ano. Em climas mais chuvosos, a umidade relativa do ar é maior, e com isso mais condensado será produzido. Em épocas de estiagem, menos condensado é produzido.

Dentro do sistema existem os líquidos refrigerantes que são responsáveis por efetuar a refrigeração do próprio compressor. Este líquido passa por 3 partes principais que são o evaporador, o compressor e o condensador. No evaporador o líquido passa do estado líquido para o gasoso retirando o calor do sistema e resfriando o mesmo, o compressor comprime esse gás levando até o condensador, para que o ciclo se mantenha o condensador transforma o gás em líquido e assim o ciclo continua. Com isso o ar que é captado pelo sistema se resfria e sua umidade se condensa formando a água que é liberada pelo aparelho.

O propósito do presente trabalho é apresentar uma possível solução ambiental com o reaproveitamento de águas outrora inservíveis e a redução de custos com insumos químicos aplicados às águas das bacias das torres de resfriamento sustentável em diversos cenários. Além disso, a água que sai desses aparelhos à primeira vista é descartada e ignorada sem nenhuma utilização através das redes pluviais.

A partir dos sistemas de captação e armazenamento desenvolvidos, como proposta de reutilização, foi elaborado um projeto de direcionamento da água captada de todos os compressores e posteriormente encaminhada para um sistema de filtragem e um reservatório para armazenagem. Foram coletadas amostras em 08 aparelhos de marcas e potências variadas, em um período de 08 horas diárias, durante 25 dias no intervalo de 1 hora de cada amostragem. Simultaneamente foi instalado um hidrômetro

para quantificar o volume de água requerido pela torre de resfriamento que receberia essa água outrora canalizada para a rede de águas. Após a quantificação e armazenagem da água liberada pelos compressores de ar, procedeu-se com uma proposta de reuso desta água para utilização em torres de resfriamento.

1.1 - MOTIVAÇÃO

A água predomina na superfície do Planeta Terra, cobrindo cerca de 70% do total. As terras emersas cobrem os 30% restantes. SHIKLOMANOV (2000) afirma que a hidrosfera, camada do planeta que contém água, a possui nas três fases: líquida, sólida e gasosa. Está distribuída na atmosfera, na superfície da terra e internalizada na crosta terrestre até a profundidade de 2.000 m. O volume de água da hidrosfera alcança 1.386 x 106 Km^3, mas só uma pequena parte, 2,5% do total, apresenta-se como água doce. Do total de água doce, 68,9% encontram-se na forma de gelo e coberturas de neve na Antártica, no Ártico e nas regiões montanhosas. Outros 29,9% encontram-se em águas subterrâneas e aquíferos e 0,9% está em pântanos, pergelissolo e como umidade no solo. Somente 0,3% do volume total da água doce está disponível em lagos, reservatórios e bacias hidrográficas.

Segundo UNDESA (2017), a demanda por água doce e energia continuará crescendo nas próximas décadas para atender às necessidades de crescimento das populações e das economias, concorrendo para mudar estilos de vida e causar evolução nos padrões de consumo, o que irá aumentar significativamente as pressões sobre recursos naturais limitados e sobre os ecossistemas. Os desafios resultantes serão mais agudos nos países em fase acelerada de transformação e rápido crescimento econômico e naqueles em que um grande segmento da população ainda não tem acesso a serviços mais modernos. As mudanças climáticas adicionam incerteza e ameaçam severamente qualquer projeção sobre a disponibilidade desses recursos para o atendimento das necessidades para o abastecimento das cidades no futuro.

A partir dessa problemática, o interesse por este tema surgiu. Em uma indústria, o consumo de água é muito grande, assim como os problemas relacionados a ele. No ambiente industrial nos deparamos diariamente com vazamentos existentes na rede hidráulica, tanto nas águas de abastecimentos quanto nas águas residuárias, que tem como destino quase final as canaletas de águas pluviais ou estações de tratamento de efluentes.

No segmento fabril, observam-se grandes investimentos em obras de infraestrutura e melhorias prediais. Contudo, pouca verba é destinada aos diversos tipos de tratamentos dos resíduos de processos e águas residuárias. Isso somente é feito quando a lei obriga a empresa a fazê-lo, ou quando o consumo desmedido se torna um prejuízo financeiro para o negócio. Onde pensamos que para um segmento industrial ser bem-sucedido é necessário respeito às pessoas e ao meio ambiente.

Uma pesquisa realizada pela CNI (Confederação Nacional da Indústria), outra da Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (FIRJAN), segundo WOLKE (2015), revelam como o excesso de burocracia no país prejudica as empresas. A primeira mostra que, na avaliação dos industriários, a legislação ambiental é a área em que o excesso de burocracia é maior. A CNI ressalta os efeitos nocivos da burocracia para o cumprimento das diversas obrigações legais das empresas. “Isso aumenta os custos, forçando as empresas a transferir recursos produtivos para atividades improdutivas, elevando o tempo de produção e reduzindo a competitividade do país”, diz o texto da pesquisa. O levantamento informa que 98% das empresas apontaram haver muita burocracia no cumprimento dos procedimentos legais.

A pesquisa também perguntou aos empresários quais os principais problemas no cumprimento das obrigações legais. Para 90% dos entrevistados, o principal problema é o número excessivo de normas. Em seguida, com 59,8% das respostas, vem a complexidade das normas e, em terceiro lugar, com 54,7% das respostas, aparece a alta frequência na mudança das regras. As empresas elegeram como áreas prioritárias na redução da burocracia a legislação trabalhista, as obrigações contábeis e a legislação ambiental.

A grande quantidade de legislações que precisam ser atendidas para uma empresa operar, a melhoria contínua que é exigida em todos os processos do setor fabril, faz com que muitas empresas desistam das questões ambientais pertinentes a sua produção, onde na maioria das vezes, as legislações são cumpridas mas permeadas de um volume grande de papéis, infelizmente na prática na maioria das vezes a natureza é sacrificada mediante a necessidade de um volume grande de produção para que os índices de lucros sejam extrapolados.

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Objetivo geral

Desenvolver um processo de reaproveitamento de água oriundo da condensação dos compressores de geração de ar comprimido por meio da canalização dos drenos de purga para utilização nas bacias das torres de resfriamento que necessitam de reposição da água.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Analisar o processo de funcionamento de compressores de ar comprimido e torres de resfriamento e sua importância no processo fabril industrial;
- Propor o método de reaproveitamento da água oriunda do processo de condensação dos compressores para o funcionamento das torres de resfriamento;
- Demonstrar a redução de custos com a aquisição de produtos químicos nas torres de resfriamento por meio do uso de águas reaproveitadas;
- Propor melhorias para reduzir o consumo de água de poço artesiano.

1.3 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

O compressor é uma presença frequente em grandes indústrias. Trata-se de um equipamento pneumático que consegue captar o ar que está no ambiente, armazená-lo sob alta pressão em um reservatório próprio e transformá-lo em ar comprimido. Esse equipamento pode ser utilizado para diversos tipos de atividades, como por exemplo, produzir ar comprimido para uma rede que supre a necessidade de uma fábrica no funcionamento de suas pneumáticas em uma linha de produção, aeração de tanques com efluentes, etc. A operação deles consiste em adequar pressão e vazão às necessidades da planta industrial. No seu processo de funcionamento, observamos uma contínua purga de água, oriunda da própria matéria prima para o seu funcionamento, o ar atmosférico.

A maioria dos processos industriais requer a remoção de calor para que haja controle de temperatura. A água é o meio de transferência de calor mais favorável para muitas aplicações industriais em seus processos fabris devido a sua disponibilidade, a

sua elevada capacidade calorífica e ao seu relativo baixo custo. A água é obtida de fontes próximas às indústrias como rios, lagos, canais ou o mar, passa por um tratamento adequado para remoção de sólidos e contaminantes e, depois de utilizada, é devolvida ao ambiente, após novo tratamento quando preciso.

No entanto, para que não ocorram problemas no ecossistema local, é preciso que a temperatura da água descartada esteja bastante próxima da temperatura do ambiente de descarte, sendo necessário, então, que ela seja resfriada antes de retornar à sua fonte (SMITH, 2005). O volume de água usado para refrigeração em geral é grande e seu uso seguido de descarte acarretaria elevados consumo e custo para as indústrias. Assim, é interessante a reutilização da água de refrigeração. Os sistemas de recirculação de água de refrigeração já são largamente utilizados principalmente pelos benefícios econômicos que trazem, porém em razão da crescente limitação na captação de água que as indústrias vêm enfrentando, a redução do volume utilizado tem se mostrado como a melhor e mais fácil alternativa prática.

Por esse motivo, o reuso da água, oriunda do processo de funcionamento dos compressores, a água condensada, foi uma oportunidade de melhoria no processo de funcionamento das torres de resfriamento, uma vez que deseja-se usar a água de reaproveitamento para o abastecimento delas, que tem uma grande taxa de evaporação e necessita de reposição contínua para seu funcionamento.

1.4 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Consta no capítulo 1, a demonstração da potencialidade da reciclagem da água oriunda de condensado de compressores, para diminuição do consumo de água do aquífero subterrâneo.

No capítulo 2, temos a revisão bibliográfica análoga a todos os instrumentos científicos usados para compor este trabalho e ressaltando sua relevância.

Constam no capítulo 3, a apresentação e testes de bombeamento da água de condensado para a bacia da torre de resfriamento e análises laboratoriais da água de condensado e da qualidade da água necessária para o bom funcionamento da torre de resfriamento e todo o tratamento químico que é realizado nesta água.

No capítulo 4, consta a conclusão do trabalho qualificando cada etapa do processo de tratamento da água reciclada que visa a melhoria contínua nas etapas

discutidas neste trabalho, identificação dos pontos favoráveis à reciclagem e os deméritos assim como também, a discussão dos resultados.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - O USO DA ÁGUA DE CONDENSADO DE COMPRESSORES

O crescente aumento da demanda por água decorre do aumento da população, das áreas irrigadas para a agricultura e do uso de água em processos industriais. Por sua vez a oferta, que deveria ser constante (pelo próprio ciclo da água), está cada vez mais reduzida, pois a atividade humana, seja ela urbana, industrial ou rural, acaba por contaminar as fontes de água, tornando-as praticamente inutilizáveis sem o adequado tratamento.

O uso sustentável da água deve ser considerado prioritário. Nos últimos anos tornou-se notória a importância da economia de água e, em muitos casos, o racionamento, pois ao contrário do que se pensava este recurso natural não é farto e, em muitos locais, está acabando (RIGOTTI, 2014).

A indústria metalúrgica, pelo próprio tipo de indústria, faz uso intensivo da água segundo CARVALHO (2000), sendo esta empregada nas suas instalações industriais em diversas e distintas utilizações, tais como geração de vapor, resfriamento de correntes, pinturas, injeção plástica, usinagem de peças, fundição, etc. Como a água participa das reações existentes em processos de específicos de montagem de motocicletas (salvo raras exceções), praticamente toda a água consumida é descartada, em grande parte, contaminada com metais pesados e compostos orgânicos, necessitando de grandes investimentos em estações de tratamento de efluentes, bem como aumentando os custos de produção.

Diversos são os instrumentos, os mecanismos e as tecnologias a serem empregados no trato dessa questão, porém vários deles carecem de estudos e investigações que auxiliem o seu melhor emprego e produzam resultados sanitários, ambientais e econômicos satisfatórios. Além das questões de preservação de um dos recursos naturais mais importantes, a sociedade de hoje vive outro problema, os altos custos envolvidos no consumo da água, atingindo entidades privadas, governo e o próprio cidadão comum.

