1. INTRODUÇÃO

A tendência atual das empresas é adaptar sua visão aos valores da sociedade moderna, deixando para trás conceitos antigos que somente consideravam a produtividade e a competitividade para avaliar o desempenho de um serviço e passando a incluir em seus valores critérios sociais e ambientais.

Para obter sucesso no mercado atual, uma empresa deve ser competitiva do ponto de vista financeiro, mas também deve ser ambientalmente responsável, o que significa ter ferramentas de gestão e metodologias de mitigação de efeitos nocivos ao meio ambiente, além de vislumbrar o desenvolvimento social de seus contribuintes e da sociedade ao seu redor. É com base nesses três pilares: econômico, social e ambiental, que se definiu o chamado desenvolvimento sustentável.

O conceito de desenvolvimento sustentável é aplicável para todos os setores da economia, onde podem ser adotados projetos sociais e/ou ações para redução do consumo elétrico, seja no comércio, onde, por exemplo, podem ser incentivados projetos ambientais para reduzir o uso de embalagens, ou no setor industrial onde há inúmeras possibilidades de atuação em direção à sustentabilidade.

No setor industrial, a demanda por recursos naturais e a geração de resíduos são os pontos mais significativos relacionados aos impactos ambientais e representam uma parcela significativa dos custos variáveis de uma fábrica. Assim, é vital, para o sucesso de uma organização, a existência de um equacionamento preciso das necessidades produtivas e a minimização da demanda por recursos, dos quais se pode citar: as matérias-primas, as utilidades, os combustíveis e a água.

A água é um dos recursos de maior criticidade, pois, além de existir em quantidade limitada, é o componente fundamental à vida. Como a disponibilidade de água potável vem diminuindo com o aumento da população, com a poluição dos corpos d’água e sua importância é imensurável, foram criadas ferramentas para gerir sua disponibilidade. É a chamada gestão de recursos hídricos.

A gestão de recursos hídricos visa estabelecer a disponibilidade e a demanda de água em uma dada região e, com base nesses dados, definir o consumo

aceitável para todos os setores da sociedade, obedecendo a uma ordem de prioridade.

Os setores prioritários são aqueles nos quais o consumo de água está totalmente associado à preservação da vida, entre eles: abastecimento doméstico e preservação de biomas (fauna e flora). Assim, em situações de baixa disponibilidade de água e alta demanda, a liberação de outorgas para o uso industrial tem se tornado cada vez mais restritiva.

A água, além de ser primordial à vida, é de extrema importância para os processos industriais. Assim, não é de se surpreender que a disponibilidade de água de uma região seja um fator decisivo para a escolha do local de instalação de uma indústria, pois, impacta em facilidades operacionais, em facilidades para liberação das outorgas de captação de água e de disposição dos efluentes, em baixos custos operacionais e em baixos custos de projetos dos sistemas de tratamento, de transporte, de reservação de água e efluente.

Além de ser um insumo estratégico ao negócio, a água industrial tem um peso representativo no custo variável de uma empresa, assim como os efluentes gerados. O custo por metro cúbico da água industrial varia de R$0,50 até patamares de R$15,00, dependendo da qualidade necessária e do volume consumido.

Projetos que visam minimizar o consumo de água nos processos produtivos são, portanto, cruciais para reduzir os impactos ambientais, pois, reduzem a quantidade de produtos químicos utilizados no tratamento da água e utilizados no tratamento dos efluentes gerados. Têm também um importante peso no que tange os resultados financeiros, pois, impactam nos custos associados à água e nos custos do efluente. Além disso, trazem benefícios socioculturais, pois, estimulam noções do uso consciente do recurso natural aos contribuintes da empresa, aos acionistas e à comunidade local. Logo, projetos de reúso e de redução no consumo de água estão inseridos nos três pilares do desenvolvimento sustentável, trazem resultados positivos em diversos âmbitos e devem ser estimulados em todos os setores da indústria.

Os principais objetivos para a implantação do reúso de água são:

- redução do consumo de água fresca e de efluente gerado;
- redução de custos com o tratamento de água e com tratamento de efluentes;

- redução dos impactos ambientais associados ao tratamento de água e à emissão de efluentes;

1.1. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

O início da nova tendência de mercado denominada desenvolvimento sustentável ocorreu nos anos 80, principalmente após a emissão do relatório “Nosso Futuro Comum” da Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (WCED, 1987). O conceito de desenvolvimento sustentável, conforme definido, é prover as necessidades da sociedade atual sem comprometer as futuras gerações de proverem as suas.

Desde a década de 60, já se presenciavam os primórdios do conceito de sustentabilidade. Mesmo um recurso renovável pode passar a ser não renovável caso a taxa de sua utilização supere a máxima capacidade de sustentação do sistema através de seus ciclos (HARDIN, 1968).

Outra limitação dos recursos renováveis é que eles não necessariamente são renovados de maneira homogênea, por exemplo, o ciclo hidrológico da água garante a sua renovação, porém não garante sua abundância em muitas regiões do planeta (ALVES, 2009).

A água é um fator limitante para o desenvolvimento sustentável, uma vez que a vida não se desenvolve sem ela e, da mesma forma, é importante para as atividades industriais e para a geração de energia (REBOUÇAS et al., 2006).

> Portanto um dos maiores desafios que deve ser enfrentado para alcançar o desenvolvimento sustentável é a minimização dos efeitos de escassez da água (sazonal e regional) e da poluição, que altera sua qualidade, e a busca de processos que levem à conservação do recurso e ao consumo mais racional ou mesmo reúso. (ALVES, 2009, p.2)

1.2. DISPONIBILIDADE DE ÁGUA

Apesar de existir em abundância no planeta, a maior parte da água existente não se adéqua aos nossos padrões de qualidade e/ou está em condições de difícil

acesso (longe dos pontos de demanda). Além disso, as reservas de água doce acessíveis estão sendo continuamente contaminadas pela ação humana.

