

JUMILE DOS SANTOS MOREIRA
ORIENTADOR: PODALYRO AMARAL DE SOUZA
CO-ORIENTADOR: JOSÉ R. SIMÕES MOREIRA

**Captação do vapor d'água produzido pela torre de
resfriamento numa indústria de fertilizantes**

Projeto de Formatura II apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo, no
âmbito do Curso de Engenharia Ambiental.

São Paulo
Junho de 2014

AGRADECIMENTOS

À professora Dione Mari Morita, coordenadora do curso de Engenharia Ambiental, por acreditar no desenvolvimento do projeto, nas minhas capacidades e assegurar as condições necessárias para que ele fosse feito.

Ao orientador, professor Podalyro Amaral de Souza, pela sugestão da concepção e direcionamento do projeto, pelo aumento dos meus conhecimentos e da minha curiosidade.

Ao professor José R. Simões Moreira , do Laboratório SISEA-USP, por indicar o rumo que o projeto deveria seguir e pela disposição em me ajudar no dimensionamento do arranjo sugerido por ele.

À Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados, FAFEN-BA, pela recepção e, ao engenheiro Antônio Vieira pela paciência e respostas às dúvidas apresentadas.

À Vale Fertilizantes S/A UNIDADE II, Cubatão-SP nas pessoas de Henrique Brum e Juliana Prestes.

À agência CETESB-Cubatão pela receptividade e paciência na pessoa do gerente Marcos Cipriano.

Ao Adriano José de Sousa, formado em história na FFLCH-USP, pela força motivacional, sugestões, correções ortográficas e alterações de coesão e coerência textual.

ÍNDICE

Conteúdo

1	INTRODUÇÃO	2
2	LEVANTAMENTO DE ESTUDOS PRÉVIOS	3
3	ESTUDO DE CASO	5
3.1	Levantamento dos dados	6
3.1.1	Unidade de produção de amônia	6
3.1.2	Unidade de produção de ácido sulfúrico	8
3.1.3	Unidade de produção de ácido nítrico	10
3.1.1	Unidade de produção de ácido fosfórico	12
3.1.2	Unidade de produção de fosfatados	13
3.1.3	Unidade de produção de nitrato de amônio	15
3.2	Usos da água no processo	15
3.2.1	Balanço Hídrico na Torre de Resfriamento	17
3.2.2	A Torre de Resfriamento	18
3.2.3	Climatologia Local	20
3.2.4	Qualidade da água captada	22
3.2.5	Outorga e cobrança pelo uso da água	24
3.2.6	Demanda de energia elétrica	25
4	ANÁLISE DOS DADOS	26
5	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	27
5.1	Premissas	27
5.2	Delimitação	28
6	ALTERNATIVAS	29
7	SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS	30
7.1	Critérios de seleção	30
7.1.1	Estudo do primeiro arranjo	30
7.1.2	Estudo do segundo arranjo	33
8	PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO (AVALIAÇÃO TÉCNICA)	34
9	VIABILIDADE ECONÔMICA	40
9.1	Custo do sistema para uma torre	40
9.2	Economia com a instalação do sistema	40
9.3	Balanço	41
10	QUANTIFICAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS	42
11	CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES	42
12	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

RESUMO EXECUTIVO

O projeto teve como objetivo a concepção e o dimensionamento de um sistema que se propõe a captar e condensar o vapor d'água de uma torre de resfriamento da Indústria Vale Fertilizantes S/A.

Para isso foram coletados dados na agência CETESB de Cubatão, em visitas à empresa e na literatura.

O princípio que norteou o trabalho é o fato da água ser um recurso essencial à vida e ao desenvolvimento das atividades humanas e por essas razões deve ser utilizada de forma racional. Uma das implicações da implantação do projeto é, justamente, o aumento da disponibilidade da água no rio Moji para outros usos como o abastecimento humano.

Foram estudados dois arranjos para o sistema proposto e a seleção foi baseada, principalmente, no critério da possibilidade de oferecimento da perda de calor necessária para que se conseguisse a condensação, além disso, levou-se em consideração a factibilidade do arranjo proposto, custo de instalação, volume de condensado produzido e tempo para dar partida no sistema ou disponibilidade dos equipamentos no mercado.

Em termos econômicos o custo do arranjo selecionado foi estimado em R\$ 345.000,00 e a economia gerada por ele foi apreciada, com todas as restrições impostas, em R\$124.464,00 por ano. Assim o tempo de retorno do investimento será de **2 anos 9 meses 10 dias**.

Em termos ambientais a empresa deixaria de captar a vazão de 2.875 m³/dia de água, em média.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Funcionamento da Torre de Resfriamento. (MANCUSO, 2001)	4
Figura 2 - Visão geral da localização da Vale. (Google Earth, Maio/2014)	5
Figura 3-Diagrama de blocos da produção de amônia. (CEKINSKI et. al, 1990)	8
Figura 4 - Fluxograma do Ácido Sulfúrico. (RIBEIRO apud CEKINSKI, 1990)	10
Figura 5 - Fluxograma de produção do ácido nítrico. (C.R.F., SANT'ANA)	12
Figura 6-Fluxograma de produção de ácido fosfórico. (CEKINSKI et. al, 1990).....	13
Figura 7 - Fluxograma da produção de fosfatados. (CEKINSKI et. al, 1990)	14
Figura 8-Fluxograma de produção de nitrato de amônio (CEKINSKI et. al, 1990).....	15
Figura 9- Gráfico de distribuição da água na unidade II	16
Figura 10 - Gráfico do balanço hídrico da torre de resfriamento	18
Figura 11 - Visão da Torre de Resfriamento. (Fonte: Google Earth, junho/2014).....	19
Figura 12- Perfis de temperatura, velocidade do vento e umidade. (VALERINI, 2011) .	21
Figura 13- Visualização do ponto de análise da CETESB (Google Earth,2014)	22
Figura 14- Vapor d'água emitido pela Torre de Resfriamento na Vale.(Fonte: Google)	27
Figura 15- Sistema de produção de condensado	29
Figura 16- Seção do Venturi.....	31
Figura 17-Gráfico $\Delta T(^{\circ}C)$xVelocidade(m/s).....	32
Figura 18 – Serpentina. (FONTE: Gma componentes para frio LTDA).....	33
Figura 19-Ciclos de refrigeração	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de água na Indústria de Fertilizantes (Fonte: HESPAHOL; MIERZWA, 2005)	3
Tabela 2- Custo dos produtos de tratamento da água de refrigeração	20
Tabela 3 – Dados de qualidade da água captada do Moji	22
Tabela 4 - Comparação entre a água captada e a água de resfriamento	23
Tabela 5-Valores dos coeficientes de outorga	24
Tabela 6 - Dados de funcionamento das bombas	25
Tabela 7 - Utilização de energia elétrica.....	25
Tabela 8- Custo do sistema. (Fonte: www.google.com.br)	40
Tabela 9- Cronograma das atividades.....	Erro! Indicador não definido.

LISTA DE SÍMBOLOS

ABIQUIM: Associação Brasileira da Indústria Química

ANDA: Agência Nacional de Difusão de Adubos

ANA: Agência Nacional das Águas

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CEPEA-USP/CNA: Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada

CETESB: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento

CONAMA: Conselho Nacional do Meio Ambiente

DAEE: Departamento de Águas e Energia Elétrica

FAFEN: Fábrica de Fertilizantes Nitrogenados

SABESP: Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SIGRH: Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos

MME: Ministério de Minas e Energia

VALE: VALE Fertilizantes S/A

1 INTRODUÇÃO

A indústria de fertilizantes tem importante papel no desenvolvimento econômico nacional, por fazer parte da cadeia de produção de uma das principais atividades econômicas desenvolvidas no país: a agropecuária. O Brasil produziu em 2011/2012 273 milhões de toneladas de agro vegetais e exportou 185 milhões (ANDA 2012). Em 2011 a renda bruta gerada por esses produtos foi de R\$195.368.878,56 (CONAB). E sua participação no PIB Nacional foi de 15,42% (CEPEA-USP/CNA).

Em 2011 tínhamos disponibilidade de 14.302.000 toneladas de nutrientes (NPK). Desse total importamos 9.694.000: 2.835.000 toneladas de nitrogenados, 2.286.000 toneladas de fosfatados e 4.573.000 toneladas de potássicos. Produzimos no total 3.178.000 (respectivamente, 808.000; 2.011.000 e 359.000) e consumimos 11.656.000 toneladas de nutrientes (3.366.000 de N, 3859.000 de P₂O₅ e 4.431.000 K₂O) (ANDA, 2012). Os dados revelam que somos fortemente dependentes das importações e, que, embora a produção agrícola esteja acelerada, a produção Nacional de fertilizantes não acompanha o mesmo ritmo. Importamos, em 2011, 83% dos fertilizantes que consumimos.

Os dados anteriores indicam que a indústria de fertilizantes utiliza quantidades consideráveis de insumos e matéria-prima em seus processos. Um dos recursos imprescindíveis à fabricação de fertilizantes é a água, utilizada de ambas as maneiras durante sua produção.

Depois da Agricultura, excluindo-se o abastecimento humano, a Indústria é a atividade que mais utiliza água. A vazão de retirada do setor, em 2010, foi de 1.359.201.600m³ de água na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste (Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2013, ANA), onde está localizada a indústria objeto de estudo.

O Rio Moji, utilizado para captação de água pela Vale está numa região hidrográfica, que é reconhecida pela alta densidade demográfica e pela grande concentração industrial. Deste modo, os recursos hídricos da região devem ser utilizados de maneira sustentável para que se garanta a proporcionalidade de distribuição entre as atividades. (ANA, 2013).

Um dos instrumentos utilizados na gestão desses recursos é a cobrança pelo uso da água, que se baseia nas diretrizes definidas na Lei Estadual nº 12.183, de 29 de dezembro de 2005 e no Decreto nº 50.667 de 30 de março de 2006.

2 LEVANTAMENTO DE ESTUDOS PRÉVIOS

Os usos da água na indústria, de modo geral, são diversos: matéria-prima, fluido auxiliar na produção de suspensões e soluções químicas, geração de energia, transporte e assimilação de contaminantes. Porém, na indústria de fertilizantes ela é utilizada, principalmente, para o resfriamento sem contato, como pode ser verificado na tabela abaixo (HESPAÑOL, I.; MIERZWA, J.C.; 2005) , o que pressupõe a produção de água de resfriamento.

Tabela 1 - Consumo de água na Indústria de Fertilizantes (HESPAÑOL; MIERZWA, 2005)

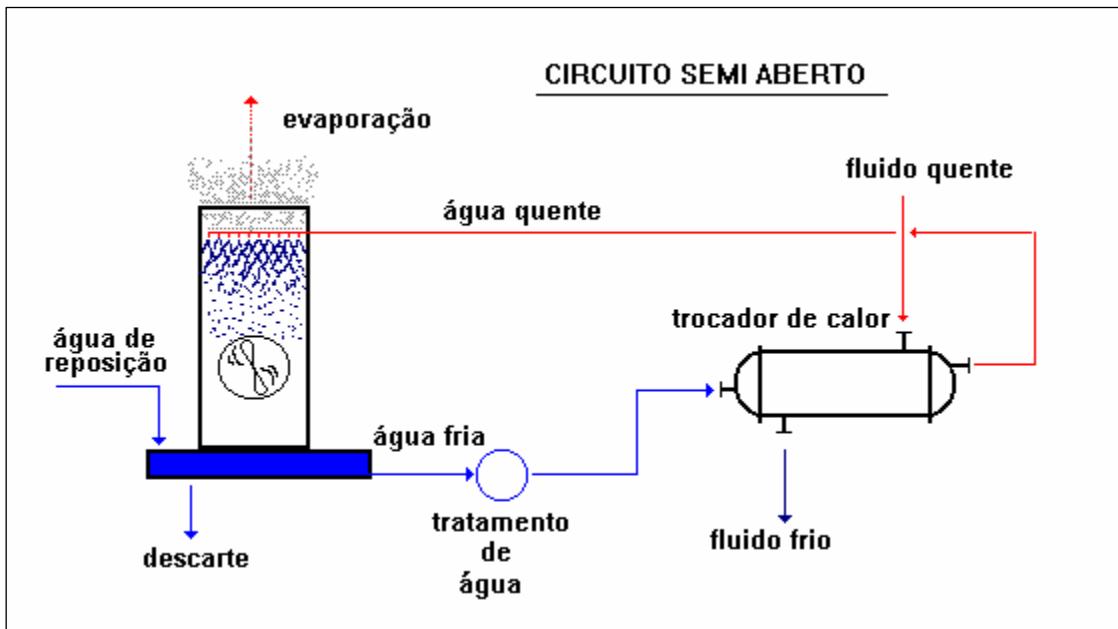
Distribuição do consumo total de água (%)			
Indústria	Resfriamento sem contato	Processos e atividades afins	Uso sanitário e outros
Fertilizantes nitrogenados	92	~8	~0,5
Fertilizantes fosfatados	71	28	1

A água de resfriamento é utilizada para retirada de calor de equipamentos e processos através da troca térmica. Ela é produzida por uma torre de resfriamento, que se encontra na área de utilidades da indústria.