Mesmo impulsionada pelas leis, práticas de reutilização de águas não potáveis não são comuns no Brasil, pois ainda falta conhecimento em relação à conservação de

água em edificações por parte da população e dos engenheiros e arquitetos responsáveis pelas construções. Para WAIDYASEKARA (2013), os sistemas de avaliação de edifícios e plantas industriais sustentáveis precisam ser revistos em termos de eficiência e conservação de água no que tange a fase de construção através do estabelecimento de novos padrões de consumo em todas as etapas que envolvem um lançamento de um empreendimento, desde a sua concepção até sua fabricação e operação.

O programa de gestão do consumo consciente de água na indústria de motocicletas, até então sempre focado no tratamento de efluentes, teve seu conceito revisto e ampliado a partir de 2016. O programa baseou-se no desenvolvimento e implementação de práticas de conservação (redução) e reuso, bem como no redesenho dos procedimentos de reciclo, incluindo um programa de otimização do tratamento de efluentes. A estação de tratamento de efluentes até então estava otimizada para atender à legislação ambiental, mas era bastante vulnerável a variações de vazão e qualidade de carga.

Com o intuito de adequar a qualidade do efluente aos requisitos de qualidade de alguns consumidores internos da própria empresa, dentre eles o sistema de resfriamento principal da unidade, foi investido um elevado montante de recursos. O principal investimento para a melhoria da qualidade do efluente final foi a aquisição de uma unidade de osmose reversa, que melhorou substancialmente a qualidade do efluente tratado, permitindo o seu uso de forma intensiva. Além dos investimentos realizados, algumas ações, de caráter procedimental, foram executadas. Todas essas ações, que foram intimamente alinhadas com a política ambiental da indústria, foram desenvolvidas com os seguintes objetivos:

- Promover a conscientização ambiental dos funcionários sobre a necessidade de uso racional de água (recurso finito);
- Reduzir consumo de água e identificar alternativas de reuso;
- Rever os procedimentos de reciclo de água, até então utilizados, cujos custos indiretos (manutenção e energia) eram extremamente elevados;
- Implementar modificações no processo de tratamento dos efluentes gerados, visando melhorar a qualidade do efluente de forma a obter uma corrente aquosa adequada ao reciclo.

Diante destes fatos, no presente trabalho pretende-se abordar as ações desenvolvidas visando a preservação do recurso natural “água”, mediante a

implementação de técnicas que possibilitem seu reaproveitamento dentro das diferentes unidades que compõe uma indústria produtora de motocicletas, quadriciclos, motores de força e geradores.

O objeto deste estudo é obter água através do processo de funcionamento do compressor e fazer o uso dessa água recuperada para o funcionamento de uma torre de resfriamento. Será estudada a demanda energética dos equipamentos necessários para atingir essa função e avaliar a sua viabilidade. A seguir será descrito como essas máquinas funcionam, e quais são os princípios físicos utilizados. Em uma planta industrial de grande porte, uma variedade de equipamentos são utilizados para diversos processos, entre eles os compressores de ar, que são máquinas indispensáveis à maioria desses processos fabris.

Compressores são equipamentos industriais que comprimem gases com diversos propósitos na indústria. Estas máquinas requerem uma atenção especial em virtude do grande consumo de energia necessário para o seu funcionamento. Segundo o Escritório de Eficiência e Energia Renováveis do Departamento de Energia dos Estados Unidos (COLLINS *et al.*, 1998), em média 10% da energia total gasta pela indústria nos Estados Unidos (SENNIAPPAN,2004) e União Européia (SAIDUR *et al.*, 2010) provém de sistemas de ar comprimido.

Custos anuais com compressores de ar, secadores e equipamentos de suporte podem variar de 70% (KAYA, 2002; CUNHA, 2007) a 90% (SAIDUR *et al.*, 2010) do gasto total de eletricidade de indústrias de manufatura e mineração. Empresas procuram alternativas para otimizar o consumo de energia desses equipamentos que muitas vezes ficam ligados durante 24 horas por dia. A utilização doar comprimido começou a ser implantado na indústria para automatizar operações, aumentando a produtividade e reduzindo custos.

O uso de ar comprimido apresenta muitas vantagens em relação a outros sistemas de energia. Entre elas, a sua extrema facilidade de obtenção a partir do ar atmosférico; a segurança sobre sobrecargas, que podem ocorrer em acionadores eletromecânicos; a robustez dos componentes pneumáticos que não são sensíveis a vibrações; sua simplicidade de operação; ótimo funcionamento em ambientes hostis; segurança tanto ambiental quanto aos trabalhadores por seus vazamentos não serem perigosos à saúde humana e ao meio ambiente; e pela utilização de pressão moderada, na maioria dos casos.

Apesar dos vários benefícios citados, o ar comprimido também apresenta desvantagens, como o custo elevado de armazenamento, transporte e produção; não pode ser utilizado onde é necessário um controle fino a baixas velocidades devido às propriedades físicas do ar; e não tem a capacidade de realizar forças extremas devido às baixas pressões de uso quando comparada a equipamentos hidráulicos. Mesmo com as desvantagens apresentadas, o ar comprimido se faz necessário em grande parte dos processos industriais, sendo essa uma fonte de energia que necessita de atenção especial em relação a seu uso eficiente.

2.1.1 - Composição do ar comprimido

Segundo (ALVES, 2005) o ar atmosférico é composto por uma mistura de gases, principalmente nitrogênio e oxigênio, e vapor d'água. Essa água provém da evaporação da água de rios, oceanos, transpiração animal e vegetal dentre outras fontes. Para remover o vapor de água da atmosfera, podemos usar alguns processos termodinâmicos. Quando o ar com determinada quantidade de água encontra um objeto suficientemente frio, parte do vapor condensa sobre sua superfície.

O gás utilizado em sistemas de ar comprimido de indústrias para se ter benefícios de sua energia acumulada é o ar atmosférico, o que é uma vantagem por não ter custos na sua obtenção, armazenamento ou separação. A composição do ar seco atmosférico varia de uma região para outra, porém o usualmente utilizado em cálculos é o ar seco padrão, que contém, em mol ou volume, 20,9% de oxigênio, 78,1% de nitrogênio, 0,9% de argônio e pequenas quantidades de dióxido de carbono, hélio, neônio e hidrogênio (ROCHA, MONTEIRO, 2005). Suas composições volumétricas e mássicas aproximadas estão apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição aproximada do ar comprimido.

ELEMENTO	PERCENTUAL (EM VOLUME)	PERCENTUAL (EM MASSA)
Nitrogênio	78,0	75,5
Oxigênio	21,0	24,0
Outros	1,0	0,5

Fonte: ROCHA, MONTEIRO, 2005.

Além dos gases citados, o ar atmosférico pode ter a presença de vapor de água e poeiras em suspensão, que devem ser considerados devido a necessidade de tratamento para retirá-los do ar comprimido a ser utilizado. O ar atmosférico age como uma esponja e tem a habilidade de conter uma certa quantidade de água até seu ponto de saturação. Essa água de seu interior tende a precipitar quando o ar é comprimido ou resfriado.

A produção de ar comprimido é, basicamente, um processo de conversão de energia, no qual a energia elétrica é convertida pelo motor em energia mecânica, que aciona o compressor, e este converte em energia potencial em forma de pressão pela compressão termodinâmica do ar atmosférico (MONTEIRO, 2005). O ar comprimido é empregado em praticamente todos os setores da indústria e encontra aplicações em diversas tarefas. Por essa razão os equipamentos que produzem, distribuem e utilizam ar comprimido são essenciais. Em muitos casos, o ar comprimido representa uma parcela significativa na composição do consumo da energia elétrica da empresa. Além disso, estudos apontam os sistemas de ar comprimido como uma utilidade onde ocorrem consideráveis perdas de energia, ou seja, possuem grande potencial de economia e devem ser foco de ações de eficiência (SANTOS, A. H. M. *et al.*, 2006). Nas indústrias, o ar comprimido é muito empregado nas máquinas operatrizes, em motores pneumáticos, equipamentos de movimentação e transporte de materiais, ferramentas manuais, em sistemas de comando, controle, regulagem, instrumentação e na automação de processos.

Segundo SANTOS, A. H. M. *et al.*, (2006) quanto aos usos o ar comprimido pode ser classificado em:

a) Equipamentos a pressão de ar – para encher pneus e câmaras, acionar embreagens e freios, tem usos no transporte pneumático, comandos à distância, etc.;
b) Equipamentos de jato livre – são os resfriadores e aquecedores, ejetores e aspiradores, veículos a colchão de ar, transporte de pós, jateamento, pulverização, bicos de limpeza, sistemas *air-lift*, entre outros;
c) Equipamentos de percussão – marteletes, prensas das forjarias, perfuratrizes de rocha, bate estacas, vibradores, etc.;
d) Motores a ar comprimido – de pistões, de palhetas, de engrenagens, etc.;
e) Máquinas ferramentas fixas e portáteis - empregadas em linhas de produção e oficinas;

f) Automação de operações industriais – sensores, atuadores, controles e processos.

2.1.2 - Umidade do ar

A pressão de vaporização ou de vapor da água a uma certa temperatura é a pressão que transforma o líquido em vapor.

A água permanece em estado de vapor até que as condições de pressão e temperatura mudem, assim se a pressão aumenta ou a temperatura reduz, a água mudará do estado de vapor para líquido. A pressão de vapor a 100 ^{o}C é a mesma que a pressão de uma atmosfera padrão, o que explica por que no nível do mar a água tende a vaporizar totalmente quando a 100 ^{o}C.

O ar atmosférico que não contém água na sua composição é denominado ar seco, caso contrário é chamado de ar úmido. Existem ainda duas formas de se representar a umidade presente no ar, sendo elas as umidades absolutas e relativas.

A umidade absoluta é a quantidade absoluta de água numa quantidade de ar atmosférico enquanto a umidade relativa é a quantidade de água numa quantidade de ar atmosférico levando em consideração a máxima quantidade de vapor d'água que a atmosfera pode suportar em uma determinada temperatura. A temperatura de orvalho de uma mistura de gás e vapor é a temperatura na qual o vapor d'água começa a condensar à medida que ele é resfriado sob pressão constante, logo a temperatura de orvalho da mistura é a temperatura de saturação do vapor d'água,correspondente à sua pressão parcial (ROCHA, MONTEIRO, 2005). O clima de Manaus é do tipo Ami de monções, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 25,6ºC, com amplitude térmica de 4ºC. O índice pluviométrico médio anual é de 2.000 a 2.200 mm. A umidade do ar é alta, em torno de 88% no período chuvoso e 77% no seco (PRANCE & LOVEJOY, 1985).

Como já descrito sobre o ar atmosférico, existe uma quantidade de vapor de água que é variável e dependente de vários fatores como altitude, temperatura, região, estação etc. O vapor advém em geral das águas de rios, lagos e mares e passam a fazer parte da composição do ar atmosférico através do ciclo hidrológico da natureza. O teor de vapor d'água tende a variar de praticamente 0 a 5% na atmosfera. Logo, segundo a Lei de Dalton, existirá uma pressão parcial desse vapor d'água no ar atmosférico.