A Figura 1 apresenta, resumidamente, estimativas da disponibilidade de água no planeta, calculadas pela UNEP (United Nations Environment Program):

- o volume total de água no planeta é de 1,4 x 10^9 km³;
- 97,5% desta água é salgada (volume de 1,365 x 10^9 km³);
- os 3,5 x 10^7 km³ restantes constituem toda a água doce disponível na Terra (cerca de 2,5%);
- das reservas de água doce, 2,4 x 10^7 km³ estão na forma de geleiras ou de neve permanente em cadeias de montanhas (representam 1,72% do total de água existente);
- cerca de 1,08 x 10^7 km³ de água doce estão armazenados no sub-solo na forma de lençóis freáticos, geleiras subterrâneas, umidade do solo e outros (representam 0,77% do total de água existente);
- rios e lagos representam cerca de 1,05 x 10^5 Km³ (0,01% do total de água existente).

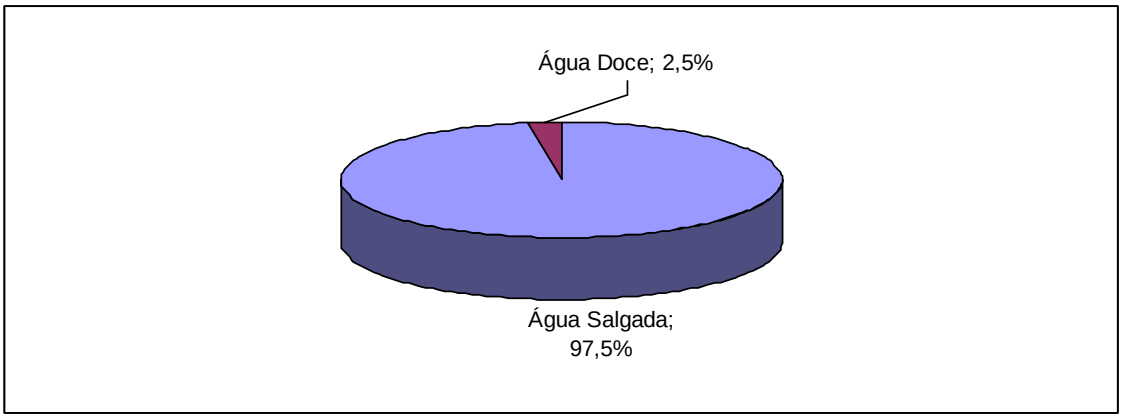


Figura 1 – Disponibilidade de Água no Mundo (UNEP)

De acordo com a Figura 2, observa-se que somente 0,01% da água existente no planeta é doce e facilmente acessível. A obtenção de água de degelo, a captação de águas subterrâneas e a dessalinização da água do mar, apesar das dificuldades implícitas nos processos, são alternativas técnicas factíveis para cenários drásticos de falta d'água.

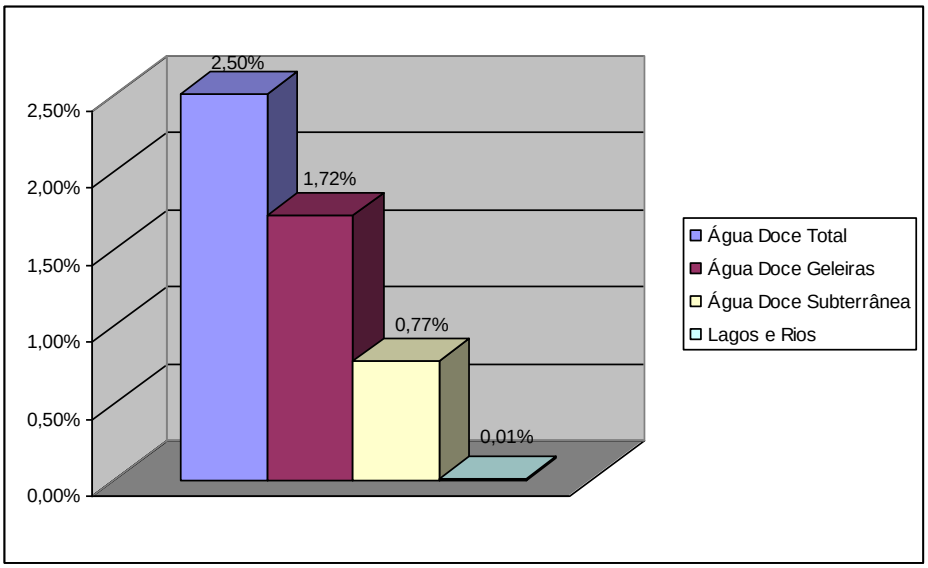


Figura 2 – Disponibilidade de Água Doce no Mundo (UNEP)

Portanto, é coerente o conceito estabelecido pelo Conselho Econômico e Social das Nações Unidas que diz: “a não ser que exista grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deve ser utilizada para usos que toleram águas de qualidade inferior” (UNITED NATIONS, 1958).

1.3. GERENCIAMENTO DO RECURSO HÍDRICO

Conforme citado em ALVES (2009), a política de gerenciamento dos recursos hídricos está baseada nos seguintes princípios:

- a água é um bem público, cuja quantidade é finita e que tem um valor econômico associado;
- o gerenciamento deve contemplar todos os usos de todos os setores da sociedade;
- em situações de escassez, são prioritários os consumos associados à vida;
- devem participar do gerenciamento: o governo, os usuários e os cidadãos.

Conforme citado previamente, a nova tendência de desenvolvimento da sociedade é o desenvolvimento sustentável, cujo sucesso depende, dentre outros fatores, da minimização do problema de escassez de água.

Segundo dados de 2005 da Agência Nacional de Águas (ANA), 11% do consumo de água do país é destinado ao uso urbano e 7% ao uso industrial. Em situações de baixa disponibilidade de água e dificuldade de abastecimento urbano, as restrições para o uso industrial ficam ainda maiores.

