


unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CHRISTIAN ANDRADE SALES

**“REUSO DE ÁGUA E ENERGIA EM UMA PLANTA DE
NITROCELULOSE”**

Guaratinguetá
2013

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2013

CHRISTIAN ANDRADE SALES

**REUSO DE ÁGUA E ENERGIA EM UMA PLANTA DE
NITROCELULOSE**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
Co-orientador: Prof. Dr. Silvio Jorge Coelho Simões

Guaratinguetá
2013

S163r	<p>Sales, Christian Andrade</p> <p>Reuso de água e energia em uma planta de nitrocelulose / Christian Andrade Sales – Guaratinguetá : [s.n], 2013.</p> <p>84 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 80</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2013.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. Sílvio Jorge Coelho Simões</p> <p>1. Água – reutilização 2. Consumo de água 3. I. Título</p> <p>CDU 628.179.2 (043)</p>
-------	--

CHRISTIAN ANDRADE SALES

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

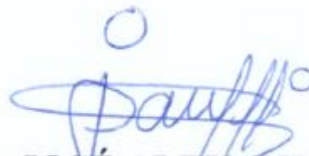
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Edson Coechieri Botelho
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. PEDRO MAGALHÃES SOBRINHO
Orientador / Unesp-Feg



Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Unesp-Feg



Prof. Dr. MÁRCIO EVARISTO DA SILVA
Faculdades Integradas Teresa D'Ávila

Novembro de 2013

DADOS CURRICULARES
CHRISTIAN ANDRADE SALES

NASCIMENTO	26 de abril de 1975.
FILIAÇÃO	João Pedro de Sales Aracy Maria Andrade Sales
1993 - 2004	Curso de Graduação Faculdade de Engenharia Química de Lorena – FAENQUIL
2012 - 2013	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João Pedro e Aracy, pela minha vida e formação dos meus valores com base na observação dos seus incansáveis esforços.

a minha esposa Chaiene, com amor e gratidão, por sua compreensão e apoio em todos os momentos da minha vida.

ao meu filho, João Pedro, felicidade maior da minha vida, que me ensina o valor de prezar cada momento.

aos meus mestres, pelo exemplo de dedicação em prol da felicidade das pessoas.

ao orientador, professor Pedro Magalhães Sobrinho, por sua paciência, dedicação e sabedoria, bem como pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

ao co-orientador, professor Sílvio Simões, pelo aprendizado e pelas sugestões e críticas para o aprimoramento desta dissertação.

aos chefes da Indústria de Material Bélico do Brasil - IMBEL, Fábrica Presidente Vargas por permitirem e apoiarem o desenvolvimento deste trabalho.

aos colegas de fábrica por compartilharem informações imprescindíveis para esta pesquisa.

o agradecimento sincero do autor.

"A natureza pode suprir todas as necessidades do homem, menos a sua ganância"

Gandhi

SALES C. A. **Reuso de água e energia em uma planta de nitrocelulose.** 2013. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

RESUMO

Por décadas as indústrias lideraram como as grandes poluidoras do meio ambiente, e agora buscam na redução do consumo e no reuso de água uma oportunidade de minimizar custos e novas oportunidades de novos negócios. Logo, a água começa a ser percebida pela indústria como um bem de grande valor. Os fatores redução de custos e expectativa da sociedade por padrões ambientais mais rigorosos estão transformando o modo como o setor industrial lida com o recurso hídrico. Na busca de reciclagem da água, minimizar as perdas no processo como vazamentos e evaporação também são prioridades. A redução contínua do consumo de água por tonelada de produção é uma tendência crescente nas empresas, que buscam implantar práticas sustentáveis e agregar estes valores socioambientais a seus produtos. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de caso real que visa a redução do consumo de água e energia em uma unidade industrial de fabricação de nitrocelulose, onde serão descritas práticas e oportunidades de modificações nos processos de digestão, drenagens e recuperação de produtos, que resultariam em redução no consumo de água, energia e economia de recursos financeiros.

PALAVRAS-CHAVE: Reuso de água e energia; redução de consumo de água; processo de produção industrial.

C. SALES A. **Reuse of water and energy in a plant nitrocellulose.** In 2013. 85 f. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - College of Engineering Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2013.

ABSTRACT

For decades the industry led to major polluters of the environment, and now seek to reduce consumption and reuse of water an opportunity to minimize costs and new business opportunities. Soon, the water begins to be perceived by the industry as an asset of great value. Factors reducing costs and expectations of society for stricter environmental standards are transforming how the industry deals with water resources. In search of water recycling, minimize process losses such as leaks and evaporation are also priorities. The continuous reduction of water consumption per ton of production is a growing trend in companies looking to deploy sustainable practices and environmental aggregate these values to their products. The objective of this work is to present a real case study that aims at reducing the consumption of water and energy in an industrial manufacturing nitrocellulose, which will be described practices and opportunities for changes in the processes of digestion, drainage and recovery of products, which result in reduced consumption of water, energy and financial savings.

KEYWORDS: Reuse of water and energy, reduce water consumption, industrial production process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-	Consumo Específico da Água – litros /kg de nitrocelulose (NC) produzida em 2012	18
Figura 2-	Disponibilidade e consumo de água no mundo.....	20
Figura 3-	Comparação entre potencial hídrico e população nas regiões brasileiras.....	21
Figura 4-	Distribuição de Água superficial nas regiões brasileiras	22
Figura 5-	Evolução no número de cidades com sistema de tratamento básico no Brasil.....	22
Figura 6-	Oferta interna de energia elétrica.....	23
Figura 7-	Esquema de tratamento “ <i>End of pipe</i> ”	27
Figura 8-	Esquema de processos sem integração e com integração.....	29
Figura 9-	Tratamento do tipo “segregação”	30
Figura 10-	Tratamento do tipo “reuso”	31
Figura 11-	Tratamento do tipo “regeneração com reuso”	31
Figura 12-	Tratamento do tipo “regeneração com reciclo”	32
Figura 13-	Diagrama de aplicação da nitrocelulose na unidade industrial	39
Figura 14-	Semente de algodão.....	40
Figura 15-	Diagrama do processo de produção de nitrocelulose.....	41
Figura 16-	Esquema de produção do linter purificado.....	42
Figura 17-	Representação da reação de nitração da celulose, considerando a nitração de todas as hidroxilas.....	43
Figura 18-	Esquema da coluna de desnitração.....	47
Figura 19-	Representação do consumo de água na unidade industrial.....	49
Figura 20-	Esquema de processo da estação de tratamento de efluentes.....	50
Figura 21-	Levantamento do consumo médio de água no processo produtivo de nitrocelulose.....	52
Figura 22-	Balanço hídrico geral da unidade fabril.....	54
Figura 23-	Balanço hídrico detalhado da unidade de nitrocelulose.....	56
Figura 24-	Balanço hídrico detalhado da planta de nitrocelulose após propostas de redução/reuso de água.....	60

Figura 25-	Esquema de funcionamento da lavagem do filtro da estação de tratamento de água.....	63
Figura 26-	Proposta de reuso de água de lavagem do filtro da estação de tratamento de água.....	64
Figura 27-	Lavagens no fervimento ácido.....	71
Figura 28-	Lavagens no fervimento com pressão (Autoclave).....	72
Figura 29-	Lavagem fervimento alcalino.....	72
Figura 30-	Teste de Lavagem da NC – Etapa de Fervimento Alcalino.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-	Caracterização do efluente bruto e final.....	51
Tabela 2-	Estimativa preliminar de custo-reuso de água e eficiência energética na estação de tratamento de água.....	63
Tabela 3-	Listagem de motores existentes na Estação de Tratamento de Água – ETA.....	65
Tabela 4-	Relação de economia de energia e em reais por ano.....	66
Tabela 5-	Comparação de variação de concentração.....	74
Tabela 6-	Análise do retorno dos ganhos do reuso de água	78

LISTA DE QUADROS

Quadro 1-	Especificação do tipo de água para cada uso	24
Quadro 2-	Classificação das Águas.....	48
Quadro 3-	Caracterização dos efluentes – Produção de linter purificado.....	53
Quadro 4-	Caracterização dos efluentes – Produção de nitrocelulose.....	54
Quadro 5-	Parâmetros médios de tratamento da água industrial.....	62
Quadro 6-	Parâmetros do Efluente da Retrolavagem dos filtros da estação de tratamento de água da unidade fabril.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanco Energético Nacional
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DFA	Diagrama de Fontes de Água
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IPPS	Industrial Pollution Projection System
MME	Ministério de Minas e Energia
PRDEI	Environment Infrastructure Agriculture Division- Policy Research Department (Divisão de Agricultura e Desenvolvimento de Infraestrutura – Departamento de Polícia)
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PNLIM	Programação Não Linear Interia Mista
IMBEL	Indústria de Material Bélico do Brasil
ONU	Organização das Nações Unidas
STS	Sólidos Totais Suspensos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	RECURSOS HÍDRICOS.....	20
2.2	MATRIZ ENERGÉTICA.....	23
2.3	ÁGUA NA INDÚSTRIA.....	24
2.4	POTENCIAL DE POLUIÇÃO DAS INDÚSTRIAS.....	25
2.5	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E A INDÚSTRIA.....	26
2.6	SISTEMAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO UTILIZADOS PELAS INDÚSTRIAS.....	26
2.6.1	Sistemas de integração de processos.....	29
2.6.2	Métodos de Integração de processos baseados na teoria termodinâmica-heurística-evolutiva	32
2.6.3	Métodos de integração de processos baseados na programação matemática	33
2.7	REUSO DA ÁGUA NA INDÚSTRIA.....	35
3	DESCRIÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL.....	39
3.1	UNIDADE DE PRODUÇÃO DE NITROCELULOSE.....	39
3.2	PROCESSO DE PURIFICAÇÃO DO LINTER.....	41
3.3	PROCESSO DE PRODUÇÃO DE NITROCELULOSE.....	43
3.3.1	Pré – estabilização	44
3.3.2	Refino	44
3.3.3	Pós Estabilização	44
3.3.4	Homogeinização.....	45
3.3.5	Separação	45
3.3.6	Sistema de Recuperação de Finos	45
3.3.7	Alcoolização	46
3.4	PROCESSOS PERIFÉRICOS.....	46
3.4.1	Sistema de recuperação de álcool	46
3.4.2	Desnitração do ácido residual	46
3.5	CONSUMO GERAL DE ÁGUA.....	48
3.6	ÁGUA PARA GERAÇÃO DE VAPOR.....	49

3.7	ÁGUA INDUSTRIAL.....	49
3.8	EFLUENTE INDUSTRIAL.....	50
4	METODOLOGIA.....	51
4.1	ANÁLISE DO PROCESSO.....	52
4.2	LEVANTAMENTO DE CONSUMO.....	52
4.3	LEVANTAMENTO DE GERAÇÃO DE EFLUENTE.....	53
4.4	CONSTRUÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO.....	54
4.5	POSSIBILIDADE DE RACIONALIZAÇÃO E REUSO.....	57
5	ALTERNATIVAS DE REUSO.....	59
5.1	TRATAMENTO DA ÁGUA DA UNIDADE FABRIL.....	62
5.2	COMPLEMENTO À RECUPERAÇÃO DE FINOS.....	67
5.3	UTILIZAÇÃO DE ÁGUA QUENTE NAS LAVAGENS DE PRÉ E PÓS ESTABILIZAÇÃO.....	69
5.4	DIMENSIONAMENTO DO TANQUE DE ÁGUA QUENTE	74
5.5	CUSTOS OPERACIONAIS	75
5.6	AVALIAÇÃO DA ALTERNATIVA PROPOSTA	77
6	CONCLUSÃO.....	79
7	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

A inclusão de valores e critérios sociais e ambientais se reflete numa mudança dos conceitos antigos utilizados pelas indústrias, que somente consideravam a produtividade e a competitividade das empresas como avaliação de desempenho de um serviço. A ideia atual de sucesso é de uma empresa financeiramente competitiva e ambientalmente responsável, e esta prática demanda utilização de metodologias e ferramentas de gestão que garantam ao meio ambiente minimização de efeitos nocivos e desenvolvimento econômico, social e ambiental, o chamado desenvolvimento sustentável.

No setor industrial, o desperdício de recursos naturais, de energia e a geração de resíduos são os pontos de maiores impactos ambientais, e representam significativos custos variáveis com estes insumos industriais. Para um desenvolvimento sustentável é necessário um equacionamento entre as necessidades produtivas e a minimização da demanda dos recursos de produção, como o consumo de energia elétrica, de água e de matérias primas. Visando este objetivo, projetos de reuso e redução do consumo de água e eficiência energética devem ser estimulados por todos os setores industriais que desejam obter um desenvolvimento sustentável.

Quanto ao reuso e minimização do uso de água na indústria, os principais objetivos para sua implantação são: a redução do consumo de água tratada e de efluente produzido; a redução dos custos com o tratamento de água e conseqüentemente com o tratamento de efluentes; e a redução dos impactos ambientais associados ao tratamento de água, como, por exemplo, lodos de decantadores e efluentes de retrolavagens de filtros.

A eficiência energética consiste em analisar e implementar ações que minimizem o desperdício de energia e ampliem o aproveitamento de energia. Muitas empresas sequer conhecem o potencial de perdas de energia de suas instalações, e saber estes índices é o primeiro passo para uma gestão energética. Após este conhecimento, é necessário entender quais as causas das perdas de energia para estabelecer ações eficazes para combatê-las.

O objetivo deste trabalho é avaliar o consumo de água e energia em uma unidade produtiva de nitrocelulose localizada em São Paulo, bem como propor alternativas de redução de consumo, utilizando como base o reuso. A unidade em questão consome em média 300 m³/h de água, que é utilizada de diversas formas e em várias etapas distintas do processo produtivo, além de considerável consumo de energia.

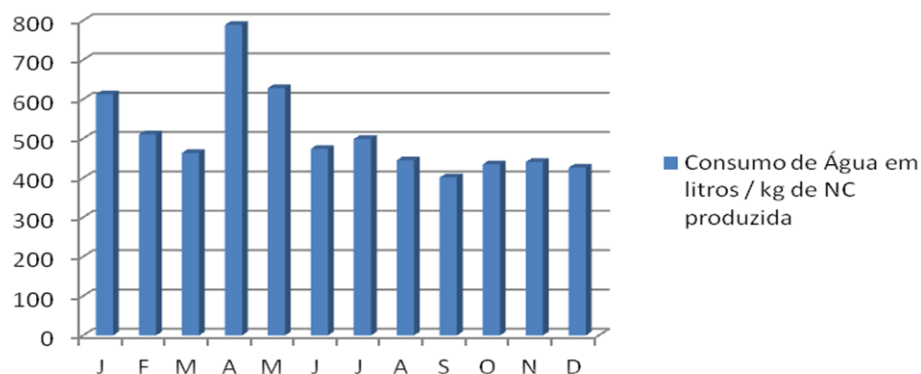
A nitrocelulose é um polímero formador de películas, utilizado em larga escala na fabricação de tintas, principalmente na produção de lacas para proteção de superfícies metálicas e em coberturas de alta flexibilidade para papéis de embalagens, além de matéria prima para produção de pólvoras e propelentes. As nitroceluloses são particularmente perigosas pela formação de gases explosivos e propagação rápida do fogo. Todas as substâncias que entram na composição destes corpos são sensíveis às variações de temperatura e umidade, determinando a decomposição lenta. Sob a ação do tempo, sem que tenha havido a ação de um agente físico ou mecânico, as fibras se inflamam e as chamas de calor intenso provocam incêndios de propagação violenta.

A característica de combustão espontânea é fator gerador de muitos incêndios industriais. O fenômeno químico da combustão é uma reação que se processa em cadeia e manifesta-se através de uma reação exotérmica, convertendo energia química em energia térmica. A decomposição das moléculas ainda intactas provoca a propagação do fogo. Devido a estas características, a nitrocelulose é mantida em meio aquoso em grande parte do processo produtivo, visando a segurança operacional.

O consumo de água na fabricação de nitrocelulose é elevado devido a várias lavagens nas etapas do processo produtivo e por causa das características físico-químicas do produto. Outras utilizações da água são consideradas além da água de processo, como água para resfriamento, geração de vapor e a água de sistemas de combate a incêndio.

O consumo de água de processo na fabricação de nitrocelulose está presente em várias etapas produtivas: cozimentos, lavagens, transportes de fibras e outros. A Figura 1 apresenta um histórico do consumo específico de água na unidade de nitrocelulose do ano de 2012.

Figura 1 - Consumo Específico da Água – litros /kg de nitrocelulose (NC) produzida em 2012.



Fonte : (IMBEL/FPV, 2013).

O potencial de redução nesta unidade de fabricação onde o consumo de água é alto, já que são consumidos em média mais de 450 litros de água para produzir 1 kg de nitrocelulose.

Assim, este trabalho mostra a aplicação de uma metodologia para avaliar o consumo de água, construir um balanço hídrico, levantar e analisar alternativas industriais para o reuso, além de possibilidades de redução no consumo de energia da unidade de fabricação de nitrocelulose.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os temas abordados neste trabalho, divididas em apanhado dos recursos hídricos e as técnicas de redução e reuso de água. A apresentação da unidade de produção de nitrocelulose analisada é realizada no capítulo 3. Os métodos e as metodologias do desenvolvimento do trabalho são apresentados no capítulo 4. O capítulo 5 mostra o estudo das possibilidades de redução e reuso de água, e o capítulo 6 apresenta as conclusões do estudo quanto à possibilidade de intensificar a redução do consumo de água no processo de produção de nitrocelulose.

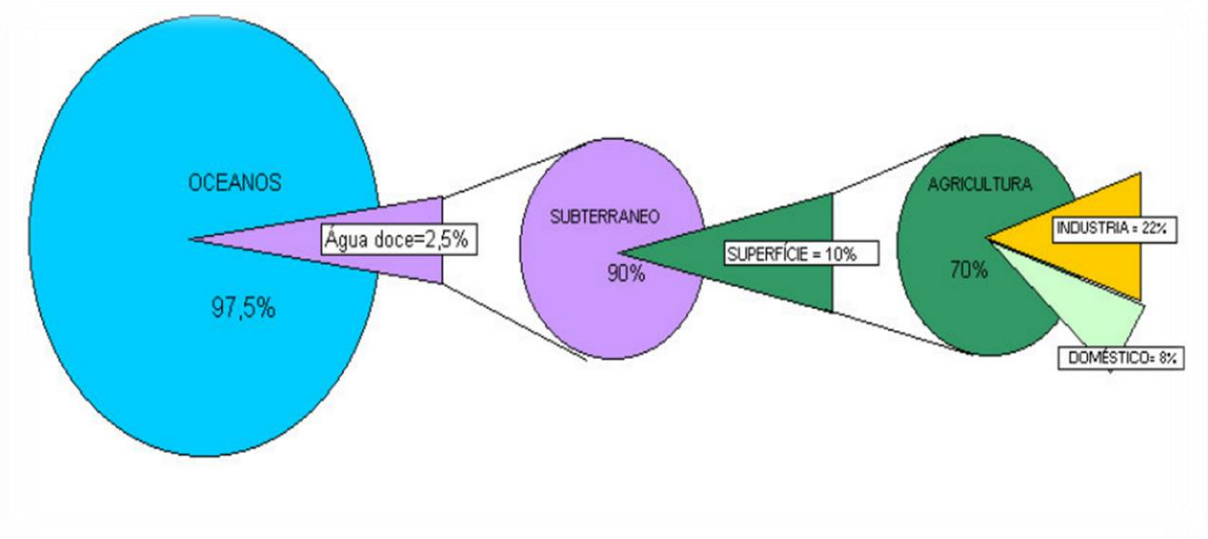
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RECURSOS HÍDRICOS

A maior parte da água existente no planeta, apesar da abundância, não se adéqua aos padrões de qualidade, ou está longe dos pontos de demanda ou tem difícil acesso. Inclui-se também que, devido ação humana, reservas acessíveis de água doce estão sendo continuamente contaminadas. A água não é apenas um recurso estratégico e um insumo indispensável para a produção, ela é vital para manutenção dos ciclos biológicos, geológicos, químicos e equilíbrio de ecossistemas.

A água é a substância mais comum no planeta, totalizando cerca de 1,46 bilhões de quilômetros cúbicos (BARROS, 2010). Cerca de 6% do total é água doce e desta, menos de 0,3% possui propriedades para consumo e fácil acesso. A Organização das Nações Unidas – ONU qualifica a água como o “Petróleo do Século XXI”. A Figura 2 apresenta de forma resumida as estimativas de disponibilidade de água segundo Toledo (2004).

Figura 2 – Disponibilidade e consumo de água no mundo.



Fonte: (TOLEDO, 2004).