2.1.3 - Taxa volumétrica em um escoamento

O fluxo volumétrico em um sistema é medido a partir do volume de fluido que escoa dividido por uma unidade de tempo. Pode ser calculado pelo produto da área da seção por onde o fluido escoa multiplicado pela velocidade média do escoamento. No Sistema Internacional (SI), a unidade da taxa de vazão volumétrica é dada emm^3/s. Entretanto, a unidade litro/segundo (l/s) é usualmente utilizada quando se refere a vazão volumétrica (ou capacidade volumétrica) de um compressor. Devido as propriedades já mencionadas de um gás, como sua compressibilidade e sua grande variação de volume quando exposto a diferentes temperaturas, existem condições padrões com intuito de comparar casos que possuem condições de temperatura e pressão diferentes como o padrão Normal, o Ar Padrão e o ar livre (ATLAS COPCO, 2015).

2.1.4 - Relação entre a massa, pressão, temperatura e volume de um gás

Existem vários modelos usados para representar a relação entre a massa, pressão, temperatura e volume de um gás. As leis dos gases são os modelos mais simples quando comparados ao uso de tabelas e interpolações que são baseados em um conjunto de parâmetros relevantes do gás. A lei mais simples é a que trata as moléculas como perfeitamente elásticas, é negligenciado seu tamanho quando comparados ao tamanho do caminho livre médio que elas podem percorrer e não exercem forças entre si. Um gás que apresenta essas características é chamado de gás perfeito e sua relação entre massa, pressão, temperatura e volume é dado pela Eq. (2.1):

$$p.V = m.R.T \tag{2.1}$$

Em que, no SI:

p é a pressão absoluta em Pascal;
V é o volume em m^3;
m é a massa do gás em Kg;
R é a constante dos gases em J/(Kg.K);
T é a temperatura absoluta em Kelvin.

Para demonstrar que esse éum modelo adequado para as necessidades apresentadas neste estudo, háuma comparação entre valores medidos e calculados para conjuntos de parâmetros relevantes. No livro intitulado "*Pneumatic Drives*" de (BEATER 2007) foi feita uma comparação entre valores calculados com o modelo de gases perfeitos com os dados tabelados. A Figura 2.1 mostra o erro relativo e_{rel} em porcentagem Eq. (2.2), desse comparativo para valores de densidade ρ = *m*/V,:

$$e_{rel} = (\rho_{tabela} - \rho_{ideal} \,.100)/\rho_{tabela} \tag{2.2}$$

Na região entre 200 K < T < 800 K e 0,1 MPa < P< 10 MPa, em que T é temperatura e P é pressão,as combinações de pressão e temperatura para máquinas de acionamento pneumático apresentaram um erro menor que 5%. Sendo assim um ótimo modelo para componentes com acionamento pneumáticos.

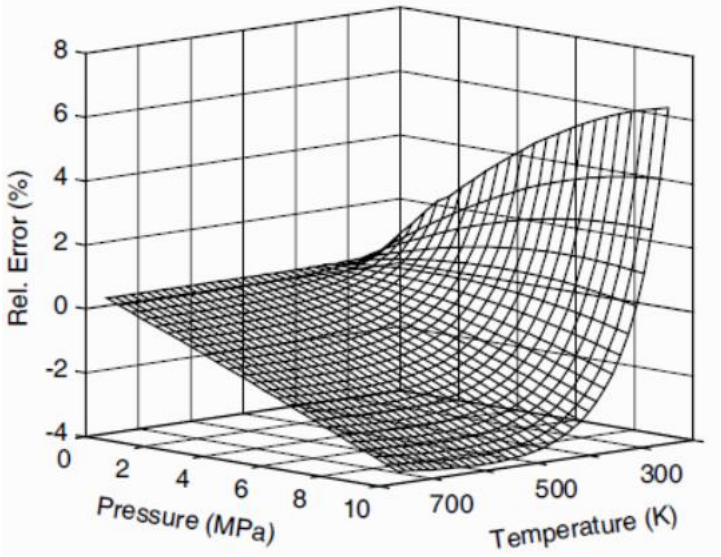


Figura 2.1 - Curvas de erro relativo entre densidades calculadas e medida.
Fonte: BEATER (2007).

Outra forma de se verificara diferença entre gases reais e gases perfeitos são através do fator de compressibilidade Z, expresso na Eq. (2.3): (BEATER2007).

$$Z = \frac{p.V}{R.T.m} \tag{2.3}$$

Em que, P é a pressão, v é o volume, R é a constante dos gases, T é temperatura e m é massa. Diagramas de fatores de compressibilidade em função da pressão e temperatura são referenciados por (BEATER 2007).

Para os casos em que haja necessidade de se utilizar modelos mais avançados, existem a Equação de *Van der Waals* e as Equações de estado de Beattie-Bridgeman e a de Benedict-Webb-Rubin. Outra hipótese relatada é que o ar comprimido pode ser tratado como um *continuum*. Todas as quantidades de interesse como pressão, velocidade e densidade são assumidas em seu volume como um todo e varia continuamente em todos os pontos do fluxo. Em componentes como válvulas e cilindros fabricados por técnicas comumente usadas de fabricação, essa suposição é usualmente válida, entretanto se micro técnicas como foto litografia forem usadas para manufatura de objetos extremamente pequenos, o pressuposto acima não pode ser utilizado, sendo necessários diferentes modelos para as aproximações necessárias (BEATER2007).

2.1.5 - Tipos de compressores

Existem dois princípios genéricos para a compressão de ar (ou gás): compressão de deslocamento positivo e compressão dinâmica (Figura 2.2). Compressores de deslocamento positivo incluem, por exemplo, compressores de pistão, de parafuso, de scroll, de dentes, entre outros. Esse tipo de compressão ocorre quando o ar é enviado para uma câmara de compressão através de uma válvula de admissão e, então, o seu volume vai gradualmente diminuindo, enquanto sua pressão aumenta internamente, até que chegue na razão de compressão de projeto. Então, o ar comprimido é expulso através da válvula de descarga sendo enviado para o sistema de ar comprimido. No caso de compressores dinâmicos, o ar é arremessado por lâminas em um rápido movimento feito pelo impelidor, sendo esse ar acelerado e depois jogado através de um difusor para que sua energia cinética seja transformada em pressão estática. A maioria dos compressores dinâmicos são turbos compressores com um padrão de fluxo de ar radial ou axial. Todos estes são projetados para grandes fluxos de ar (CAGI, 2016).

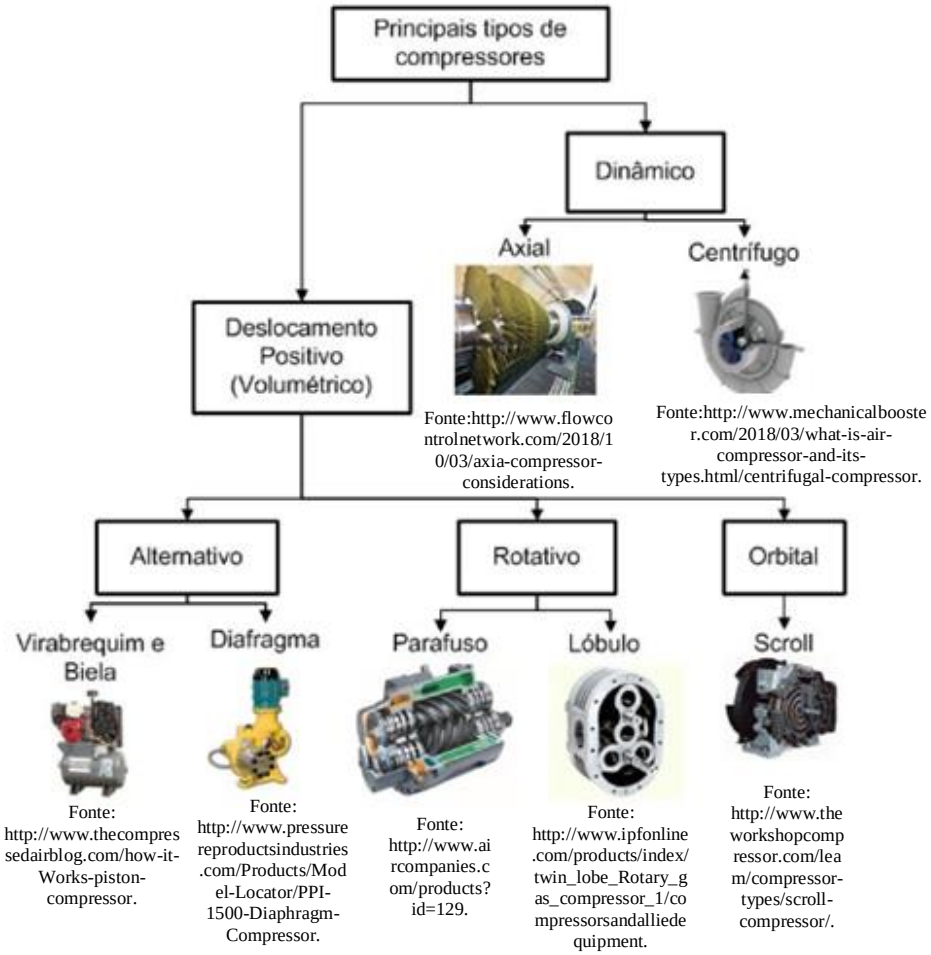


Figura 2.2 - Alguns exemplos de compressores de deslocamento positivo e compressão dinâmica.

2.1.6 - Purgadores

São os drenos de descarga do condensado distribuídos ao longo do circuito pneumático. Sua instalação é praticamente indispensável, mesmo nos casos onde não haja necessidade de tratamento do ar. O principal ponto de instalação é no reservatório do compressor. Em seguida, quando houver,no pós esfriador, secador e pontos de desnível da rede. Havendo ou não tratamento do ar comprimido sua instalação é recomendada nos pontos prováveis de acúmulo de condensado. Os purgadores disponíveis no mercado são de acionamento manual ou automático, sendo que no último pode-se programar a frequência e duração de descarga. Em redes pneumáticas muito extensas e com possibilidade de acúmulo de condensado em grande quantidade, por fatores naturais e mecânicos, sugere-se a programação de acionamento dos purgadores na frequência e duração realmente necessários, pois podem constituir um fator a mais de consumo de ar, visto que a descarga da água é impulsionada pelo ar da rede.

Os sistemas pneumáticos têm baixa eficiência energética devido a perdas no processo de compressão e aplicação (KRICHEL *et al.*, 2012). Segundo o Manual Prático elaborado pela Eletrobrás (ELETROBRAS/PROCEL, 2004), o ar comprimido é uma das formas de energia mais caras em uma planta industrial. A eficiência global de um sistema típico de ar comprimido pode ser tão baixa quanto 10% a 15%. Por exemplo, um compressor consome aproximadamente 7 a 8 kW para produzir 1 kW de ar comprimido. (ELETROBRAS/PROCEL, 2004). Diante deste fato, estudos relacionados ao consumo de ar comprimido, no intuito de aumentar a eficiência energética vêm crescendo significativamente.

2.1.7 - Importância da torre de resfriamento no ambiente industrial

Torre de resfriamento é um equipamento que faz a remoção de calor de uma corrente de água para o ar atmosférico com consequente resfriamento de água (COOLING TOWER INSTITUTE, 2007). O processo de resfriamento numa torre é um dos mais importantes em uma indústria, pois é o sistema de resfriamento mais utilizado, principalmente para vazões elevadas e restrições na condição de processo de usuários de água de resfriamento da torre.

Parte da água evaporada, ao entrar em contato com a corrente de ar, fará com que o mesmo tenha sua temperatura e umidade relativa elevadas ao sair da torre de resfriamento. Para a maioria das torres, o ar de saída na torre está próximo da saturação (umidade relativa igual a 100%) (BURGER, 1994).