A Torre de Resfriamento, portanto, recebe água numa determinada temperatura e a devolve numa temperatura menor para que ela seja utilizada, novamente, como fluido refrigerante no processo produtivo.

A figura abaixo apresenta o funcionamento de uma torre de circuito semiaberto, com recirculação de água.

Figura 1-Funcionamento da Torre de Resfriamento. (MANCUSO, 2001)



O funcionamento da torre se dá pelo bombeamento da água a ser resfriada para seu topo, onde ela é distribuída por bicos de aspersão. Sua parte interna é preenchida por um enchimento (obstáculos), que tem a finalidade de aumentar o tempo de contato entre a água e o ar, que vem na direção oposta a da água.

O resfriamento da água, na torre, ocorre pela transferência simultânea de calor e massa d'água para o ar por convecção e nesse processo parte da água aquecida é evaporada para o ar. Esta é a principal responsável pelo resfriamento, representa cerca de 90% do processo de resfriamento da água. (Torres de Resfriamento de água, ALPINA EQUIPAMENTOS LTDA.).

A taxa de evaporação, porém, é influenciada por fatores de ordem climática. No verão é mais difícil atingir-se a temperatura adequada da água para o processo, pois a temperatura de bulbo úmido na entrada da torre é maior e, como consequência, a temperatura da água de saída também é maior, o que pode comprometer o funcionamento do equipamento que irá utilizar a água resfriada no processo.

3 ESTUDO DE CASO

O estudo foi iniciado com uma visita técnica à FAFEN-BA, no Município de Camaçari para conhecimento dos processos de produção da amônia e uréia. Ali foi observado que a quantidade de vapor gerada por uma torre de resfriamento na produção de ureia e amônia foi consideravelmente alta. Devido à distância, a continuidade do projeto se deu com dados da Vale Fertilizantes unidade II, localizada em Cubatão, na região metropolitana de São Paulo.

Figura 2 - Visão geral da localização da Vale. (Google Earth, Maio/2014)



Inicialmente pediu-se vistas aos processos da empresa na agência CETESB de Cubatão para análise do Memorial de Caracterização do Empreendimento (MCE) e dos autos de inspeção.

O Decreto nº 47397/2002 classifica o empreendimento com fator de complexidade máximo, $w=5$, o que exigiu um MCE mais detalhado. No entanto, nem sempre foi possível encontrar os dados necessários à modelagem do problema, portanto eles foram complementados pela literatura correspondente.

Foram, também, coletados dados de teses e de sites de órgãos governamentais como DAEE, SABESP, ANA, ANEEL, entre outros.

Na segunda parte do trabalho foi feita uma visita técnica à Vale Fertilizantes, Unidade 02, onde são produzidos os seguintes compostos: ácido nítrico, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, amônia, nitrato de amônio (solução e perolado), fosfato monoamônico (MAP) e fosfato diamônico (DAP). A fim de complementar os dados coletados foi feito um novo pedido de vista aos processos da empresa na agência CETESB de Cubatão.

3.1 LEVANTAMENTO DOS DADOS

Nesse tópico estão descritos os dados coletados no MCE, produzido em março de 2008, complementados por dados da literatura e da visita técnica à Unidade 2, por meio de observação e consulta ao acervo histórico da empresa.

Para que seja demonstrada a importância da água para os diversos processos as entradas e saídas de água nos estados líquido e gasoso estão circuladas nos respectivos diagramas dos processos produtivos.

Para melhor análise a descrição dos processos industriais da Vale Fertilizantes estão divididos nas seguintes unidades:

- Unidade de produção de amônia
- Unidade de produção de ácido sulfúrico
- Unidade de produção de ácido nítrico
- Unidade de produção de ácido fosfórico
- Unidade de produção de fertilizantes fosfatados
- Unidade de produção de nitrato de amônio

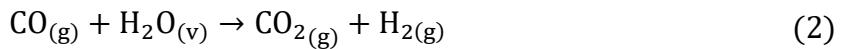
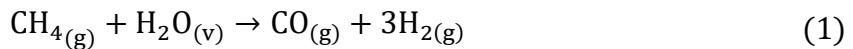
3.1.1 Unidade de produção de amônia

A produção de amônia é de extrema importância para a empresa, pois praticamente todos os fertilizantes fabricados contém nitrogênio em sua formulação.

A amônia ou amoníaco liquefeito utiliza como matéria-prima o gás de refinaria, no caso da Vale, produzido na Refinaria de Presidente Bernardes (RPBC) com densidade de 13kgf/cm².

O gás de refinaria é recebido e enviado para o sistema de remoção de enxofre e de oleofinas, respectivamente, dessulfurização e hidrogenação, que tem como subprodutos o gás sulfídrico (H₂S) e a parafina. Após sua purificação o gás é dividido em duas correntes, que tem como destino, a produção de amônia e o setor de utilidades, no qual servirá como combustível em outros processos.

Na produção de amônia o gás passa pelo reformador primário (forno), no qual é convertido em H₂, CO₂ e CO sobre um leito de vapor d'água e catalisador a base de níquel.



Como não há conversão total do gás nesses produtos, procede-se a reforma secundária na qual, também, pretende-se produzir N₂. A mistura gasosa vinda da primeira reforma é enviada ao topo do reformador secundário, onde existe uma câmara de combustão, que é alimentada por ar atmosférico (pré - aquecido e filtrado), assim há o consumo de oxigênio e incorporação de nitrogênio. A mistura de gases flui pelo leito catalítico a base de níquel, formando, o gás de síntese, que sai a 994°C.

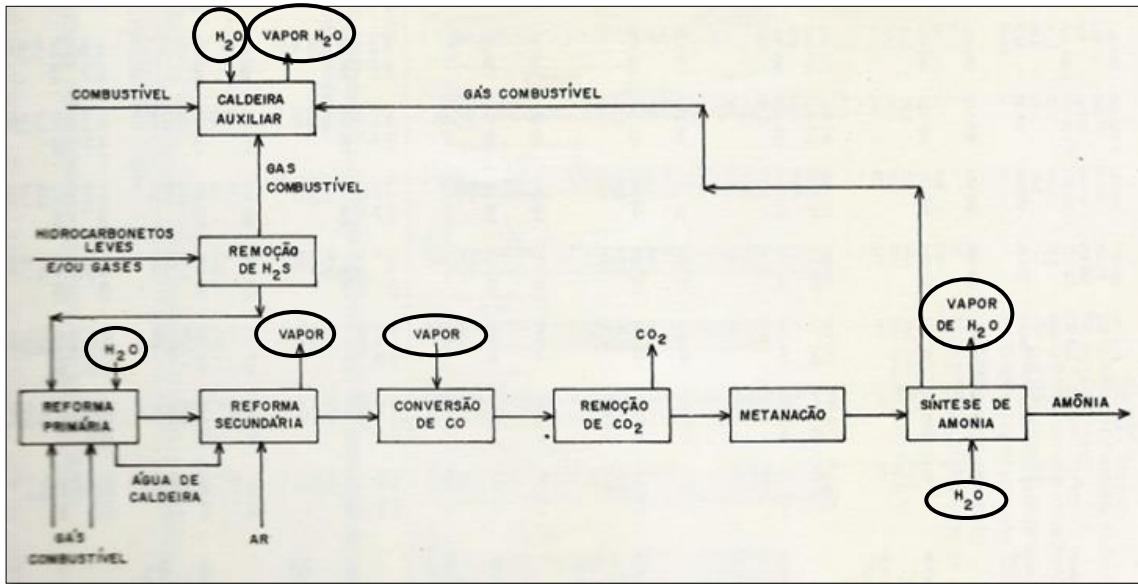
O objetivo dos processos como um todo é purificar cada vez mais a mistura gasosa a fim de se obter a mistura de nitrogênio e hidrogênio na proporção exata para obtenção da amônia.

As etapas que seguem são a conversão do CO em CO₂ (shift de alta temperatura e shift de baixa temperatura); remoção de CO₂ e metanação (retirada dos resíduos de CO e CO₂ na forma de metano, que volta para o início do processo).

Finalmente, há a formação da mistura de N₂ e H₂ que é submetida à compressão e então se obtém a amônia.

Pela **Figura 3** tem-se a dimensão da necessidade do uso da água como fluido de troca térmica no resfriamento do gás de síntese; como matéria-prima, na reforma primária. Além disso, percebe-se a ocorrência de emissão de vapor d'água em outras fases do processo.

Figura 3-Diagrama de blocos da produção de amônia. (CEKINSKI et. al, 1990)



3.1.2 Unidade de produção de ácido sulfúrico

A produção de ácido sulfúrico, pela Vale, é feita a partir de enxofre bruto ou elementar, como na maioria das indústrias brasileiras (ABIQUIM, 2012). Um dos destinos da produção é a fabricação do ácido fosfórico que será utilizado no processo produtivo dos fertilizantes fosfatados (MAP e DAP).

As etapas de produção são as seguintes:

1. Fusão do enxofre elementar
 2. Combustão do enxofre líquido
 3. Oxidação do SO_2 a SO_3
 4. Absorção de SO_3 pelo ácido sulfúrico recirculado
 5. Resfriamento do ácido
 6. Armazenamento

O processo tem início com o transporte de enxofre bruto ao poço de fusão, onde é submetido a uma temperatura média de 120°C. Já no estado líquido ele é bombeado para um filtro e encaminhado ao forno de combustão, onde é injetado sob pressão no queimador, que é alimentado por um soprador de ar seco, que por sua vez é ativado por uma turbina movida a vapor superaquecido. O enxofre, em sua forma gasosa, reage com o oxigênio formando SO₂ em uma reação bastante exotérmica, com temperatura de, aproximadamente, 1000 °C no forno.



Então o gás passa por uma caldeira tubular, onde há geração de vapor em razão da troca térmica com a água de resfriamento. O gás é resfriado (~430°C) e enviado para um reator de conversão de SO₂ a SO₃, que possui leito catalítico de pentóxido de vanádio (V₂O₅). Uma reação que também é exotérmica.

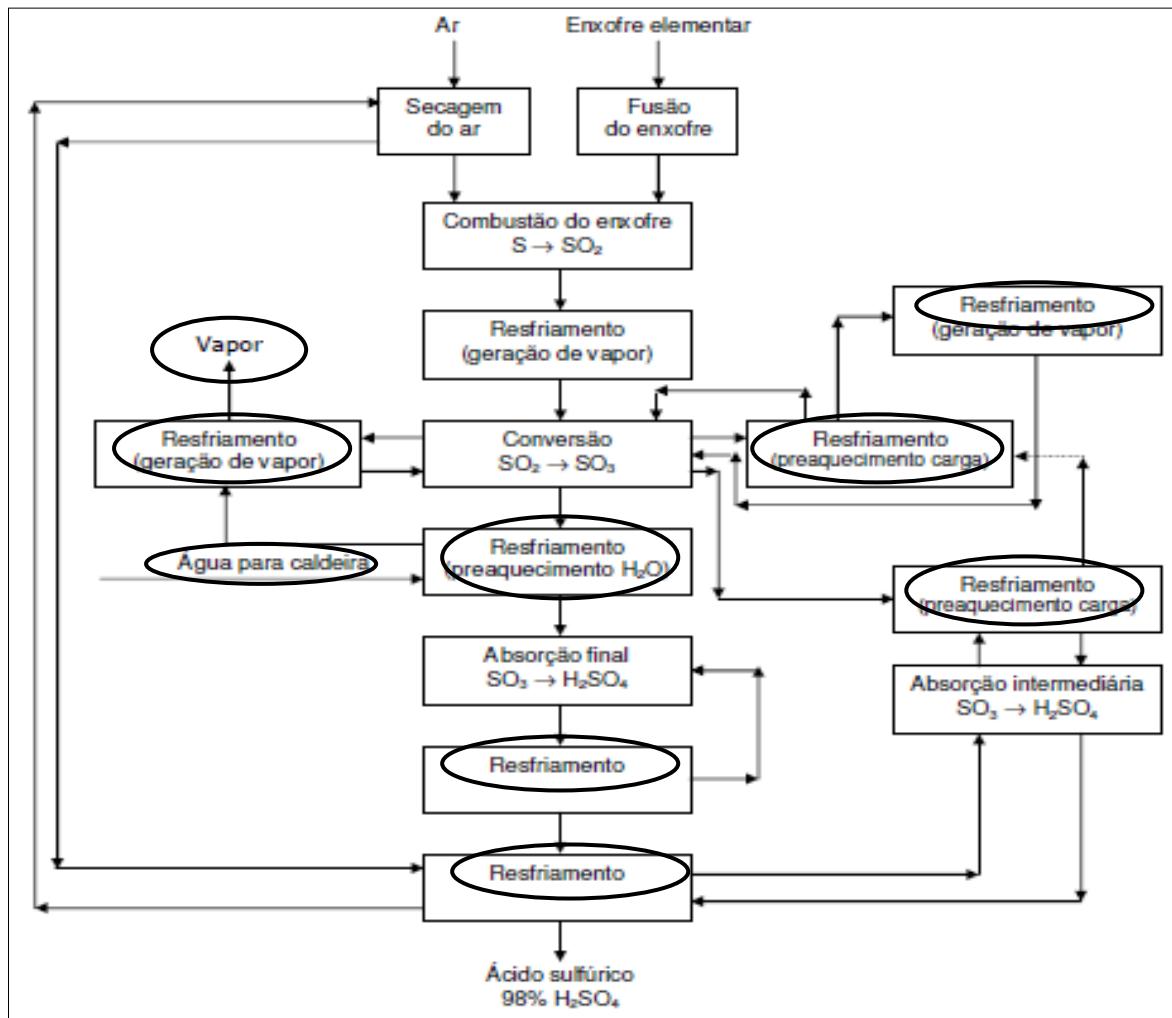


O SO₃ é absorvido por ácido sulfúrico concentrado formando mais ácido sulfúrico, obtido na concentração desejada pela adição de água.