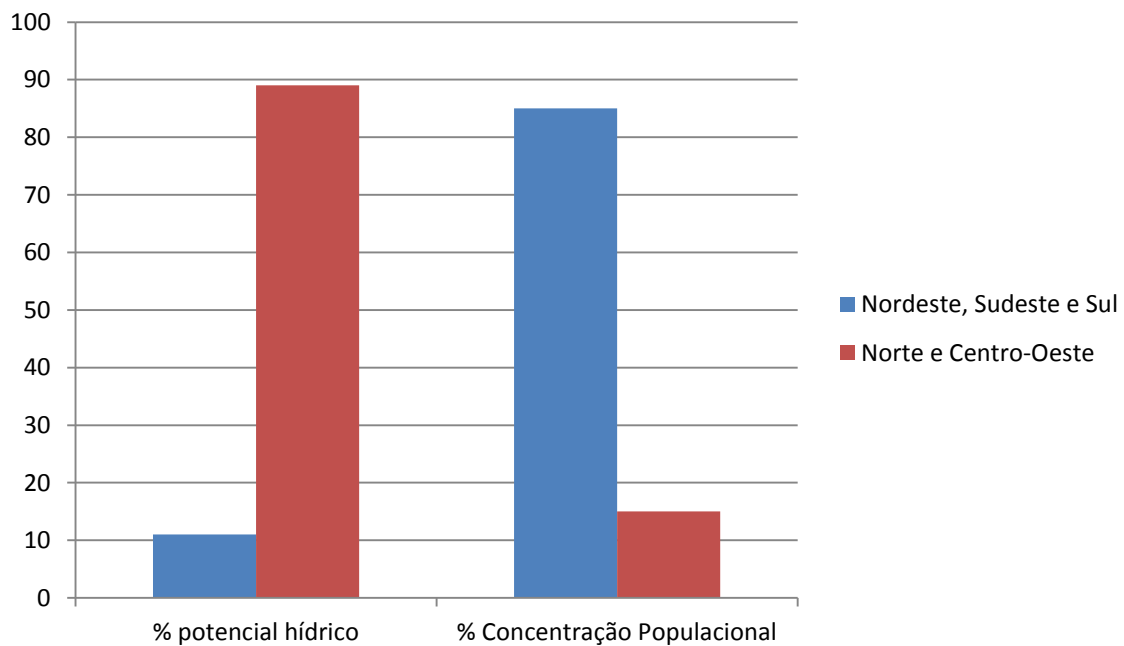
Segundo Toledo (2004), as indústrias serão responsáveis por 24% do consumo mundial de água até 2025. As indústrias despejam de 300 a 500 milhões de toneladas de metais pesados e outros dejetos nas águas. Estima-se que em 2025, haverá um aumento de 50% no consumo de água nos países em desenvolvimento e de 18% nos países desenvolvidos.

Acredita-se que o mundo tenha hoje 12000 km³ de água poluída. Esse valor é maior do que a quantidade de água existente nas dez maiores bacias hidrográficas do mundo (TOLEDO, 2004).

O Brasil vive sérios problemas relativos a escassez de água, mesmo possuindo a maior bacia hidrográfica do mundo, com cerca de 12% da água doce do planeta. Contribuem para este quadro a má distribuição da população dentro do nosso território, onde cerca de 80% da população vive em áreas urbanas, sendo que deste valor cerca de 40% encontra-se concentrada em 22 regiões metropolitanas (MIERZIWA; ESPANHOL, 2005).

A disponibilidade hídrica não é compatível com a demanda, apesar da concentração da população nestas regiões. A Figura 3 mostra a comparação entre a quantidade de habitantes e a disponibilidade hídrica das regiões de maior e menor índice demográfico no Brasil.

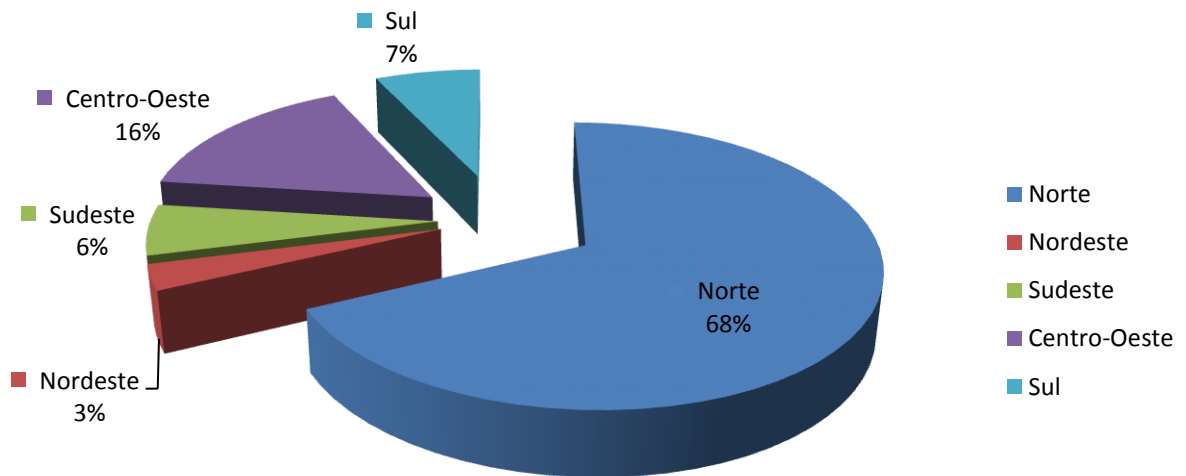
Figura 3 - Comparação entre potencial hídrico e população nas regiões brasileiras.



Fonte: Construção própria baseado em Barros (2010).

Na Figura 4 segue a distribuição no Brasil da água superficial, onde se verifica a alta concentração nas regiões Norte e Centro-Oeste.

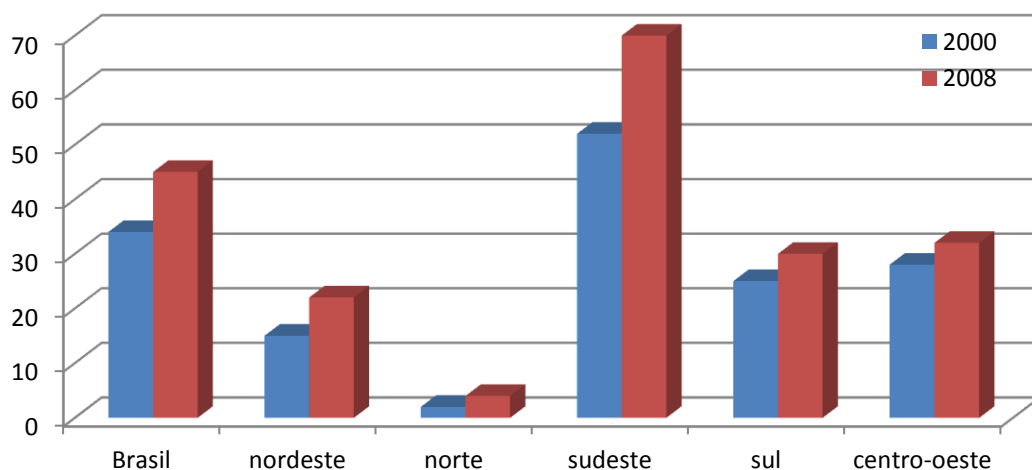
Figura 4 - Distribuição de água superficial nas regiões brasileiras.



Fonte: (AMORIM, 2005) e (PEIXOTO, 2011).

A falta de planejamento no crescimento das cidades fez com que os serviços de coleta e tratamento de esgoto fossem insuficientes diante de uma população brasileira que produz, em média, 8,4 bilhões de litros de esgoto por dia (SPILZCOVSY, 2009). Apenas 44% dos domicílios do país possuem acesso à rede geral de esgoto (IBGE, 2010). A Figura 5 compara as pesquisas sobre saneamento básico nos anos de 2000 e 2008, realizada pelo IBGE:

Figura 5 - Evolução no número de cidades com sistema de tratamento básico no Brasil.

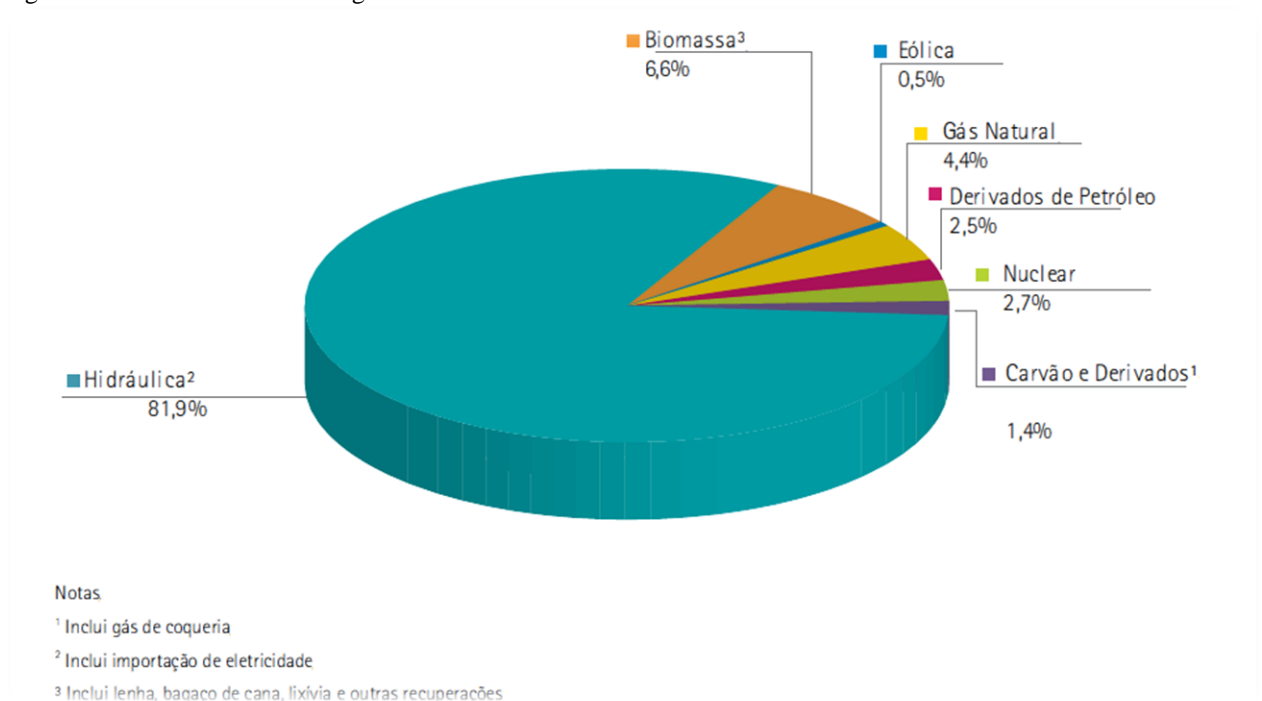


Fonte : (IBGE, 2010).

2.2 MATRIZ ENERGÉTICA

Uma matriz energética é uma descrição de todo o consumo energético de um país, discriminada por fonte de produção e setores de consumo. No Brasil a matriz energética é descrita no Balanço Energético Nacional (BEN), documento elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética – EPE que é publicado anualmente pelo Ministério de Minas e Energia (MME), desde 1970. Este documento é utilizado amplamente pelo setor privado e público como ferramenta na elaboração de planejamentos e investimentos. A Figura 6 apresenta a oferta interna de energia elétrica no ano de 2011 por fontes de geração.

Figura 6 – Oferta interna de energia elétrica.



Fonte: (BEN, 2011).

A geração de energia elétrica no Brasil nas centrais de serviço público representam 85,5% da geração total. Nestas, a principal fonte é a energia hidráulica. A geração elétrica a partir de combustíveis fósseis representa 18,9% do total nacional.

Pode-se observar que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração interna hidráulica responde por 74,0% da oferta. Somando as importações, que essencialmente também são de origem renovável, pode-se afirmar que 89% da eletricidade no Brasil são geradas de fontes renováveis.

2.3 ÁGUA NA INDÚSTRIA

A utilização de água na indústria depende da quantidade de contaminantes ou impurezas. Por exemplo, aspectos importantes para a utilização em caldeiras não são os mesmos para a água destinada a uso doméstico ou consumo humano. Dessa forma vários parâmetros químicos, físicos e biológicos são utilizados na caracterização de uma água. Estes parâmetros são indicadores da qualidade da água e essenciais para a determinação do tratamento para atingir a qualidade requerida para o específico uso.

Os parâmetros físicos de odor, gosto, cor e turbidez são itens importantes para indústrias de alimentos e bebidas. A cor pode ser causada pela presença de material orgânico, metais como ferro ou manganês, ou efluentes industriais coloridos. O gosto e odor podem ser provenientes de matéria orgânica ou compostos químicos voláteis na água. A turbidez é proveniente de partículas em suspensão na água. Os parâmetros químicos representam a quantidade de compostos químicos presentes na água, como carbonatos, ferro e manganês. O controle de parâmetros químicos é importante para uso da água em caldeiras.

Parâmetros biológicos são determinados pela presença de microorganismos presentes, através da quantidade de coliformes na água.

Diante do grau de qualidade definido pelos parâmetros, as especificações do tipo de água para cada uso são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Especificações do tipo de água para cada uso.

Utilização	Especificação
Consumo Humano	Potabilidade da água estabelecida em Portaria 2914 – Norma de Água para Consumo Humano – Ministério da Saúde – DEZ/2011
Matéria Prima	A qualidade exigida varia em função do uso. Visa a garantir a qualidade do produto final e a saúde dos consumidores finais.
Fluido auxiliar	A qualidade varia de acordo com o uso.
Fluido de Aquecimento/ Resfriamento	Para a utilização na geração de vapor a exigência de qualidade é alta; Para utilização como fluido de resfriamento a exigência é menos restritiva, abrangendo-se a proteção do equipamento em contato com a água.
Geração de Energia	Para aproveitamento de sua energia potencial ou cinética, há a limitação da quantidade de sólidos que podem danificar o equipamento gerador; Para geração de energia térmica, o grau de qualidade depende do equipamento de geração de vapor e conversão de energia esperada.

Fonte : Construção própria baseado em Amorim (2005).

As indústrias promovem grandes alterações nas características físicas, químicas e biológicas da água durante seu processo produtivo, com a liberação de várias substâncias de toxidades e concentrações distintas, sendo um dos maiores causadores de poluição ambiental da água. Entre as aplicações mais comuns da água na indústria, tem-se:

- Consumo humano em sanitários, cozinhas, vestiários, bebedouros, e equipamentos de emergências como lava-olhos;
- Lavagem de pisos e equipamentos;
- Lubrificação de máquinas;
- Solvente;
- Matéria prima com a incorporação ao produto final;
- Transporte hidráulico;
- Resfriamento.

2.4 POTENCIAL DE POLUIÇÃO DAS INDÚSTRIAS

O potencial de poluição de uma indústria é definido pelo risco existente, sem nenhum controle ambiental, de causar dano ambiental, independente de seu porte.

O sistema do Banco Mundial, *Industrial Pollution Projection System – IPPS*, *Environment Infrastructure Agriculture Division- Policy Research Department – PRDE* foi proposto em países desenvolvidos para estimativa da poluição industrial e de seu impacto e custo ao bem-estar e poluição, baseado nos dados das indústrias. O sistema obtém uma combinação dos dados de intensidade de poluição com através de coeficientes de poluição por unidade de número de empregados, ou por valor adicionado, ou por valor de produção (MORENO, 2005). No modelo IPPS são estimados os parâmetros como demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais em suspensão (STS) e metais tóxicos na água.

No cenário nacional, o número de empregados é a medida industrial mais fácil de ser obtida e utilizada. Além destes dados, os órgãos regulamentadores e fiscalizadores, buscam levantar e controlar os parâmetros de qualidade e vazão da água utilizada e efluente gerado pelas indústrias.

2.5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E A INDÚSTRIA

A conciliação de produção industrial e controle ambiental é um dos grandes desafios da atualidade. O desenvolvimento industrial e econômico da sociedade atual se deu a custo de enormes impactos ambientais (PEIXOTO, 2005). Durante o desenvolvimento industrial, a preocupação com o meio ambiente e preservação do uso de água era praticamente inexistente.

Atualmente as indústrias possuem maior preocupação com a preservação e minimização dos impactos ambientais, sobretudo motivados pelas legislações ambientais vigentes. Com o gerenciamento de recursos hídricos por parte dos órgãos governamentais que buscam a garantir a minimização dos impactos ambientais nos corpos d'água e a minimização do desperdício com o uso consciente da água. A Lei da Política Nacional de Recursos Hídricos nº 9433/97, conhecida como Lei das Águas, atribui valor econômico à água em uma série de regulamentações quanto ao seu uso. A Agência Nacional de Águas (ANA) foi criada para garantir a implementação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e a Política Nacional de Recursos Hídricos.

O Plano Nacional de Recursos Hídricos tem como objetivo:

- assegurar a disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos;
- a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento;
- a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural ou de uso inadequado dos recursos.

2.6 SISTEMAS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO UTILIZADOS PELAS INDÚSTRIAS

A indústria, diante das restrições ambientais, busca minimizar o custo de adequação às restrições utilizando técnicas de minimização do consumo de água e redução da contaminação das correntes de processo. Dentre as alternativas pode - se citar:

- I. Eliminação de desperdícios e mudanças nos procedimentos operacionais visando à diminuição da demanda:

A eliminação de desperdícios e pequenas mudanças nos procedimentos operacionais são alternativas que demandam baixo custo de investimento. São exemplos de ações comumente adotadas para redução do desperdício na operação: substituição de equipamentos

obsoletos, colocação de gatilhos em mangueiras, melhoria da eficiência energética do processo, aperfeiçoamento do controle de purga, entre outros.

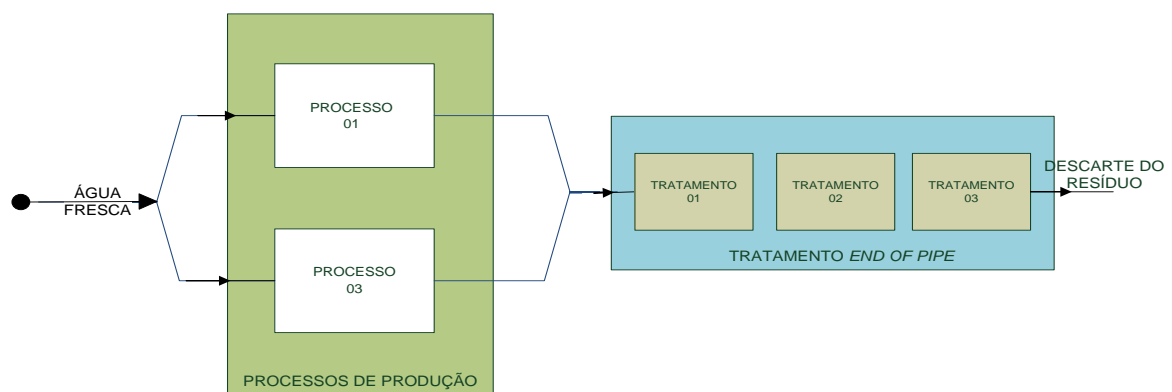
Outro fator que se mostra bastante eficiente é o investimento no treinamento dos operadores através de um programa de conscientização ambiental e conservação do meio ambiente. A adoção destas medidas, além de benéfica ao meio ambiente, pode trazer ganhos econômicos às empresas que as adotam. Isso porque as empresas que garantem políticas ambientais apropriadas, com os chamados selos verdes, tendem a ter vantagens competitivas pelo fato de possuírem certificados de sustentabilidade ambiental.

II. Tratamento de final de linha que consiste na readequação do efluente para posterior descarte.

O tratamento no final de linha, também chamado tecnologia *End of pipe* (Fim de tubo), começou a ser usado na década de 70 e consistiu na primeira forma de controle de poluição dos recursos hídricos do setor industrial. O efluente é previamente tratado antes do descarte final. Exemplos de tratamento prévio anterior ao descarte são a incineração e a digestão biológica.

Nesta forma de tratamento, as correntes de efluentes provenientes de cada unidade são reunidas e destinadas às unidades de tratamento, onde através de diversos processos físicos, químicos e biológicos, são reduzidas as concentrações dos contaminantes em quantidades aceitáveis para o despejo em corpos receptores (VALLE, 2005). A Figura 7 a seguir esquematiza este tipo de tratamento.

Figura 7 - Esquema de tratamento *End of pipe*.



Fonte: Construção própria, baseada em Valle (2005).