Atualmente, para as indústrias, a torre de resfriamento está associada a fatores de redução de custos operacionais e a fatores ecológicos, pois uma característica importante deste equipamento e a formação de um circuito fechado sem desperdício de água, com reposição da mesma apenas para suprir as perdas devido à evaporação, arrastem e purgam. Estas purgas são necessárias para evitar problemas com depósito de sais, corrosão do equipamento e proliferação de microrganismos.

Em uma torre de resfriamento, duas variáveis têm grande importância, e estão relacionadas ao seu custo de projeto: a garantia de remoção da demanda térmica do processo e a temperatura da água resfriada que deve estar o mais próximo da temperatura de bulbo úmido. O equipamento a ser utilizado estará sendo exposto a temperaturas de entrada de 40 ºC, situação esta não recomendada conforme projeto de equipamento, porém usual nas indústrias, principalmente em situação de pico.

Neste equipamento, ocorre a evaporação parcial de água para uma corrente de ar não saturado, além da troca de calor sensível devido à diferença de temperaturas entre os dois fluidos (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981). O processo envolve a transferência de calor latente devido à vaporização de uma pequena parte da água e, também, a transferência de calor sensível devido à diferença de temperatura entre a água e o ar. De uma maneira geral, considera-se que 80% deste resfriamento é devido à transferência de calor latente e 20% ao calor sensível (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981). No estudo de uma torre de resfriamento, são empregados diversos termos referentes à sua tecnologia (projeto e operação) os quais serão definidos a seguir:

APPROACH: diferença entre a temperatura da água que está saindo da torre e a temperatura de bulbo úmido (BURGER, 1994).

ARRASTE (*DRIFT*): perda da água de circulação por arraste de gotículas na exaustão do ar através das paredes laterais da torre.

CARGA TÉRMICA: quantidade de calor por unidade de tempo dissipada pela torre de resfriamento.

ELIMINADOR DE GOTÍCULAS (*DRIFT ELIMINATOR*): sua função é minimizar a perda de água por arraste na corrente de ar que sai da torre para a atmosfera, prolongar a vida útil da torre e prover uma melhor eficiência no processo de trocas térmicas.

FLUXO DE ESCOAMENTO: o escoamento de ar e de água no interior de uma torre de resfriamento, em geral, é em contracorrente, conforme as Figura 2.3 e 2.4, entretanto, há torres de resfriamento com escoamento de água – ar cruzado, conforme as Figuras 2.5 e 2.6.

MAKE UP: reposição de água que foi perdida por evaporação, arraste, purga e vazamentos. É expressa geralmente como uma porcentagem da vazão mássica em circulação e normalmente é controlada por uma válvula bóia ou outro sistema de controle de nível, instalado na bacia de água da torre.

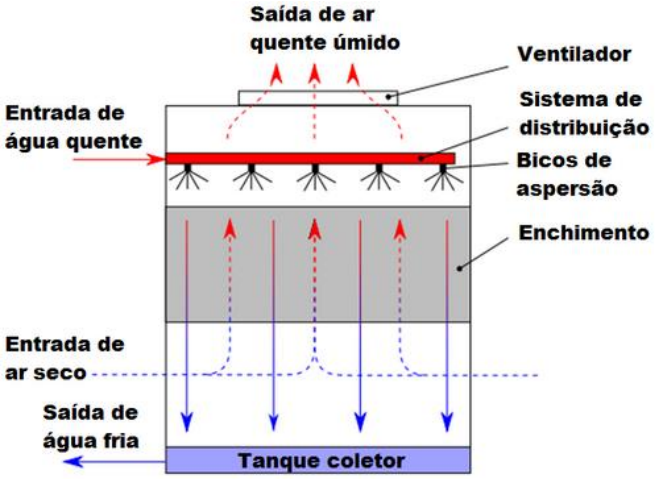


Figura 2.3 - Esquema de funcionamento de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.

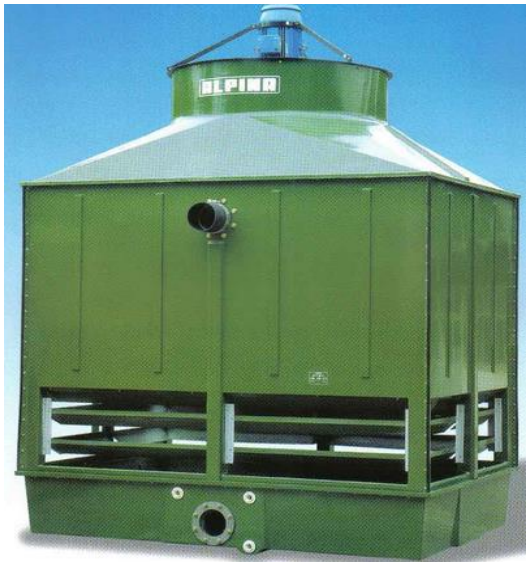


Figura 2.4 - Foto de uma torre de resfriamento do tipo contracorrente.

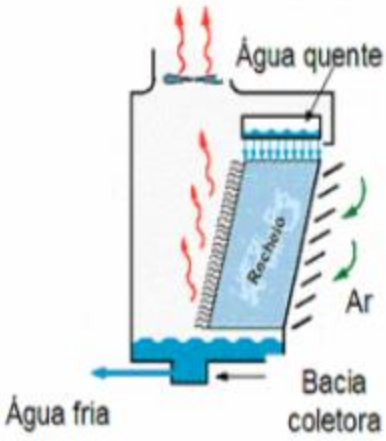


Figura 2.5 - Esquema de uma torre de resfriamento do tipo ar cruzado.

Figura 2.6 - Foto de uma torre de resfriamento do tipo ar cruzado.

PURGA: eliminação contínua ou intermitente de uma pequena parte da água que circula na torre, com o propósito de prevenir um excesso na concentração de sólidos devido à evaporação da água.

RANGE: diferença entre a temperatura de água de alimentação da torre de resfriamento e a temperatura da água de saída (CHEREMISINOFF; CHEREMISINOFF, 1981).

Em processos industriais, a água usada para resfriamento deve ser resfriada em uma torre de resfriamento e retornar ao circuito, minimizando gastos operacionais e fornecendo o uso racional de recursos naturais. Estes equipamentos dissipam este calor de modo eficiente, pois se caracterizam por ser um equipamento que opera em circuito fechado onde a água quente proveniente do processo, em presença de ar frio, cria um efeito de evaporação. Estes equipamentos são projetados para expor uma grande área de superfície entre a água e um fluxo de ar, por um determinado período de tempo. As torres de resfriamento abaixam a temperatura da água por evaporação. Aproximadamente 2300 kJ de calor são removidos para cada quilograma de água evaporada (MSPC, 2007). O tamanho de uma torre de resfriamento é estabelecido pela demanda de calor a ser removido de um sistema por unidade de tempo. O approach reflete o desempenho térmico da torre, bem como está associado ao seu tamanho. Geralmente, o approach de uma torre de resfriamento está compreendido entre 3ºC e 11ºC e conforme esta temperatura é reduzida, o tamanho da torre aumenta exponencialmente.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - MATERIAIS

Neste trabalho foi utilizado como principal matéria-prima a água de condensação proveniente do processo de funcionamento dos compressores que geram ar comprimido, que ficam localizados em uma sala chamada de sala dos compressores. Inicialmente os drenos dos compressores foram canalizados para uma caixa coletora das águas recuperadas e submetidas ao processo de decantação por aproximadamente 2 horas. Posteriormente, a água obtida foi bombeada por meio de uma bomba – sapo quando o nível da bacia da torre de resfriamento diminuiu, com a finalidade de manter o bom funcionamento da torre de resfriamento e evitando entrada de ar na área de sucção da torre. Os tubos de PVC utilizados na canalização foram adquiridos a partir de resíduos de obras da construção civil e a bomba de transferência foi comprada no mercado local.

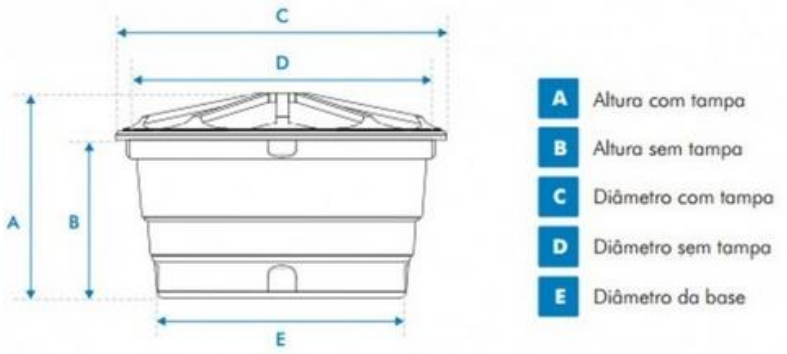
3.2 - EQUIPAMENTOS

- **Caixa coletora**

Foi adquirido uma caixa d'água de 1000 litros para armazenamento da água de condensação, da marca FortLev.

Figura 3.1 - Caixa d'água de 1000 litros utilizada como recipiente coletor.

As dimensões da caixa foram estas:



Capacidade em litros	Dimensões em metros					Pesos em quilos	
	A	B	C	D	E	Caixa vazia	Caixa cheia
100	0,51	0,41	0,75	0,73	0,54	3,80	103,80
150	0,55	0,43	0,88	0,87	0,61	4,50	154,50
250	0,68	0,53	1,00	0,98	0,74	6,40	256,40
310	0,69	0,54	1,05	1,04	0,75	7,50	317,50
500	0,72	0,58	1,24	1,22	0,95	10,06	510,06
750	0,86	0,73	1,37	1,35	1,00	14,50	764,50
1.000	0,97	0,76	1,52	1,51	1,16	17,02	1.017,02
1.500	1,05	0,83	1,77	1,75	1,43	24,21	1.524,21
2.000	1,10	0,90	1,89	1,88	1,55	34,17	2.034,17
3.000	1,49	1,21	2,28	2,22	1,72	46,74	3.046,74
5.000	2,00	1,63	2,45	2,37	1,85	95,00	5.095,00

* Dimensões e pesos aproximados.

Figura 3.2 - Especificação técnica das dimensões da caixa d'água.

- **Bomba de transferência**

A bomba submersível KSBDrainer N 302 S E é indicada para o bombeamento de água limpa ou ligeiramente suja, drenagem de poços contendo água servida residencial e coleta de água, irrigação de jardins e pequenas lavouras a partir de tanques e riachos, esgotamento de porões e locais alagados, abastecimento de fontes ornamentais, piscinas e cascatas. Possui as seguintes especificações técnicas:

- Potência: 0,5 CV;
- Recalque: 1.1/4";
- Temperatura de operação: até 50 ºC;
- Rotação: 3500 rpm;
- Grau de proteção do motor: IP68;
- Vazão máxima: 12 m³/h (Pressão 2 m.c.a);
- Vazão mínima: 3,5 m³/h (Pressão 9 m.c.a).

Suas principais características são: corpo da bomba de plástico, à prova de corrosão, reduzindo sensivelmente o peso do conjunto, eficiente absorção de ruído e resistência a abrasão e a impactos. Bóia magnética ajustável, com adaptação simples a qualquer tipo de comando externo. Válvula de retenção integrada no recalque impedindo retorno da água. Sistema de proteção contra sobrecarga integrado no motor elétrico. Tripla vedação do eixo lubrificado por fluido barreira, resultando em elevada proteção do motor. Lubrificação das faces do selo em caso de funcionamento a seco. Cabo de alimentação do tipo submersível (padrão 3 m) com conector tipo plug e motor elétrico com carcaça refrigerada permitindo operação mesmo quando o motor não está submerso. Possui as seguintes dimensões: peso: 6,2 Kg; comprimento: 33,5 cm; largura: 33,5 cm e altura: 36,3 cm. Todas estas informações foram tiradas do manual do fabricante.