Pela **Figura 4** nota-se que a água é utilizada, principalmente, como fluido de troca térmica, devido a alta prevalência da geração de vapor, o que é explicado pela ocorrência de reações com alto potencial exotérmico conforme citado anteriormente.

Figura 4 - Fluxograma do Ácido Sulfúrico. (RIBEIRO apud CEKINSKI, 1990)



3.1.3 Unidade de produção de ácido nítrico

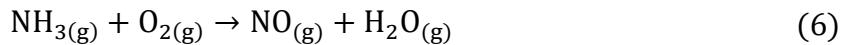
A produção de ácido nítrico é dividida em três etapas: oxidação catalítica da amônia, oxidação do NO a NO₂ e absorção dos óxidos de nitrogênio.

1. Oxidação catalítica da amônia

O método de oxidação utilizado é conhecido como processo de OSTWALD. Que se dá a partir da mistura entre amônia vaporizada e o ar, que é filtrado a fim de evitar a presença

de contaminantes, o que atrapalha a eficiência do catalisador. A amônia é produzida por meio da vaporização do amoníaco liquefeito, através de um vaporizador, onde troca calor com a água vinda do sistema de resfriamento da torre de absorção.

A amônia gasosa, então sofre oxidação sob um leito, que contém o catalisador de Platina-Rodhio, por onde é injetado ar, transformando-se em NO a temperaturas entre 880°C e 890°C, faixa na qual a reação é mantida sob controle. A proporção entre a amônia e o ar deve ser controlada para que se assegure a eficiência da conversão (10% de amônia em volume).



2. Oxidação do NO a NO₂

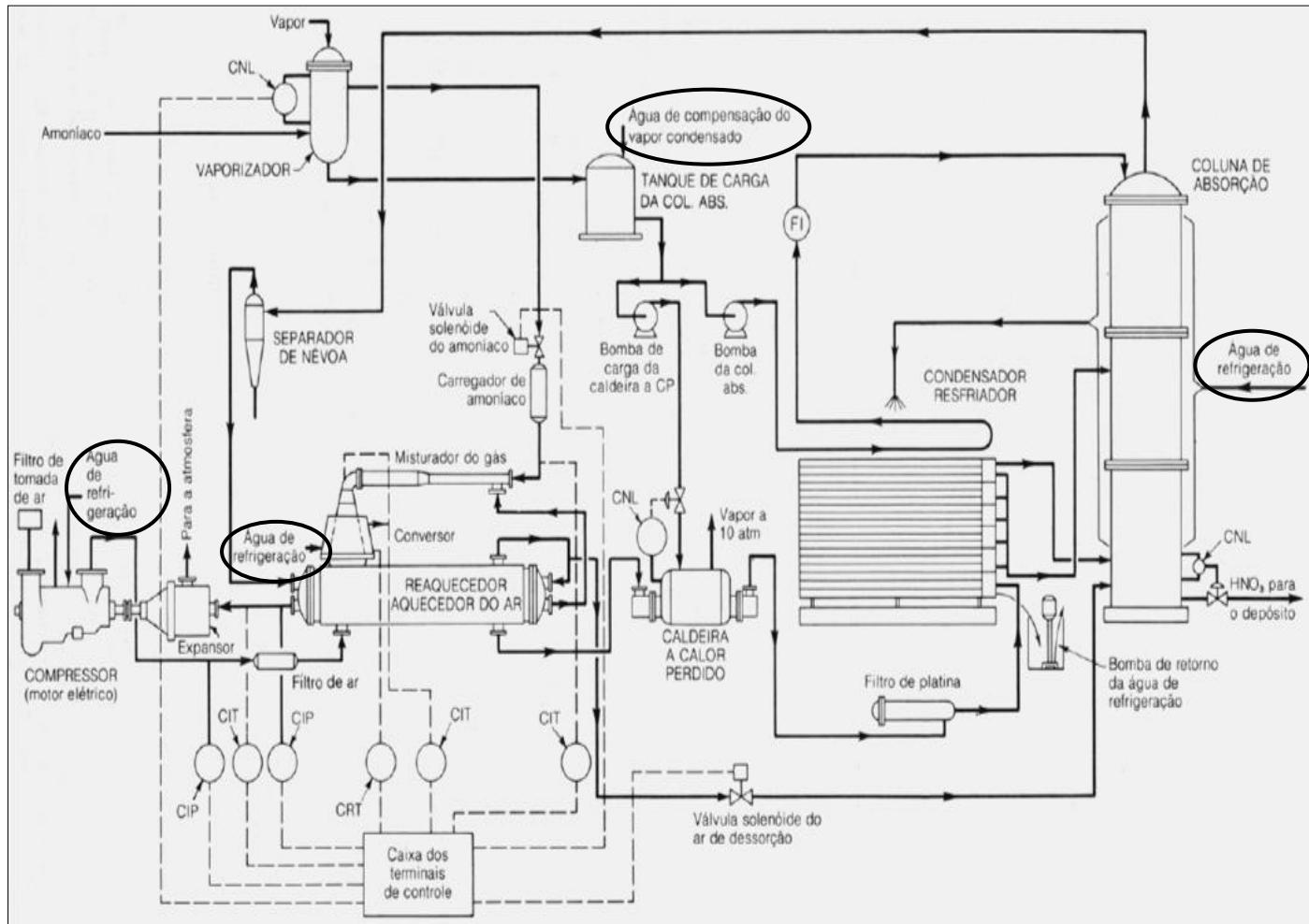
O NO, resfriado, é oxidado a NO₂ na presença de oxigênio. Quanto menor a temperatura maior será a velocidade dessa reação, não há necessidade de utilização de catalisador nessa etapa. O resfriamento da mistura gasosa é feito por uma bateria de trocadores de calor, que tem como fluido refrigerante a água. Em seguida essa mistura é transferida para uma torre de absorção onde será assimilada pela água e então formará o ácido nítrico. Durante esse processo o vapor d'água produzido pela reação entre amônia e oxigênio sofre condensação e reage com o NO₂, formando ácido nítrico fraco (45% de concentração).

3. Absorção dos óxidos de nitrogênio

A mistura de gases resultante é absorvida por uma coluna com pratos perfurados, onde os gases são resfriados (por serpentinhas com água de refrigeração) até sua temperatura de orvalho para retirada de excesso de água e aumento de pressão, resultando no deslocamento da reação, que favorece a produção de ácido nítrico.

Percebe-se pela **Figura 5** que o uso da água se dá, principalmente, como fluido refrigerante no compressor e na coluna de absorção.

Figura 5 - Fluxograma de produção do ácido nítrico. (C.R.F., SANT'ANA)



3.1.1 Unidade de produção de ácido fosfórico

Existem, basicamente, dois processos utilizados na produção de ácido fosfórico, o Hemihidratado e o Dihidratado, na Vale é utilizado o segundo (CEKINSKI et. al, 1990).

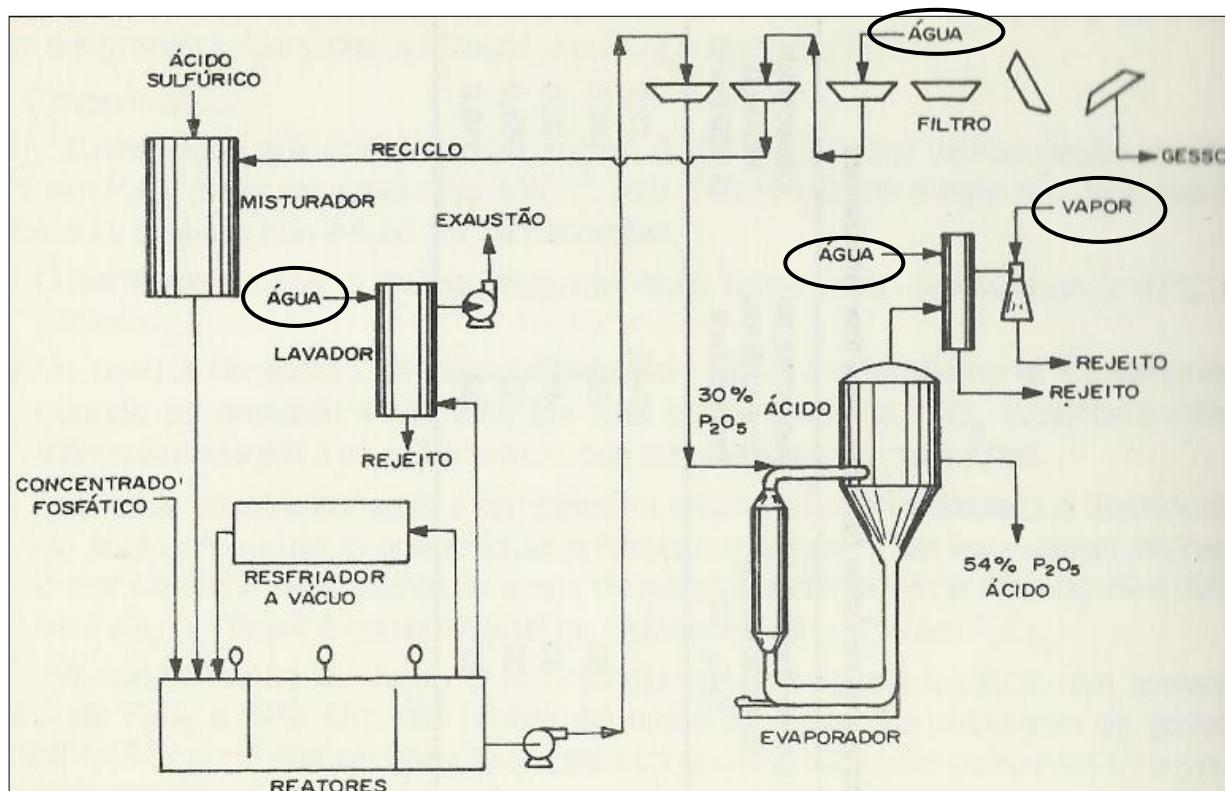
O processo produtivo do ácido se inicia com a mistura do concentrado fosfático, geralmente, composto por fluorapatita e ácido sulfúrico num reator. Essa reação libera bastante energia, assim uma parte da mistura, que agora se chama polpa, é enviada para um resfriador e volta para o reator, a fim de controlar a temperatura do sistema.

A polpa, em seguida, passa por três etapas de filtração e duas de lavagem. O primeiro filtrado é enviado para um tanque de concentração, na unidade de evaporação, onde é

concentrado em duas etapas, para que se tenham duas variações de concentração (40 a 42% e 50 a 54%).

O subproduto da filtração é o fosfogesso, que é enviado para armazenamento em via úmida, nas lagoas de estabilização.

Figura 6-Fluxograma de produção de ácido fosfórico. (CEKINSKI et. al, 1990)



3.1.2 Unidade de produção de fosfatados

Os fertilizantes fosfatados produzidos na Vale são o monoamônio e o diamônio. O processo pode ser dividido em duas etapas, a de neutralização, representada nas equações abaixo, e a de granulação.