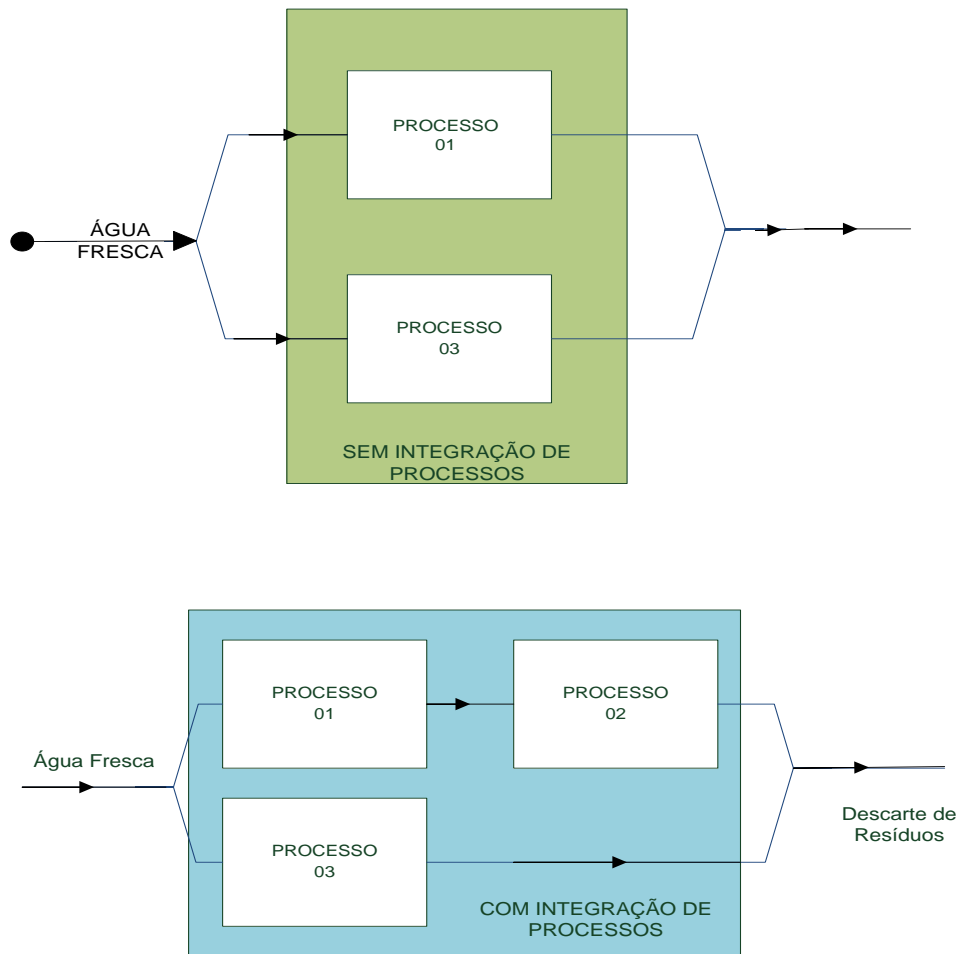
A metodologia *end of pipe* apresenta a desvantagem de apenas minimizar a contaminação do efluente; porém, o descarte ainda se faz necessário. Além disso, ao se reunir correntes diferentes existe a possibilidade de diluição das correntes concentradas, dificultando-se assim, a separação final. Sendo o custo do tratamento do efluente diretamente proporcional ao volume, o efeito da diluição tem impacto econômico negativo sob as unidades de tratamento final. Outro problema que persiste neste tipo de configuração é devido às características particulares de cada corrente. Por exemplo, contaminantes de origem orgânica ou inorgânica necessitam, respectivamente, de processos de purificação e tratamento específicos. Por estes motivos a indústria teve que voltar o foco para a fonte do efluente dentro da fábrica e não somente no problema após sua geração. Desta forma, começaram a surgir metodologias para reaproveitamento de água dentro da planta industrial no início da década de 90.

III. Redução ou eliminação da produção de efluentes na fonte

Com a crise mundial de petróleo no final da década de 70 e início da década de 80, as instituições internacionais começaram a propor uma abordagem diferente para o problema do uso da água e descarte de efluentes aquosos, estabelecendo como prioridades a redução na fonte, a reutilização e a reciclagem. Desta forma, ao invés do controle da poluição a jusante, tenta-se a prevenção da poluição em primeiro lugar.

A prevenção de poluição tem várias vantagens em relação ao controle de poluição, em que as principais vantagens são a redução no custo de tratamento de efluentes e redução nos custos de matérias-primas. Parte do poluente que chega ao final do processo representa perda de matéria-prima. Assim, ao buscar minimizar a quantidade de material que tem este fim, a prevenção de poluição torna-se se um meio de conservação de recursos naturais. Ela também implica na redução de custos relacionados à disposição de rejeitos, já que procura a sua minimização. Além disso, estas medidas de redução da produção de efluentes na fonte produtora, juntamente com o exposto anteriormente (item I), trazem contribuição para a boa imagem pública da indústria. Desta forma, a estratégia de conservação relatada (item I), aliada a medidas que utilizam o reaproveitamento da água e diminuição de efluentes gerados (item III), norteiam as políticas industriais modernas, baseadas na sustentabilidade. A Figura 8 apresenta esquema comparativo entre processo sem integração e processo com integração.

Figura 8 – Esquema de processos sem integração e com integração.



Fonte: Construção própria baseada em Valle (2005).

2.6.1 Sistemas de integração de processos

A política de descarte de resíduos *End of pipe* difundida na década de 1970, era baseada em tentativa e erro, onde uma corrente totalmente limpa era usada em processos que possuíam um efluente altamente contaminado, o que prejudicava a busca pela solução de mínimo consumo de água fresca.

Nas últimas duas décadas, vários esforços foram direcionados para a redução do desperdício, redução do efluente líquido na fonte, reaproveitamento e reciclagem. Técnicas de controle de poluição a jusante foram gradativamente substituídas por técnicas de prevenção da poluição, com a busca de tecnologias de tratamento e de disposição final de efluentes, e por

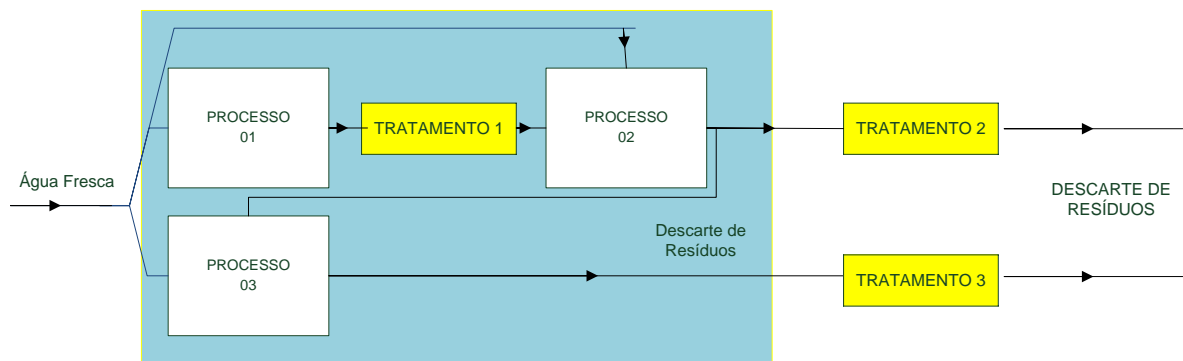
procedimentos que visem a sua minimização (FARIA, 2004). Neste contexto surge a integração de processos na indústria.

A integração de processos são métodos sistemáticos para o projeto de sistemas integrados de produção, desde processos individuais a complexos, com ênfase especial no uso eficiente da energia e na redução dos efeitos ao meio ambiente. Segundo El-Halwagi (1997), há basicamente quatro formas de redução da geração de efluentes líquidos:

- Segregação;
- Reuso;
- Regeneração com reuso;
- Regeneração com reciclo;

A segregação consiste em evitar a mistura das correntes de efluentes que possuem diferentes composições ou contaminantes, evitando assim diluições desnecessárias e o custo de remoção de poluente de uma corrente mais concentrada. A Figura 9 apresenta um modelo de tratamento tipo segregação.

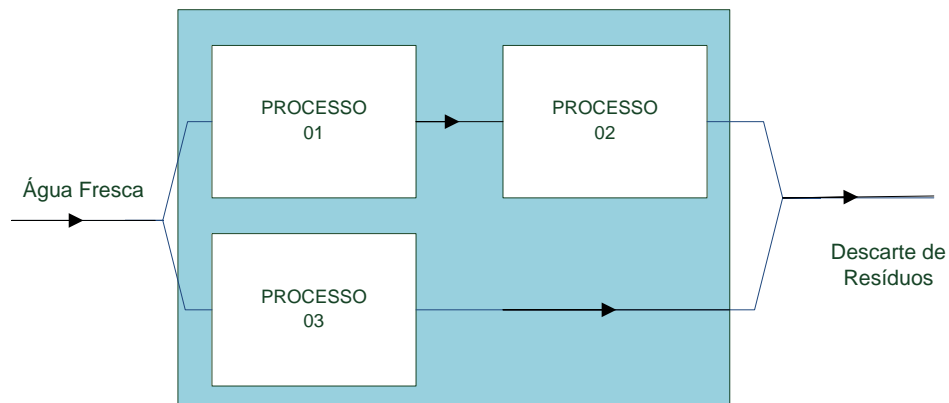
Figura 9 - Tratamento do tipo segregação.



Fonte: Construção própria.

O reuso é a operação de reutilização do efluente, sem nenhum tratamento prévio, desde que o nível de contaminantes não altere ou prejudique o processo nessa operação, evitando assim o consumo de água primária. A Figura 10 apresenta um modelo de reuso.

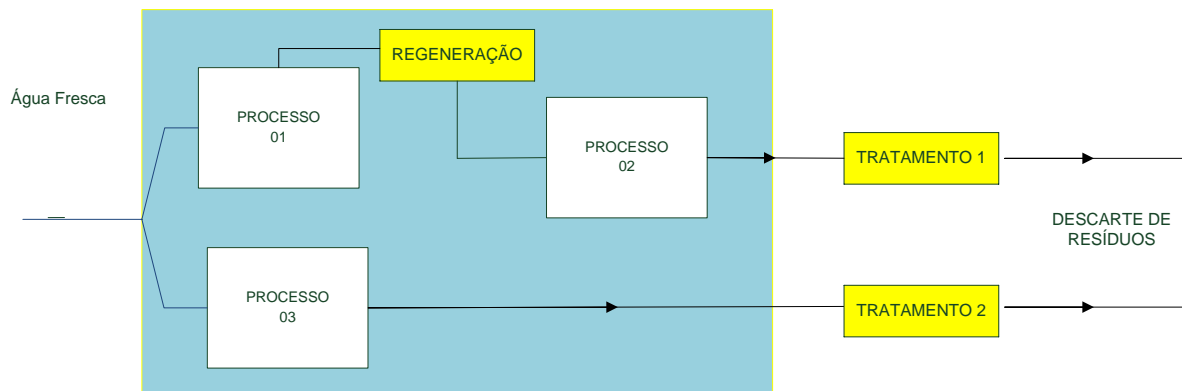
Figura 10 - Tratamento do tipo reuso.



Fonte: Construção própria.

A regeneração com reuso consiste na remoção parcial de contaminantes de uma linha de efluentes através de tratamento, e sua utilização em outra operação. A regeneração com reuso promove uma redução no volume consumido de água primária, volume de efluentes gerado e redução na carga de contaminantes. A Figura 11 apresenta um modelo de sistema de regeneração com reuso.

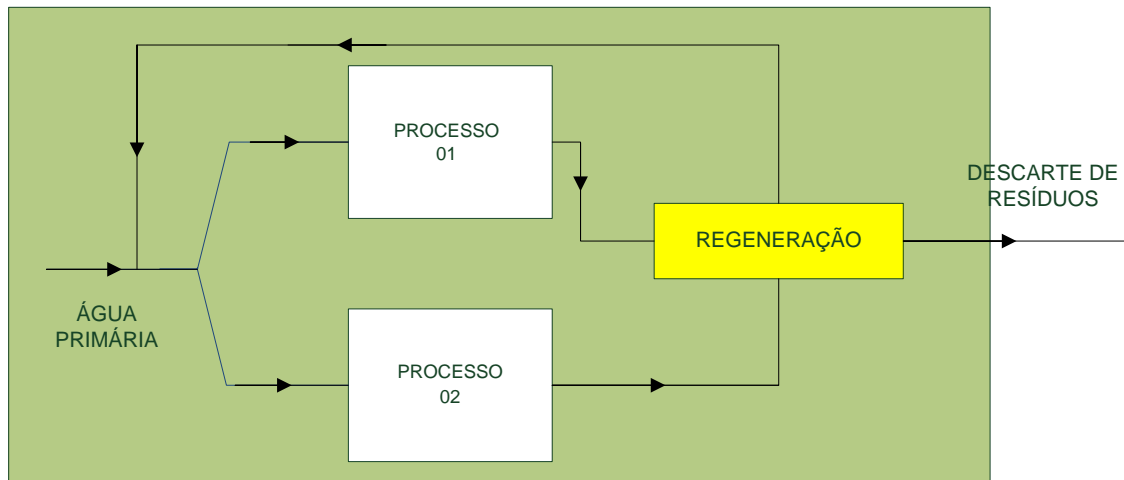
Figura 11 - Tratamento do tipo regeneração com reuso.



Fonte: Construção própria.

No processo de regeneração com reciclo, o efluente recebe tratamento parcial para a remoção dos compostos contaminantes e é reutilizado no mesmo processo gerador, resultando em diminuição do consumo de água primária, no volume do efluente para descarga e de sua carga contaminante. A Figura 12 apresenta um tratamento de regeneração com reciclo.

Figura 12 - Tratamento do tipo regeneração com reciclo.



Fonte: Construção própria.

As diversas metodologias propostas para minimização do consumo de água e geração de efluentes são baseadas em conceitos de integração mássica das correntes e utilizam o reuso, o reciclo e a regeneração das correntes do processo. Dois grandes grupos na literatura baseiam-se na integração mássica: o primeiro utiliza a abordagem termodinâmica-heurística-evolutiva, enquanto que o segundo utiliza a programação matemática e otimização (VALLE, 2005).

2.6.2 Métodos de integração de processos baseados na teoria termodinâmica-heurística-evolutiva

Os métodos de Integração de processos baseados na teoria termodinâmica-heurística-evolutiva de análises de redes utilizam a sequência lógica da evolução do fluxograma, seguindo regras originadas de experiências prévias, o que permite a identificação e avaliação das opções de minimizações dos efluentes.

Um conjunto de correntes de efluentes com alta concentração de poluentes é transferida para correntes que possuem baixa concentração de poluentes, e o desenho final da rede de trocadores de massa é definido por fundamentos da termodinâmica, utilizando-se de técnicas heurísticas e de conhecimento do processo. Os métodos baseados nesta integração de processos possuem limitações como: o coeficiente de transferência de massa é uma função linear da composição, o que não reflete a realidade; a síntese da rede de trocadores não é feita

de forma automática; e existe restrição quanto a quantidade de contaminantes que podem ser incluídos no problema.

Dois métodos que utilizam a abordagem termodinâmica–heurística-evolutiva são: o Método Pinch e o Diagrama de Fontes de Água (DFA). O Método Pinch é o método heurístico-teórico mais difundido e é conhecido como ponto de estrangulamento. Consiste em uma técnica de análise sistemática do comportamento dos efluentes de processos industriais baseada nos fundamentos da termodinâmica, utilizada para definir possíveis mudanças no processo para a redução de energia e na redução do consumo de água de processo de plantas industriais através do reuso ou reciclo. A metodologia permite a determinação da mínima quantidade de água visando redução do consumo total e a redução da geração do efluente, e desenvolvimento de técnicas para uma síntese sistemática de sistemas de água e tratamento de efluentes além de técnicas de melhorias contínuas do sistema. Baseado em fundamentos termodinâmicos e de transporte, é o tratamento de unidades que precisam de água como fonte de poluentes, e a partir dela, o sistema é tratado como um problema de transferência de massa de uma corrente concentrada para uma corrente de baixa concentração de poluentes. Melhorias e variações do método foram propostas por muitos autores e obtiveram sucesso na aplicação. Um exemplo de procedimento baseado no método Pinch é o Diagrama de Fontes de Água (DFA). O Diagrama de Fontes de Água consiste de um algoritmo que efetua simultaneamente a especificação de metas de consumo e a síntese da rede, podendo ser aplicado para redes com problemas com múltiplos contaminantes no caso de reuso, regeneração com reuso e regeneração com reciclo em processos com restrição de vazão e múltiplas fontes de água.

2.6.3 Métodos de integração de processos baseados na programação matemática

Abordagens de otimização numérica existem várias, que vão desde a simulação de processos com modelos matemáticos simples até sofisticados métodos de programação matemática. O propósito do procedimento é representado pela chamada função objetivo e o seu valor é maximizado ou minimizado através de um processo de otimização que deve satisfazer restrições de igualdade ou desigualdades.

As restrições de igualdade podem ser representadas por equações de balanço material, equações impostas para o processo e restrições termodinâmicas. As restrições de desigualdade podem ser de natureza ambiental como a concentração de alguns poluentes deve ser menor

que certo nível; de natureza técnica, como temperatura, pressão e/ou vazão não devem ultrapassar um determinado valor; e termodinâmica como valores positivos da força motriz em processos de transporte de massa e energia.

O problema de otimização para obtenção da rede de integração mássica segue os modelos matemáticos dos processos e pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\text{Min } z = f(x, y) \quad (1)$$

$$h(x, y) = 0 \quad (2)$$

$$g(x, y) \leq 0 \quad (3)$$

$$x \in X \subseteq R^n \quad (4)$$

$$y \in Y \subseteq \mathfrak{Z}^m \quad (5)$$

onde $f(x, y)$ representa a função objetivo, $h(x, y)$ representa as restrições de igualdade e $g(x, y)$ as restrições de desigualdade, isto é, as condições limites de cada processo. A variável z representa o critério a ser minimizado (por exemplo, a minimização de efluentes); x representa as variáveis contínuas e y as variáveis discretas.

O método apresenta como vantagens: a maior facilidade em se trabalhar com múltiplos contaminantes e a síntese da rede de trocadores torna-se automática, isto é, as conexões entre os processos e suas respectivas composições são simplesmente resultados do problema de otimização. As principais desvantagens do método residem no fato de que devido aos problemas de otimização de redes de água apresentarem dificuldades numéricas referentes à natureza não linear das restrições, muitas vezes tornam-se bastante complexos de serem resolvidos. Os algoritmos de otimização disponíveis, em geral apresentam dificuldades em encontrar um ótimo global de problemas não-convexos.

Dentre os métodos de resolução baseados na programação matemática tem-se: Programação linear (PL), Programação Não-Linear (PNL), a Programação Linear Inteira Mista (PLIM), a Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM) e a Programação Binária.

A Programação Linear (PL) trata problemas onde a função objetivo e todas as restrições são lineares. Acontece que muitos problemas do mundo real não são lineares e necessitam de métodos que considerem a não linearidade do problema.

O método de Programação Não-Linear (PNL) possui representação igual a dos problemas de programação linear, mas com duas exceções: a adição de uma função escalar lisa $F(x)$ na função objetivo e um vetor de funções lisas $f(x)$ nas restrições. Os métodos de resolução aplicados a problemas de PNL são divididos em problemas não-lineares sem restrição e problemas não-lineares com restrição.

A Programação Linear Inteira Mista (PLIM) é aplicada quando as equações de restrições e função objetivo são lineares, porém existem variáveis de decisão contínuas e discretas (inteiras). Quando as variáveis estão restritas a valores inteiros é dito programação linear inteira (PLI), mas quando algumas das variáveis são inteiras e outras contínuas, tem-se a Programação Linear Inteira e Mista (PLIM).

A Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM) segue a mesma filosofia da PLI e PLIM, a diferença é que as equações de restrições e/ou função objetivo são não-lineares. Problemas dessa natureza aparecem com frequência em engenharia química e incluem, por exemplo, síntese de processos, projeto de colunas de destilação, síntese de rede de trocadores de calor e produção de óleo e gás (LOBATO, 2009).

O método de Programação Binária apresenta a mesma filosofia da PLI e PLIM, com a diferença de que as variáveis inteiras são restritas ao número 0 e 1.

2.7 REUSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

As várias possibilidades de reuso de água foram descritas por Hespanhol (1997), elencando os possíveis consumidores, a agricultura, a indústria e o abastecimento de água. Na indústria existem diversos tipos diferentes de consumo, cada qual com suas características e critérios de qualidade, e por este motivo, o setor industrial já vem desenvolvendo soluções para reusar águas residuais desde a década de 70. Hospondarec & Thompson (1974), já apresentavam trabalhos de reuso de água pela indústria.

Trabalhos como Asano & Mills (1990), Asano (1991) e Asano & Levine (1995) discutem de maneira ampla as categorias de reuso e os elementos essenciais para sua implantação. Asano *et al* (1998) estudaram, dividiram e classificaram metodologias para minimização de consumo e reuso de água. Higgins (1989) apresentou dados sobre a classificação do grau de qualidade da água necessária para reuso e parâmetros de classificação, segundo a ANEEL. A técnica *Pinch* foi uma das distintas metodologias e tecnologias foram desenvolvidas objetivando a aplicação em reuso e foi a pioneira para trocadores de calor em refinarias de petróleo, (WANG & SMITH, 1994 a, b).