Figura 3.3 - Bomba submersa utilizada para transferência de líquidos.

- **Compressor VSD – 500**

Foram utilizados para o desenvolvimento do trabalho equipamentos do tipo VSD – 500, no caso dos compressores carga/alívio, o número de ciclos de liga/desliga permissível diminui com o aumento da potência dos seus respectivos motores. E este número não corresponde à quantidade de ciclos necessária para manter o nível de pressão do sistema em uma faixa estreita. Por este motivo, quando a pressão máxima é atingida, o compressor entra em alívio, ou seja, abre uma válvula interna, não realizando a compressão do ar. Porém, o motor continua em funcionamento por algum tempo,

consumindo cerca de pelo menos 30% da energia necessária para operar o compressor a plena carga, no caso dos compressores da marca Atlas. Uma vez que a empresa onde este trabalho foi desenvolvido prioriza eficiência e custos reduzidos, assim como, o uso racional dos energéticos necessários à sua produção, os compressores com variador de velocidade (VariableSpeed Drive) são uma solução para ambientes com uma demanda flutuante de ar comprimido. Esta tecnologia permite uma variação no volume de ar comprimido na saída do compressor através da variação da velocidade de rotação do motor, que visa à economia de energia, menor desgaste da máquina e estabilização da pressão da linha de ar comprimido.

Figura 3.4 - Compressor VSD - 500.

3.3 - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para mensurar as quantidades de águas em todos os compressores, retirou-se a mangueira que conecta a saída do dreno de dentro da canalização e esta direcionada para um recipiente graduado com capacidade de 1000 litros (bobina plástica graduada). A fim de estimar o volume médio de água que cada equipamento produz, bem como os volumes diários, semanal e mensal, de acordo com as horas de funcionamento de cada um deles. As medições foram realizadas entre os turnos da manhã e da tarde, o que equivale ao 1º turno de trabalho da referida empresa. Vale lembrar que todos os equipamentos possuem as saídas de água de condensação canalizadas para uma rede de drenagem comum ligada outrora diretamente na rede pluvial, porém agora, toda a água

de condensação foi direcionada para uma caixa coletora, as quais receberão todas as águas ditas até então, inservíveis.

Posterior às coletas, foi necessário realizar análise de parâmetros físico-químicos e biológicos da água com objetivo de identificar a sua qualidade, de acordo com a Portaria nº 2.914/2011 MS, NBR 15.527:2007 e pela Agência Nacional de Águas - ANA (2005), e também verificar se a mesma se enquadrava dentro dos parâmetros estabelecidos no manual do fabricante do compressor. Com o propósito de investigar a qualidade desta água e a necessidade de tratamento prévio para o uso.

As amostras foram coletadas primeiramente em um recipiente devidamente limpo e lavado com álcool 96%, com capacidade para armazenar a quantidade necessária de água de condensação a ser enviada para o laboratório. Após, a água condensada armazenada foi acondicionada nos recipientes do kit de coleta e encaminhada para análise laboratorial.

Os resultados da análise indicaram amostra sem potencial contaminante. A partir das medições foi possível estimar que, se reutilizada, a água de condensação de todos os equipamentos, em um período de oito horas, o volume estimado seria de aproximadamente 500 litros diários. Em termos quantitativos, estes valores indicam que a água de condensação apresenta grande possibilidade para reaproveitamento na reposição da bacia da torre de resfriamento.

Os parâmetros analisados foram: temperatura, dureza, alcalinidade, sólidos totais dissolvidos, pH, condutividade elétrica, sódio, potássio, cloretos, turbidez, cor, cálcio, magnésio, nitrito, nitrato, flúor, ferro e cloro residual livre e análise bacteriológica.

A necessidade de tratamento de desinfecção ou não, e o tipo de tratamento foi definido a partir da análise da água. Tendo em vista a preocupação em relação à saúde pública e considerando que não haverá contato através do manuseio da água para reaproveitamento, uma vez que esta será utilizada para atender a necessidade de um outro equipamento fabril que faz o resfriamento do óleo das prensas de um setor chamado Estamparia.

Para a etapa de coleta de água, foi realizada a identificação de todos os compressores existentes na sala onde estes estão instalados dentro do ambiente fabril. Dentre eles, foram escolhidos cinco pontos de coleta localizados nas saídas dos drenos de cada um deles. As coletas foram realizadas nos seguintes períodos: 02 a 31 de janeiro de 2018, e nos dias 01 a 30 de novembro 2018, observando-se o tempo e volume aquoso coletado.

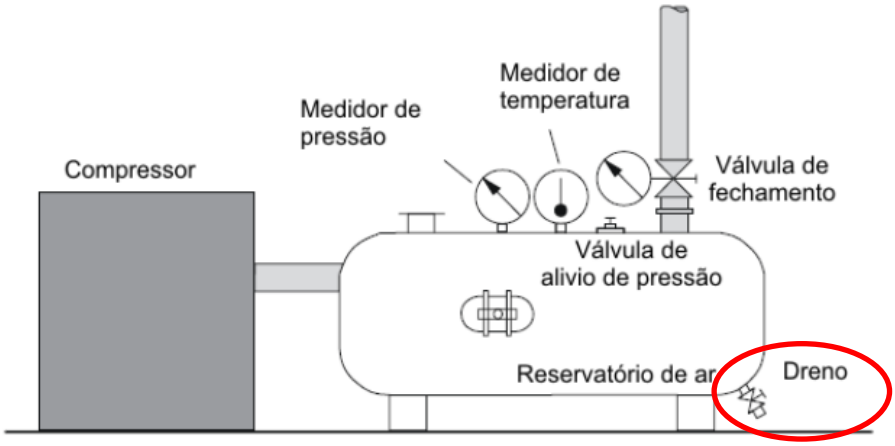


Figura 3.5 - Local de onde foi coletada a água a ser reaproveitada.

No primeiro momento de coleta realizaram-se as seguintes análises: pH, Condutividade Elétrica, Cloretos, Sódio, Potássio, Cálcio, Magnésio, Coliformes Totais e *E. coli*. No segundo momento, realizaram-se as mesmas análises citadas com intuito comparativo e ampliou-se os estudos com os parâmetros de Cor, Turbidez, Nitrito, Flúor, Ferro e Cloro Residual. Os métodos de análise seguiram referência do *Standard Methods For the examination of water and waste water* APHA (2012). Na Tabela 3.1 são listados os métodos e/ou seus respectivos equipamentos utilizados.

Tabela 3.1 - Parâmetros e métodos ou equipamentos utilizados nas análises.

Parâmetros	**Métodos ou Equipamentos**
pH	Multiparâmetro - Marca: Multimer 86505
Condutividade Elétrica	Multiparâmetro - Marca: Multimer 86506
Sódio	Espectrometria de Absorção Atômica por Chama Marca: Varian - AA240FS
Potássio	Espectrometria de Absorção Atômica por Chama Marca: Varian - AA240FS
Cloretos	Método Titulométrico
Turbidez	Turbidímetro - Marca: ALFAKIT
Cor	Comparativo visual com discos coloridos Marca: Policontrol – Nessler Quant 200
Cálcio	Método Titulométrico
Magnésio	Método Titulométrico
Nitrito	Método da sulfanilamida 543 nm
Flúor	Colorimetria Modelo: Pocket Colorimeter II - Fluoride - HACH
Ferro	Espectrometria de Absorção Atômica por Chama Marca: Varian - AA240FS
Cloro residual	Comparação visual de cloro munido de discos Marca: PoliControl - NesslerQuant 200

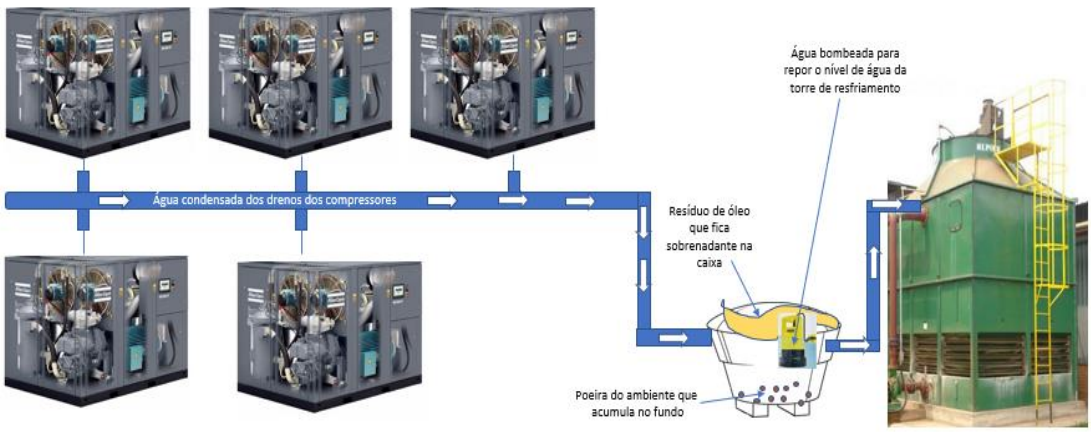


Figura 3.6 - Fluxo do processo proposto no trabalho.

Estas são as informações técnicas da torre de resfriamento utilizada para receber a água oriunda do dreno dos compressores.

LFA – LIMITE DE FORNECIMENTO ALPINA

	TAMANHOS	DIMENSÕES [mm]						LADOS LIVRES PARA ENTRADA DE AR (6)						CONEXÕES		PESO (Kgf)		VOLUME EMBARQUE [m³] [ft]	Vol.máx. da bacia [litros]
								4 LADOS		3 LADOS		2 LADOS							
		ØA	B	C	D	E	F	R	S	R	S	R	S	X(1)	Y(2)	Embarque	Operação		
	25	910	1660	1660	1770	1770	350	2280	2990	2480	3190	2680	3390	4"	5"	669	1650	14,1	920
	32	910	1660	2060	1770	2170	350	2280	2990	2480	3190	2680	3390	5"	5"	790	2150	17,6	1135
	40	[illegible]																	
	50	[illegible]																	
	63	1480	2460	2460	2570	2570	495	2580	3735	2780	3935	3080	4235	6"	8"	1894	5040	23,5	2420
(11)	80 80/14–RT	1700	2860	2860	2970	2970	500	2635	3660	2855	3880	3185	4210	8"	8"	2410	6530	24,6	**3270**
(12)	80/3 80/18–RT	1700	2860	2860	2970	2970	500	3110	4115	3330	4335	3660	4665	8"	8"	2450	6550	31,0	**3270**
	63SM	1510	2820	2260	2960	2370	470	2590	3790	2840	4040	3040	4240	6"	8"	1900	5100	35,7	2420
	72SM	1730	3220	2260	3340	2370	500	2610	3835	2860	4085	3060	4285	8"	8"	2170	5800	39,4	2850
	80SM	1700	3630	2260	3750	2370	500	2620	4135	2840	4355	3170	4685	8"	8"	2450	6550	42,6	3270

Observações Gerais:

1. X= entrada de água quente.
2. Y= saída de água resfriada.
3. Entrada de água de reposição (torneira bóia).
4. Drenagem.
5. Conexão de transbordo.
6. Observar a distância mínima de 1,5m entre a entrada de ar e eventuais obstáculos à ventilação.
7. Dimensões em milímetros.
8. O volume de embarque é estimado e sujeito a variações.
9. Opcionalmente, a torre pode ser fornecida com escada e passadiço para acesso ao conjunto de acionamento.
10. Em Torres sem bacias, as cotas "R e S" variam para menos, de acordo com a dimensão F.
11. O tamanho 80 corresponde aos enchimentos "SG" e "W20" até 2 camadas, "SGC" e "A19" até 3 camadas e "RT" 14 camadas.
12. O tamanho 80/3 corresponde aos enchimentos "SG" e "W20" até 3 camadas, "SGC" e "A19" até 4 camadas e "RT" 18 cmadas.