Existem regiões onde a situação da disponibilidade de água é ainda mais complicada, como por exemplo, a região metropolitana de São Paulo (região onde se localiza a indústria cujo processo é objeto deste estudo). Segundo dados do DAEE (2006), a região da bacia do Alto Tietê está, atualmente, numa situação crítica no que tange a vazão de referência de água. A vazão de referência é uma relação entre a demanda total de água e a capacidade natural de reposição da bacia hidrográfica. Ela é um parâmetro estabelecido para quantificar a vazão máxima de água que é passível de ser consumida em uma região sem que haja severos impactos ao meio ambiente. Isso significa que em regiões onde a demanda é inferior à vazão de referência, há disponibilidade de água e sua renovação é garantida, simplesmente, pelos ciclos naturais de reposição.

A Figura 3 apresenta o mapa do estado de São Paulo subdividido entre as bacias hidrográficas e classificado de acordo com a vazão de referência de água.

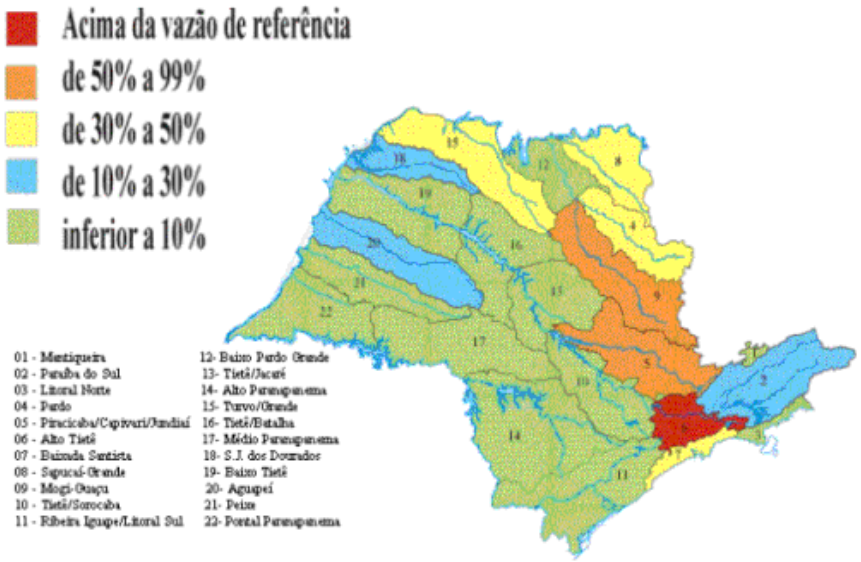


Figura 3 – Vazão de referência atual de água (DAEE, 2006)

Nota-se que, na bacia do Alto Tietê, há uma demanda de água superior àquela que a bacia pode fornecer, ou seja, há baixa disponibilidade de água na região. Se hoje a situação da disponibilidade de água não é confortável, as perspectivas futuras para o Estado de São Paulo também não são otimistas, como mostra a Figura 4 (DAEE, 2006).

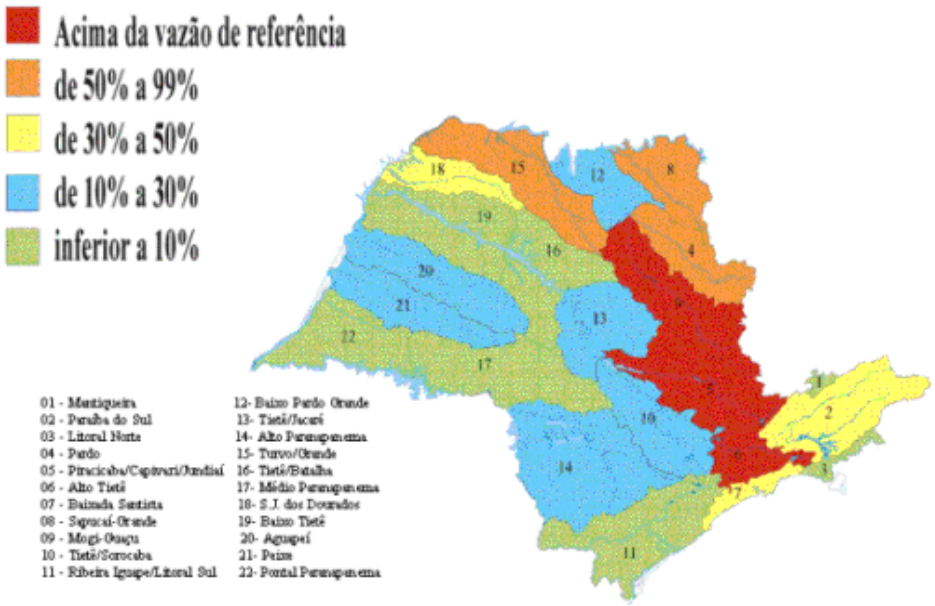


Figura 4 – Cenário vazão de referência para 2020 (DAEE)

Esse cenário futuro é traçado utilizando, além de dados climáticos e hidrológicos, premissas sócio-econômicas como: crescimento populacional, desenvolvimento econômico e consumo per capita de água. Desta forma, esta perspectiva pode ser alterada caso as tendências do desenvolvimento local e do consumo per capita de água da região também se alterem.

A disponibilidade de água e sua respectiva qualidade podem sofrer alterações não apenas devido a causas naturais como também antrópicas (TUNDISI, 2006).

Bacias hidrográficas e aqüíferos estão sujeitos a alterações de qualidade, cujos principais causadores são (TOZE, 2006):

- despejos domésticos que agregam matéria orgânica, contaminantes biológicos, hormônios e fármacos (ingeridos pela população);
- resíduos agrícolas como fertilizantes e pesticidas carregados pela irrigação e/ou pela chuva;

- efluentes industriais, que contaminam águas com diversos compostos químicos.

Portanto, este cenário incentiva o desenvolvimento de projetos sociais de conscientização do uso do recurso “água” por parte da população, incentiva projetos de saneamento doméstico e industrial e incentiva projetos técnicos de reúso como o projeto Aquapolo Ambiental, cujo escopo baseia-se no tratamento do esgoto doméstico da ETE ABC para produção de água industrial e abastecimento de dez empresas do Pólo Petroquímico de Capuava - SP, cuja vazão prevista é de 600 L/s (SABESP, 2008).