Whang & Smith (1995) utilizando mesmo método, mostraram que este poderia ser adaptado para perdas de água, integrando processos consumidores de água com o intuito de reduzir o consumo, reaproveitando efluentes. A integração de sistemas e/ou processos consumidores de água, proposta da técnica *water pinch* para reduzir o consumo de água e a

geração de efluentes, foi um avanço importante nos estudos de otimização do consumo de água em processos industriais, que até então, os sistemas eram avaliados isoladamente.

Em 1996, Dhole *et al* popularizaram metodologia usando a técnica “water pinch”, e Kuo & Smith (1998) simplificaram esta técnica com o uso de uma abordagem gráfica.

O reuso aplicado em torres de resfriamento, em escala piloto por Winjesinghe *et al* (1996), comprovaram possibilidade técnica do uso de água de reuso clorada em torres de resfriamento, após tratamento secundário. Através de testes, comparando o rendimento de sistema alimentado com água potável e outro com água de reuso, mostrou que o desempenho em ambos os casos foram similares.

Baum (2010) avaliou as possibilidades de minimização de desperdício de água e reuso dos efluentes dentro da própria planta de produção de nitrocelulose. O desperdício e reuso de água em unidades industriais de nitrocelulose foi proposto por Chang *et al* (2000). Além do reuso de água, foram também avaliados o reaproveitamento de re-concentração de ácido nítrico; concentração de ácido sulfúrico; sistema de absorção de NOx; e sistema de retificação de isopropanol.

DearBorn (2002) coloca que com o levantamento das especificações da água em cada etapa do processo e análises dos efluentes gerados, pode-se tratar e reutilizar a água até mesmo no próprio processo que a gerou, desde que haja um projeto adequado que inclua o balanço hídrico.

Mancuso & Santos (2003) apontaram que dentre os consumidores potenciais de água de reuso em uma indústria, o uso para construção civil e lavagens de pisos é viável, já que a qualidade requerida da água é baixa e não existem fatores muito restritivos ao reuso.

DearBorn (1991) mostra que para a aplicação de água de reuso em torres de resfriamento existem algumas restrições, dentre elas: deve-se evitar água com elevada temperatura, pois impactaria em baixo rendimento no processo de resfriamento; evitar água contendo cloretos ou águas ácidas, pois aceleram a corrosão de trocadores de calor; e evitar o reuso de águas duras, pois gerariam incrustação na rede de resfriamento.

O tratamento de efluente para utilização em caldeiras é possível, principalmente com o desenvolvimento de técnicas de tratamento por membranas, mas a técnica é onerosa quando comparada com a recuperação do próprio condensado e não promove a recuperação de calor (JACOB *et al*, 2010).

Processos de tratamento de água utilizando membranas, abriram a possibilidade de reuso de água para caldeiras. Asme (1994) ressalta que a pureza requerida para a água de

alimentação sistemas de vapor de alta pressão requerem água de elevada qualidade.

O condensado é tipo de reuso mais aplicado em sistemas de vapor, pois a recuperação do próprio, além de promover economias associada ao consumo de água e de geração de efluentes, também implica recuperação de calor e diretamente na redução no consumo de combustível da caldeira.

O conceito ultrapassado de mistura de correntes residuais dificulta o reaproveitamento direto da corrente e/ou seu tratamento, pois a corrente resultante contém níveis médios de concentração de uma vasta gama de compostos químicos. Em sistemas antigos, diferentes correntes (drenagens, purgas, efluentes e outros) com diferentes origens com diferentes características físico-químicas e contaminações diversas são misturadas em um só sistema de captação e enviadas para tratamento de fim de tubo. Cichocki (2005) utilizou metodologias de segregação de efluentes, objetivando o reuso.

A segregação visa não misturar componentes e resíduos de diferentes naturezas. Ao invés de uma única corrente com grande vazão e contaminação generalizada, têm-se várias correntes com menor vazão e contaminações específicas. Estas são mais facilmente tratadas que correntes com contaminação generalizada e também representam uma maior chance de encontrar um ponto consumidor que admita uma destas correntes sem nenhum tipo de pré- tratamento, favorecendo o reuso em cascata. O tratamento descentralizado de fluxos é econômico e permite o uso mais efetivo de ferramentas de reuso.

A implementação de melhorias nos processos industriais de maneira a obter uma descarga quase zero é possível, segundo Alves *et al* (2006), com o uso de tecnologias inovadoras na área de tratamento de efluentes e otimizando o sistema de resfriamento. Através da substituição das torres de resfriamento convencionais por um sistema de híbrido água / ar, atingidas reduções substanciais na emissão de efluentes de uma unidade industrial.

O reuso não substitui a necessidade de água fresca numa unidade industrial, pois poucos sistemas conhecidos atingem resultados com reuso de 100% dos efluentes. Isso decorre das limitações técnicas, operacionais e ambientais que restringem o uso de sistemas totalmente fechados. Um dos principais motivos é a concentração dos contaminantes a cada ciclo de reuso, conforme mostrou Maron (2006).

Com a captação de água de chuva reuso direto de efluente tratado e reuso em cascata, foi possível reduzir em até 12,74% o consumo de água em uma avícola segundo Matsumara (2007).

Alves *et al* (2008), estudaram a minimização no consumo de água na geração de efluentes em uma coluna de *stripping* (coluna de desabsorção) usada para remoção de compostos orgânicos voláteis de uma corrente de efluente industrial. O trabalho propõe a utilização de um refeedor em substituição ao sistema de injeção de vapor vivo. Os resultados mostram que a proposta de recuperação do condensado gerado propicia redução no consumo de água fresca, redução na geração de efluente e recuperação de energia térmica.

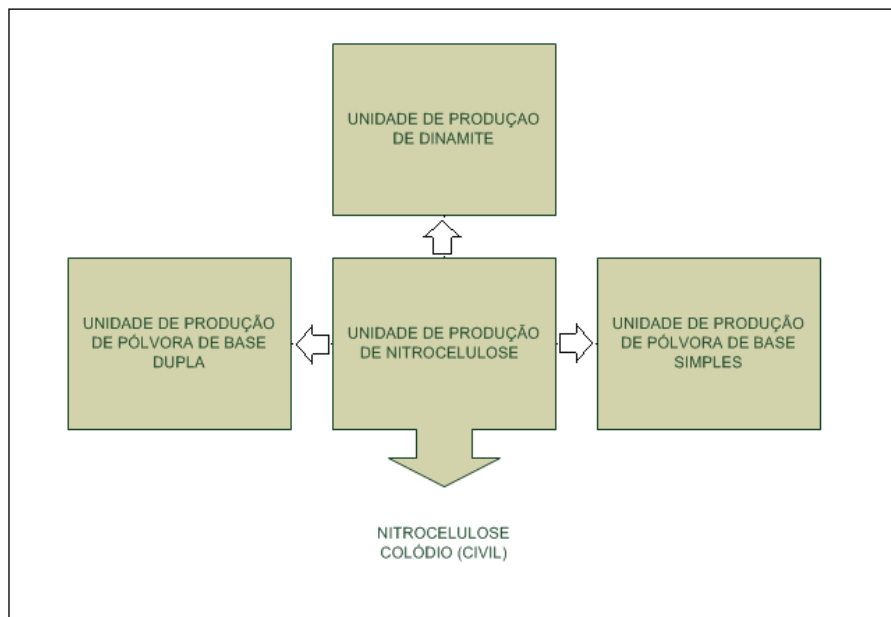
A metodologia *Water Source Diagram* (WSD), apresentada por Gomes *et al* (2007), foi aplicada no estudo de caso de um único contaminante, com possibilidades de ser estendida para a avaliação de casos de contaminações múltiplas. Resultados da utilização da técnica de WSD em diversos setores industriais foi apresentada por Campos *et al* (2009), como redução no consumo de água de cerca de 90% conseguido em uma indústria de papel. Alves (2009) aponta diversas metodologias que podem ser adotadas para aplicar o reuso nas indústrias, dentre elas o uso em cascata dos efluentes, de modo que o efluente que sai de um processo seja realimentado em outro processo, sem necessidade de tratamento.

3 DESCRIÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL

O objeto deste estudo é um complexo fabril composto por cinco unidades de produção de materiais diversos de uso civil e militar. A unidade de produção foco do estudo fabrica nitrocelulose, que é a matéria prima base de outras unidades de produção do complexo. A Figura 13 mostra a nitrocelulose como matéria prima para a produção nas unidades de produção de pólvoras de base simples, pólvoras de base dupla e dinamite. Além da produção de nitrocelulose para uso bélico, há produção significativa de nitrocelulose que é utilizada na fabricação de tintas e vernizes de alto desempenho.

Apesar de produzida pela primeira vez há mais de 160 anos, é considerada uma das mais antigas resinas sintéticas, mas somente após a 1ª Guerra Mundial passou a ser largamente utilizada em tintas (FREITAS, 2007).

Figura 13 - Diagrama de aplicação da nitrocelulose na Unidade Industrial.



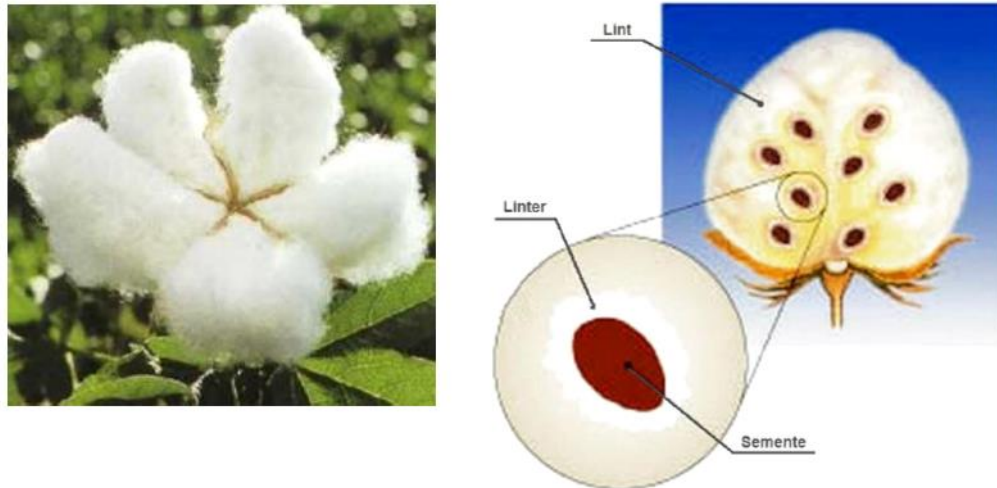
Fonte: Construção própria.

3.1 UNIDADE DE PRODUÇÃO DE NITROCELULOSE

O processo de fabricação de nitrocelulose emprega o linter de algodão como fonte de matéria prima. Linter de algodão é o nome que se dá ao material constituído pelas fibras relativamente curtas, que ainda ficam aderidas ao caroço do algodão depois da operação

de descaroçamento, quando o material é chamado de linter de segundo ou terceiro corte. As fibras longas são conhecidas por *lint* e são destinadas à indústria têxtil. A Figura 14 mostra a composição da semente do algodão. O linter é composto praticamente de celulose, podendo conter em pequenas quantidades, pectinas, constituintes minerais, lipídeos (óleos e ceras) e resinas.

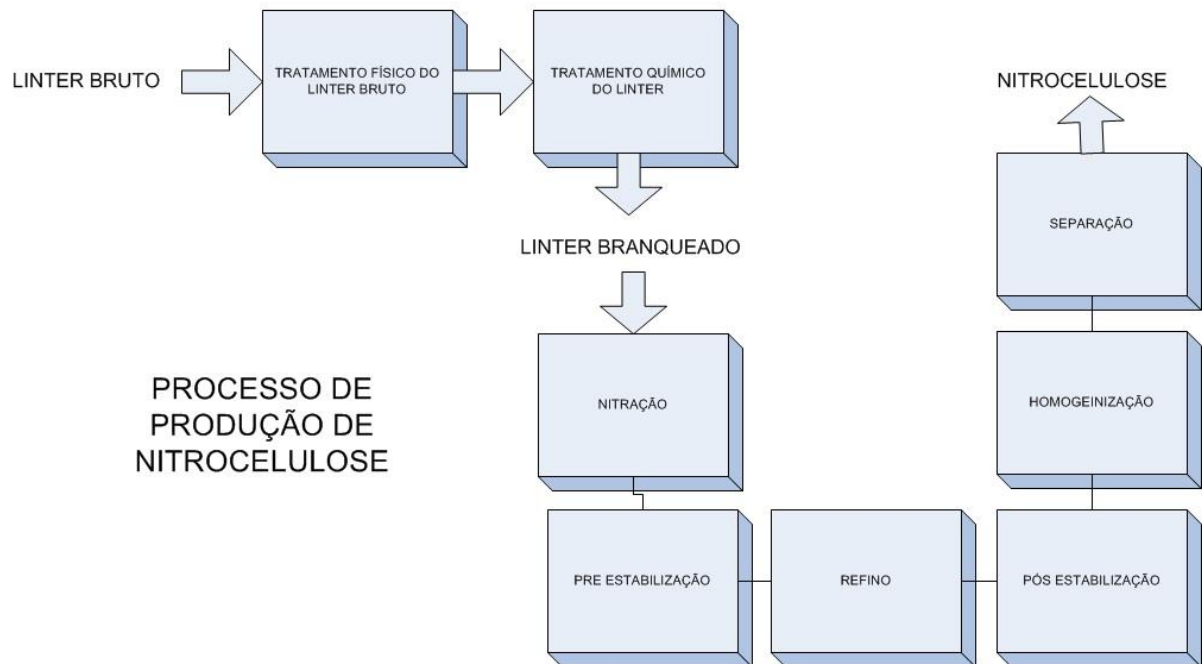
Figura 14 - Semente do algodão.



Fonte: (GRUPO CULTIVAR, 2009; MORGADO, 2009).

O processo de fabricação começa com a separação e purificação do linter bruto para obtenção da celulose isenta de resíduos. A celulose obtida é então reagida com mistura sulfonítrica, seguido do processo de estabilização com vários fervimentos para extração do ácido residual ocluso nas fibras da nitrocelulose. A Figura 15 demonstra sequencialmente o processo de obtenção da nitrocelulose a partir do linter bruto. Durante o processo as variáveis são controladas de acordo com a necessidade de sua aplicação. Os diferentes tipos do produto são caracterizados principalmente em relação ao teor de nitrogênio e à viscosidade (ou grau de polimerização).

Figura 15 - Diagrama do processo de produção de nitrocelulose.



Fonte: Construção própria.

3.2 PROCESSO DE PURIFICAÇÃO DO LINTER

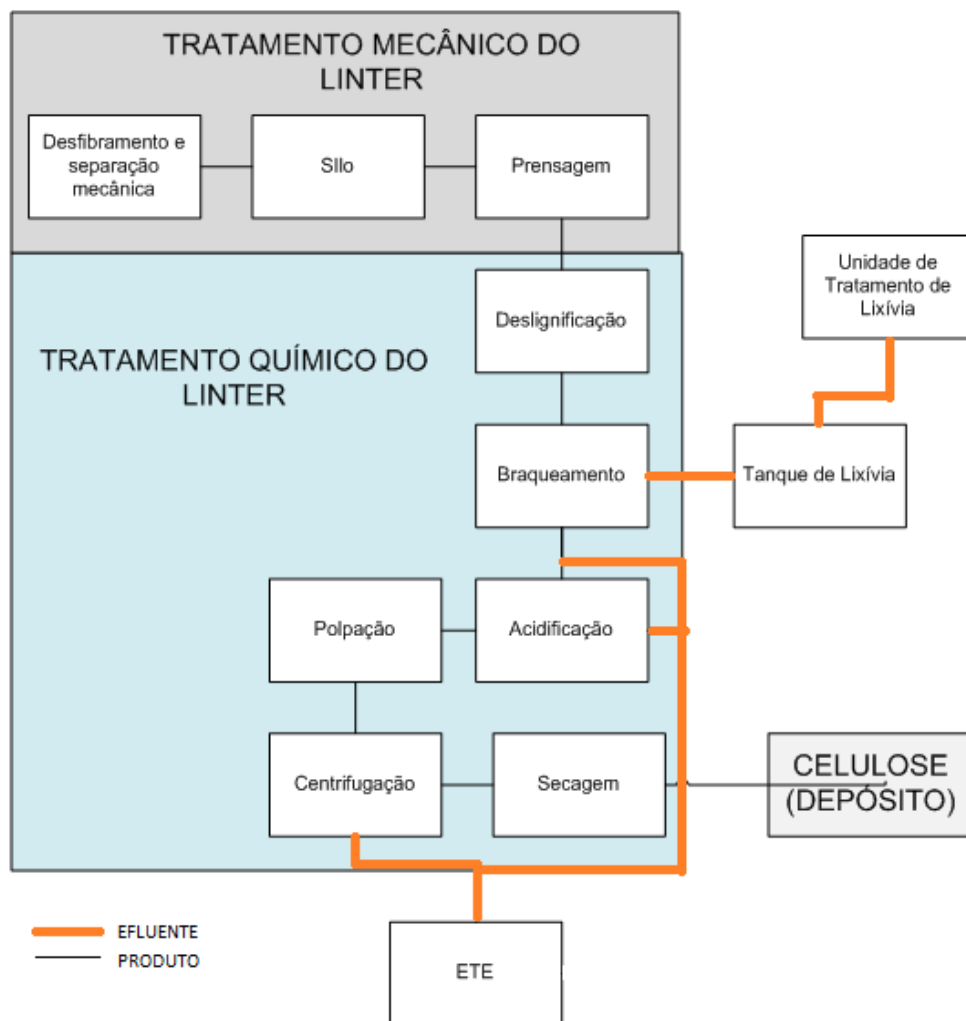
A primeira etapa do processo de purificação do linter é o tratamento físico, onde de forma mecânica é realizada a descompactação do linter, que inicialmente vem acondicionado e transportado em fardos compactados. A finalidade da descompactação é a separação do linter bruto e a geração de tufo facilmente transportáveis em equipamentos pneumáticos. As impurezas passíveis de separação mecânica são removidas através do emprego de um sistema pneumático constituído de tela giratória e exaustor. O exaustor promove o deslocamento de ar dentro de um duto, causando a aspiração dos tufo produzidos até a tela giratória, de onde é raspado com auxílio de uma lâmina fixa. Nesta etapa, materiais mais densos, como areia, são separados pela ação da corrente de ar, sendo coletados em bandejas. Materiais finos atravessam a tela giratória sendo aspirados e ejetados pelo exaustor nos filtros tipo manga instalados. O material raspado cai em uma esteira para ser conduzido a outro sistema de desfibramento, onde é novamente succionado até o sistema de tratamento químico.

No tratamento químico, o material recebe a adição de água, sendo compactado por uma prensa hidráulica a fim de ser cozido com ácido sulfúrico (H_2SO_4) em um autoclave.

Após o cozimento ácido, a massa de linter é tratada com uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), gerando um licor negro chamado de lixívia. A lixívia é o efluente tóxico resultado da remoção de gorduras, proteínas, ligninas e outras substâncias das fibras de linter. O licor negro de lixívia é encaminhado a uma unidade de tratamento de lixívia, antes de ser descartado junto com os outros efluentes para a estação de tratamento de efluentes. Depois das lavagens do linter, há a adição de hipoclorito de sódio para alveijamento das fibras de celulose.

O linter bruto após estes tratamentos obteve sua purificação, apresenta aspecto branco e a denominação de linter purificado. Após passagem por uma centrífuga, apresenta de 5 a 10% de umidade, que é retirada por uma secadora, antes de ser enfardado e estocado. A Figura 16 ilustra a sequência de produção do linter purificado a partir do linter bruto.

Figura 16 - Esquema de Produção de Linter Purificado.

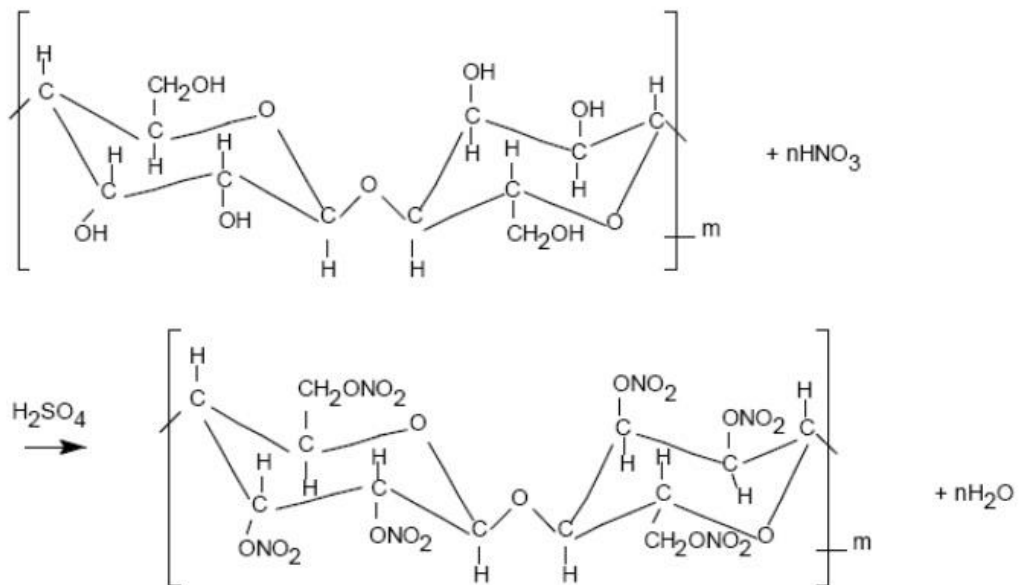


Fonte: Construção própria baseado na planta da unidade de produção.