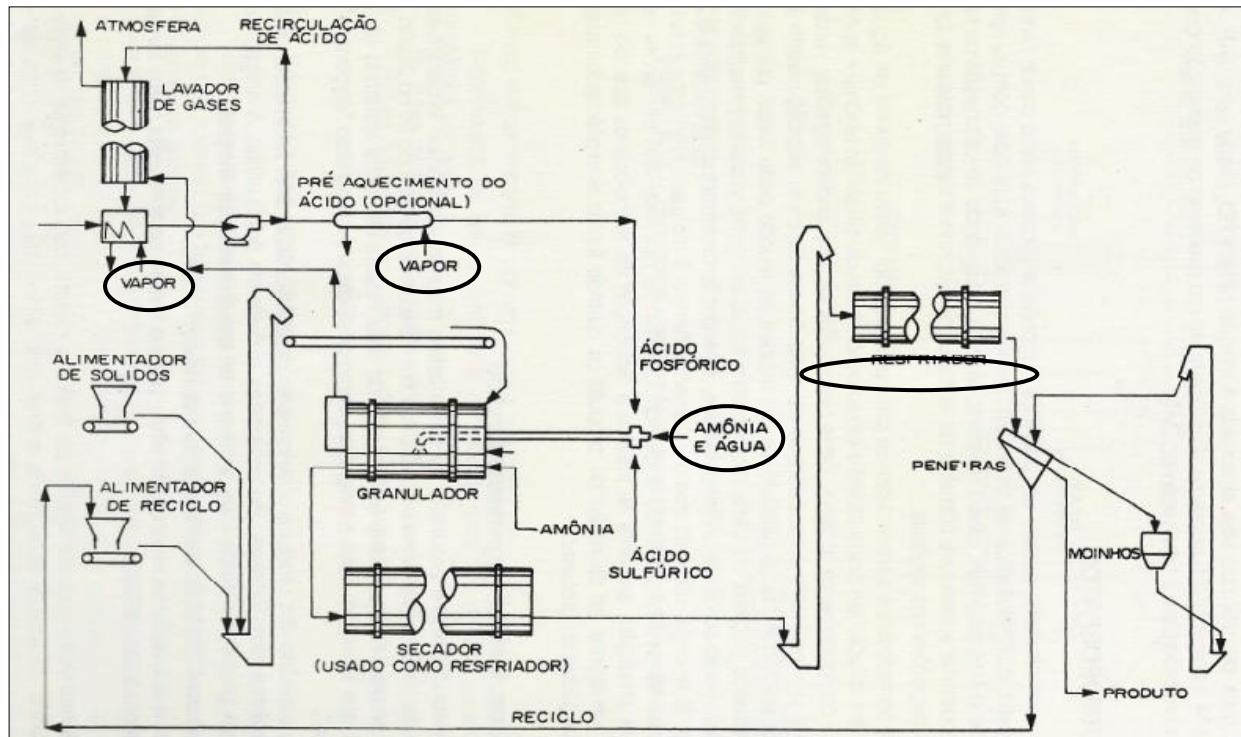


A reação de neutralização se dá pela mistura de amônia com ácido fosfórico, na proporção desejada, de acordo com o que se pretende produzir, MAP ou DAP, porém a reação se completa somente quando chega ao granulador, no qual ocorre a formação de cristais fosfatados, antes ela vai ocorrendo em reações parciais, conforme os reagentes passam pelos reatores.

Como o granulador é um vaso rotativo a mistura dos compostos acontece por rolagem entre as partículas, os cristais vão se agregando e formando grãos maiores até alcançar a granulação requerida. Estes grânulos são descarregados no secador e enviados para o resfriador, em seguida vão para um elevador que os distribui em quatro peneiras, que os separam em três correntes. Os grãos, com diâmetro adequado, vão para o empoador, onde se realiza o capeamento do produto final com óleo mineral. Os grânulos fora de especificação, finos ou grossos, têm os seguintes destinos: o primeiro é devolvido ao granulador, para que ganhe diâmetro e o segundo é moído e encaminhado ao empoador.

Na **Figura 7** é apresentada a sequência de formação dos grânulos fosfatados de MAP e DAP, no qual a utilização da água se dá como fluido refrigerante, como vapor de aquecimento e como diluidora de amônia.

Figura 7 - Fluxograma da produção de fosfatados. (CEKINSKI et. al, 1990)



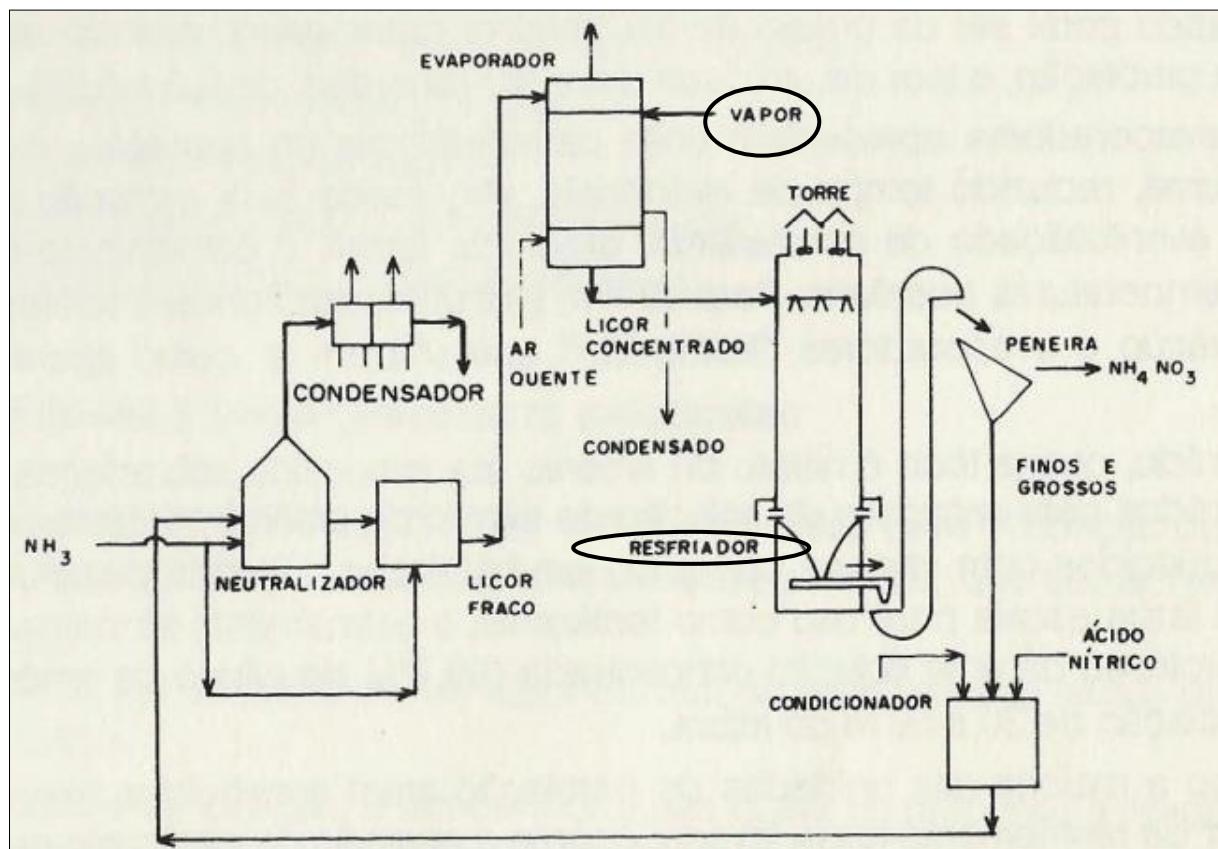
3.1.3 Unidade de produção de nitrato de amônio

O processo consiste na neutralização do ácido nítrico pela amônia sob pressão, com temperaturas variando entre 145º C e 190º C. Devido a exposição da mistura a essas temperaturas, ocorre sua concentração porque a água presente nela sofre evaporação.



A solução é enviada a uma torre de perolação, segue para peneiramento e vai para o resfriamento. Na Vale há produção de nitrato de amônio tanto em solução como na forma perolada. O fluxograma do processo está representado abaixo na **Figura 8**.

Figura 8-Fluxograma de produção de nitrato de amônio (CEKINSKI et. al, 1990)

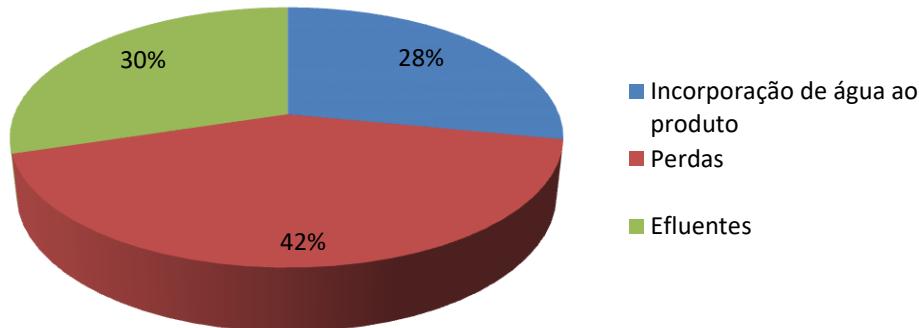


3.2 Usos da água no Processo

A água é utilizada nos processos descritos em item anterior como matéria-prima, sendo incorporada ao produto; como fluido de troca térmica, atuando nos processos de resfriamento e geração de vapor (perdas), e como meio de diluição ou solvente,

retornando ao corpo d'água compondo um efluente. No gráfico apresentado na **Figura 9** há a distribuição dos usos da água nos processos da VALE.

Figura 9- Gráfico de distribuição da água na unidade II



Do total de uso industrial da água, 23.677 m³/dia, 10.080 m³/dia são de perdas. Conforme os processos descritos, anteriormente, a água é utilizada, principalmente, como um fluido de troca térmica, assim como as transformações das matérias – primas nos produtos desejados ocorrem à alta temperatura, confirmando a necessidade de que haja resfriamento posterior dos processos para sua estabilização, a partir daí conclui-se que essa porcentagem de perdas se dá, principalmente, na forma de vapor, já que a água fria em contato com água quente provoca evaporação.

Diante das constatações em duas visitas técnicas, de dados da literatura e da análise do gráfico depreendeu-se que uma das formas de reduzir as perdas de água no processo seria atuar na redução das perdas de água por evaporação.

Para que esse cenário fique mais claro e que seja mais bem esmiuçado apresenta-se, em seguida, o balanço hídrico da torre de resfriamento e os aspectos referentes ao seu funcionamento.

3.2.1 Balanço Hídrico na Torre de Resfriamento

Os dados de vazão dos diversos processos da empresa, que utilizam água foram retirados do Plano de Redução de Uso de água (PRUA, 2013) e utilizados em tópicos anteriores, já os referentes à torre foram fornecidos pela própria empresa. As informações coletadas dão conta de que a vazão de reposição varia de 254-322 m³/h e a de recirculação é de 9.350 m³/h.

Para efeito de modelagem, a purga do sistema foi considerada contínua e a vazão de evaporação foi calculada pela equação:

$$E = R \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (10)$$

Onde:

R= vazão de reposição (m³/h)

E= vazão de evaporação (m³/h)

n= número do ciclo de concentração (igual a 5)

E a vazão de purga por:

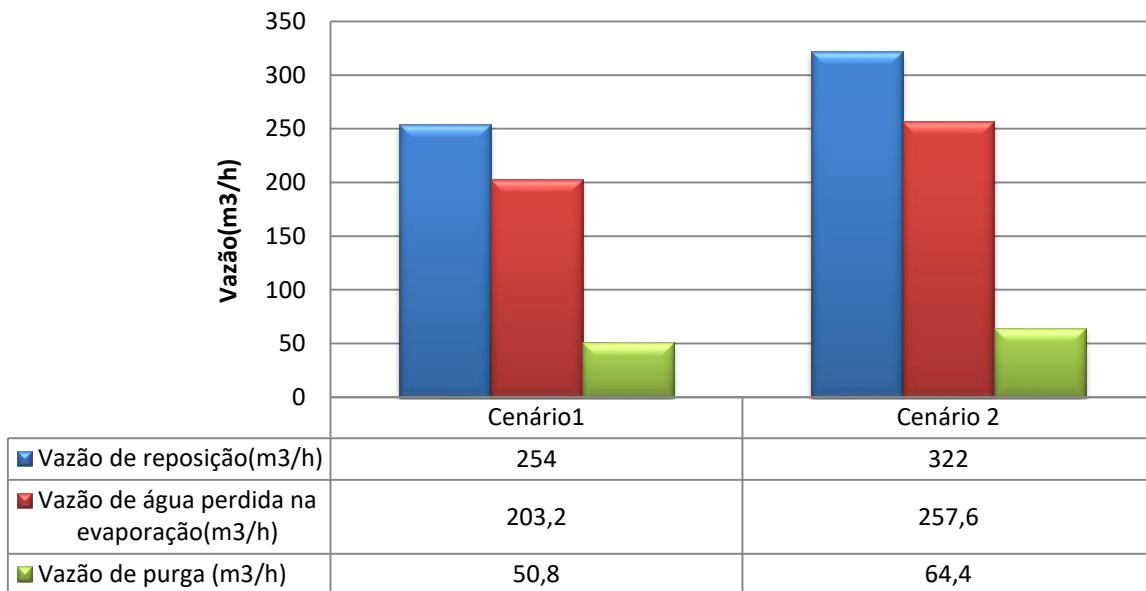
$$P = R - E \quad (11)$$

Onde:

P= vazão de purga (m³/h)

Os resultados dos cálculos são mostrados na **Figura 10**, na forma de dois cenários possíveis, o primeiro representa a situação com vazão de purga menor, pelo fato da água captada estar mais limpa e o segundo com vazão de purga maior devido a qualidade da água estar mais comprometida para o funcionamento adequado do processo.