1.4. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar o consumo de água em uma unidade produtiva de Nitrocelulose, localizada em São Paulo, bem como propor alternativas de redução de consumo, utilizando como base o reúso. A unidade em questão consome grandes volumes de água, em média são 300 m^3/h, que é utilizada de diversas formas e em várias etapas distintas do processo produtivo.

1.5. JUSTIFICATIVA

O consumo de água na unidade de produção de Nitrocelulose é elevado devido a dois fatores principais: as etapas do processo produtivo, que por natureza consomem muita água (cozimentos e lavagens) e as características físico-químicas do produto. A Nitrocelulose é uma fibra com característica acentuada de inflamabilidade e emite gases tóxicos, em caso de fogo. Assim, o produto é mantido em meio aquoso durante grande parte do processo e a unidade é mantida “úmida”, visando à segurança operacional.

Os usos de água na unidade produtora de Nitrocelulose, em ordem decrescente de quantidade de consumo, são: água de processo, água de

resfriamento, água para geração de vapor, água para consumo humano e água de combate a incêndio.

O consumo de água de processo na fabricação de Nitrocelulose está presente na maioria das etapas produtivas: cozimentos, lavagens, transporte de fibras e outros. A Figura 5 apresenta um histórico do consumo especifico de água na unidade de Nitrocelulose nos últimos anos.

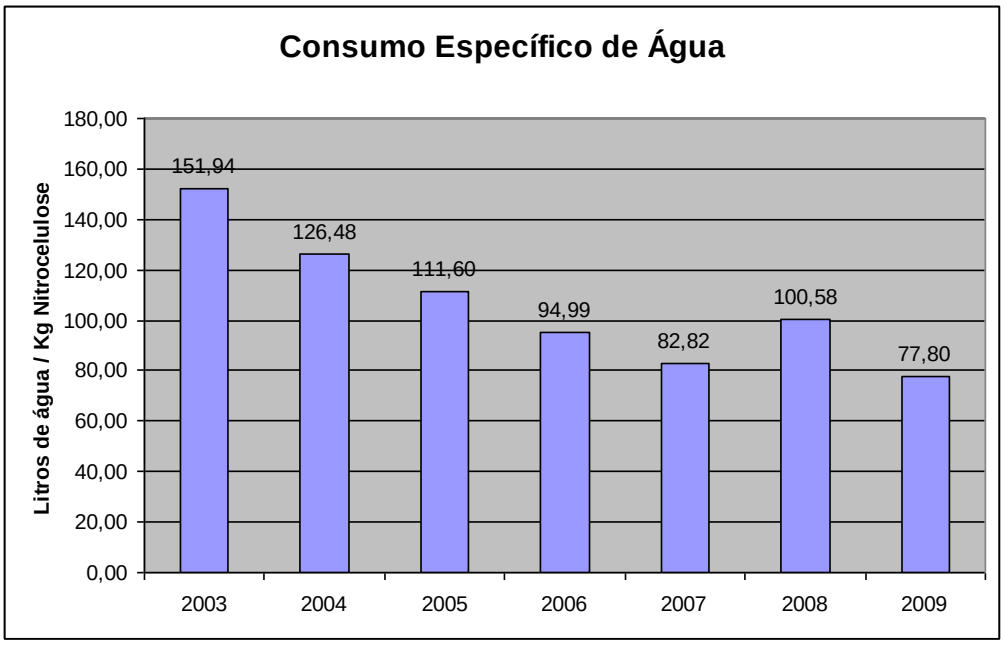


Figura 5 – Consumo Específico de Água

A partir da Figura 5, pode-se notar que há uma tendência clara de redução no consumo específico de água na unidade em questão, com exceção do ano de 2008. Essa tendência de redução no consumo de água está associada a projetos de melhoria contínua nos processos, de melhorias nos procedimentos operacionais e outros projetos relacionados ao reúso de água.

O aumento associado ao ano de 2008 está relacionado a uma falha operacional que vigorou por seis meses: uma válvula na linha de água emperrou aberta e o seu respectivo transmissor indicava que a mesma estava fechada. Quando o problema foi identificado, a situação foi resolvida e o consumo específico de água voltou a cair.

Vale observar que, apesar do consumo especifico de água ter sido reduzido em quase 50% de 2003 a 2009, ainda há um bom potencial de redução neste consumo, pois, ainda são consumidos 77,8 litros de água para produzir 1 kg de Nitrocelulose.

Assim, este trabalho mostra a aplicação de uma nova metodologia para avaliar o consumo de água, construir um balanço hídrico, levantar e analisar alternativas industriais para o reúso.

A apresentação do trabalho é dividida em capítulos, a saber:

No capítulo 2, é descrita a unidade industrial utilizada como estudo de caso para este trabalho.

No capítulo 3 são mostrados aspectos referentes à fundamentação teórica relacionada ao reúso de água, sua história, aspectos técnicos e tendências futuras. No mesmo capitulo, é realizada uma fundametação teórico do tema de sepação e tratamento de misturas entre água ealcool isopropílico.

O capítulo 4 trata de descrever detalhadamente a metodologia aplicada neste estudo. Trata-se de um estudo de caso de reúso bem especifico, mas a metodologia aplicada é ampla e poderia facilmente ser utilizada em projetos de reúso de água em outros setores da economia.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos a partir da utilização da metodologia anteriormente descrita. São apresentados os balanços hídricos da unidades, as alternativas de reúso levantadas, bem como as respectivas avaliações técnico-financeiras.

O capítulo 6 apresenta a conclusão geral do trabalho quanto aos resultados obtidos, quanto à atratividade das propostas desenvolvidas, quanto à aplicabilidade e a abrangência da metodologia utilizada.

2. DESCRIÇÃO DA UNIDADE INDUSTRIAL

A unidade industrial objeto deste estudo produz Nitrocelulose (NC) para fins comerciais e Ácido Sulfúrico (AS). Existem unidades produtoras de Nitrocelulose para fins bélicos.