3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DA NITROCELULOSE

A primeira etapa da produção de nitrocelulose é a nitratação, na qual ocorre a adição do radical nítrico à molécula de celulose. A reação de formação de nitrocelulose é uma reação de esterificação reversível em equilíbrio químico. Essa operação é realizada banhando a celulose em uma mistura de ácido nítrico e ácido sulfúrico, denominada de mistura sulfonítrica. A mistura sulfonítrica precisa ser aquecida ou resfriada, dependendo do produto desejado. Para isto existe um sistema trocador de calor antes do processo de nitratação. O ácido nítrico é a fonte dos radicais nítricos e o sulfúrico é o catalisador da reação, pois retira a água gerada durante a reação.

Figura 17 - Representação da reação de nitratação da celulose, considerando a nitratação de todas as hidroxilas.



Fonte: (URBANSKY, 1983; GARCIA, 2009).

No final da reação obtemos fibras de nitrocelulose em meio a uma solução aquosa de ácido sulfúrico e nítrico. A última etapa da nitratação é a remoção das fibras por meio de centrifugação. As fibras separadas seguem adiante no processo produtivo e a solução sulfonítrica remanescente segue para colunas de destilação extrativa, onde é recuperada. Neste ponto já se tem a nitrocelulose formada e os processos seguintes são responsáveis pela determinação das características físico-químicas do produto final. Após a etapa de nitratação é que o consumo de água se intensifica no processo produtivo.

3.3.1 Pré – estabilização

A nitrocelulose, após a separação pela centrífuga, é transferida para tanques abertos com infusão de vapor direto, onde é fervida por um tempo que varia dependendo do grau de nitração. O grau de nitração é uma função do teor de nitração que é definido como a relação entre a massa de nitrogênio pelo peso molecular da molécula. No processo este teor pode variar de 10,8 até 13,50, sendo o máximo teórico igual a 14,14. Após o fervimento são feitas lavagens da massa com o objetivo de retirar a acidez. Em seguida, a nitrocelulose é bombeada para autoclaves, onde o tempo de cozimento depende do produto desejado, podendo chegar mais de 70 horas dependendo do tipo de produto desejado. Depois do cozimento, mais uma vez são realizadas lavagens contínuas para retirada de acidez das fibras.

3.3.2 Refino

Depois do processo de pré-estabilização, a massa de nitrocelulose pode ser bombeada para tanques de refino e passada por refinadores que trituram e cortam as fibras de nitrocelulose, reduzindo o seu comprimento médio. Nem todos os tipos de nitrocelulose são refinados; alguns seguem diretamente para a etapa de pós-estabilização.

3.3.3 Pós Estabilização

A nitrocelulose, após obter a granulometria ideal, é bombeada para a etapa de pós-estabilização, cujo objetivo é estabilizar quimicamente a nitrocelulose de modo a evitar decomposição e possibilidade de ignição espontânea. Dependendo do tipo de nitrocelulose desejada, mais etapas de fervimentos da nitrocelulose podem ser necessárias para ajuste de pH, através de lavagens ou através de adição de carbonato de cálcio. Esta etapa demanda grande quantidade de água fresca para lavagens da nitrocelulose. O material drenado dos tanques de pós-estabilização são enviadas ao sistema de recuperação de fibras instáveis.

3.3.4 Homogeneização

O Objetivo da homogeneização é agregar lotes do mesmo tipo de nitrocelulose e enviá-los para a etapa de separação e envasamento. Nessa etapa são realizadas as análises do produto e o controle de qualidade total.

Os homogeneizadores recebem bateladas de nitrocelulose e água, provenientes das etapas de pós-estabilização (ou diretamente da etapa de estabilização, dependendo do tipo do produto desejado), como também fibras estáveis recuperadas do sistema de recuperação de finos.

3.3.5 Separação

No sistema de separação, a massa passa por um conjunto de desarenadores antes de chegar à centrífuga, onde a nitrocelulose é separada da água de arraste. O produto é embalado em sacos plásticos, com teor de água de 25% a 30%, e encaminhado para o depósito de nitrocelulose úmida.

3.3.6 Sistema de Recuperação de Finos

No sistema de separação, a água separada pela centrífuga e pelos desarenadores, contém grande quantidade de fibras que são acumuladas em piscinas de decantação, chamados de sistema de recuperação de fibras estáveis. Essas fibras são recuperadas e bombeadas para os tanques de homogeneização.

O sistema de recuperação de fibras instáveis recebe a água proveniente da pós-estabilização e tem o objetivo recuperar as fibras de nitrocelulose instáveis perdidas nas contínuas lavagens, retornando para a etapa de pós-estabilização.

Nesses sistemas a eficiência de recuperação é de 50 % e o restante das fibras não decantadas, chamado de finos, seguem com o efluente para a estação de tratamento.

3.3.7 Alcoolização

Trata-se da última etapa do processo produtivo da nitrocelulose para uso civil, antes de ser embalada. A nitrocelulose, mantida em água ou úmida durante todo o processo produtivo, nesta etapa é desidratada e alcoolizada com etanol para comercialização. A alcoolização é realizada em centrífugas que efetuam inicialmente a remoção do excesso de água, seguida de arraste da água remanescente nas fibras com álcool e finalmente a alcoolização. Após este processo a nitrocelulose é novamente embalada e está pronta para ser encaminhada aos clientes.

3.4 PROCESSOS PERIFÉRICOS

As etapas descritas anteriormente consistem do processo principal de produção de nitrocelulose. No entanto, existem duas unidades complementares à produção de nitrocelulose: o sistema de recuperação de álcool (etanol) e o sistema de desnitração do ácido residual.

3.4.1 Sistema de recuperação de álcool

O sistema de recuperação de álcool opera concentrando o etanol residual por meio de destilação. O etanol é concentrado a 96% em uma coluna simples de destilação, com injeção direta de vapor saturado a 1,0 bar. O etanol destilado em fase vapor sai pelo topo da coluna enquanto grande parte da água é removida na forma de vinhoto.

Neste sistema têm-se, associados às colunas de destilação condensadores, trocadores de calor e resfriadores de álcool. Todos esses equipamentos são fontes consumidoras de água de resfriamento. Depois de recuperado o etanol é encaminhado a tanques de armazenamento para ser novamente utilizado no processo de desidratação e alcoolização da nitrocelulose.

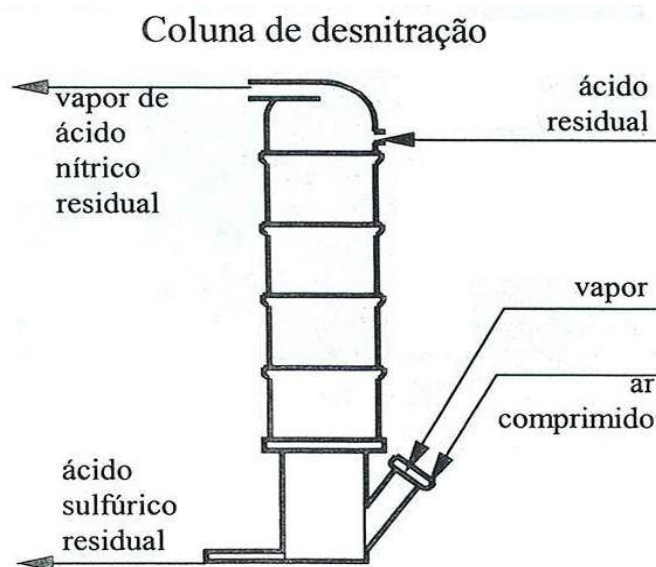
3.4.2 Desnitração do ácido residual

A empresa possui uma planta de desnitração de ácidos residuais. O ácido residual proveniente da nitração da celulose geralmente é reaproveitado para a fabricação de nova

mistura sulfonítrica. Esse ácido é recebido em tanques, aguardando a preparação de nova mistura sulfonítrica. Quando a quantidade de ácido residual excede a capacidade da oficina de armazenamento, ou quando a composição desse ácido não permite seu reaproveitamento para a produção de nova mistura sulfonítrica, ele é encaminhado à desnitração. O ácido encaminhado à desnitração passa por um filtro de ácido residual, que pode conter excesso de fibras de nitrocelulose.

A desnitração é a separação dos ácidos sulfúrico e nítrico existentes no ácido residual. A mistura é alimentada no topo de uma coluna com recheio de anéis de Raschig, de cerâmica. O vapor é injetado na base da coluna. Em contato com o vapor, a mistura ácida é aquecida, ocorrendo a vaporização do ácido nítrico (cerca de 90°C). O ácido sulfúrico absorve a água (condensação do vapor), sendo recolhido no fundo da coluna em solução a concentração de cerca de 65% em massa. Ar comprimido também pode ser injetado na coluna para arrastar e converter os óxidos de nitrogênio formados por decomposição do ácido nítrico, em ácido nítrico. A vazão de operação das colunas é em média de 370 litros por hora de ácido residual. Os ácidos residuais são aquecidos a 50°C antes de entrarem na coluna, através de serpentina imersa em banho de água quente, aquecida através de serpentina de vapor. A temperatura da base da coluna atinge em torno de 120°C, enquanto que no topo atinge cerca de 90°C. A Figura 18 representa o esquema de operação da coluna de desnitração.

Figura 18 - Esquema da coluna de desnitração.



Fonte: IMBEL/FPV.

O ácido sulfúrico residual após separação é armazenado e vendido como subproduto. O ácido nítrico é recuperado em colunas de absorção, e encaminhado para a planta de fabricação de TROTIL (trinitrotolueno), na diluição de ácido nítrico concentrado.

3.5 CONSUMO GERAL DE ÁGUA

A unidade industrial em estudo está localizada na região do Vale do Paraíba, em São Paulo. O sistema de captação de água bruta é formado por duas represas e a água bruta captada passa pela estação de tratamento da empresa. A água tratada é utilizada como água industrial nos processos produtivos, conforme Figura 19, que apresenta os consumos de água na unidade industrial. O ribeirão de onde é realizada a captação é enquadrado como Classe 2 do Decreto Estadual nº 8.468/76, como mostra a Quadro 2.

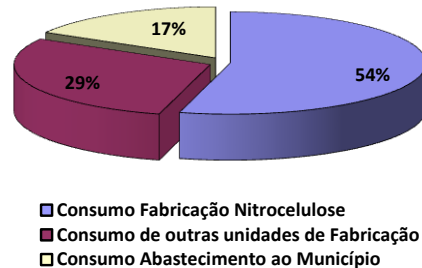
Quadro 2 – Classificação das Águas.

Grupo	Classe	Descrição
I	1	águas destinadas ao abastecimento doméstico, sem tratamento prévio ou com simples desinfecção.
II	2	águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, à irrigação de hortaliças ou plantas frutíferas e à recreação de contato primário (natação, esqui-aquático e mergulho);
III	3	águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento convencional, à preservação de peixes em geral e de outros elementos da fauna e da flora e à dessedentação de animais;
IV	4	águas destinadas ao abastecimento doméstico, após tratamento avançado, ou à navegação à harmonia paisagística, ao abastecimento industrial, à irrigação e a usos menos exigentes.

Fonte: CETESB.

Há também o fornecimento de água para consumo humano para o município, como fonte alternativa de abastecimento de água tratada. Essa água é fornecida para as vilas de casas dos funcionários da unidade industrial e algumas casas do município.

Figura19 - Representação do consumo de água na unidade industrial.



Fonte: Construção própria com dados fornecidos pela unidade de produção.

3.6 ÁGUA PARA GERAÇÃO DE VAPOR

Existe um sistema de tratamento de 6 m³/h, exclusivo para as caldeiras, onde a água passa por filtro de areia, carvão ativado e resina aniônica. Há também tratamento de desaeração térmica e química, cujo objetivo é reduzir a taxa de oxigênio dissolvido e, conseqüentemente, o potencial corrosivo da água.

Uma vez nas caldeiras, a totalidade da água desmineralizada é convertida em vapor (10 t/h) ou é purgada do sistema na forma de *blowdown* (cerca de 2 t/h). A rede de vapor é muito extensa, chegando a 5 km de tubulação, pois os pontos de consumo são bem espaçados por medidas de segurança.

O vapor produzido é encaminhado aos pontos consumidores para aquecimento. Pequena parte do consumo de vapor é de aquecimento do tipo indireto e grande parte na forma de vapor vivo. Há recuperação de parte do condensado, que retorna para o desaerador da caldeira, gerando economia de energia.

A empresa em questão possui outorga de captação de água superficial. O custo do tratamento da água é relativamente baixo, variando em torno de R\$0,60/m³, porque a água captada é de boa qualidade, necessitando de muito poucos produtos para o tratamento.

3.7 ÁGUA INDUSTRIAL

A estação de tratamento de água analisada capta água de duas represas localizadas dentro da área da fábrica e possuem as seguintes capacidades hídricas:

- 1- A maior com 49160 m³, vazão mínima de 529 m³/h e vazão máxima de 1570 m³/h, onde a vazão máxima captada é de 300m³/h;
- 2- A menor com 7.000 m³, com vazão mínima de 140 m³/h e máxima de 400 m³/h e a vazão máxima captada é de 60m³/h.

As duas represas se localizam em altitude de 20 metros acima da estação de tratamento; por isso, não há custo com bombeamento para a estação.

A água captada das barragens é transferida para a estação de tratamento, passando pelas seguintes operações:

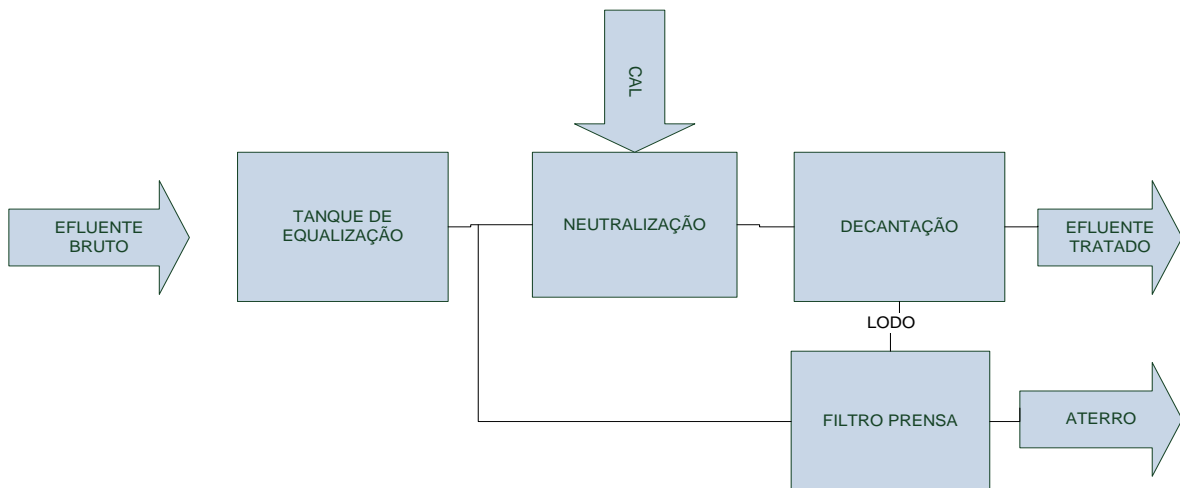
- 1- floculação;
- 2- sedimentação;
- 3- filtração.

O tratamento de água tem como objetivo atingir os parâmetros necessários para o consumo industrial, isenta de partículas que contaminem os produtos. A água destinada à utilização humana na área residencial passa por um tratamento final realizado na estação de tratamento residencial, com as operações adicionais de cloração e fluoreação.

3.8 EFLUENTE INDUSTRIAL

O complexo fabril possui um sistema de captação de efluentes por gravidade graças ao desnível topográfico do complexo, que direciona todos os efluentes para a estação de tratamento de efluentes (processo *end of pipe*), como mostrado na Figura 20.

Figura 20 - Esquema de processo da estação de tratamento de efluentes.



Fonte: Construção própria.

A Tabela 1 apresenta a caracterização média dos efluentes bruto e final da estação de tratamento de efluente.

Tabela 1- Caracterização do Efluente Bruto e Final.

Caracterização do Efluente Bruto e Final			
Parâmetro	Bruto	Final	Unidade
pH	1,35	7,3	-
Sól. Suspensos Totais	1,2	0,3	mg/L
DBO	256,5	63	mgO ₂ /L
DQO	676	208	mgO ₂ /L

Na Tabela 1 há a comparação dos parâmetros do efluente pré e pós-tratamento na estação onde nota-se apenas a neutralização do efluente e remoção dos sólidos totais. Um processo posterior de tratamento está em processo de instalação para a adequação do DBO, DQO e demais parâmetros.

4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada consiste em avaliar os processos que utilizam água na produção de nitrocelulose, verificando a causa da geração do efluente, possibilidades de racionalização do uso da água, tratamentos, reuso ou reciclagem do efluente. A metodologia aborda ainda: a identificação de cada uso de água, caracterizando a vazão, a concentração dos poluentes principais na entrada e na saída de cada processo; o estudo de possíveis reusos de águas e possíveis tratamentos para cada processo; a montagem da solução problema de cada situação que envolve possibilidade de reuso e minimização do uso de água e energia em processos.

As etapas do desenvolvimento metodológico deste estudo seguem as etapas abaixo:

- Análise do processo;
- Levantamento do consumo;
- Construção do balanço hídrico;
- Levantamento da geração de efluentes;
- Levantamento das possibilidades de racionalização e reuso
- Identificação dos ganhos econômicos com a redução e reuso;
- Levantamento das melhorias ambientais obtidas;

4.1 ANÁLISE DO PROCESSO

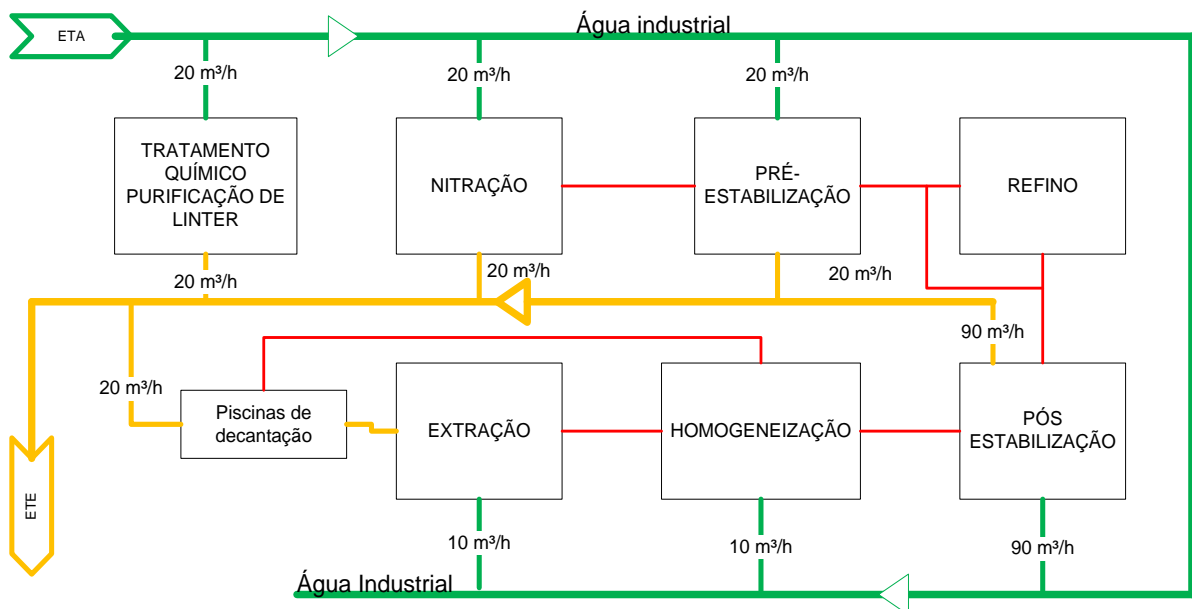
Na análise de reuso de água na indústria, uma análise completa do processo industrial envolve conhecer detalhadamente o processo produtivo, suas etapas, especificações, restrições e consumos de água, matérias primas, insumos e outras utilidades.

Neste levantamento a verificação de todos os documentos, fluxogramas de processo, procedimentos e relatórios, e a checagem com a operacionalidade real, são bases para a avaliação e verificação de possibilidades de soluções para o reuso ou minimização.