Figura 10 - Gráfico do balanço hídrico da torre de resfriamento



A partir da análise do gráfico fica claro, e se confirma que boa parte da água captada, para reposição na torre, é perdida na forma de vapor (80%).

3.2.2 A Torre de Resfriamento

O circuito de funcionamento da torre estudada é semiaberto, com fluxo cruzado e tiragem mecânica forçada, sua altura é de 12m e seu enchimento é de madeira. Ela possui no total doze células de refrigeração com ventiladores de 6,7 m de diâmetro que funcionam a frequência de 173 RPM.

No projeto da torre, de 1958, são referenciadas as seguintes temperaturas:

T bulbo úmido: 25°C

T bulbo seco: 29,4°C

T água de entrada: 44,4°C

T água de saída: 29,2°C

Atualmente a água chega à torre a uma temperatura de 45°C e sai a 32°C e seu ciclo de concentração é cinco.

Na **Figura 11** é apresentado o layout da torre e parte de sua estrutura, destacada por um polígono de linha branca.

Figura 11 - Visão da Torre de Resfriamento. (Fonte: Google Earth, junho/2014)



O tratamento utilizado na bacia da torre é composto pela adição de dispersante, inibidor de corrosão a base de fosfato, inibidor de corrosão a base de zinco, biodispersante a base de surfactante, biocida oxidante a base de bromo e uso eventual de antiespumante.

As informações quanto à dosagem e o preço desses produtos foram fornecidos pela empresa “**EP Engenharia de processo**”, em 11 de junho e estão relatados na **Tabela 2**.

A partir da vazão de reposição foi calculado o quanto de composto seria adicionado pela primeira vez para tratar a água, com a purga do sistema será necessário repor o soluto perdido para que fique na concentração adequada, para essa reposição é que foram calculados os custos com produtos químicos.

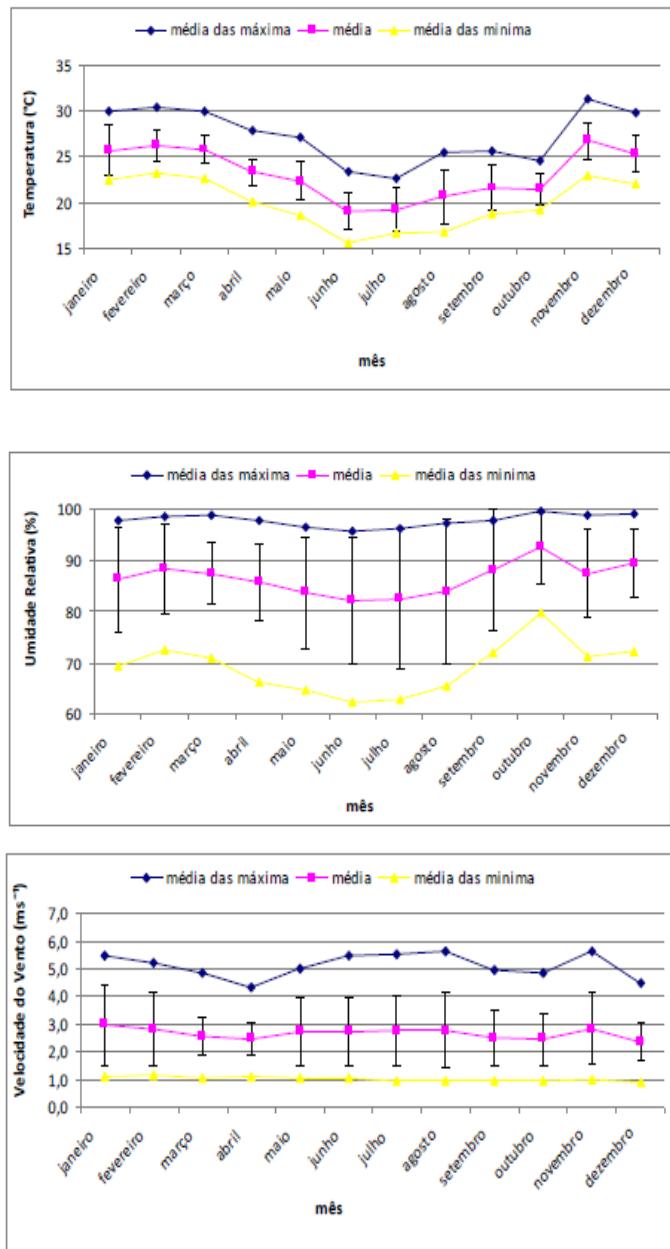
Tabela 2- Custo dos produtos de tratamento da água de refrigeração

Compostos	Custo (R\$/kg)	Dosagem (ppm)	Quantidade de composto (mg)	kg	Soluto perdido (kg)	Custo mensal (R\$)
Inibidor de corrosão	13,8	50	12700000	12,7	2,5	1051,56
Biocida Oxidante	4,25	50	12700000	12,7	2,5	323,85
Dispersante Orgânico	10,7	50	12700000	12,7	2,5	815,34
Dispersante Inorgânico	27,3	30	7620000	7,62	1,5	1248,15

3.2.3 Climatologia Local

Os dados de climatologia foram retirados da tese “Caracterização do Material Particulado em Cubatão” (Valarini, S. 2011). A série histórica abrange o período que vai de 2006 a 2009, para a região do Vale do Rio Mogi. São mostrados na **Figura 12** quadro os gráficos com a variação mensal dos parâmetros climatológicos: temperatura, umidade relativa, velocidade e direção do vento.

Figura 12- Perfis de temperatura, velocidade do vento e umidade. (VALERINI, 2011)



De acordo com VALERINI a média de temperatura é de 22,9°C, a umidade de 88,4% e a velocidade do vento é de 2,7 m/s; com direção e intensidade predominantemente a nordeste. O clima da região do Vale do rio Moji pode ser caracterizado como tropical úmido, com uma média de incidência solar de 4,2 kWh/m².dia (Resumo Executivo de Energias Renováveis, 2014). A circulação de ar durante o dia ocorre do mar para o vale, o que torna a região de vale mais quente nesse período e, durante a noite, a brisa se dá no sentido contrário, deixando a região de vale fria. Devido a essas características a circulação de ar é bastante definida na região.

3.2.4 Qualidade da água captada

Os dados de qualidade da água captada foram retirados dos relatórios de águas interiores produzidos pela CETESB, no período de 2007 a 2012, por possuir ponto de análise no rio Moji e este se encontrar a um a distância considerável do ponto de captação de água pela VALE, conforme a **Figura 13**.

Figura 13- Visualização do ponto de análise da CETESB (Google Earth, 2014).



A coleta desses dados teve como propósito permitir a identificação de contaminantes que pudessem impedir ou restringir o uso da água do rio Moji nos processos. A análise dos dados seguiu a metodologia de comparação com valores de referência da CONAMA 357/2005 para um rio de classe 2, que é o enquadramento dado ao rio Moji, as concentrações que ultrapassaram os limites da legislação estão discriminadas na cor verde e são exibidos na **Tabela 3**.

Tabela 3 – Dados de qualidade da água captada do Moji

Data	Turbidez (UNT)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	DBO _{5,20} (mg/L)	Fosfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	SDT (mg/L)	pH	ST (mg/L)	Al (mg/L)	Fe (mg/L)	Mg (mg/L)	Sulfato (mg/L)
2007	39	5	8	3	12	332	6	350	0,4	0,2	0,3	40
2008	5	12	5	5	20	174	6	247	0,6	0,1	0,4	48
2009	8	4	4	2	9	135	6	326	0,2	0,2	0,4	28
2010	6	3	12	2	7	120	6	194	0,2	0,3	0,4	28
2011	4	8	6	2	11	97	6	133	0,2	0,4	0,5	–
2012	4	8	6	3	10	115	7	165	0,1	0,2	0,2	–
Média histórica	11	7	7	3	11	162	6	236	0,3	0,2	0,4	36
Máximo	39	12	12	5	20	332	7	350	1	0,4	0,5	48
Mínimo	4	3	4	2	7	97	6	133	0,1	0,1	0,2	28
Mediana	6	6	6	2	10	128	6	221	0,2	0,2	0,4	34
VR (CONAMA357)	100	4	5	0,3	250	–	6 a 9	–	0,1	0,3	0,1	250

A tabela a seguir apresenta a comparação entre a qualidade da água captada e a que é necessária ao processo produtivo.

Tabela 4 - Comparação entre a água captada e a água de resfriamento

Parâmetros	Turbidez (UNT)	Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	DBO _{5,20} (mg/L)	Fosfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	SDT (mg/L)	pH	Alumínio (mg/L)	Ferro (mg/L)	Manganês (mg/L)	Sulfato (mg/L)
Limites da água de resfriamento	50	1	25	4	500	500	6,9 a 9	0,1	0,5	0,5	200
Qualidade da água captada	6	6	6	2	10	128	6	0,2	0,2	0,4	34

Quando comparados os dados de qualidade da água requeridos pela torre com os resultados analíticos dos relatórios da CETESB (2007-2012), percebe-se que a água é compatível com o processo de resfriamento. No entanto, conforme relatos da Vale existem problemas relativos à turbidez da água captada, tanto que ela permanece armazenada num tanque que serve como decantador, para então poder ser utilizada.

3.2.5 Outorga e cobrança pelo uso da água

A empresa possui uma outorga de captação superficial no rio Moji de 795m³/h e outra de lançamento para a mesma vazão.

A cobrança pelo uso da água é um dos instrumentos econômicos descrito na lei estadual na Lei Estadual nº 12.183, de 29 de dezembro de 2005 e regulamentada pelo Decreto nº 50.667 de 30 de março de 2006 e é dada em função dos volumes captado, utilizado e lançado.

A metodologia do cálculo do valor a ser cobrado passa pela definição de coeficientes que são multiplicados por PUBs (preços básicos unitários) estabelecidos pela bacia hidrográfica, o resultado dessa operação é o PUF (preço unitário final) de cada parcela da cobrança(captação, uso e lançamento).

Os preços médios dos PUFs cobrados no estado de São Paulo são:

R\$ 0,01 por m³ de água captada, extraída ou derivada;

R\$ 0,02 por m³ de água consumida;

R\$ 0,10 por kg de DBO_{5,20} (matéria orgânica) lançada.

Os PUFs são calculados da seguinte forma (SIGRH):

$$PUF_{cap} = 0,001078 \frac{UFESP}{m^3}$$

$$PUF_{cons} = 2 \times PUF_{cap}$$

$$PUF_{lan} = 3 \times (PUF_{cap} + PUF_{cons})$$

UFESP = R\$20,14 (Secretaria da Fazenda, 2014)

Tabela 5-Valores dos coeficientes de cobrança pelo uso da água

PUF _{cap} (R\$/m ³)	PUF _{cons} (R\$/m ³)	PUF _{lan} (R\$/m ³)
0,02171	0,04342	0,19540

O valor total a ser cobrado é obtido pela fórmula abaixo:

$$Valor = PUF_{cap} \times V_{cap} (m^3) + PUF_{cons} \times V_{cons} (m^3) + PUF_{lan} \times M_{lan} (\text{kgDBO}) \quad (12)$$

Como são captados 24.000m³/dia de água e são utilizados 24.000 m³/dia, usando a concentração de DBO de 6mg/L(água captada) e o custo de R\$0,10/ kgDBO lançada, o custo anual é de R\$579.000,00.

3.2.6 Demanda de energia elétrica

Nesse tópico será abordado apenas o gasto de energia elétrica presente na fronteira entre a captação da água e sua chegada à torre de resfriamento. Nesse volume de controle ficou evidente o uso de duas bombas. Uma para captar e outra para transferir a água à torre. Então o sistema é formado:

- por uma barragem, que eleva o nível do corpo d'água.
- por uma bomba, que desloca o líquido até um tanque de armazenamento.
- por mais uma bomba, que transfere a água do tanque para a torre de resfriamento

Os dados das duas bombas são apresentados na **Tabela 6**:

Tabela 6 - Dados de funcionamento das bombas

Potência da bomba (hp)	Capacidade (m ³ /h)	Tempo de funcionamento (h)
300/200	795/795	24/24

O cálculo de energia elétrica gasta pelas duas bombas está presente na **Tabela 7**:

Tabela 7 - Utilização de energia elétrica

Potência (hp)	Potência (Mw)	Tempo de funcionamento (h)	Energia elétrica (Mwh)	Mwh/mês	Total (Mwh/mês)
300	0,22371	24	6,32	189,50	315,83
200	0,14914	24	4,21	126,33	

Obs.: Considerou-se que o rendimento das bombas é de 85%

O município de Cubatão é abastecido pela ELETROPAULO, concessionária de distribuição de energia elétrica. A tarifa cobrada por ela é, em média, de R\$255,66/Mwh (MME, 2011) para a indústria. Assim o custo mensal com energia elétrica é de R\$ 80.745,00.

4 ANÁLISE DOS DADOS

A região na qual a empresa está inserida apresenta alta concentração industrial, tanto no seguimento de produção de fertilizantes como de outros setores, portanto é necessário que se implante a consciência do uso racional do recurso nessas fábricas , já que ela é primordial para seus processos produtivos.