O Ácido Sulfúrico é um produto muito bem conhecido e dispensa explicações. A Nitrocelulose é uma fibra cujas principais propriedades são proporcionar brilho metálico quando adicionada a tintas e/ou vernizes e acelerar o processo de secagem no momento da aplicação da tinta. Essas características explicam seu uso difundido em indústrias de embalagens (impressão), indústrias de tintas, indústria automotiva e indústria cosmética (esmaltes).

A Nitrocelulose é gerada a partir de uma reação de nitração da molécula de celulose. Flocos de celulose são imersos em uma mistura de ácido nítrico e ácido sulfúrico, onde o ácido nítrico é a fonte de radicais nitrosos e o ácido sulfúrico é o catalisador da reação de nitração.

As unidades de NC e Sulfúrico coexistem de forma complementar e estratégica. Conforme exposto anteriormente, a ácido sulfúrico é o catalisador da reação de nitração, de maneira que ele é fornecido diretamente de uma unidade à outra. Como o ácido sulfúrico não participa da reação, em outras fábricas ele seria perdido no efluente ou parcialmente recuperado. No caso estudado, foram instalados sistemas de destilação extrativa com o objetivo de processar a mistura sulfonítrica (ácido sulfúrico e nítrico) remanescente da reação de nitração. O ácido nítrico recuperado é novamente enviado ao estoque. O ácido sulfúrico concentrado a 69% é reconcentrado até 86% em uma segunda etapa de destilação e, posteriormente, enviado de volta à unidade de Ácido Sulfúrico, onde será totalmente recuperado.

Além disso, a unidade de Ácido Sulfúrico produz vapor de alta pressão, utilizado para gerar energia elétrica e vapor de aquecimento para diversos pontos consumidores na unidade de Nitrocelulose.

2.1 UNIDADE DE PRODUÇÃO DE NITROCELULOSE

O processo de produção de Nitrocelulose é descrito a seguir, tendo seu foco principalmente no consumo de água.

De maneira geral, o processo de produção de Nitrocelulose é um grande consumidor de água. Além de exigir água em etapas de cozimentos e lavagens, o produto é extremamente perigoso em ambientes secos e necessita de abundância de água para controlar o risco de explosões. É uma fibra inflamável, quando seca. Sua ignição pode ser oriunda de fricção, calor, faísca ou eletricidade estática, logo, pode-se dizer que a planta é mantida “úmida” por razões de segurança.

As características físicas do produto também motivam o uso abundante de água. Como se trata de uma fibra com viscosidade elevada, seu escoamento é difícil, de modo que a água é utilizada em grandes quantidades para auxiliar o manuseio, o transporte do produto ao longo do processo produtivo e a desobstrução de linhas.

A Figura 6 apresenta um esquema que retrata resumidamente o processo produtivo de Nitrocelulose.

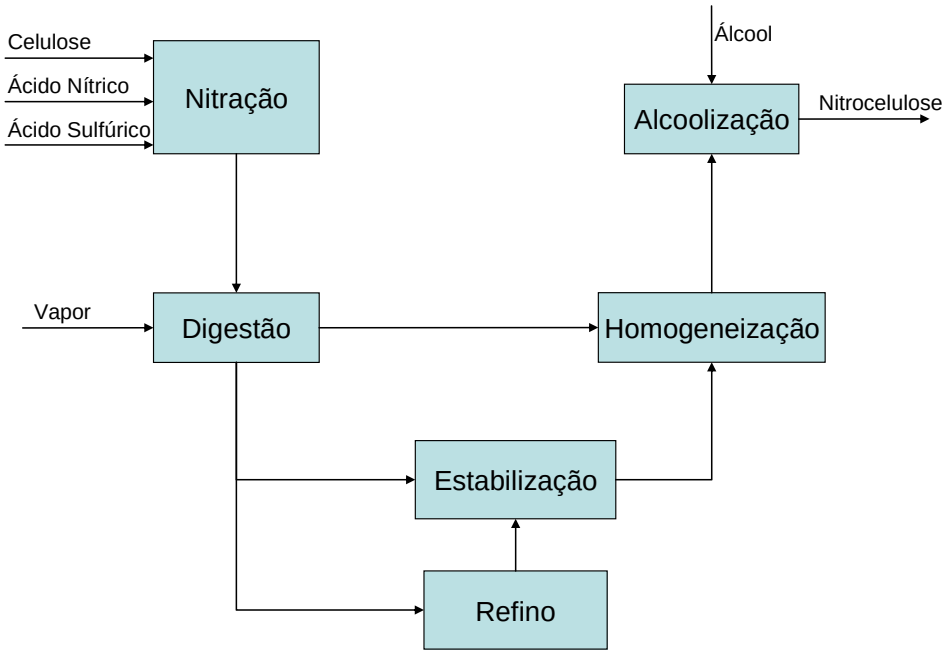


Figura 6 – Fluxograma de Blocos do Processo Produtivo de Nitrocelulose

2.1.1 Nitração

A primeira etapa do processo produtivo é a Nitração, na qual ocorre a adição do radical nítrico à molécula de celulose. A reação de formação de Nitrocelulose é uma reação de esterificação reversível, sujeita a um equilíbrio químico. Essa operação é realizada banhando a celulose em uma mistura de ácido nítrico e ácido sulfúrico, denominada de mistura sulfonítrica. O ácido nítrico é a fonte dos radicais nítricos e o sulfúrico é o catalisador da reação. A equação (1) descreve a reação de Nitração:

$$\text{Celulose-OH} + HNO_3 \leftrightarrow \text{Celulose-}ONO_2 + H_2O \qquad (1)$$

Ao final da reação, têm-se fibras de Nitrocelulose em meio a uma solução aquosa de ácido sulfúrico e nítrico. A última etapa da Nitração é a remoção das fibras por meio de centrifugação. Após serem separadas por centrifugação, as fibras seguirão adiante no processo produtivo e a solução sulfonítrica remanescente seguirá para colunas de destilação extrativa, onde é recuperada. Neste ponto já se têm a Nitrocelulose formada. Os processos seguintes serão responsáveis pela determinação das características físico-químicas do produto final.