4.2 LEVANTAMENTO DO CONSUMO

Essa etapa envolve a análise detalhada do processo de produção; o levantamento de dados da planta química, como vazões e concentrações dos contaminantes nas entradas e saídas dos processos; identificação de todos os usos atuais de água no processo, e construção do diagrama de fontes e usos de água. Assim, é possível avaliar os maiores pontos de consumo e as possibilidades de reuso. A Figura 21 apresenta os dados de consumo levantados na produção de nitrocelulose a partir da purificação do linter bruto.

Figura 21 - Levantamento do consumo médio de água no processo produtivo de nitrocelulose.



Fonte: Construção própria.

4.3 LEVANTAMENTO DA GERAÇÃO DE EFLUENTE

Os efluentes gerados devem ser identificados com base em análise dos processos e operações que utilizam a água tanto como matéria prima como produto.

O Quadro 3 apresenta as características dos efluentes da produção de linter purificado referente aos componentes contaminantes, à vazão de geração do efluente e o destino do tratamento final. A vazão total de efluentes gerados no processo de produção do linter purificado é de 22 m³/h, com características e contaminantes diversos.

O Quadro 4 apresenta as características dos efluentes da produção de nitrocelulose, onde se verifica as mesmas características contaminantes, com concentrações e pH diferentes, além das características dos sólidos totais arrastados em cada corrente de lavagem.

Quadro 3 – Caracterização dos efluentes- Produção de linter purificado.

Operação	Componente	Vazão (m ³ /h)	Destino
Tratamento Químico Lixívia	Orgânicos solubilizados pH ~12	3,0	Unidade de Tratamento de Lixívia
Tratamento Químico Lavagens	Água de lavagem Ph 8 – 12	7,0	ETE – Tratamento Físico-químico
Tratamento Químico Branqueamento	Hipoclorito de Sódio 3 g/l	1,5	ETE – Tratamento Físico-químico
Tratamento Químico Lavagens	Água de lavagem Ph 8-11	6,0	ETE – Tratamento Físico-químico
Tratamento Químico Polpação	Água de lavagem Ph-7,0	3,5	ETE – Tratamento Físico-químico

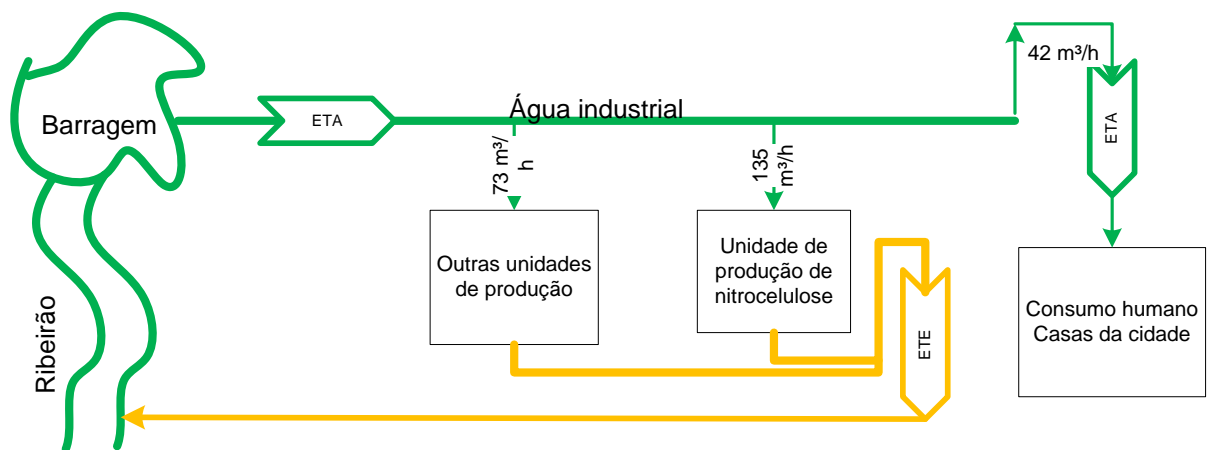
Quadro 4 – Caracterização dos efluentes- Produção de nitrocelulose.

Operação	Componente e concentração	Vazão (m ³ /h)	Destino
Nitração	Ác. Nítrico e Ác. Sulfúrico 20g/l	20	ETE – Tratamento Físico-químico
Fervimento sem pressão	Ác. Nítrico e Ác. Sulfúrico 3 a 5 g/l	10	ETE – Tratamento Físico-químico
Fervimento com pressão	Ác. Nítrico e Ác. Sulfúrico Ph~2,0	10	ETE – Tratamento Físico-químico
Fervimento Alcalino	Ác. Nítrico e Ác. Sulfúrico pH 2,0 ~7,0	90	ETE – Tratamento Físico-químico
Extração e Homogeneização	Ác. Nítrico e Ác. Sulfúrico pH 7,0	20	ETE – Tratamento Físico-químico

4.4 CONSTRUÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO

A Figura 22 apresenta o balanço hídrico geral da água industrial e água para consumo humano da unidade fabril, onde se verifica que o consumo geral de água é de 250 m³/h.

Figura 22 - Balanço hídrico geral da unidade fabril.

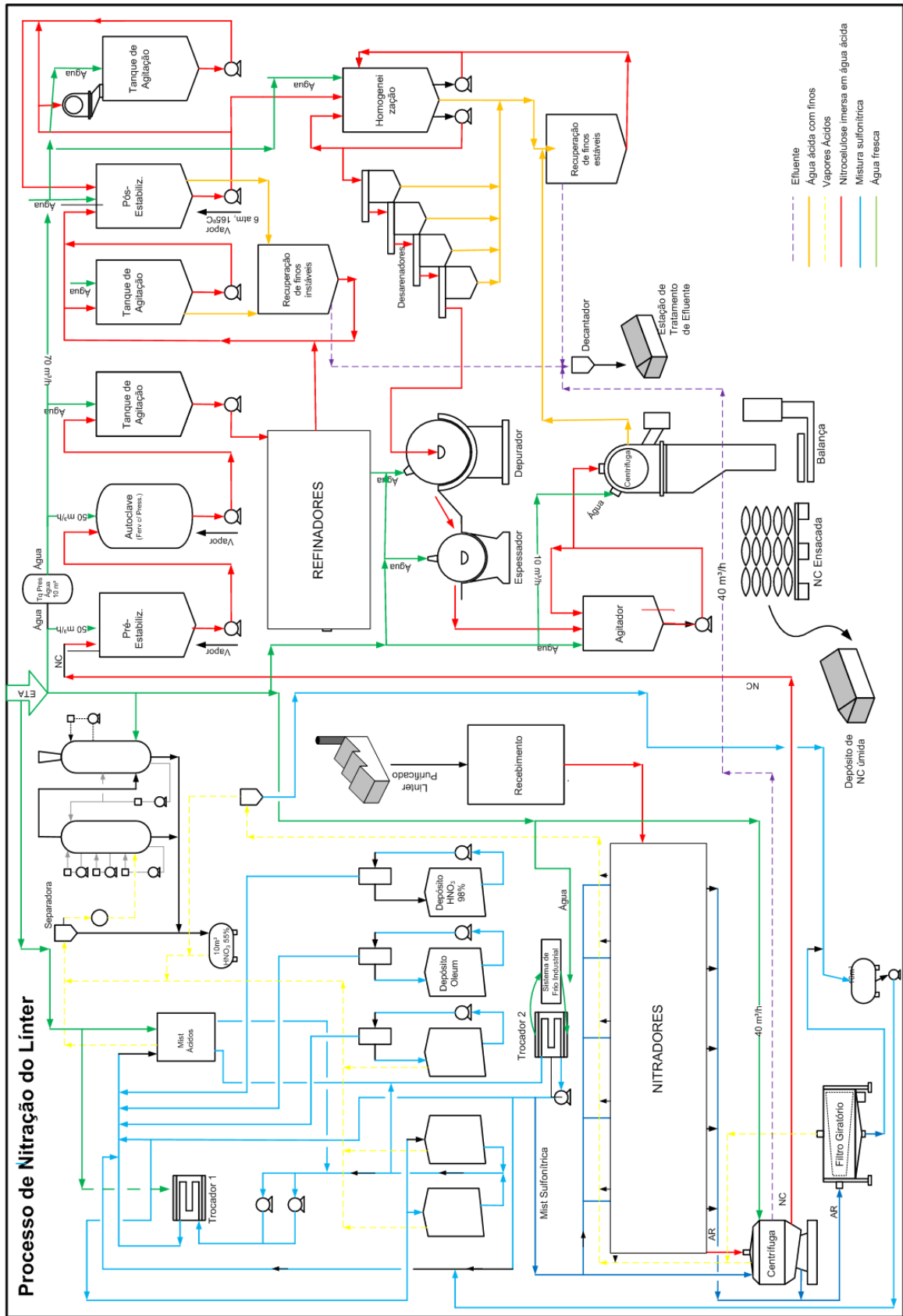


Fonte: Construção própria.

A unidade de produção de nitrocelulose representa o maior consumo da unidade fabril e, dessa forma, é o foco principal de possibilidades de reuso e minimização de consumo. A

Figura 23 apresenta o balanço hídrico detalhado da planta de produção de nitrocelulose, mostrando as correntes principais de água e efluente. São apresentadas também as vazões de cada corrente dos principais pontos consumidores de água e geradores de efluentes.

Figura 23- Balanço hídrico detalhado da unidade de nitrocelulose.



Fonte: Construção própria.

O balanço hídrico da unidade de nitrocelulose apresentado na figura 23 é base de dados iniciais para a análise de viabilidade técnica de reaproveitamento ou minimização do consumo de água. Outro dado importante é a caracterização dos efluentes gerados em cada etapa para verificar a possibilidade de isolamento desta corrente para reuso direto em outra etapa onde a composição encontrada não fosse um parâmetro limitante. Entretanto a caracterização não foi possível devido ao grande número de diferentes tipos de nitrocelulose produzidas ao simultaneamente em etapas distintas do processo. Dessa forma, não há uma característica constante nos efluentes de cada etapa, que depende do tipo de nitrocelulose processada.

Com base no balanço hídrico detalhado, é possível avaliar alterações de processo que propiciem redução no consumo e reuso de água. As possibilidades avaliadas e as propostas elaboradas seguem descritas neste capítulo.

4.5 POSSIBILIDADES DE RACIONALIZAÇÃO E REUSO

Racionalizar o uso da água é uma das prioridades de um programa de gerenciamento de recursos hídricos. As principais ações de prevenção da poluição, tendo em vista a redução do consumo de água e a geração de efluentes, são: eliminar desperdícios, mudar procedimentos operacionais, treinar operadores, substituir equipamentos e alterar processos de produção.

No caso de reuso, devem ser levados em consideração os investimentos necessários para adequar as características dos efluentes aos requisitos de qualidade exigidos para uso e à vazão a ser tratada. A prática de reuso pode ser implantada de duas maneiras distintas: reuso direto de efluentes e reuso e/ou reciclagem de efluentes tratados. Muitos casos exigem alterações nos procedimentos de coleta e armazenagem de efluentes. No caso de reuso de efluentes tratados, uma das principais preocupações é o processo de concentração de contaminantes específicos, que reduz o potencial de reuso e pode comprometer as atividades que utilizarão essa água. De modo geral, a implantação de qualquer prática de reuso de água ou efluente deve considerar limitações técnicas, operacionais e econômicas.

Um dos primeiros procedimentos utilizados em reuso de água na indústria na geração de vapor é a recuperação do próprio condensado gerado nos pontos consumidores. O vapor é o fluido de aquecimento mais difundido na indústria, onde na maioria de seus usos tem como função exclusiva de aquecimento de reatores, digestores, vasos ou linhas, sendo de forma direta ou indireta. O consumo de combustível em um queimador gera calor, com aquecimento

da água, gerando vapor que é enviado quente aos pontos de consumo para utilização nos equipamentos ou processos. Em casos de consumo de vapor em equipamentos de troca indireta, há a geração de condensado que normalmente apresenta elevada pureza, pois trata-se de água desmineralizada por processo de destilação por vaporização na caldeira e condensada no ponto de consumo.

A recuperação de condensado consiste em reutilizar o vapor consumido na produção novamente em vapor, ao invés do uso de água fresca desmineralizada nas caldeiras, onde há também o aproveitamento de energia térmica, implicando em economia de combustível da caldeira.

Caldeiras são consumidores exigentes, referente à qualidade da água utilizada na geração de vapor, sendo assim a qualidade do condensado deve ser evidenciada antes de seu reuso. A presença de gases dissolvidos, principalmente oxigênio, águas ácidas e águas com concentração de cloretos não devem ser alimentadas em caldeiras, pois promovem corrosão nos tubos de aquecimento, como também águas com elevada dureza (presença de carbonatos) devem ser evitados, pois podem incrustar os tubos, causando deficiência na troca térmica, superaquecimento e até ruptura dos tubos, causando assim risco de acidentes e explosão do equipamento.

O condensado é gerado em seu ponto de saturação (quente) e dessa forma a captação do condensado no ponto de consumo e encaminhamento ao desaerador da caldeira, gera economia de água e reaproveitamento da energia térmica, o que implica em economia de combustível na caldeira. A empresa analisada neste estudo de caso possui sistema de captação e recuperação de condensado em parte da rede de distribuição de vapor, que como relatado anteriormente é extensa, devido a longas distâncias entre os pontos consumidores e o sistema centralizado de geração de vapor. Dessa forma esta possibilidade de reuso não faz parte das oportunidades analisadas neste trabalho.

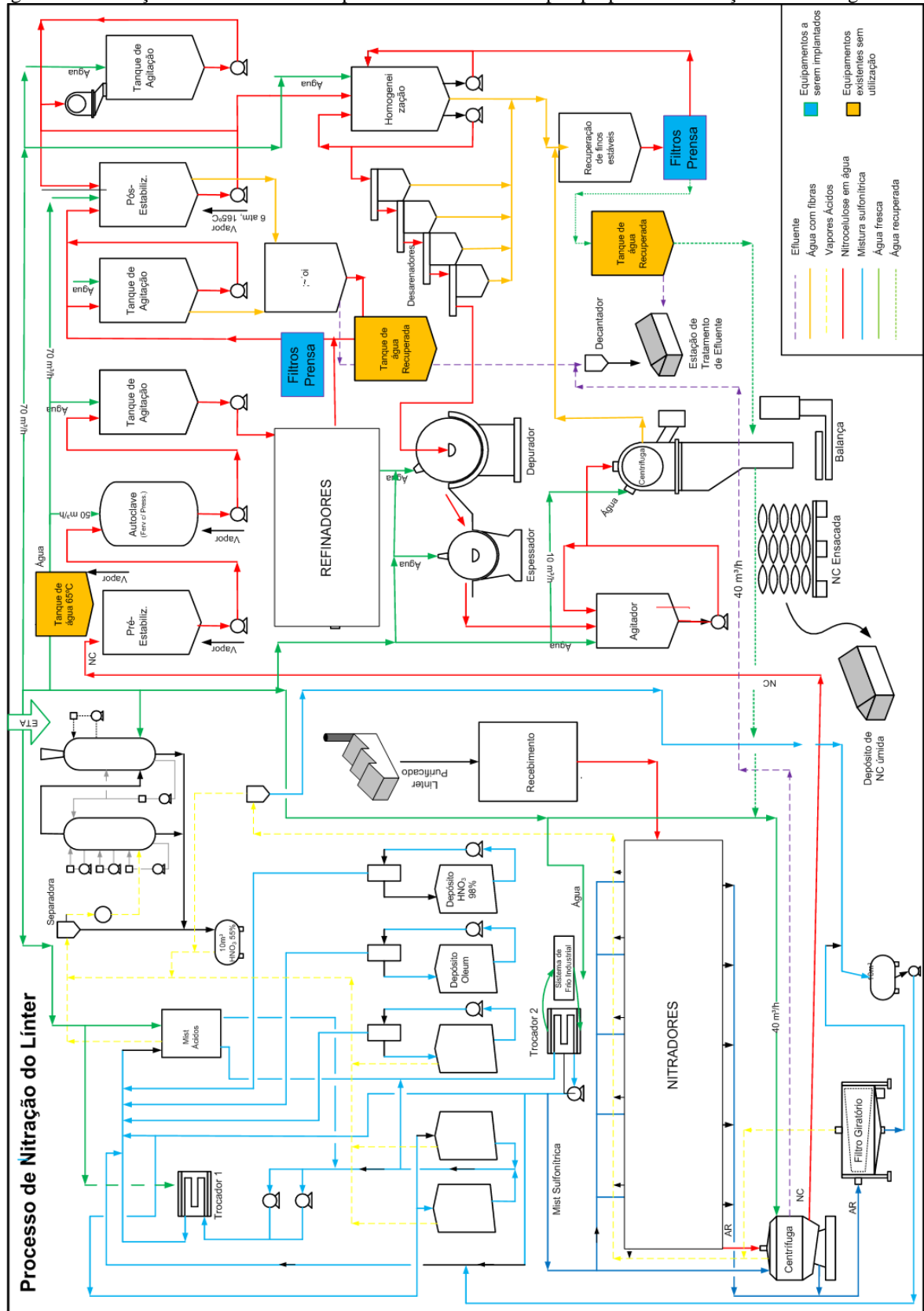
5 ALTERNATIVAS DE REUSO

Neste item, são descritas e avaliadas as propostas de modificação no processo produtivo de nitrocelulose que propiciam reduções no consumo de água, energia e na geração de efluentes.

A análise de reuso e minimização de consumo da água da unidade de produção de nitrocelulose foi possível devido a existência de levantamento de dados do processo e medidas de vazão de consumo de água da unidade. Medidores de vazão foram instalados há menos de 2 anos com o intuito de medição para melhorias não apenas de processo, mas de redução do consumo de água e da geração de efluentes, já que o tratamento, representa atualmente um grande problema junto aos órgãos ambientais.

A Figura 24 apresenta o balanço hídrico com as modificações propostas neste trabalho visando reuso de água. Os equipamentos a serem implantados pela fábrica (projetos de melhorias já em andamento) estão destacados em azul. Os equipamentos destacados na cor laranja são equipamentos já existentes fora de uso, que serão adaptados para as propostas de redução do consumo de água e energia na planta.

Figura 24 - Balanço hídrico detalhado da planta de nitrocelulose após propostas de redução/reuso de água.



Fonte: Construção própria.

A unidade de produção é da década de 1970 e os motores instalados estão ainda em operação, foram construídos especificamente para a planta industrial. Os motores possuem eixos diretos, sem sistema de acoplamento. As carcaças dos motores são reforçadas para aguentar o ambiente agressivo. O ambiente é corrosivo devido os vapores ácidos, juntamente com o risco de deflagração de partículas de nitrocelulose que podem estar depositadas próximas aos motores, impossibilitam a medição dos motores em funcionamento. Vários trechos do sistema de cabeamento já foram substituídos. Os cabos antigos foram apenas desativados e ainda permanecem nos dutos e calhas, impedindo a ampliação da rede por falta de espaço, como também a substituição por cabos de maior isolamento caso fossem possíveis a instalação de inversores de frequência.

O ambiente extremamente agressivo frustrou a tentativa da unidade de produção na instalação de *soft-starters* nos motores dos agitadores dos tanques de ácidos, que acabavam tendo as placas corroídas mesmo com sistemas de isolamento.

Existe um alto potencial para redução de consumo energético na unidade fabril, mas a falta de medições e dados confiáveis do processo na planta de produção, impossibilitam uma análise de eficiência energética mais detalhada. Diante destas particularidades da planta, outras propostas de reuso foram elencadas.

As propostas descritas estão associadas a alterações de processo nas seguintes áreas/processos: tratamento de água da unidade fabril, processos de pré-estabilização e pós-estabilização, processo de homogeneização e processo de recuperação de finos (instáveis e estáveis) da unidade de produção de nitrocelulose.

A proposta de reuso de água e energia na estação de tratamento de água visa não apenas redução do consumo como atendimento à exigência técnica do órgão ambiental fiscalizador, referente ao despejo de efluente da estação de tratamento de água no córrego.

A proposta para alteração nos processos de pré-estabilização e pós-estabilização se justifica principalmente por representarem o maior consumo de água do processo na produção de nitrocelulose. O reuso da água proveniente das etapas de homogeneização e do sistema de recuperação de finos estáveis, para utilização como água de transporte da centrífuga de nitrção.

5.1 TRATAMENTO DE ÁGUA DA UNIDADE FABRIL

A estação de tratamento de água tem capacidade de tratamento de 320 m³/h de água. A água captada da barragem é transferida para a estação de tratamento de água onde são feitas as operações de floculação, sedimentação e filtração. O tratamento de água tem como objetivo atingir os parâmetros necessários para o consumo industrial isenta de partículas que contaminem os produtos.

O Quadro 5 compara os parâmetros da água bruta e da água industrial tratada. A quantidade de cloretos não tem alteração significativa porque na água industrial não ocorre efetiva cloração. Apenas uma pequena quantidade é adicionada para manter o controle de algas e microorganismos na estação de tratamento de água.

Quadro 5 - Parâmetros médios de tratamento da água industrial.