Figura 3.7 - Informações técnicas da torre de resfriamento escolhida para o projeto.

Figura 3.8 - Foto tridimensional da torre de resfriamento.

É importante salientar que a referida torre possui quatro lados livres para a saída de ar. Ela está localizada em uma área de grande quantidade de tráfego de veículos, onde observa-se grande quantidade de poeira depositada na bacia da torre. Conforme o tempo vai passando, essa poeira ganha peso e fica precipitada no fundo da bacia, daí surge a necessidade de drenar este equipamento continuamente com o objetivo de minimizar a quantidade de sujidade sólida.

Tabela 3.2 - Balanço de massa individualizado do sistema escolhido.

Parâmetro	**Valor da Unidade**
Vazão de Recirculação (m³/h)	27
Diferencial de Temperatura(°C)	5,5
Evaporação (%)	0,99
Volume do Sistema (m³)	5
Arraste (%)	0,12
Regime de Trabalho (24 h/dia)	24
Dias de Operação (30 dias/mês)	30
Ciclos de Concentração	7
Evaporação (m³/h)	0,2
Arraste (m³/h)	0,03
Blow-down total (m³/h)	0,003
Make-up (m³/h)	0,3
Perda Líquida (m³/h)	0,033

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 - RESULTADOS DA QUANTIDADE DE ÁGUA COLETADA ORIUNDA DO PROCESSO DE FUNCIONAMENTO DOS COMPRESSORES

Para tal, foi coletada uma amostra de água contendo seis litros e encaminhada para laboratório, o qual forneceu o kit para coleta contendo os frascos específicos para cada parâmetro a ser analisado.

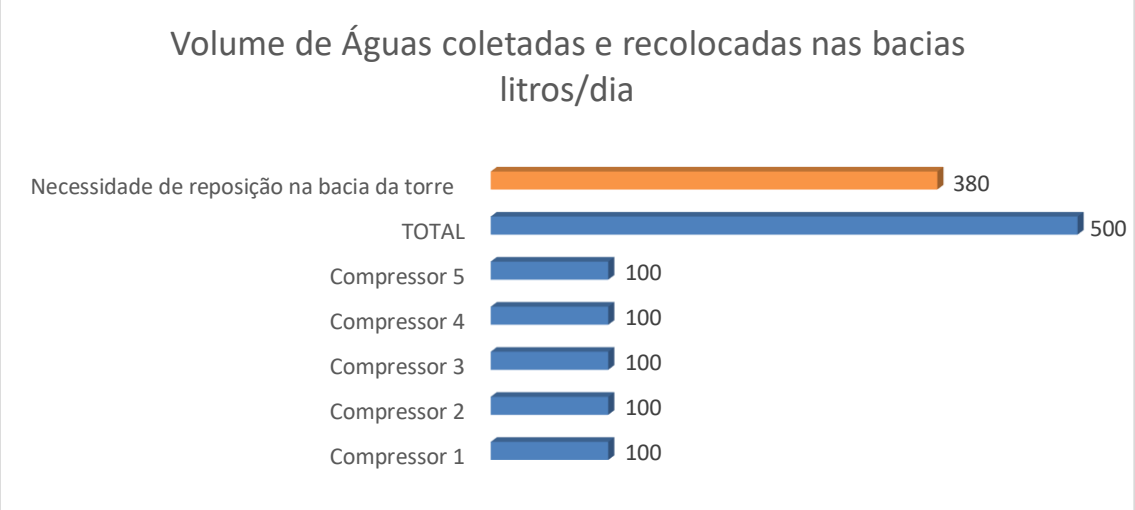


Figura 4.1 - Comparativo de águas condensadas dos compressores versus necessidade da torre de resfriamento.

Observa-se na Figura 4.1 que as águas oriundas do processo de purga dos compressores perfazem aproximadamente no total de 500 litros de água por dia, canalizadas para a caixa coletora. Essa água desce por gravidade e fica armazenada. Esta água só será bombeada para a bacia da torre de resfriamento se a água da bacia da torre baixar o suficiente para o acionamento da bomba de transferência que está dentro da caixa coletora de água de condensação. Fica nítido também que a torre possui drenagem constante de sua bacia para a desconcentração dos sais dissolvidos na água e retirada da sujidade de bacia. A necessidade de reposição da torre é de aproximadamente 380 litros de água por dia.

4.2 - RESULTADOS DAS ANÁLISES FÍSICO – QUÍMICA DA ÁGUA COLETADA DOS COMPRESSORES

A água, como sabemos, tem uma tendência a dissolver outras substâncias. Quanto mais pura é a água, maior é a tendência solubilizante. Por outro lado, quando ela apresenta concentrações elevadas de sais, maior é a tendência destes se precipitarem. À vista disso, a solubilidade das substâncias normalmente presentes na água (sais, em sua maioria) é também dependente da temperatura, do pH, das espécies químicas envolvidas, entre outros fatores.

Todas as análises foram realizado em triplicada e calculado a média dos resultados.

Tabela 4.1 - Parâmetros físico - químicos das amostras analisadas das purgas dos compressores e da água oriunda do poço artesiano da empresa.

Parâmetros físico - químicos das amostras analisadas					
Parâmetros	Padrão da água de poço	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	$\bar{R}_p$
pH	5,900	4,3	5,2	5,5	5,00
CondutividadeElétrica (mS/cm)	49,000	37,2	38,6	33,78	36,53
Temperatura (°C)	26,000	27,5	28,05	27,03	27,53
Sódio (mg/L)	200,000	0,6	1,1	1,2	0,97
Potássio (mg/L)	10,800	3,26	2,9	3,6	3,25
Cloretos (mg/L)	250,000	0,01	0,01	0,02	0,01
Tubidez (NTU)	5,000	3	2	2,89	2,63
Cor (Uc)	5,000	3,21	2,098	3,156	2,82
Cálcio (mg/L)	0,240	0,2	0,29	0,22	0,24
Magnésio (mg/L)	0,689	0,32	0,31	0,33	0,32
Nitrito (mg/L)	1,000	0,24	0,23	0,32	0,26
Flúor (mg/L)	1,500	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
Ferro (mg/L)	0,300	0,005	0,004	0,005	0,005
Cloro Residual (mg/L)	0,000	0,0001	0,000	0,00	0,00
Sílica (mg/L)	21,000	0,2	0,132	0,26	0,20
Dureza (ppm CaCO3)	500,000	4,183	12,139	7,832	8,05

$\bar{R}_p$: Média dos Resultados encontrados nas águas de purga dos compressores

Na Tabela 4.1, observa-se que as água oriundas dos processos de condensação possuem uma quantidade de sais dissolvidos mínima, o que a torna favorável para o ótimo funcionamento em sistemas de arrefecimento da torre de resfriamento. Uma vez

que, no tratamento químico das águas de torres de resfriamento, é necessário adição de produtos químicos para diminuir a agressividade desses sais na água circulante. Podemos nos resultados dar destaque para a concentração de sódio, potássio, cloretos, cálcio, magnésio e principalmente para sílica e dureza. Dando um destaque para os dois últimos parâmetros mencionados, quando não controlados podem levar ao colapso um sistema de troca térmica, pela concentração dos sais e necessidade de aplicação de produtos químicos para o controle da agressividade da água GENTIL (2003).

4.3 - QUANTIDADE DE PRODUTOS QUÍMICOS APLICADOS NAS TORRES DE RESFRIAMENTO COM A ÁGUA DO POÇO E A ÁGUA REAPROVEITADA DA CONDENSAÇÃO DOS COMPRESSORES

Tabela 4.2 - Custos dos produtos químicos aplicados na torre de resfriamento.

Produtos Químicos	**R$/litro**
Depositrol PY 5202	16,37
Inhibitor AZ 8104	18,64
Biomate SAN 9363	12,65
Spectrus OX 1277	43,68
Foamtrol AF 2051	24,2
Corrshield NT4230	19,41

Tabela 4.3 - Quantidade de produtos químicos aplicados na torre de resfriamento.

Produtos Químicos	**Tratamento com água do poço**	**Tratamento com água reaproveitada de condensação**
Depositrol PY 5200	3	1
Inhibitor AZ 8104	2	1,3
Biomate SAN 9363	5	3,5
Spectrus OX 1277	4	2,9
Foamtrol AF 2051	1,5	0,5
Corrshield NT4230	4	1,8
Gasto Semanal	R$ 438,30	R$ 258,59
Gasto Mensal	R$ 1.753,20	R$ 1.034,35
Gasto Anual	R$ 21.038,40	R$ 12.412,18

Foi observado uma economia financeira em relação ao quantitativo de produtos químicos aplicados ao sistema. Segundo o fornecedor Suez Water and Technologies, o sistema de tratamento é a tecnologia mais avançada e eficaz para sistemas de resfriamento com recirculação aberta. Os programas de tratamento GenGard podem ser aplicados em todo o espectro de pH, de neutro a alcalino e garantem resultados inflexíveis, mesmo nas condições mais estressantes. Os programas incorporam os mais avançados aditivos de depósito e corrosão disponíveis. A tecnologia patenteada GenGard inclui um novo polímero tolerante ao estresse (STP), química alcalina aprimorada (AEC) e azol resistente a halogênio (HRA) em combinação com inibidores de corrosão de aço à base de fosfato. Todos os componentes de tratamento GenGard são estáveis e mantêm sua eficácia na presença de cloro e outros halogênios. A estabilidade do halogênio permite a conformidade com Legionella quando resíduos residuais de cloro ou bromo são aplicados continuamente em níveis efetivos (0,5-1,0 ppm de Cl_2 livre) para controle microbiológico geral e durante desinfecções periódicas do sistema (> 5 ppm de Cl_2 livre). Diferentemente dos tratamentos convencionais, o GenGard oferece a liberdade de responder efetivamente a distúrbios microbianos sem perda de deposição ou controle de corrosão.