Pode-se notar da equação (1) que há a formação de água durante a reação de Nitração, mas a quantidade gerada é pequena e irrelevante frente às vazões de consumo da unidade, de maneira que esta geração foi desprezada no desenvolvimento deste trabalho. Além da geração de água ser pequena, não há um consumo representativo de água na etapa de Nitração. Há somente consumos como lavagem da área, desobstrução de linhas e preparação da mistura sulfonítrica.

Após a etapa de Nitração é que se inicia o consumo de água, propriamente dito, no processo produtivo.

2.1.2 Digestão

A segunda etapa é a chamada Digestão, onde ocorre o processo de cozimento das fibras de NC (Nitrocelulose). As características físico-químicas das fibras de NC

variam com o tempo, com a pressão e com a temperatura de cozimento, portanto, para cada tipo de produto há uma receita a ser seguida na digestão.

O consumo de água na digestão é alto, cerca de 120 m³/h de água industrial. A NC é transportada da etapa de Nitração para os digestores utilizando uma corrente de água denominada de água de transporte, a qual já é uma água de reúso. Quando o digestor atinge o nível ideal, a água de transporte é drenada para a ETE e é iniciada a lavagem da NC com água fresca. Após a lavagem, ocorre o processo de digestão propriamente dito. Novamente é acrescentada água fresca à NC e a solução é cozida sob pressão e aquecida através de injeção de vapor vivo. Ao final do cozimento água é drenada dos vasos e é encaminhada a um sistema de recuperação de fibras instáveis. A NC é enviada para a próxima etapa do processo que, dependendo do tipo, pode ser a Homogeneização, a Estabilização ou o Refino.

O sistema de recuperação de fibras instáveis tem como objetivo recuperar fibras que porventura tenham escapado das telas dos digestores, dos vasos da estabilização e dos vasos de refino durante as drenagens. A Figura 7 representa o sistema de recuperação de finos instáveis.

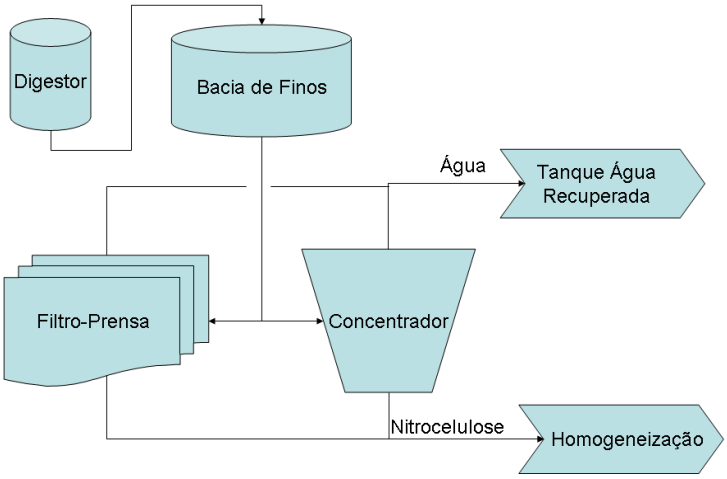


Figura 7 – Sistema de Recuperação de Finos Instáveis

As fibras removidas são uma mistura de vários tipos distintos de Nitrocelulose. Essas fibras são enviadas à etapa de Homogeneização, formando um lote de fibras mistas que serão comercializados a baixo preço, denominadas de Nitrosel.

A água removida tem caráter ácido e contém resíduos de Nitrocelulose instável, não podendo, portanto, ser utilizada em qualquer parte do processo. Ela é recuperada e utilizada para transportar fibras da etapa de Nitração para a Digestão.

Este transporte é um dos maiores consumos de água de processo da unidade produtiva e admite águas ácidas. O reúso de água ácida para o transporte foi o primeiro grande reúso implementado com sucesso na unidade e hoje possibilita a recuperação de cerca de 50 m^3/h de água industrial.

2.1.3 Refino

A etapa seguinte é o Refino, cujo objetivo é reduzir a granulometria do produto por fricção mecânica de modo a facilitar seu envasamento. A mistura de NC e água é bombeada de um tanque através dos refinadores, helicóides dentados que raspam e rasgam as fibras, e é despejada em outro tanque vazio. A operação se repete até que as fibras atinjam a granulometria ideal, a qual varia de acordo com o tipo produzido. Da mesma forma que ocorre na Digestão, as drenagens do refino também são enviadas ao sistema de recuperação de finos.

2.1.4 Estabilização

Uma vez que a NC atinge a granulometria ideal, ela deixa a etapa de Refino e é enviada à Estabilização, cujo objetivo é estabilizar quimicamente a NC de modo a evitar decomposição e/ou ignição espontânea.

Quando a NC é enviada à etapa de Estabilização, ela é armazenada em tanques onde é lavada com água até que sua acidez atinja níveis desejáveis, os quais variam de acordo com o tipo produzido. A lavagem consiste no enchimento seguido de drenagem dos tanques de estabilização. As drenagens dos tanques de estabilização também são enviadas ao sistema de recuperação de fibras instáveis.

2.1.5 Homogeneização

A próxima etapa é a Homogeneização, cujo objetivo é agregar lotes do mesmo tipo de NC e enviá-los para a etapa de alcoolização e envasamento. É nessa etapa que são realizadas as análises do produto e o controle de qualidade final.

Os homogeneizadores recebem bateladas de NC e água, provenientes da etapa à montante (ou Digestão ou Estabilização, dependendo do tipo do produto). As fibras são acumuladas e, antes de serem enviadas à Alcoolização, parte da água presente é drenada. A água de drenagem dos homogeneizadores é encaminhada para outro sistema de recuperação de fibras: a recuperação de fibras estáveis. A Figura 8 apresenta o processo de recuperação de finos estáveis.

O sistema de recuperação de fibras estáveis, analogamente ao sistema de instáveis, tem como objetivo recuperar as fibras de NC perdidas nas drenagens. Nesse sistema não há recuperação de água. A água que sai dos filtros e que extravasa pelo concentrador é enviada à ETE (Estação de Tratamento de Efluentes).