Água Bruta	Parâmetro	Água Tratada	Parâmetro
Cor (uH)	10	Cor (uH)	2
Turbidez (uT)	15	Turbidez (uT)	1
Matéria Orgânica (ppm)	6	Matéria Orgânica (ppm)	2,1
Fe (ppm)	1,6	Fe (ppm)	0,05
pH	5,8	pH	6,2
Condutividade (µS)	350	Condutividade (µS)	500
Cloretos (ppm)	-	Cloretos (ppm)	0,08

Fonte: Construção própria.

A água destinada à utilização humana na área residencial passa por um tratamento final com dosagem de cloro e flúor realizado na estação de tratamento residencial, na tubulação da saída da empresa, conforme legislação de água para consumo humano.

Uma das etapas de operação da estação de tratamento de água é o processo de retrolavagem dos filtros. A água utilizada na retrolavagem é a água tratada armazenada no reservatório ao final da estação. A lavagem do filtro se processa com o bombeamento de água tratada do reservatório de 150 m³. Atualmente, o volume é despejado diretamente no córrego.

A água captada pela estação de tratamento de água tem classificação 2, necessitando de poucos insumos para o tratamento da água industrial.

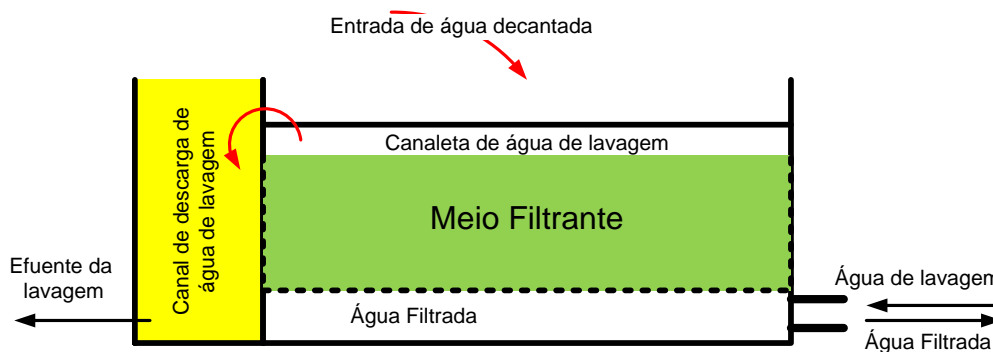
Os parâmetros do efluente da retrolavagem são apresentados na Quadro 6. A água retirada no processo de retrolavagem (150 m³) possui baixos parâmetros de contaminação e poucos sólidos suspensos, estando dessa forma totalmente tratável na própria estação de tratamento.

Quadro 6 – Parâmetros do Efluente da Retrolavagem dos filtros da estação de tratamento de água da unidade fabril.

Parâmetros			
COR (UC)	Turbidez (UT)	pH	Sólidos Suspensos (mg/litro)
10	30	6,5	3,5

A Figura 25 apresenta os compartimentos do filtro descendente da estação, mostrando o canal de descarga do efluente da estação de tratamento de água.

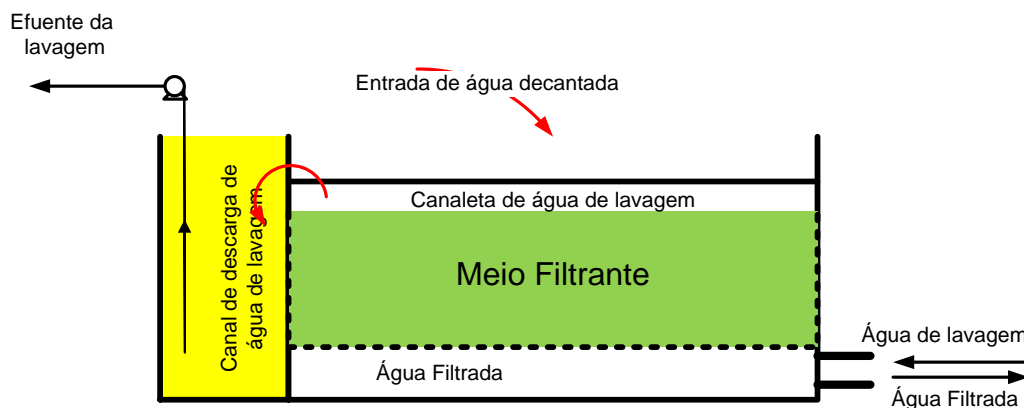
Figura 25 - Esquema de funcionamento da lavagem do filtro da estação de tratamento de água.



Fonte: Construção própria

O volume total diário de efluentes (150 m³) pode retornar ao início do processo de tratamento, através da instalação de sistema de bombeamento no canal de descarga de água de lavagem dos filtros. Este canal de descarga de água de lavagem do filtro, que possui uma comporta de escoamento, com capacidade de 10 m³ de efluente. A tubulação de bombeamento, encaminhando o efluente para a entrada da estação de tratamento de água, juntamente com a água bruta para o tratamento. A Figura 26 retrata a proposta da implantação do sistema de reuso da água de lavagem do filtro.

Figura 26 - Proposta de reuso de água de lavagem do filtro da estação de tratamento de água.



Fonte: Construção própria

O cálculo de especificação do equipamento a ser instalado segue referente aos seguintes dados na Tabela 2:

Tabela 2 - Estimativa preliminar de custo – reuso de água e eficiência energética na estação de tratamento de água.

Equipamento	Custo (R\$)
Tubulação e mangotes	R\$ 5.000,00
Bomba submersa 100 m ³ /h	R\$ 38.000,00
Montagem	R\$ 30.000,00
TOTAL	R\$73.000,00

O custo total estimado do projeto é de R\$73.000,00, onde este custo implica em reuso de 6,25m³/h na operação da estação de tratamento de água. O retorno do investimento da proposta de reuso da água não pode ser analisada apenas de forma econômica direta. O retorno de investimento é em 5 anos e 4 meses. O maior retorno é ambiental, já que se trata de uma exigência técnica do órgão ambiental.

Na distribuição da água tratada são utilizadas motobombas que enviam a água para um tanque de 800m³ a 62m de altura; deste, é distribuída por gravidade para a área industrial e área residencial. Assim foi feita uma análise no dimensionamento das bombas de envio ao tanque elevado e dos motores nelas utilizados.

Foi realizada análise de eficiência energética dos motores de indução utilizados na estação de tratamento de água, pois são antigos e possuem consumo elevado comparado a motores de indução trifásicos de alto rendimento.

Os motores utilizados foram analisados estão relacionados na Tabela 3.

Tabela 3 – Listagem de Motores existentes na Estação de Tratamento de Água – ETA.

Quantidade	Potência (CV)	Nº Polos	RPM	Tensão Alim. (V)	Frequência (Hz)	C Placa (A)
2	0,75	2	3510	440	60	1,5
2	0,5	2	3520	440	60	-
4	0,33	4	1720	440	60	-
1	75	4	1885	440	60	103
3	200	4	1780	440	60	235
1	12,5	4	1720	440	60	17
2	3	6	1140	440	60	5,5
1	1,5	6	1130	440	60	3

Todos os motores instalados são do mesmo fabricante, WEG Equipamentos Elétricos S.A., e mesmo ano de fabricação, 1981. Diante da possibilidade da troca ser efetuada pela mesma marca e modelos, os valores dos motores atuais foram pesquisados com representantes do fabricante e atualizados para este estudo. Foi analisado o ganho econômico anual da energia consumida em kWh e em reais, através da equação:

Cálculo do retorno, em anos:

$$Retorno = \frac{DR\$}{0,736} * CV * N^{\circ}h * R\$/kWh * \left(\frac{100}{\eta} - \frac{100}{\eta_{AR}} \right) \quad (6)$$

Onde,

DR\$ - Diferença de custos entre o motor standard e o alto rendimento;

CV – Potência do motor em “CV”;

N^oh – Número de horas em operação do motor, por “1”ano;

R\$/kWh – Custo médio do kWh da empresa;

η – Rendimento do motor antigo (%);

η_{AR} – Rendimento do motor de alto rendimento (%);

O total do investimento em simples troca dos motores existentes por motores 2012 de alto rendimento ficou estimado em R\$ 100.000,00 e o demonstrativo de ganho por motor, admitindo custo médio de R\$ 0,31 por kWh, segue na Tabela 4:

Tabela 4 – Relação de economia de energia e em reais por ano.

MOTOR (CV)	Ganho em kWh/ano	Ganho em R\$/ano
200	14856	5.125,00
12,5	7407	2.555,00
75	492	170,00
3	3752	1.295,00
0,33	326	112,00
0,5	635	219,00
1,5	1364	471,00
0,75	787	271,00

O total de economia anual de energia foi de aproximadamente 68MWh, equivalente a cerca de R\$ 24.000,00 por ano. O retorno do investimento é estimado em 4 anos e 2 meses. Todos os valores foram calculados apenas levando em conta a substituição dos motores atuais por motores novos de alto rendimento, de acordo com o valor atual de mercado.

Os sistemas motobombas utilizados para alimentação do reservatório foram analisados, como também a existência de perda de carga na tubulação. O tanque elevado está a 62 metros de altura da estação de tratamento de água.

A distância total é de 185m de tubulação de ferro fundido de 16” de diâmetro. Calculando a potência das bombas, assumindo perda de carga de 10% nos 62 metros e calculando a potência do motor necessário. As bombas centrífugas utilizadas com motores de potência de 200 CV dimensionadas para vazão de 400m³/h, operam apenas atualmente 8 horas/dia. Dessa forma, um sistema motobomba de menor vazão poderia ter maior tempo de utilização, e possivelmente, menor tempo de retorno do investimento com a economia de energia. A determinação da vazão mínima necessária de água tratada está na sazonalidade de operação das várias unidades de produção, que no sistema atual possui picos de consumo que demandam abastecimento imediato no reservatório de água tratada, por esta razão, a hipótese de utilizar sistema de bombeamento de menor vazão que opere continuamente, não foi

levantada. As medições ou estimativas de produção são baseadas nas horas de funcionamento das bombas centrífugas atuais e em relação direta com a capacidade nominal delas, sem considerar desgastes e perdas do sistema moto bomba com o passar dos 30 anos da instalação. Por isso pode ser que o consumo médio seja de uma bomba de menor vazão.

5.2 COMPLEMENTO À RECUPERAÇÃO DE FINOS

Com base no balanço hídrico, nas caracterizações das correntes e no conhecimento do processo produtivo de Nitrocelulose é possível avaliar o consumo de água na unidade e procurar por melhorias.

A primeira alternativa a ser apresentada trata da modificação de um projeto já em fase de implantação pela empresa, denominado “RECUPERAÇÃO DE FIBRAS DE NITROCELULOSE”. O projeto original trata da instalação da tecnologia de filtragem por filtros prensa nos sistemas de recuperação de fibras estáveis e instáveis.

O objetivo deste projeto é potencializar a recuperação das fibras de produto que por ventura foram perdidas na etapa de desidratação da nitrocelulose e trazer melhorias operacionais à área de recuperação de finos.

Segue uma breve explanação sobre o projeto original e sobre a modificação proposta. A nitrocelulose é transportada em água até a etapa de homogeneização e posteriormente à centrífuga de extração. A água residual removida contém uma quantidade grande de finos de nitrocelulose. Atualmente esta água contendo grande quantidade de finos é encaminhada às piscinas de decantação do sistema de recuperação de finos. As piscinas de recuperação de finos apresentam baixo rendimento, somente 50% dos finos são recuperados e a concepção do sistema atual gera um problema de disponibilidade de tanques homogeneizadores. Os finos recuperados, são uma mistura de tipos diferentes de fibras, são considerados um produto de baixo valor agregado e necessitam de um homogeneizador dedicado.

O projeto “RECUPERAÇÃO DE FIBRAS DE NITROCELULOSE” visa captar algumas das correntes de água residual oriundas das centrífugas de separação, e águas da homogeneização e as armazenar em tanques pulmão dedicados e utilizar filtros prensa ou vela com retro-lavagem a ar para separar e recuperar as fibras de nitrocelulose. Deste modo, as fibras podem ser recuperadas sem que haja mistura de tipos diferentes, e podem retornar direto ao homogeneizador de origem. O projeto em que está sendo executado

pela empresa, visa somente à recuperação das fibras. A água removida nos filtros será desprezada junto ao efluente.

Em complemento ao projeto “RECUPERAÇÃO DE FIBRAS DE NITROCELULOSE”, a proposta deste item é que a água removida seja encaminhada a um tanque de água recuperada, ao invés de integrar ao efluente, permitindo o seu reuso como água de transporte nas centrífugas.

A proposta deste item é ampliar o projeto de recuperação de fibras para que contemple o reuso da água. Nesta proposta a água seria enviada a um tanque ao invés de ir para a rede coletora de efluentes. A perspectiva de ganho de economia seria de aproximadamente 40 m³/h, se utilizada nas duas centrífugas.

Propõe - se instalar válvulas três vias nas linhas de envio da água à rede de efluente (chicana) dando a opção operacional de encaminhar a água residual a um tanque de água recuperada e/ou à rede de efluente.

Os filtros devem ser instalados no segundo andar do prédio, de modo a fazer com que a água escoe por gravidade até o tanque. Por outro lado, deve ser previsto um sistema de bombeamento para distribuição da água aos consumidores. Há ainda a possibilidade de utilização de um tanque de 50 m³ existente dentro da planta para servir de reservatório, evitando o custo de construção do tanque. Neste caso há necessidade de bombeamento também para o envio da água para o armazenamento. A vazão de água a ser disponibilizada para reuso será de 20 m³/h. Uma possível utilização desta água é na área de alcoolização lavagem da área, lavagem dos equipamentos e outros.

Além do uso na alcoolização, pode-se prever a utilização desta água para realizar o transporte e o manuseio dos finos, ou seja, para bombear as fibras dos filtros-prensa e dos concentradores até a etapa de homogeneização, seja na área dos filtros-prensa, seja nos concentradores ou na área das bacias de finos.

Foi realizada uma estimativa preliminar de custo de instalação do sistema acima proposto. Estima-se o custo total do projeto em R\$ 240 mil, sendo este apenas uma adaptação do custo do projeto original de reaproveitamento dos finos, que é de R\$ 2 milhões de reais.

Baseado em balanços financeiros da empresa, que levam em consideração os custos variáveis da estação de tratamento de água, os custos variáveis da estação de tratamento de efluentes industriais, os custos de manutenção dos sistemas e os custos associados à depreciação das instalações, chega-se a conclusão que para cada m³ reduzido no consumo

de água, há uma economia de R\$2,97 (valor válido para o ano de 2012).

O sistema proposto tem capacidade máxima de recuperação de 40 m³/h de água, logo, a economia máxima em potencial associada a esta alternativa é de R\$59,80/h ou R\$ 520.000,00/ano.

Para calcular tempo de retorno do projeto, assumiu-se um coeficiente de segurança de 50%, ou seja, somente metade da água disponível seria reusada e o restante, seria desprezado. Esta situação deve-se à possível ausência de demanda nos pontos consumidores ou por indisponibilidade do sistema de reuso. Logo:

$$\text{ECONOMIA (R\$)} = 59,80 \text{ (R\$/h)} \times 24 \text{ (h/dia)} \times 365 \text{ (dia/ano)} \quad (7)$$

$$\text{ECONOMIA POTENCIAL} = \text{R\$ } 520.344,00/\text{ano}$$

$$\text{ECONOMIA ASSUMIDA} = 0,5 \times \text{ECONOMIA POTENCIAL}$$

$$\text{ECONOMIA ASSUMIDA} = \text{R\$ } 260.172,00/\text{ano.}$$

Comparando-se as estimativas de custo e de economia associados ao projeto, nota-se que o investimento é recuperado em seis meses.

Do ponto de vista ambiental, a alternativa propõe uma redução de até 10% do consumo total de água da unidade de fabricação, o que implica também na redução de geração de lodo associada ao processo de tratamento efluente.

5.3 UTILIZAÇÃO DE ÁGUA QUENTE NAS LAVAGENS DE PRÉ E PÓS-ESTABILIZAÇÃO

A terceira proposta é chamada “aquecimento das águas de lavagens da etapa de estabilização”. A estabilização é a etapa de cozimento das fibras de nitrocelulose responsável por determinar as características de viscosidade e de estabilidade do produto.

Uma característica comum a todos os cozimentos é que eles foram realizados com injeção direta de vapor. Todo o vapor consumido é borbulhado em solução, assim o vapor é integrado à mistura. Quando a estabilização é finalizada, os digestores são drenados e o vapor que foi incorporado à mistura é perdido no efluente.

A injeção de vapor vivo tem como função somente o aquecimento do meio. Ele não participa de reações e não há nenhum tipo fenômeno de transporte envolvido, ou seja, desde que haja aquecimento nos vasos a presença do vapor vivo não seria necessária, mas por segurança, referente à secagem de nitrocelulose em algumas partes do sistema, aumentando o risco de combustão espontânea da nitrocelulose seca acumulada, a hipótese de aquecimento indireto dos tanques não foi considerada. Por outro lado, há informações

relativas à segurança de processo que devem ser cuidadosamente avaliadas. Conforme ressaltado anteriormente, a nitrocelulose é um composto de fácil ignição quando em meio seco. É extremamente não recomendável manter nitrocelulose seca, ainda mais em ambientes aquecidos. Trocadores de placas, vasos serpentinados e qualquer outro tipo de equipamento que permita o acúmulo de nitrocelulose em cantos ou a sua deposição em superfícies não são recomendáveis.

O objetivo deste item é avaliar a alternativa de substituição da água de lavagem dos tanques digestores, que hoje operam com água fresca que possui baixa propriedade de arraste da acidez, por água aquecida que possui maior capacidade de remoção da acidez das fibras. Vale ressaltar que o objetivo do trabalho não é avaliar uma reposição imediata dos ativos, mesmo por que tal alternativa teria um investimento tão elevado que inviabilizaria sua implantação, e sim avaliar a possibilidade de substituição gradativa dos ativos, quando estes chegarem ao final de sua vida útil.

A utilização de um tanque serpentinado para o aquecimento de água para as etapas de lavagens na estabilização da nitrocelulose, ressalta o foco deste trabalho que é indicar possibilidades factíveis de reuso de água, indicar seus benefícios, apontar as limitações e os riscos envolvidos nas propostas. Pode-se prever, por exemplo, um sistema automatizado que atue na vazão de vapor para controlar a temperatura do sistema, pode-se prever um intertravamento que corte a alimentação de vapor caso a água do tanque de aquecimento atinja uma dada temperatura e/ou pode-se prever um intertravamento que não habilite a alimentação de vapor caso não seja identificado nível de água no tanque. Experimentos em laboratório apontam que com o aumento da temperatura de 25°C para uma temperatura entre 50°C e 70 °C, o arraste de acidez (objetivo das frequentes lavagens do processo de estabilização) seriam minimizadas de 20 lavagens de 8m³ por tanque, para máximo de 5 lavagens por tanque, o que resultaria em economia de aproximadamente 1900m³/dia de água fresca. Diante destes dados promissores de economia, os cálculos desta implantação foram levantados.

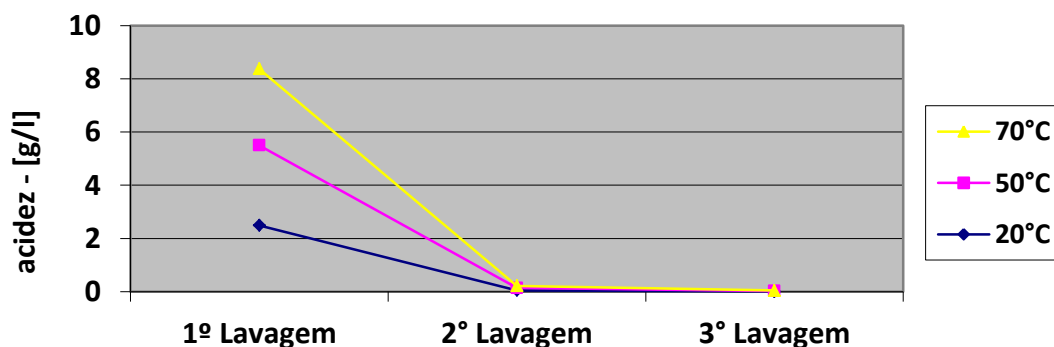
A metodologia das análises nas amostras retiradas em cada etapa seguiu as seguintes etapas:

- Determinação da porcentagem em volume da massa de nitrocelulose e do líquido da amostra padrão retirada do tanque;
- Separação da parte sólida drenada em 3 amostras iguais;
- Cozimento das amostras com vapor por 6 horas;

- Lavagem das amostras com água nas temperaturas de 25°C; 50°C e 70°C;
- Titulação de neutralização das águas de lavagem com solução de hidróxido de sódio (NaOH), 0,5N de concentração, fator de correção $f = 0,985$;
- Cálculo da concentração de ácido retirada da amostra;

A Figura 27 apresenta os resultados das análises de utilização de água quente na remoção de acidez da mistura de nitrocelulose de tipo 1/8", realizada em três temperaturas na etapa de fervimento ácido da pré-estabilização, onde foi utilizada a mesma proporção de drenagem dos tanques de fervimento ácido. São efetuadas 3 lavagens para remoção do excesso de acidez, antes do início do fervimento. Após o fervimento ácido, são realizadas mais 3 lavagens antes do envio para os tanques de fervimento com pressão.