O uso da água do rio Moji, após seu tratamento com produtos de prevenção da corrosão, incrustação e formação de colônias de microorganismos, de forma geral, se mostrou adequada para utilização no resfriamento dos processos da empresa.

Os fatores de ordem climática que podem interferir no processo de resfriamento são o aumento da temperatura, da umidade e da velocidade do vento porque aumentam as perdas de água por respingos.Além disso, durante o verão em razão do ar estar mais úmido e quente tanto na saída como na entrada da torre, o diferencial de temperatura entre eles é menor, o que faz com que a taxa de transferência de calor entre eles seja menor. Adiciona-se a isso o fato do ar já está com água, portanto ele absorverá menos gotículas de vapor e haverá menor transferência de massa entre o ar e o vapor, dificultando ainda mais o processo de resfriamento.

No inverno, a temperatura da água utilizada no processo de resfriamento é alcançada com maior facilidade porque o ar está mais frio, como o calor flui do corpo quente para o frio a taxa de transferência de calor entre ele e a água quente aumenta, o que faz com que a água resfrie mais rapidamente.

A quantidade de energia elétrica utilizada na empresa é de 315,83 Mwh/mês e custa R\$80.745,00; os produtos químicos custam R\$3.439,00/mês e a outorga de direito de uso da água é de R\$579.121,00/ano. Esses são custos que variam pouco(fixos), pois

estão envolvidos com a fabricação do produto, ou seja são gastos essenciais ao processo produtivo, portanto é importante que eles sejam reduzidos, já que se produziria a mesma quantidade de produto com menos gastos.

Além disso, destaca-se, que a redução da captação de água é importante pelo fato do uso da água na indústria ser consuntivo, ou seja, retira água do corpo hídrico e não devolve uma parte dela para o mesmo. Com o retorno do condensado a água do rio fica disponível para outros usos, como abastecimento urbano.

Figura 14- Vapor d'água emitido pela Torre de Resfriamento na Vale. (Fonte: Google)



5 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

5.1 Premissas

Antes da concepção do sistema devem-se levar em consideração as seguintes limitações:

- Com relação à climatologia local foi detectada a necessidade de uso de materiais anti-corrosivos devido a brisa marinha, assim como as variações climáticas a que a região de vale está submetida.
- Com relação à qualidade da água não foram detectados produtos que volatilizem junto com o condensado, portanto, não será necessário um tratamento posterior do mesmo. Assim o vapor foi considerado adequado para ser recuperado.

5.2 Delimitação

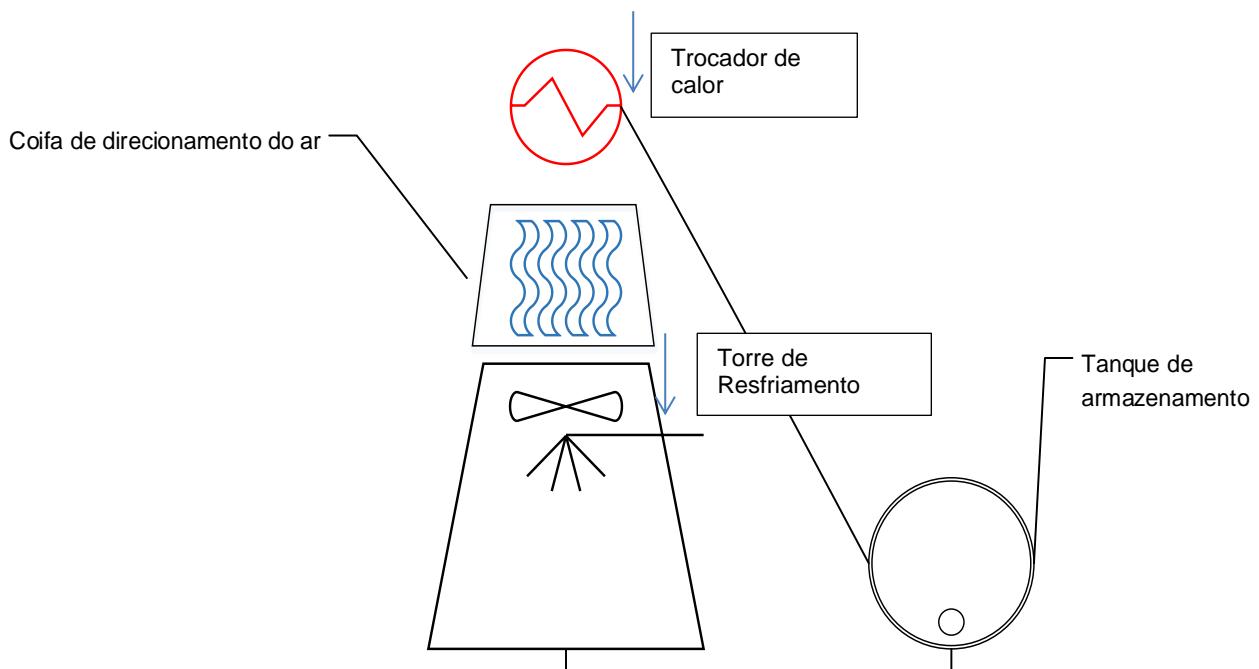
Para que seja possível a transformação do ar úmido em condensado é necessário que se tenha os seguintes dados:

- Qual a quantidade de calor que deve ser retirada do vapor para que ele seja transformado em condensado.
- Definição de um arranjo para captar e condensar o ar úmido que vem da torre.
- Definição os equipamentos a serem utilizados.
- O dimensionamento sistema.
- Estimativa do custo de montagem do sistema.
- Estimativa do tempo de retorno do investimento
- A qual temperatura o condensado será recuperado e a energia necessária para isso
- Pesquisa de materiais resistentes à corrosão, pelo fato da região estar exposta à brisa marinha.

A fábrica existe desde 1958, então o sistema a ser definido será feito da forma mais genérica possível, a fim de que ele se adapte a qualquer torre de resfriamento análoga a estudada.

O esquema genérico do sistema está representado na **Figura 15**.

Figura 15- Sistema de produção de condensado



6 ALTERNATIVAS

Pensando em como transformar o ar úmido em condensado pelo abaixamento da temperatura o professor Podalyro Amaral me sugeriu o estudo um arranjo que consiste na captação do vapor por meio de uma coifa, de diâmetro igual ao da torre, ligada a uma tubulação, sob contato com um venturi multidirecional.

A proposta tem como objetivo utilizar apenas as forças naturais, portanto o resfriamento do vapor se daria com a entrada do ar atmosférico no venturi, no qual sua velocidade seria aumentada na “garganta” do equipamento e, em razão disso reduziria a temperatura da superfície do próprio venturi e, por consequência, reduziria a do vapor que passa pela tubulação, condensando-o. Como o equipamento é multidirecional, o vento poderia entrar em qualquer direção.

Admitindo entre o raio de entrada seja o dobro do raio da “garganta” a velocidade do ar atmosférico será multiplicada por quatro. Assim para uma velocidade de entrada de 2,7 m/s na entrada se tem uma velocidade de 10,8 m/s na “garganta”.

Outra solução apresentada, para estudo, pelo professor José Simões, tem como princípio o rebaixamento da pressão como forma de transformar o vapor em condensado. O arranjo do sistema consiste em instalar uma serpentina na saída do vapor da torre, ao se encontrar com ela o vapor se condensará e deverá ser captado por canaletas.

Para alimentar a serpentina será necessário manter a temperatura do líquido refrigerante que circula por ela, assim também foram propostos dois ciclos de refrigeração para o líquido. Um por absorção e outro por compressão

7 SELEÇÃO DE ALTERNATIVAS

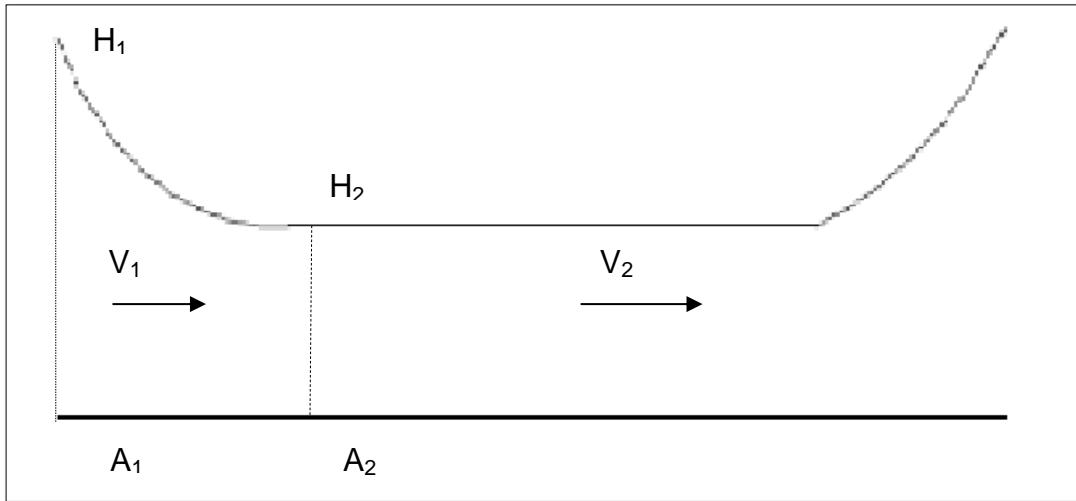
7.1 Critérios de seleção

- Oferecimento da perda de calor necessária para que se consiga a condensação.
- Factibilidade do arranjo proposto.
- Custo de instalação.
- Volume de condensado produzido.
- Tempo para dar partida no sistema.
- Disponibilidade dos equipamentos necessários no mercado.

7.1.1 Estudo do primeiro arranjo

Ao se calcular o abaixamento da temperatura que o primeiro sistema geraria percebeu-se que não era o suficiente para que a transformação ocorresse. Ainda assim o sistema possui um arranjo complexo em tamanho e forma, os equipamentos não seguiam nenhum padrão de mercado, portanto teriam que ser construídos sob medida para o projeto. Foram feitas pesquisas em ferramentas de buscas na internet, mas não foram encontradas informações a respeito do venturi multidirecional. Com tudo isso o sistema demoraria para ser posto em prática. Os cálculos da variação da temperatura do sistema são descritos abaixo:

Figura 16- Seção do Venturi



Admitiu-se que não há troca de calor, pois o cálculo abaixo visa, somente, demonstrar o quanto a variação da energia cinética provocada pela perda de carga na “garganta” rebaixaria a temperatura do ar que passa por ela. Assim, segundo a 1^a lei da termodinâmica:

$$H_1 + \frac{V_{12}}{2} = H_2 + \frac{V_{22}}{2} \quad (13)$$

$$H_1 - H_2 = \frac{V_{22}}{2} - \frac{V_{12}}{2} = \Delta E_c \quad (14)$$

Como a massa de ar será conservada no escoamento, então:

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2 \quad (15)$$

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (16)$$

$$H_1 - H_2 = C_p(T_1 - T_2) \quad (17)$$

$C_p(T_1 - T_2)$ = perda de carga em termos de perda de calor

$$C_p(T_1 - T_2) = \frac{\left[\left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \left(\frac{A_1}{A_2} \right) 2 - 1 \right] V_{12}}{2}$$

A razão entre as duas áreas é 2, então

$$\frac{[(1 * 2)2 - 1]V_{12}}{2} = 1,5V_{12}$$

Supondo $V_1=10$ m/s, para extrapolar o resultado:

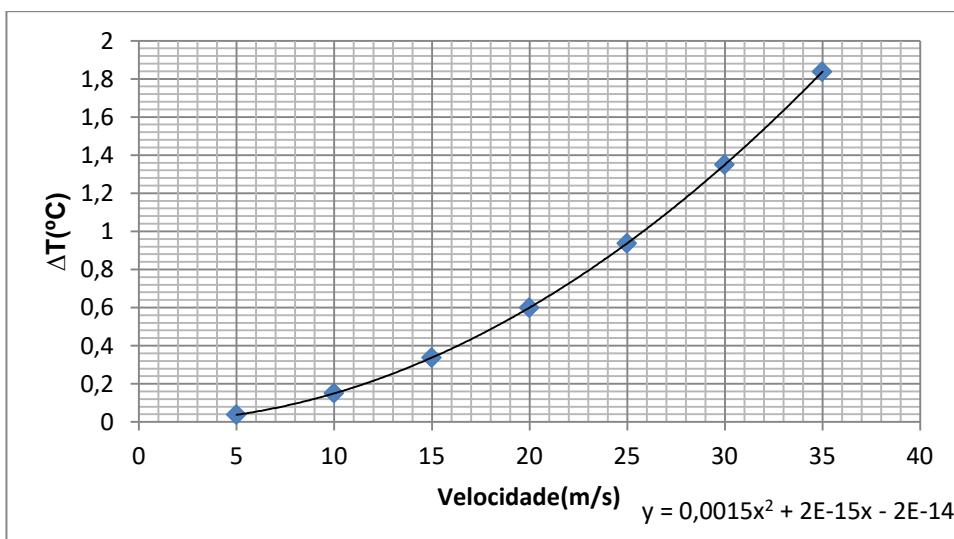
$$C_p(T_1 - T_2) = 150 \frac{J}{kg} = 0,15 \frac{KJ}{Kg}$$

$$cp = 1 \frac{KJ}{Kg \cdot ^\circ C}$$

$$\Delta T = 0,15 \text{ } ^\circ C$$

A velocidade média dos ventos na região é de 2,7 m/s, apesar de se ter adotado uma velocidade bem maior, a variação de temperatura encontrada foi muito baixa, portanto insuficiente para condensar o ar úmido.