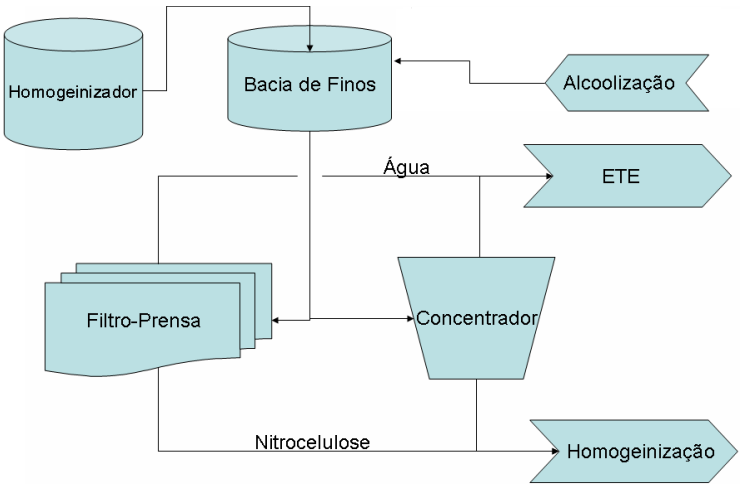


Figura 8 – Sistema de Recuperação de Finos Estáveis

2.1.6 Alcoolização

Trata-se da última etapa do processo produtivo antes do envasamento e do transporte. A NC, mantida em água ou úmida durante todo o processo produtivo, nesta etapa, é desidratada e alcoolizada para comercialização.

Quando uma batelada é formada na homogeneização, inicia-se a etapa de transferência. A mistura contendo NC e água é removida dos homogeneizadores e bombeada para a área de Alcoolização.

Na Alcoolização, a NC passa por um processo de centrifugação de modo a desidratar e, posteriormente, alcoolizar o produto. Logo que o produto chega às centrifugas, ele é processado de maneira a remover o excesso de água. Quando não é mais possível remover a água via centrifugação, adiciona-se álcool de modo a arrastar a água residual remanescente.

A centrifugação é dividida em três etapas: remoção de água; arraste da água com álcool; e alcoolização, propriamente dita. Durante a primeira etapa de centrifugação, toda a água removida é enviada de volta à bacia de finos estáveis (sistema de recuperação de finos). Na segunda etapa, o álcool utilizado para arrastar a água é encaminhado aos tanques de álcool residual para futura recuperação. Na terceira etapa, é injetado álcool no sistema e a Nitrocelulose alcoolizada cai em um silo sobre a máquina de envasamento. A seguir, a NC é carregada em caminhões.

2.1.7 Processos Periféricos

As etapas descritas anteriormente consistem do processo principal de produção de Nitrocelulose. No entanto, existem, na unidade de NC, sistemas periféricos, como: concentração de ácido sulfúrico, recuperação de álcool (etanol e isopropanol), recuperação de ácido nítrico e recuperação de fibras. Os sistemas de recuperação de álcool são descritos a seguir.

2.1.7.1 Recuperação de Álcool

Na segunda etapa de desidratação da NC utiliza-se álcool para arrastar água remanescente. Este álcool residual contendo água é encaminhado aos sistemas de recuperação de álcool.

Os sistemas de recuperação de álcool operam concentrando álcool residual, etanol ou isopropanol, por meio de destilação. O etanol é concentrado a 92% em uma coluna simples de destilação, com injeção direta de vapor saturado a 1,0 barg. O etanol destilado em fase vapor sai pelo topo da coluna enquanto grande parte da água é removida na forma de vinhoto.

O isopropanol residual é concentrado a 99% em um sistema de destilação azeotrópica composto por duas colunas em série. A primeira coluna, que também opera com injeção direta de vapor a 1,0 barg, concentra o álcool até o ponto de azeótropo. O isopropanol é removido pelo topo, condensado e enviado a uma segunda coluna, a qual opera com refervedor. O fluido usado no reverfedor é vapor a 1,0 barg. Ciclohexano é adicionado com a função de quebrar o azeótropo formado, propiciando a concentração do álcool a patamares superiores.

Nestes dois sistemas têm-se, associados às colunas de destilação, condensadores, trocadores e resfriadores de álcool. Todos esses equipamentos são fontes consumidoras de água de resfriamento.

Depois de recuperados, o etanol e o isopropanol são encaminhados aos tanques de álcool recuperado e são novamente utilizados no processo produtivo (desidratação e alcoolização).

2.2 CONSUMO GERAL DE ÁGUA

A unidade industrial em estudo está localizada na zona leste do município de São Paulo. Hidrograficamente falando, ela pertence à bacia do Alto Tietê. O Rio Tietê é muito próximo ao terreno da companhia e é dele que é captada água bruta que, após ser submetida a uma clarificação tradicional, é utilizada como água industrial nos processos produtivos. Nessa região, o Rio Tietê é enquadrado como classe 4 do Decreto Estadual n. 8.468/76 (águas que podem ser destinadas à navegação e à harmonia paisagística).

Em paralelo ao sistema de água industrial, opera o sistema de água desmineralizada. Cinco poços artesianos captam água do lençol freático subterrâneo, abastecem uma unidade de osmose reversa que desmineraliza a água artesiana, produz água desmineralizada e alimenta as caldeiras.

Há também consumo de água potável nos banheiros, vestiários, copas, cozinhas e restaurante. Essa água é fornecida pela companhia de saneamento do estado de São Paulo (SABESP) via rede distribuidora.

O consumo de água na fábrica é:

- Água Industrial – 400 m³/h;
- Água Desmineralizada – 60 m³/h;
- Água potável – 1 m³/h;

A Figura 9 apresenta o consumo de água estratificado. Vale observar que o consumo de água potável é desprezível quando comparado com o consumo de água industrial ou de água artesiana. Assim, neste trabalho não serão abordados estudos de melhorias no sistema ou de redução no consumo de água potável.