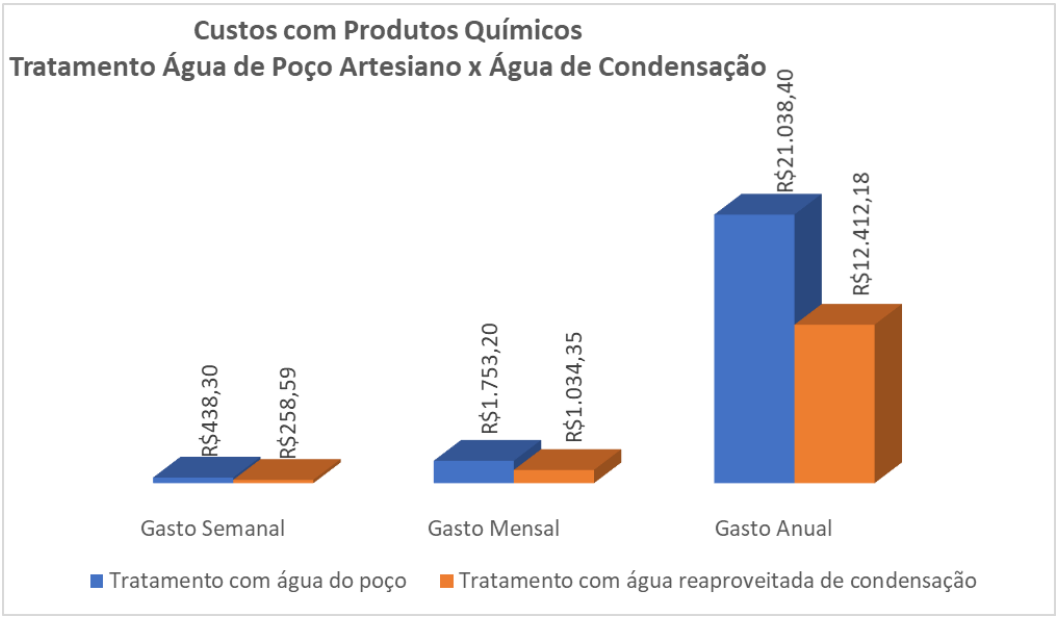


Figura 4.2 - Custos com compras de produtos químicos para tratamento de torres de resfriamento.

Em relação às reduções de custos, vale lembrar que o planejamento de despesas e orçamento de custos fixos de manutenção de sistemas são programados para cada 1,5

anos, e devido a economia produzida o mesmo precisou ser revisado, gerando um impacto positivo para as despesas anuais.

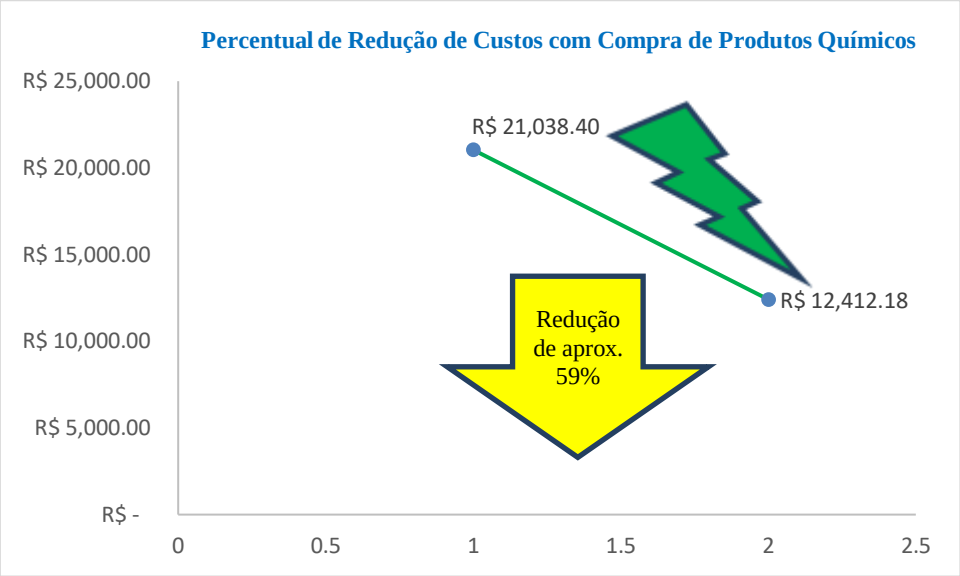


Figura 4.3 - Percentual de redução de custos com insumos químicos.

4.4 - ÍNDICES DE SATURAÇÃO E ESTABILIDADE

O comportamento agressivo ou incrustante das águas subterrâneas é verificado através da correlação entre o pH medido e o pHe, que é o pH de equilíbrio (LASTORIA, 2002; FEITOSA, 2008). Sua tendência corrosiva/incrustante determina se ocorrerão estas alterações no sistema de exploração e podem ser avaliadas pelo Índice de Saturação de Langelier (LSI – Lagelier Saturation Index) e pelo Índice de Estabilidade de Ryzanr (RSI – Ryznar Stability Index). Devido às características hidrogeológicas de percolação por meios de porosidade intergranular e fissuras, bem como a capacidade de carrear substâncias desses meios, as águas subterrâneas podem conter diferentes concentrações de sólidos totais dissolvidos, do íon cálcio, e de alcalinidade, que determinam suas propriedades corrosivas ou incrustantes (FEITOSA, 2008). Apesar da determinação do LSI e RSI em águas subterrâneas ser pouco empregada, muito provavelmente pelo fato de não indicarem a potabilidade destas águas para o consumo humano, esses índices podem nortear os executores dos poços tubulares quanto aos tipos de materiais e equipamentos que devem ser utilizados nessas obras, bem como quanto à frequência e o período de manutenção, visando ao aumento da sua vida-útil. No caso de águas incrustantes, pode ocorrer a redução de sua vazão de explotação; em poços com águas corrosivas, tem se constatado o rompimento do tubo

edutor e queda do conjunto moto-bomba, podendo causar a perda do poço devido à inviabilidade de retirada do equipamento. Complementarmente, poderiam ser previstos tratamentos físico-químicos para a inibição das ações corrosivas ou incrustantes ao longo da rede de distribuição de água.

Índice de Saturação de Langelier

É um modelo de equilíbrio derivado de conceitos teóricos de saturação que indica o grau de saturação do carbonato de cálcio na água, sendo proposto por Langelier no ano de 1946 (FERRAZ, 2007; GRADES, 2004; McNEILL, 2000). O cálculo é feito tomando-se a diferença entre o pH medido da água e o pHe Eq. (4.1), quando esta mesma água apresenta-se saturada com CaCO3 ou em equilíbrio (pHe), parâmetro obtido pela relação entre os coeficientes A, B, C e D Eq. (4.2), determinados pelas respectivas Equações 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6, sendo a interpretação dos resultados conforme apresentado na Tabela 4.5.

$$\mathrm{LSI} = \mathrm{pH} - \mathrm{pHe} \tag{4.1}$$

$$\mathrm{pHe} = (9{,}3 + \mathrm{A} + \mathrm{B}) - (\mathrm{C} + \mathrm{D}) \tag{4.2}$$

Onde:

$$\mathrm{A} = (\mathrm{Log10[STD]} - 1/10 \tag{4.3}$$

$$\mathrm{B} = [-13{,}12.\mathrm{Log}\ 10\ (\mathrm{T} + 273)] + 34{,}55 \tag{4.4}$$

$$\mathrm{C} = \mathrm{Log10[Ca2+]} - 0{,}4 \tag{4.5}$$

$$\mathrm{D} = \mathrm{Log10[Alcalinidade]} \tag{4.6}$$

NOTAS: STD = Total de sólidos dissolvidos (mg/L);

Ca^{2+} = Concentração de Cálcio;

T = Temperatura em °C.

Tabela 4.4 - Classificação dos valores obtidos com a aplicação do LSI.

Valor LSI	Indicação
< 4	Incrustação severa
3 a 4	Incrustação moderada
1 a 3	Incrustação suave
0,5 a 1	Incrustação muito suave
-0,5 a 1	Balanceado
-0,5 a -2	Corrosão suave
-2 a -5	Corrosão moderada
< -5	Corrosão severa

Fonte: Adaptado de GRADES (2004).

Índice de Estabilidade de Ryznar

O índice de estabilidade de Ryznar foi proposto em 1944 (FERRAZ, 2007; GRADES, 2004; McNEILL, 2000) aponta para o estado de saturação de carbonato de cálcio, representado na Eq. (4.7), com interpretação dos resultados conforme apresentado na Tabela 4.6.

$$\mathrm{RSI} = 2\mathrm{pHe} - \mathrm{pH} \tag{4.7}$$

Tabela 4.5 - Classificação dos valores obtidos com a aplicação do RSI.

Valor RSI	Indicação
> 4	Incrustação severa
4 a 5	Incrustação forte
5 a 6	Incrustação leve
6 a 7	Balanceado
7 a 7,5	Corrosão moderada
7,5 a 9	Corrosão forte
> 9	Corrosão severa

Fonte: Adaptado de GRADES (2004).

Todo o tratamento das águas de circulação industrial passa pela a avaliação de uma equipe de especialistas da empresa Suez que é responsável pela integridade dos equipamentos, por onde a água tratada por eles circulam e suas atividades são supervisionadas e aprovadas por um químico responsável.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 - CONCLUSÕES

Quando os compressores executam seu processo de funcionamento, é originada uma água que é aproveitada para outros fins. Esse reaproveitamento vem a atender a necessidade de resfriamento de prensas da estamparia e de parafusadeiras pneumáticas da linha de produção. Isso só foi possível quando foram canalizados os drenos de purga para utilização nas bacias das torres de resfriamento que necessitam de reposição da água de forma contínua, tanto por conta da evaporação nominal do equipamento estabelecida em manual de fabricante, quanto da necessidade de desconcentração dos sais da própria bacia das torres.

A água impura encontrada na natureza apresenta uma vasta gama de substâncias dissolvidas. Muitas dessas substâncias são sais, óxidos e hidróxidos que apresentam solubilidades diferentes, e sofrem influências da temperatura, concentração e pH. Com a evaporação da água em um sistema de resfriamento, há um aumento na concentração das substâncias dissolvidas que, muitas vezes, podem se precipitar de forma aderente nas superfícies dos equipamentos (principalmente nas regiões de troca térmica), constituindo as incrustações.

Outras substâncias também podem se incrustar indesejavelmente nesses sistemas, tais como: material orgânico (óleos, graxas, resíduos), lodo e acúmulo de material microbiológico, produtos de corrosão, sólidos em suspensão (argila, etc.), bem como produtos insolúveis originados de reações químicas na água (incluindo excesso de produtos para condicionamento químico).As consequências da presença de incrustações em circuitos de resfriamento são: a diminuição das taxas de troca de calor nos trocadores, devido à baixa condutividade térmica das incrustações; a obstrução e até destruição do enchimento (colméias) de torres de resfriamento; a obstrução (parcial ou total) de tubulações e acessórios; essas alterações restringem a área de fluxo e, consequentemente, limita a vazão, o entupimento de bicos e os dispositivos distribuidores de água nas torres de resfriamento, promovendo a ocorrência de canais preferenciais de escoamento e diminuindo a eficiência do equipamento e o aumento dos

processos corrosivos que ocorrem sob os depósitos (áreas sujeitas a diferenciais de aeração).

As substâncias formadoras de incrustações (sais em sua maioria), ao terem seus limites de solubilidade ultrapassados, iniciam uma precipitação sob a forma de pequenos cristais. Esses, por sua vez, apresentam uma estrutura molecular bem ordenada e podem se aderir fortemente às superfícies metálicas dos equipamentos. Uma vez formado o cristal, ocorre um rápido desenvolvimento dele, através da agregação de novas moléculas, resultando em incrustações com tamanhos cada vez maiores. Para a remoção de incrustações já consolidadas despende-se um grande esforço, muitas vezes através de limpezas químicas (normalmente com soluções de ácidos apropriados, devidamente inibidos) ou limpezas mecânicas de grande intensidade, tais como hidrojateamento a altas pressões, marteletes, chicotes rotatórios, impactos diretos com ferramentas (marreta e talhadeira, ponteiros), etc.