Figura 27 - Lavagens no Fervimento Ácido.



Fonte: Construção própria

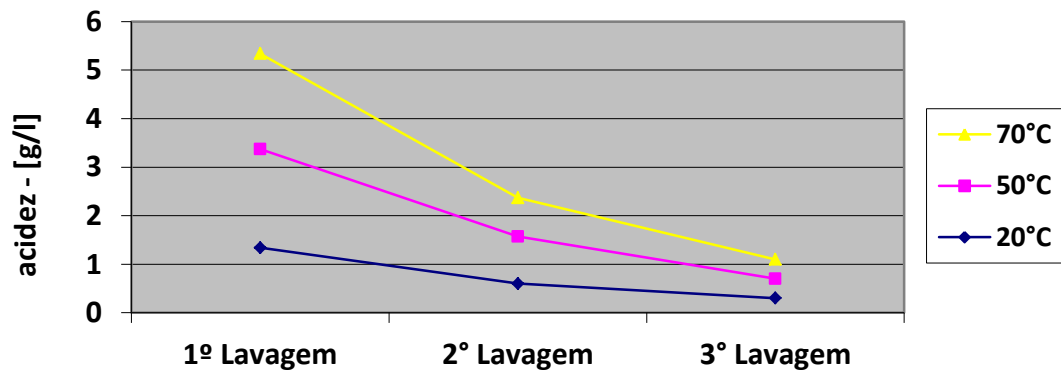
Apesar de parecer discreta a diferença de arraste de acidez das fibras de nitrocelulose, o volume total utilizado por tanque em cada lavagem é de 8 m³, sendo o total de 6 tanques por etapa, o volume total é de 48 m³ de água utilizados por lavagem. O número total de lavagens por etapa varia de acordo com o tipo de nitrocelulose desejada, e a etapa do processo.

De acordo com a Figura 27, durante o experimento há remoção de maior acidez quando utilizada água a 50°C nas lavagens realizadas antes do fervimento ácido. Em relação à utilização de água a 20°C, a utilização de água aquecida obteve na 1ª lavagem, 17% de maior remoção de acidez, na 2ª lavagem, 45% maior remoção de acidez e na 3ª lavagem, 77% mais remoção de acidez das fibras de nitrocelulose.

A Figura 28 apresenta os resultados das análises de utilização de água quente na

remoção de acidez da mistura de nitrocelulose de tipo 1/8", realizada em três temperaturas na etapa de fervimento com pressão (autoclave) da pré-estabilização.

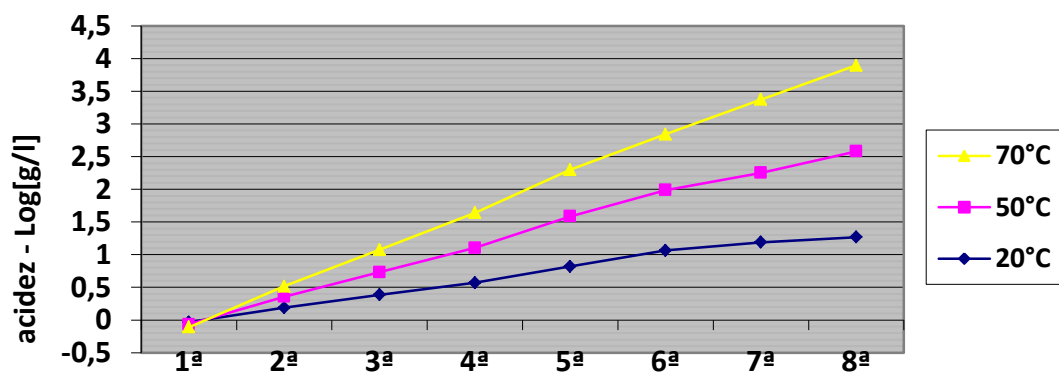
Figura 28 – Lavagens no Fervimento com Pressão (Autoclave).



Fonte: Construção própria

A etapa de Estabilização – Fervimento Alcalino é a etapa que tem o maior número de lavagens, podendo chegar a 20 lavagens até obtenção de Ph 6,5 na mistura. A Figura 29 representa o experimento realizado com 8 lavagens utilizando água quente.

Figura 29 - Lavagem fervimento alcalino.



Fonte: Construção própria

Apesar da diferença entre a utilização das lavagens a 25°C e 70°C serem em média de 12% de maior arraste de acidez da nitrocelulose, a maior vantagem da utilização da água

quente, está na rápida decantação da nitrocelulose com o uso de água quente. Normalmente, as lavagens são realizadas a cada 2 horas, tempo necessário para que as fibras de nitrocelulose decantem até que possa se fazer nova drenagem do volume do tanque de 20 m³ até 12m³. A figura 30 do teste realizado na planta, demonstra que a utilização da água a 50°C e à 70°C, resultaram na decantação rápida da nitrocelulose, abrindo a possibilidade de diminuição do tempo de lavagens de até 30 horas (dependendo do tipo de NC a ser produzida), para até 12 horas, na execução de 15 lavagens.

Figura 30 - Teste de lavagem da NC – Etapa de Fervimento Alcalino.



Fonte: Construção própria.

Na Figura 30 pode-se perceber a diferença nítida de decantação que ocorre com a utilização de água com temperatura acima de 50°C. Dessa forma a Tabela 5, apresenta a possibilidade do aumento da drenagem dos tanques de 8m³ por lavagem para 12 m³ por lavagem.

Tabela 5 – Comparação de variação de concentração.

Nº Lavagem	Conc. drenagem de 8m ³ por lavagem	Conc. drenagem de 12m ³ por lavagem
0	1	1
1	0,6	0,4
2	0,36	0,16
3	0,216	0,06
4	0,1296	0,025
5	0,078	0,01
6	0,047	0,004
7	0,027	-
8	0,017	-
9	0,01	-
10	0,006	-

Utilizando água acima de 50°C na etapa de lavagens após fervimento alcalino, e aumentando a drenagem de 8m³ para 12 m³, o número de lavagens reduzirá pela metade, com 5 lavagens de 12m³, atingiu a mesma concentração de 10 lavagens de 8m³, reduzindo também o tempo de lavagem em até 50%. A redução do consumo de água será de 12% devido a maior arraste da acidez pela água quente. O aumento do uso de vapor no aquecimento da água, refletirá em aumento de produtividade devido a redução do tempo de decantação.

5.4 DIMENSIONAMENTO DO TANQUE DE ÁGUA QUENTE

A construção de um tanque com aquecimento para utilização nas lavagens dos tanques digestores, não é necessário, pois dentro da unidade de fabricação existe um tanque de 50 m³, com isolamento térmico que atualmente não está em uso. Este tanque necessita de uma carga térmica de 500.000 kcal/h de aquecimento, ou seja, 580.000W. Para obter a área de troca necessária ao sistema de aquecimento indireto pode-se aplicar a equação global de troca térmica:

$$Q = A * U * \Delta T \quad (8)$$

Q - Calor necessário ao aquecimento (W)

A- Área de troca térmica (m²)

U - Coeficiente global de troca térmica (W/m² °C)

ΔT – Diferença de temperatura entre o meio e o vapor (°C)

O vapor utilizado é vapor saturado a 5,5 barg, cuja temperatura é de 160°C. Por outro lado, a temperatura média das lavagens será de 65°C. Assim sendo, o ΔT médio é de 95°C (diferença média entre a T_{meio} e a T_{vapor}).

O valor do coeficiente global de troca é $U = 1000 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$;

Logo, $A = 20 \text{ m}^2$.

Considerando serpentina em aço inox e com capacidade de 22,8 m³, o custo para o sistema de aquecimento é de R\$540.000,00. Estes valores foram obtidos através de contato com uma caldeiraria especializada.

5.5 CUSTOS OPERACIONAIS

Para o cálculo dos custos operacionais dos vasos, considera-se:

- Carga térmica máxima no tanque = 580.000 W;
- Temperatura média de aquecimento = 65°C;
- Perdas térmicas do condensado para o ambiente desprezíveis;
- Temperatura ambiente = 25°C;
- Produtividade da caldeira = 15,9 kg_{vapor}/Nm³_{GN};

Trata-se de vapor de 5,5 bar (saturado) que é injetado para aquecimento da mistura e entra em equilíbrio termodinâmico com a mistura final. Assim, seus estados inicial e final estão definidos (vapor saturado a 5,5 bar e água saturada à 65°C). Logo, a diferença de entalpia disponível por quilo de vapor é dada por:

h_{inicial} (vapor saturado à 5,5 barg) = 2760 kJ/kg;

h_{final} (água saturada à 65°C) = 289 kJ/kg

$$\Delta h = 2471 \text{ kJ/kg}$$

Na situação atual de injeção de vapor, há transferência média de 2471 kJ para cada quilo de vapor injetado no tanque. Assim, pode-se calcular o consumo de vapor para atingir a carga térmica máxima do tanque em questão (linha B –580.000 W).

$$\dot{m}_v = \frac{Q}{\Delta h} \quad (9)$$

Q – Calor necessário ao aquecimento (kJ/h)

Δh – Entalpia disponível por quilo de vapor (kJ/kg)

\dot{m}_v – Consumo de vapor (kg/h)

$$\dot{m}_v = 942 \text{ kg/h}$$

Portanto, o consumo de vapor é de 942 kg/h para realizar a transferência de 580.000 W para o tanque aquecedor.

$$h_{IV} (5,5 \text{ bar}) = 2088 \text{ kJ/kg};$$

Portanto, para a mesma carga térmica de 580.000 W ou 2.088.000 kJ/h, são necessário cerca de 1000 kg/h de vapor. Neste caso, o vapor gera 1000 kg/h de condensado com entalpia de 776 kJ/kg, que é, então, encaminhado ao desaerador das caldeiras.

$$h_{\text{vapor}} = 2076 \text{ kJ/kg}$$

$$h_{\text{água desaerada}} = 436 \text{ kJ/kg}$$

$$\Delta h_{\text{disponível}} = 1640 \text{ kJ/kg}$$

Para cada quilo de vapor injetado no tanque, são transferidos 1640 kJ para o sistema.

Do ponto de vista econômico, há um acréscimo de R\$540.000,00 no custo do tanque provido de troca indireta. No entanto, a economia é gerada pela redução do número de lavagens. Com base nisso, estima-se o tempo de operação do investimento em 1mês, que é um retorno muito atrativo.

No âmbito ambiental, a substituição de água fresca por água aquecida, reduz o consumo de água em 35%, da unidade de produção de nitrocelulose.

5.6 AVALIAÇÃO DA ALTERNATIVA PROPOSTA

Depois de levantadas as possibilidades de reuso e racionalização, devem ser realizadas análises críticas do âmbito técnico, do âmbito financeiro e ambiental. As análises técnicas das alternativas podem ser analisadas pela equipe produtiva, juntamente com a engenharia e segurança. A análise é seguida de dimensionamento dos materiais, linhas e equipamentos necessários.

Caso a viabilidade seja aprovada tecnicamente, segue-se para a avaliação financeira com a estimativa preliminar de custo do projeto e uma estimativa da economia associada à operacionalização do sistema. Na estimativa econômica referente a reuso de água e efluente devem ser utilizados valores reais do custo unitário da água e efluente.

A economia referente à operação do sistema de reuso pode proporcionar economia de outros insumos e/ou produtos químicos, redução do consumo de energia e recuperação térmica.

A racionalização e o reuso da água devem trazer benefícios ambientais, que devem ser avaliados, estimados e /ou calculados, como a redução do consumo de produtos químicos no tratamento do efluente; redução da geração de lodo no respectivo tratamento do efluente; e a redução da emissão de gases do efeito estufa, provenientes do uso de combustíveis e ao consumo de energia elétrica.

Fazendo a avaliação das alternativas propostas elencando cada uma nos parâmetros da Tabela 6, temos:

Tabela 6 - Análise do retorno dos ganhos do reuso de água.

Alternativa	Investimento Estimado R\$	Retorno financeiro/ano R\$	Ganho ambiental m ³ /h	Ganho em energia (MWh)	Prazo de retorno (anos)
Reuso de água na ETA	137.000,00	32.400,00	6,25	----	5,4
Troca dos motores da ETA	100.000,00	24.000,00	----	68	4,2
Complemento recuperação de finos	240.000,00	260.172,00	20	----	0,5
Utilização de água quente nas lavagens de nitrocelulose	540.000,00	628.689,60	24,5	----	0,86
TOTAL	1.017.000,00	945.572,00	50,75	68	1,07

6 CONCLUSÕES

Foram detectadas, sugeridas e avaliadas propostas de redução do consumo de água, sendo todas atrativas do ponto de vista financeiro e ambiental.

A execução destas propostas implicam em uma redução de até 10% no consumo total de produtos químicos e na geração de lodo, ambos associados ao tratamento de água e efluente. Portanto, além da alternativa estar alinhada com a tendência de atuação responsável e de desenvolvimento sustentável, pois, otimiza o uso dos recursos disponíveis e reduz os impactos ambientais associados ao consumo de água, as propostas são muito atrativas do ponto de vista financeiro, uma vez que necessitam de investimento não muito alto,mas proporciona uma economia representativa. Algumas das alternativas impactam inclusive no consumo de gás natural e na emissão de gases do efeito estufa.

Do ponto de vista financeiro, as alternativas sugeridas apresentaram curtos períodos de retorno do investimento, demonstrando que o reuso de água, além de ser uma prática sustentável e ambientalmente correta, é uma ferramenta útil para reduzir os custos de uma unidade industrial. Como sugestão neste trabalho estudos de melhorias de eficiência energética mais detalhada nos motores antigos da planta.

7 REFERÊNCIAS

EUROPEAN SYMPOSIUM ON COMPUTER AIDED PROCESS ENGINEERING AND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PROCESS ENGINEERING, COMPUTER AIDED CHEMICAL ENGINEERING, 16 e 9, 2006, **Anais da 16 - Water reuse: a successful almost zero discharge case.** ALVES, R.M.B.; GUARDANI, R.; BRESCIANI, A.E.; NASCIMENTO, L.; NASCIMENTO, C.A.O. , Elsevier, 2006. 1845-1850 p.

INTERNATIONAL CONGRESS OF CHEMICAL AND PROCESS ENGINEERING, 16, 2008, Praga. **Strippers for wastewater minimization in an oleofin process unit.** ALVES, R. M. B.; BRESCIANI, A. E.; NASCIMENTO, C. A. O. Praga: CHISA, 2008.

ALVES, S. S. **Conservação e Reúso de Água na Indústria de Cosmético – Estudo de Caso da Natura Cosméticos.** 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

AMORIM, R.S. **Abastecimento de Água de uma Refinaria de Petróleo: Caso Replan.** 2005. f. 193. Dissertação (Mestrado em Sistema de Gestão) - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2005.

ANA (Agência Nacional de Águas). **Caderno de Recursos Hídricos–Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil, Brasília, 2005.**

AGREE, A. M.; ASCOLESE, C. R. **Handbook of industrial water conditioning.** 9. ed. Hardcover: BetzDearborn, 1991. 167-238 p.

ASANO, T. Planning and implementation of water reuse projects. **Water Science and Technology**, 24, 9, 1-10, 1991.

ASANO, T. & LEVINE, A.D. Wastewater reuse: a valuable link in water resources Management. **Water quality International**, 4, 20-24, 1995.

ASANO, T; Wastewater reclamation and reuse. **Water quality management library**, Lancaster, 10, 1528, 1998.

THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICALS ENGINEERS - ASME. **Consensus on Operating practices for the control of feedwater and boiler water chemistry in modern industrial boilers**. 22-23, 1994.

BARROS, J.G; **Gestão Integrada dos Recursos Hídricos - Implementação do uso das águas subterrâneas**. Brasília: MMA/SRH/OEA, 2010. 171 p.

BAUM, D. **Reuso de água na indústria química: estudo de caso de uma unidade produtiva de nitrocelulose**. 2011. f. 109. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BRASIL, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. 2011- Ano base 2010: Resultados preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 49 p. 2011.

BRASIL, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contagem Populacional 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/>>. Acesso em: 10 ag. 2013.

BRASIL. Decreto nº 8.468, de 8 de Setembro de 1976, Aprova o regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente, set. 1976.

CAMPOS, C. E. P. S.; MARQUES, S. V.; QUEIROZ, E. M.; PESSOA, F. L. P. Water Source Diagram – An heuristic algorithmic methodology for reduction of water consumption, **Computer Aided Chemical Engineering**, 27, 1149- 1154, 2009.

CHANG, I. J; CHEN, C, H; LIU, G, S, Y. The experience of waste minimization at a nitrocellulose manufacturing plant, Resource, **Conservation and Recycling**, 30, 333-351, 2000.

CICHOKI, A. Conservação de Água – Um desafio para a indústria de hoje, São Paulo, 2013. Disponível em :<www.tratamentodeagua.com.br>. Acesso em: 4/09/2013.

DHOLE, V. R.; RAMCHANDANI N.; TAINSH, R. A.; WASILEWSKI, M. Make your process water pays for itself. **Chemical Engineering**, 100, January 1996.

EL-HALWAGI, M.M. **Pollution Prevention through Process Integration – Systematic Design Tools**. 1 ed. Londres: Academic Press, 1997.

FARIA, D.C. **Reuso das Correntes de Efluentes Aquosos em Refinarias de Petróleo**. 2004. f. 268. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

GOMES, J. F.S.; QUEIROZ, E. D.; PESSOA, F. L. P. Design procedure for water/wastewater minimization: single contaminant, **Journal of Cleaner Production**, 474-485, 2007.

HESPANHOL, I. Esgotos como recurso hídrico -- Parte I: Dimensões políticas, institucionais, legais, econômico-financeiras e socioculturais, **Engenharia**, São Paulo, 53 ano 55, 1997.

AMERICAN INSTITUTE OF CHEMICAL ENGINEERING WORKSHOP, 1974. **Oil-steam system for water reuse**. HOSPODAREC, R. W., THOMPSON, S. J., 1974. vol. 7.

JACOB, M.; GUIGUI, C.; CABASSUD, C.; DARRAS, H.; LAVISON, G.; MOULIN, L.; Performance of RO and NF processes for wastewater reuse: Tertiary treatment after a conventional activated sludge or a membrane bioreactor, **Desalination**, 250, 833-839, 2010.

KUO, W.C.J., SMITH, R. Designing for the interactions between water-use and effluent treatment. **Transactions of international Chemical Engineering**, 76 Part A, 287-301, 1998.

MARON, R. J. **Reúso de água em indústria metalúrgica rolamenteira – Estudo de caso da SKF do Brasil LTDA**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reuso de água**. Barueri-SP: Manole, 2003. 576 p.

MATSUMARA, E. **Perspectiva para conservação e reuso de na água na indústria de alimentos – estudo de uma unidade de processamento de frangos**. 2007, f. 211. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

MIERZWA, J. C. **O uso racional da água e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes – estudo de caso da Kodak Brasileira**. 2002. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria – uso racional e reuso**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2005. 144p.

MORENO, R.A.M. **Estimativa do Potencial Poluidor nas Indústrias: o caso do Estado do Rio de Janeiro**. 2005. f. 150. Dissertação (Mestrado em Ciências em Planejamento Energético) - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MORGADO, D. L. **Biocompósitos a partir da celulose de linter: filmes de acetato de celulose/celulose e quitosana/celulose**. 2009. f. 304. Tese (Doutorado em Ciências em Físico-química) - Universidade de São Paulo, Instituto de Química de São Carlos, São Carlos, 2009.

PEIXOTO, T. C. L. C. **Reuso de água: Comparação entre os Métodos DFA, Programação Linear e Programação Não Linear**. 2011. f. 128. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SPITZCOVSKY, D. Como está o saneamento básico do Brasil? Planeta Sustentável. 2009. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticia/desenvolvimento/conteudo_471143.shtml>. Acesso em: 19 jun. 2013.

TOLEDO, R. A. S. Tecnologia da Reciclagem. **Química Têxtil**, 8-14, Março 2004.

VALLE, E.C. **Minimização do Uso de Água e Efluentes com Considerações Econômicas e Operacionais via Programação Matemática**. 2005. f. 287. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimization, **Chemical Engineering Science**, 49, Issue 7, 981-1006, 1994.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Design of distributed effluent treatment systems. **Chemical Engineering Science**, 49, Issue 18, 3127-3145, 1994.

WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimization with Flowrate Constraints. **Chemical Engineering Research & Design**, 73, 889-904, 1995.

WINJESINGHE, B. Reuse of treated sewage effluent for cooling water make up: a feasibility study and a pilot plant study, **Water Science and Technology**, 33, Issues 10-11, p 363-369, 1996.