Figura 17-Gráfico $\Delta T(^{\circ}C)$ x Velocidade (m/s)



Pela equação do gráfico, percebe-se que a temperatura varia muito pouco com a velocidade do vento, pois dois de seus coeficientes são da ordem de 10^{-15} e 10^{-14} .

7.1.2 Estudo do segundo arranjo

A segunda proposta é a instalação de uma serpentina na saída do vapor com uma coifa de direcionamento do ar para a área de troca térmica da serpentina. Sendo que a temperatura do fluido de troca térmica será mantida por um ciclo de refrigeração.

Figura 18 – Serpentina. (FONTE: Gma componentes para frio LTDA)

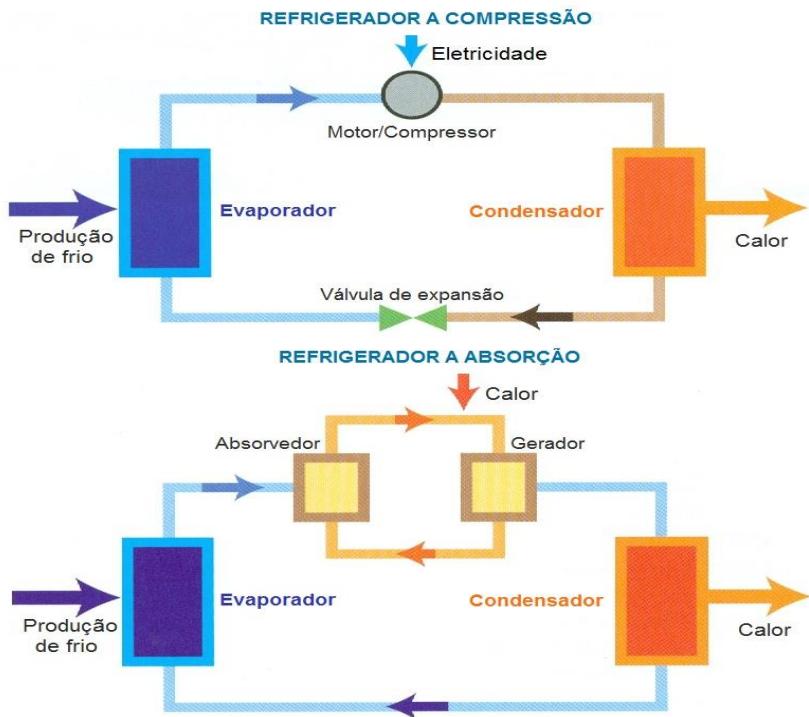


A serpentina terá como fluido refrigerante a amônia, pois é produzida pela fábrica. Ela circulará por dentro do tubo, a uma temperatura estimada de 20°C, para resfriar o vapor que sairá da torre por volta de 40°C.

A captação do condensado será feita por calhas, com uma pequena declividade, colocadas abaixo da serpentina, então o condensado será transferido para uma tubulação que encontrará um tanque de armazenamento.

O ciclo de refrigeração que atuará na conservação da temperatura da amônia pode ser concebido por absorção ou por compressão. A diferença entre eles é a forma como realizam a compressão do refrigerante, o segundo necessita de um compressor, que realiza trabalho sobre o vapor aumentando sua pressão, já no primeiro o compressor é substituído por um absorvedor e um gerador, portanto necessita de uma quantidade de trabalho menor, o suficiente para a bomba que transfere a solução do absorvedor para o gerador.

Figura 19-Ciclos de refrigeração



Apesar do ciclo de absorção utilizar menos trabalho, o gerador precisa de uma fonte térmica para que haja aumento de temperatura e, consequentemente, de pressão da amônia em seu interior, forçando a separação do vapor de amônia da solução absorvedora.

Essa fonte térmica poderia ser suprida pelo vapor liberado no processo produtivo do ácido sulfúrico, que é de alta pressão. Porém devido à dificuldade de montagem do sistema de absorção optou-se por utilizar o ciclo de refrigeração composto por um compressor.

8 PRÉ-DIMENSIONAMENTO DA SOLUÇÃO (AVALIAÇÃO TÉCNICA)

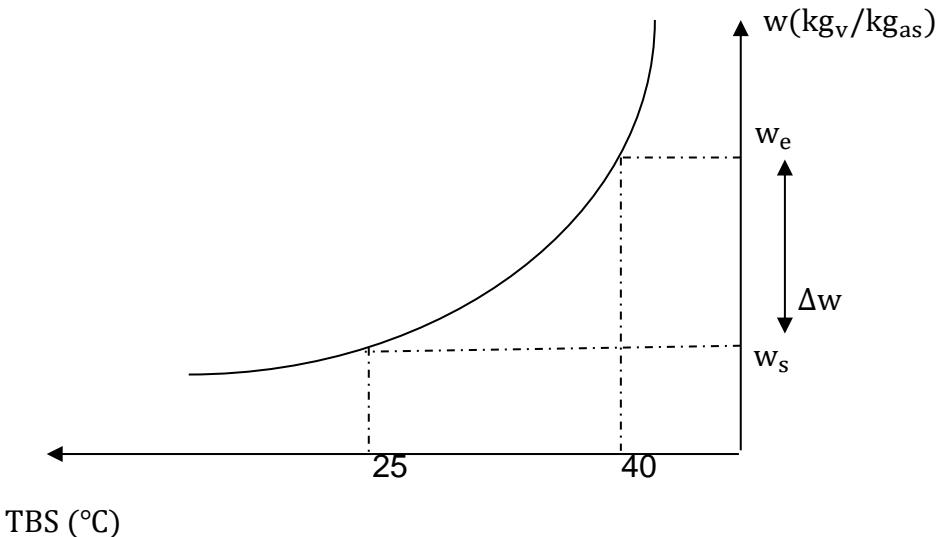
A temperatura que a água entra na torre é de 45°C e a temperatura com que sai é de 32°C, assim admitiu-se que o vapor sai da torre a uma temperatura de, aproximadamente, 40°C. Pretende-se que o condensado a ser recuperado saia a uma

temperatura de, aproximadamente, 25°C, compatível com a temperatura da água captada.

Para que isso seja possível é preciso definir as umidades de saída do condensado e de entrada do vapor, pois a variação entre elas será um passo para o cálculo da vazão mássica de condensado que será recuperado. Para que se tenha a visualização de como varia a quantidade de condensado com a variação da temperatura e da umidade foi feito um “range” deles na tabela abaixo:

T (°C)	w _e (T=40°C)	w _s (kg _v /kg _a)	Δw(kg _v /kg _a)
15	0,049138	0,010691	0,0384
20		0,014757	0,0344
25		0,020169	0,0290
30		0,027328	0,02181

A relação entre temperatura e umidade está representada pelo gráfico abaixo:



Para dar continuidade ao cálculo da massa de condensado é necessário obter a massa de ar seco que sai da torre, ela pode ser encontrada pela seguinte relação:

$$\dot{m}_a = \dot{m}_v/w$$

$$w = \text{umidade} \left(\frac{\text{kg}_v}{\text{kg}_a} \right)$$

\dot{m}_a = vazão mássica de ar seco(kg_a/s)

$$\dot{m}_v = \text{vazão mássica de vapor d'água} \left(\frac{\text{kg}_v}{\text{s}} \right) = \text{vazão mássica de evaporação}$$

Foram encontrados os seguintes resultados:

Vazão de evaporação (m^3/h)	\dot{m}_v (kg_v/s)	\dot{m}_a (kg_a/s)
203,2	56,44	1148,69
257,6	71,56	1456,22

Por fim a massa de condensado é dada por:

$$\dot{m}_L = \dot{m}_a (w_e - w_s)$$

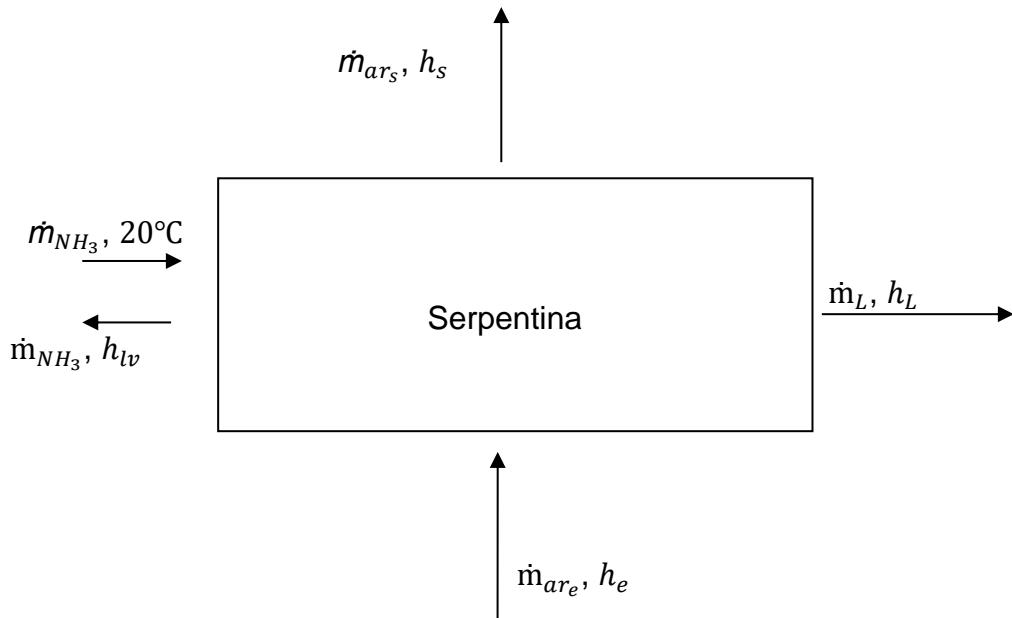
Os resultados estão exibidos na tabela a seguir:

T($^{\circ}\text{C}$)	w _s (kg_v/kg_a)	Δw (kg_v/kg_a)	\dot{m}_a (kg_a/s)	\dot{m}_L (kg_L/s)	\dot{m}_L (m^3/h)
15	0,010691	0,038447	1148,69	44,16	158,99
			1456,22	55,99	201,55
20	0,014757	0,034381	1148,69	39,49	142,18
			1456,22	50,07	180,24
25	0,020169	0,028969	1148,69	33,28	119,80
			1456,22	42,19	151,87
30	0,027328	0,02181	1148,69	25,05	90,19
			1456,22	31,76	114,34

Supondo uma eficiência de 80%, teremos que a vazão de líquido recuperado a 25°C estará entre 121,5 m^3/h e 95,8 m^3/h .

Para prosseguir a concepção do sistema é necessário saber o fluxo de calor necessário para resfriar o vapor de 40°C para 25°C, com líquido refrigerante a 20°C.