Na empresa onde foi realizado o projeto, existem 03 grandes salas de compressores. Contudo foi escolhida somente uma delas para executar o projeto piloto. Esses equipamentos são fonte de insumos necessários para as operações diárias da referida indústria, pois gera ar comprimido para equipamentos pneumáticos, aeração de tanques de estação de tratamento de efluentes, homogeneização dos cadinhos de alumínio líquido da fundição, além da separação de óleos de corte do setor de usinagem de peças diversas.

A redução de custos financeiros foi de 59%, totalizando R$ 8.626,22 economizados por ano com aquisições de produtos químicos. Em relação à água poupada do lençol freático, deixou de serem utilizados 374 mil litros de água por ano. Nessas torres de resfriamento observa-se, portanto, a importância de recirculação de água para o uso racional e consciente desse recurso natural finito e valioso, ação essa que combina com a política ambiental da empresa por priorizar a manutenção de recursos naturais para as presentes e futuras gerações.

5.2 - SUGESTÕES

Como sugestão, até mesmo pela própria diretriz da empresa, menciona-se a expansão do projeto para as duas outras salas de compressores e para as demais torres de resfriamento do parque fabril.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, C. **Aerossóis atmosféricos: perspectiva histórica, fonte, processos químicos de formação e composição orgânica.** Química Nova, v. 28, n. 5, p. 859–870, 2005

ANANIAS, N.; MARIN, F. A. D. G. **O trabalho docente no ensino fundamental: o tema água e a educação ambiental em questão.** Congresso nacional de formação de professores, 2.; congresso estadual paulista sobre formação de educadores, 12, Águas de Lindóia. Anais 2. Congresso Nacional de Professores 12. Congresso Estadual sobre Formação de Educadores. São Paulo: UNESP; PROGRAD, 2014. p. 2766-2778. 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/141770>. Acesso em: 14 de março de 2019, 10h40min.

APHA, 2012. **Standard methods for the examination of water and wastewater**, 22ndEd.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.

ATLAS COPCO. **"Compressed Air Manual".** 8 the dition. 2015. Disponível em: <https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/local-countries/thailand/documents/compressed-air-manual-8th-edition-ac.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2018.

BEATER, P. **"Properties of compressed air", cap. 1 em: beater, p. "pneumatic drives –system design, modelling and control".** springer, 2007 compressed air challenge. "Guidelines for selecting a compressed air system service provider and levels of analysis of compressed air systems". 2002. Disponível em: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/guidelinesforweb.pdf>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

BRASIL, Presidência da República. **Lei 9.433 de 12 de janeiro de 1997.** Política dos Recursos Hídricos. Brasília. 1997b.

BREGA FILHO, D. MANCUSO, P. (2003). **Conceito de reuso de água.** In: Mancuso, P., santos, H. dos (org). Reuso de água. Barueri, SP: Manole (USP).

BURGER, R. **Cooling tower technology: maintenance, upgrading and rebuilding.** 3rd ed. The Fairmont Press, Inc. India. 1994. 234 p.

BUSTOS, M. R. L. **A educação ambiental sob a ótica da gestão de recursos hídricos.** Tese. Universidade de São Paulo, 2003.

CASTELLAN, G. **Fundamentos de Físico – Química.** 4. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

CAGI - **Compressed Air and Gás Institute.** "Compressed Air & Gás Handbook", Seventh Edition, 2016. Disponível em: <http://www.cagi.org/pdfs/cagi_electhb _ch1.pdf>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

CENGEL, Y. (1997). **"Introduction to Thermo dynamics and Heat Transfer"**. McGraw-Hill Companies, New York.

CHEREMISIOFF, N. P.; CHEREMISIOFF, P. N., **Cooling towers: selection, design and practice.** Michingan. Ann Arbor Science. 1981. 347 p.

COOLING TOWER INTITUTE (CTI). Houston. **Apresenta recursos e atividade desenvolvidas.** Disponível em <http://www.cti.org> Acesso em: 22 de junho de 2019.

COLLINS, B., JONES, T., McGLYNN, McKANE, A., MOTLEY, M., POWELL, H., **"Assessment of the market for compressed air efficiency services"**, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, US Department of Energy, Burlington, Massachusetts, 1998.

CUNHA, I. F., **"Compressed air. Energy efficiency reference guide book"**. Canadá: CEA Technologies, 2007. Disponível em: <https://www.slideshare.net/Sugestive/com pressed-air-manual-hand-book>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

Declaração universal dos direitos da água. Disponível em: <http://www.direitoshuma nos.usp.br/index.php/Meio-Ambiente/declaracao-universal-dos-direitos-da-agua.html>. Acesso em: 04 de março de 2019, 11h35min.

ELETROBRAS/PROCEL. Manual **Prático-Eficiência Energética em Sistemas de ar Comprimido.** 86 p. 2004.

ESTEVES, F. A. **Fundamentos de limnologia.** 2ed. Rio de Janeiro: Interciência, 1998.

FEITOSA, F. A. C. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações.** 3. ed. rev. e ampl. - Rio de Janeiro: CPRM: LABHID, 2008. 812p.

FERRAZ, R. C. **Avaliação de sistema alternativo de proteção contra a corrosão em circuito de água de refrigeração.** Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia

Metalúrgica e de Materiais). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. 92p.

FERREIRA, S. J. F. **Amazônia das águas: qualidade, ecologia e educação ambiental.**

FILHO, E. F. da *et al.* **Aquíferos do Estado do Paraná.** Curitiba: Maxi Gráfica, 2011.

Gentil, V. **Corrosão. Livros Técnicos e Científicos.** 4ª edição, LTC, Rio de Janeiro. 2003.

GRADES, E. des A. **Modelling and simulation of CO2 release in multiple-effect distillers for seawater desalination.** jordanien, 2004. p 78-84. Dissertation (Doktor-Ingenieur). Mathematisch-Naturwissenschaftlich-TechnischeFakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg in Tafilah.

KAYA D., PHELAN P., CHAU D., SARAC H.I. **"Energy conservation in compressed-air systems".** International Journal of Energy Research, v.26, 837–49, 2002.DOI: 10.1002/er.823QUARTARONI,G. e ANGLANI, N., "Improving the Energy Efficiency of Air Compressor Rooms -A methodological tool for the topology optimization of air compressor rooms". IEEE Industry Application Society, vol. 22, n. 1, 40-50 (2016). DOI:10.1109/MIAS.2015.2459100

KRICHEL, S. V. *et al.* **Exergy Flow Diagrams as Novel Approach to Discuss the Efficiency of Compressed Air Systems.** In: Proceedings of 8th International Fluid Power Conference, 2012. Dresden, Germany.

LASTORIA, G. **Hidrogeologia da formação serra geral no Estado de Mato Grosso do Sul.** Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2002. 133p.

McNEILL, L. S. **Water quality factors influencing iron and lead corrosion in drinking water.** Dissertation (Doctor Degree in Civil and Environmental Engineering). Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA, USA, 2000. p 1-12.

MONTEIRO, M. A. G.; ROCHA, C. A. **Eficiência energética em sistemas de ar comprimido: Manual Prático.** Rio de Janeiro: Eletrobrás; Procel, 2005.

MSPC informações Técnicas. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/termo/termo d0410.shtml>. Acesso em: 29 de dezembro de 2018.

PANNKOKE, T. **Cooling tower basics.** Journal HPAC Engineering. February 1996.

PHILIPPI JR, A. **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável.** SP: Manole, (Coleção Ambiental; 2). 2005.

PRANCE, G.T., LOVEJOY, T. E. **Amazônia: key environments.** Oxford: Pergamon Press, 1985. 40p.

REIMBRECHT, E. G., FREDEL, M. C., BAZZO, E. **Fabricação de elementos porosos para utilização em bombas capilares.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE ESTRUTUROLOGIA, 1, 1998, Belo Horizonte. Anais eletrônicos. Belo Horizonte: UFMG, 1998. Disponível em: <http://www.uranocdtn.br/~sbe/>. Acesso em: 21 de janeiro de 2016, 20h35min.

RIGOTTI, P. A. C. **Projeto de aproveitamento de água condensada de sistema de condicionadores de ar.** 2014. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Departamento de Ciências Exatas e Engenharias, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2014. Disponível em: http://bibliodigital.unijui.edu.br:8080/xmlui/handle/123456789/25
13. Acesso em: 24 set. 2019.

ROCHA, C. R., MONTEIRO, M. A. G. **"Eficiência energética em sistemas de ar comprimido"**, Rio de Janeiro: Eletrobrás, 208p (2005). Disponível em: <https://static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/ManualArComprimido.pdf>.
Acesso em: 1 de Junho de 2018.

ROOTS BLOWERS, 2018. Disponível em: http://roots-blowers.com/. Acesso em: 03 de Junho de 2018.

SAIDUR, R., RAHIM, N. A., HASANUZZAMAN, M. **"A review on compressed-air energy use and energy savings"**, Renewable and Sustainable Energy Reviews14, 1135–1153 (2010). DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.013SCHMIDT, C., KISSOCK, K. "Modeling and simulation of air compressor energy use". ACEEE Summer Study on Energy in Industry, West Point, NY, July 19–22. 2005. Disponível em: <https://aceee.org/files/proceedings/2005/data/papers/SS05_Panel01_Paper13.pdf>. Acesso em: 1 de junho de 2018.

SANTOS, A. H. M. *et al.* **Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações.** Itajubá: FUPAI, 3ª Edição, 2006.

SAVELSKI, M. J.; BAGAJEWICZ, M. J. **On the optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants.** Chemical Engineering Science, n. 55, p. 5035-5048, 2000.

SENNIAPPAN, A. P. **"Baselining a compressed air system—an expert systems approach".** Dissertação, Morgantown, West Virginia University, USA, 2004.

TESSARO, S. A. **"Desempenho comparativo entre compressores rotativos de parafuso com velocidade fixa e variável".** Trabalho de Conclusão de Especialização, Universidade Federal de Santa Maria. 2014. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/1320>. Acesso em: 20 de Maio de 2018.

SHIKLOMANOV, I. A. **Appraisal and Assessment of World Water Resources.** International Water Resources Association, v.25, n.1, p.11-32, 2000.

SILVA, J. F. A.; PEREIRA, R. G. **Panorama global da distribuição e uso de água doce.** Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais, v.10, n.3, p.263-280, 2019. DOI: http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2019.003.0023.

SILVA, L. M. **Estudo da demanda de água não potável e desenvolvimento de um sistema de reuso de água cinza para habitação de interesse social.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.

SMITH, R. **Chemical process design and integration.** New York: John Wiley & Sons Ltd., chap. 24, 2005.

WAIDYASEKARA, K. G. A. S; SILVA, M. L. de; RAMEEZDEEN, R. **Comparative study of Green building rating systems: in terms of water efficiency and conservation.** In: THE SECOND WORLD CONSTRUCTION SYMPOSIUM 2013. SOCIO-ECONOMIC SUSTAINABILITY IN CONSTRUCTION, 2013, Sri Lanka. Anais. Colombo, Sri Lanka, 2013, p. 108-117.

WWF Brasil. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/informacoes/bliblioteca/?4020>. Acesso em: 04 de fevereiro de 2019, 20h35min.

WOLKE, V. **77% dos brasileiros dizem que excesso de burocracia prejudica o crescimento econômico.** In: Portal da Indústria. Agência Confederação Nacional da Indústria, 2015. Disponível em <https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/leis-e-normas/77-dos-brasileiros-dizem-que-excesso-de-burocracia-prejudica-o-crescimento-economico. Acesso em: 27 de janeiro de 2019, 20h35min.