O fluxo de calor será assim estabelecido:



$$\frac{dQ_{ar}}{dt} = \dot{m}_{ar_e} * h_e - \dot{m}_{ar_s} * h_s - \dot{m}_L * h_L, \text{ onde :}$$

$$\frac{dQ_{ar}}{dt} = \text{ fluxo de calor}$$

\dot{m}_{ar_e} = vazão mássica do ar que entra a $40^\circ C$

h_e = entalpia do ar que entra

\dot{m}_{ar_s} = vazão mássica do ar que sai a $25^\circ C$

h_s = entalpia do ar que sai

\dot{m}_L = vazão mássica de condensado

h_L = entalpia do condensado

Definição de h_e do ar úmido e h_s ar seco:

$$h_{ar} = \frac{h_a}{(1 + w)}$$

$m_{ar} = m_a(1 + w)$, substituindo:

$$m_{ar} * h_{ar} = \frac{(m_a * (1 + w) * h_a)}{(1 + w)}$$

$m_{ar} * h_{ar} = m_a * h_a$, assim temos:

$$\begin{aligned} \frac{dQ_{ar}}{dt} &= \dot{m}_{ar_e} * h_e - \dot{m}_{ar_s} * h_s - \dot{m}_L * h_L \\ &= \dot{m}_a (h_{a_e} - h_{a_s}) - \dot{m}_L * h_L \end{aligned}$$

$T(^{\circ}\text{C})$	$h_{a_e}/h_{a_s}(\text{kJ}/\text{kg}_a)$	$\dot{m}_a(\text{kg}_a/\text{s})$	$\dot{m}_L(\text{kg}_L/\text{s})$	$h_L(\text{kJ}/\text{kg})$	$dQ_{ar}/dt(\text{kw})$
25	25,152	1148,69	33,28	104,87	18.545,61
		1456,22	42,19		17.611,22
40	40,253				

Temos, que:

$$dQ_{Nh_3}/dt = \dot{m}_{Nh_3} * h_{lv_{Nh_3}}, \text{ onde:}$$

\dot{m}_{Nh_3} = vazão mássica de amônia

$h_{lv_{Nh_3}}$ = entalpia de vaporização da amônia

O ar úmido a 40°C será resfriado pela amônia, que circula a 20°C , assim pode-se dizer que:

$$dQ_{Nh_3}/dt = dQ_{ar}/dt, \text{ entâo:}$$

$$\dot{m}_{Nh_3} = \frac{\frac{dQ_{ar}}{dt}}{h_{lv_{Nh_3}}}$$

$h_{lv_{NH_3}}$ (kJ/kg)	Carga térmica (kw)	Vazão mássica de NH_3 (kg/s)
1185,9	17611,22	14,85
	18545,61	15,64

$$\frac{dQ}{dt} = U * A * DMLT$$

$$U * A = (dQ/dt)/DMLT$$

$$A = N * PI * D * L$$

$L = 6,7 =$ diâmetro da torre

$DMLT = 10,8 \text{ } ^\circ C$

Número de células de refrigeração: 12

Fluxo de calor (kw)	Vazão mássica de NH_3 (kg/s)	UA (Kw/ $^\circ C$)	L (m)	D (m)	U (kW/m^2K)	A (m^2)	N	por célula
17611,22	14,85	62,06	6,7	0,012	1	116	79	19
18545,61	15,64	65,35			1	33	22	20
					3,5	122	83	5
					3,5	35	24	6

9 VIABILIDADE ECONÔMICA

9.1 Custo do sistema para uma torre

Tabela 8- Custo do sistema. (CERETO, 2004)- Valor do dólar: R\$2,50 (outubro de 2014).

Custo do Sistema	
Custo da serpentina (baseado no custo do trocador de calor casca tubo)	R\$50.000,00
Custo do compressor+ condensador (unidade condensadora)	R\$120.000
Custo do evaporador	R\$55.000,00
Tubulação (30 m de tubulação/célula de refrigeração, R\$20,00/m).	R\$12.000
Coifa (R\$4.000,00 /célula de refrigeração)	R\$48.000
Mão de obra (10 funcionários, trabalhando 8h/dia, por 30 dias, ganhando R\$25,00/hora).	R\$ 60.00,00
Total	R\$ 345.000,00

Supondo que a soma dos equipamentos, aumente em 300HP a potência utilizada pela fábrica, atualmente, teremos um gasto com energia elétrica de R\$74.464,00 por ano para suprir o sistema.

9.2 Economia com a instalação do sistema

Economia com energia elétrica

Potência (hp)	hp em Mw	Tempo de funcionamento (h)	Energia elétrica (Mwh)	Mwh/mês	Tarifa mensal (R\$)	Tarifa anual (R\$)
300	0,22371	3,6	0,81	24,27	6.205,41	124.108,17
200	0,14914	3,6	0,54	16,18	4.136,94	
Total			1,35	40,45	10.342,35	

Economia com a cobrança pelo uso da água

	Custo pela captação	Custo pelo consumo	Custo pelo lançamento	Economia anual
Diário	R\$ 62,42	R\$ 124,85	R\$ 3,37	R\$ 69.583,81
Anual	R\$ 22.784,48	R\$ 45.568,96	R\$ 1.230,36	

Economia com produtos químicos

Apesar de não se conseguir mensurar a economia com os produtos. O fato da água condensada se tornar desmineralizada e sem turbidez incidirá diretamente na redução dos custos desses produtos porque a água estará mais limpa, assim haverá redução da vazão de purga e menor perda de produto, porém não se sabe até que ponto isso influencia na dosagem correta de cada componente no tratamento da água, que é feito na bacia da torre.

Economia Total

Por fim calcula-se que a economia nos custos fixos de produção será de R\$ 193.691,68 (energia elétrica+ cobrança pelo uso da água) por ano. Foi considerada a vazão de reposição mínima do sistema para essa estimativa a fim de se levar em consideração as incertezas da operação da fábrica e do sistema proposto.

9.3 Balanço

Para alimentar o sistema será necessário um gasto de R\$74.464,00 por ano com energia elétrica. Mas, como houve economia de energia elétrica com o menor uso das bombas (pela redução da vazão), então haverá uma economia anual de R\$ 49.644,00 com custo da energia elétrica.

A economia total anual da fábrica será a soma da redução da cobrança pelo uso da água com a relativa à energia elétrica, que tem como resultado R\$124.108,00.

É necessário calcular o tempo de retorno do investimento para ter um indicativo da viabilidade econômica do projeto. Sabendo-se o quanto foi gasto com a instalação do sistema e o quanto foi economizado no período de um ano é possível calcular o *pay-back* (tempo de retorno do investimento) simplificado do projeto, dividindo-se o primeiro pelo segundo. Assim:

$$\text{TR} = 345.000 / 124.108 = 2 \text{ anos } 9 \text{ meses } 10 \text{ dias}$$

Portanto, depois desse período a empresa começa a ter saldo positivo com a instalação do sistema.

10 QUANTIFICAÇÃO DOS BENEFÍCIOS AMBIENTAIS

Com a redução da captação a disponibilidade de água aumentará em 2875,2 m³/dia para outros usos. Portanto o corpo hídrico estará sob menos estresse poluidor, já que se há menor captação, há menor lançamento.

A energia elétrica, que é produzida por centrais hidrelétricas terá sua demanda reduzida, portanto a necessidade por construção de novas centrais hidrelétricas também será menor ou no mínimo haverá redução da sobrecarga do sistema de distribuição. Guardando-se as devidas proporções do empreendimento.

Como o condensado estará desmineralizado, a frequência de lavagem e manutenção causada pela turbidez alta será reduzida, economizando água, detergentes, óleos e outros materiais.

11 CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A determinação do custo do projeto foi superestimada e a economia causada por sua implantação subestimada a fim de abranger os gastos com as mudanças na concepção do projeto, custo de mão de obra, custo de materiais, etc.

Os ganhos ambientais foram indicados de forma qualitativa devido à dificuldade na definição dos seus valores. Porém, deve-se acrescentar o desenvolvimento de um ramo da contabilidade que trabalho no sentido de definir os custos e ganhos ambientais, a chamada contabilidade ambiental, que acompanha o desenvolvimento da economia ecológica.

Recomenda-se que se faça um modelo experimental do sistema selecionado, a fim de prever o seu funcionamento em diferentes situações climatológicas, mudanças na vazão de evaporação, manutenção do sistema entre outras imprevisibilidades.

Há algumas perguntas e indicações de estudos, que são pertinentes para que se assegure a implantação do sistema no Vale do Moji de modo que não se criem impactos negativos na região. São elas:

- 1) Como o vapor que, atualmente, é emitido altera as condições climáticas da região e, portanto, a estabilidade atmosférica?
- 2) O que acontecerá quando a atmosfera não receber mais o vapor que antes era emitido? Quais mudanças ocorrerão no clima da região?
- 3) Estudo do impacto da redução da vazão de captação sobre a região em termos socioeconômicos e ambientais?
- 4) Estudo do arranjo e implicações da instalação de um hidrociclone antes da entrada da água no sistema de resfriamento para remoção de turbidez e consequente melhora da qualidade da água.
- 5) Fazer a contabilidade ambiental do projeto.
- 6) O impacto econômico da mudança sobre o processo produtivo.

12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M.C.R. **Refrigeração Industrial**. Relatório (Avaliação de Estágio). Curso de Eletromecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Minas Gerais, 2007.

ANDA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2012**. São Paulo, 2013. 178p. ISSN 0103-4790.

BAZZO, W.A. e PEREIRA, L.T.V. **Introdução à Engenharia**. Florianópolis, SC, 2000.274p.Editora da UFSC.6^a ed.

Catálogo de Equipamento da ALPINA EQUIPAMENTOS LTDA. Disponível em:<<http://www.alpinaequipamentos.com.br/>>

Acesso: 23/11/2013

CEKINSKI, E. (Coord.); CALMANOVICI, C. E.; BICHARA, J. M.; FABIANI, M.; GIULIETTI, M.; CASTRO, M. L. M.; SILVEIRA, P. B. M.; PRESSINOTTI, Q. S.H. C.; GUARDANI, R. **Tecnologia de produção de fertilizantes**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo, 1990. 237p. Publicação IPT n. 1816.

CERETO, A.C. **Integração Energética da Rede de Trocadores de Calor em Extração por Solvente para a Produção de Farelo Branco de Soja**. Dissertação (Mestrado). 170p. Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

CETESB. **Qualidade das Águas Superficiais no Estado de São Paulo**. ISSN 0103-4103. São Paulo, 2007-2012<<http://www.cetesb.sp.gov.br/agua/aguas-superficiais/35-publicacoes/-/relatorios>>

Acesso: 10/2013

CONAB-COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Caderno Estatístico da Safra 2010-2011.** Brasília, 2013.p.236. Volume 4. ISSN 2317-7543 Disponível em:<<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1429&t=2>>
Acesso em: 10/2013

Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2013. Disponível em:<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/projeto/index.html>
Acesso em: 24/11/2013

CORTINOVIS, G.F. e SONG, T.W. Funcionamento de uma Torre de Resfriamento. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 6p

C.R. F, SANT'ANA. Produção de Ácido Nítrico ($H^{15}NO_3$) Enriquecido no ^{15}N . Dissertação (Mestrado)84p. Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2006.

DERISIO, J.C. Introdução ao Controle de Poluição Ambiental. São Paulo, 2012.273p.Editora Oficina de Textos.4^a ed.

Federal Energy Management Program. Cooling Towers: Understanding Key Components of Cooling Towers and How to Improve Water Efficiency.U.S. Department of Energy.Em :< https://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/waterfs_coolingtowers.pdf>
Acesso: 11/10/2013

GOOGLE, Google Earth. Disponível em: <<http://www.google.com/earth/index.html>>
Acesso em: 15/11/2013

HESPAÑOL, I. Conservação e Reúso como Instrumento de Gestão para Atenuar os Custos de Cobrança pelo Uso da água no Setor Industrial. Capítulo 4.

MANCUSO, P.C.S. Reúso de Água para Torres de Resfriamento. 18p. São Paulo, 2001

Manual de Outorga da ANA 2013:

Em:<<http://arquivos.ana.gov.br/institucional/sof/MANUALDEProcedimentosTecnicoseAdministrativosdeOUTORGAdedeUsodeRecursosHidricosdaANA.pdf>>

Acesso em: 15/11/2013

MCE-MEMORIAL DE CARACTERIZAÇÃO DE EMPREENDIMENTO-VALE FERTILIZANTES-UNIDADE 03. Agência CETESB-Cubatão, São Paulo. Vistas ao Processo de Obtenção de Licença de Operação. Setembro de 2013

MIDIC-MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR<<http://www.mdic.gov.br/sitio/>>

Acesso: 10/2013

MIEZWA, J.C. e HESPAÑOL, I. Água na Indústria Uso Racional e Reuso. São Paulo, 2005.143p. Editora Oficina de Textos.

MOREIRA, J.R.S. Fundamentos e Aplicações da Psicometria. São Paulo, 1999.194p. Editora RPA Editorial Ltda.

Pesquisa de Poços-DAEE-Departamento de Águas e Energia Elétrica<<http://www.aplicacoes.daee.sp.gov.br/usosrec/fchweb.html>>

Acesso em: 11/11/2013

PIB do Agronegócio. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/>>

Acesso: 10/2013

RIBEIRO, P.H. Contribuição ao Banco de Dados Brasileiro para Apoio à Avaliação do Ciclo de Vida: Fertilizantes Nitrogenados. Dissertação (Mestrado). 343p. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

ROSA, D.F. Aproveitamento de Membranas de Osmose Inversa Descartadas da Indústria para o Reúso da Purga de Torres de Resfriamento. Dissertação(Mestrado).Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.Porto Alegre,2012.

ROTHBARTH, A. **Reúso de água na cogeração de energia.** Revista Meio Filtrante. São Paulo, 2010.ed.45 http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=614&revista=n45;data, consultado em 11/10/2013.

SPIRO, T.G. e STIGLIANI, W.M. Tradução: YAMAMOTO, S.M. **Química Ambiental.** São Paulo, 2009. Editora Prentice Hall. 2^a ed.

Acesso: 10/2013

Tabela de Tarifas de Saneamento. Disponível em:

<http://www.arsesp.sp.gov.br/SitePages/informacoes-economico-financeiras/tarifas-saneamento.aspx>

Acesso em: 24/11/2013

VALARINI, S. **Caracterização do Material Particulado em Cubatão.** Dissertação (Mestrado)134p. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

W.F., STOECKER e J.M.S., JABARDO. **Refrigeração Industrial.** São Paulo, 2002.371p. Editora Edgard Blücher LTDA.