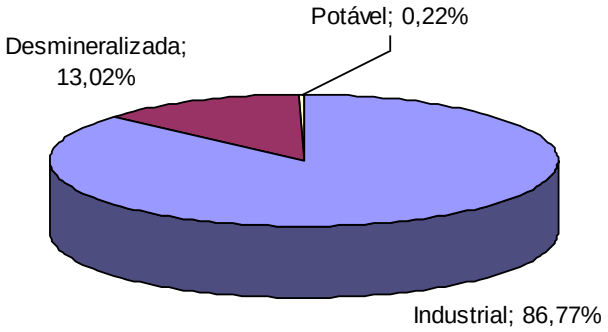


Figura 9 – Consumo Estratificado de Água

2.2.1 Água Desmineralizada e Vapor

Água proveniente de cinco poços artesianos, que captam 60 t/h de água, alimenta o sistema de osmose reversa. São produzidos 46 t/h de água desmineralizada. O rejeito do sistema de Osmose Reversa, 14 t/h, é encaminhado para recuperação na ETA (Estação de Tratamento de Água), saindo do circuito de água artesiana e ingressando no circuito de água industrial. Este é outro caso de reúso já implementado na fábrica.

Após a desmineralização, e antes de ser abastecida nas caldeiras, a água passa por um 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 ou é convertida em vapor (44 t/h) ou é purgada do sistema na forma de "*blowdown*" (cerca de 2 t/h).

O vapor produzido é encaminhado aos pontos consumidores para aquecimento. Metade do consumo de vapor é de aquecimento do tipo indireto e outra metade na forma de vapor vivo. No entanto, não há recuperação de condensado.

A empresa em questão possui outorga de captação de água artesiana e nada paga pelo m³ de água captada. Além disso, o tratamento de desmineralização da água é relativamente barato, variando em torno de R$0,60/m³. Por outro lado, a disponibilidade de água artesiana vem diminuindo notoriamente e outorgas para escavação de novos poços não estão sendo liberadas. Em caso de falta de água artesiana, ocorreria falta de fornecimento de vapor e, conseqüentemente, parada das unidades. A redução no consumo de água artesiana bem como a recuperação do condensado são estratégicos para a continuidade operacional, apesar do custo de produção de água desmineralizada ser baixo.

2.2.2 Água Industrial

A água industrial que abastece a unidade é proveniente da Estação de Captação de Água (ECA), localizada na margem do Tietê, de onde a água bruta é bombeada.

Ao chegar à fábrica, a água bruta é encaminhada à ETA onde passa por um tratamento de clarificação tradicional. A Figura 10 apresenta um fluxograma esquemático do processo de tratamento, bem como os principais pontos de aplicação de produtos químicos.

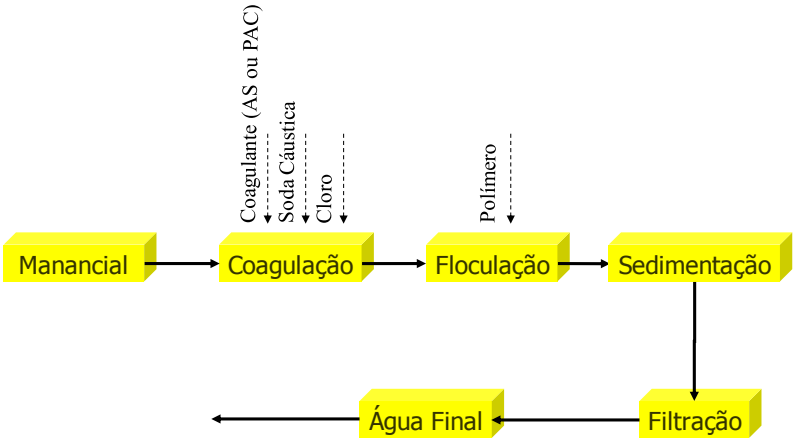


Figura 10 – Esquema do Tratamento da Água Industrial

Quando o tratamento é finalizado, a água é enviada ao reservatório de água industrial. A Figura 11 mostra o reservatório de água Industrial, de onde a água é distribuída para toda a fábrica.

Figura 11 – Reservatório de Água Industrial

A água industrial é utilizada em diversas funções, entre elas: insumo para a produção de sulfúrico, sistemas de cozimento, sistemas de lavagem de produto, sistemas de lavagem de resíduos gasosos, sistemas de resfriamento, abatedores de gases, limpeza da área produtiva, desobstrução de linhas e outros.

Em termos de qualidade, a água industrial deve apresentar baixa turbidez e baixos teores de ferro, pois, ambos os parâmetros afetam fortemente a qualidade da

Nitrocelulose. Altos teores de matéria orgânica também não são aceitos, pois levam a altos teores de orgânicos no ácido sulfúrico. A Tabela 1 apresenta os valores médios das análises da água bruta e da água industrial para o ano de 2010. Observa-se que, conforme exigido pela especificação, a ETA remove os contaminantes indesejados até níveis satisfatórios.

Além das restrições associadas à qualidade dos produtos finais: ferro, matéria orgânica e turbidez, existem outros fatores limitantes à qualidade da água industrial que não podem ser controlados na ETA, como por exemplo, a concentração de cloretos e a dureza total. Alta concentração de cloretos na água leva a corrosão acentuada nos equipamentos. Elevada dureza gera incrustação de linhas, trocadores de calor e, conseqüentemente, perda de eficiência em sistemas de troca térmica.

Tabela 1 – Qualidade de Água Bruta e Industrial

Água Bruta		Água Industrial	
Fe (ppm)	1,8	Fe (ppm)	0,02
Matéria Orgânica (ppm)	6	Matéria Orgânica (ppm)	2,2
Turbidez (NTU)	11	Turbidez (NTU)	0,6
Condutividade (µS)	350	Condutividade (µS)	500
Amonia (ppm)	12	Amonia (ppm)	8
Cloretos (ppm)	-	Cloretos (ppm)	135
Dureza Total (ppm)	-	Dureza Total (ppm)	70

O tratamento empregado na ETA não é capaz de reduzir teores de cloretos e de dureza. Ao contrário, quando se adiciona o coagulante (cloreto férrico ou policloreto de alumínio), aumenta-se a concentração de cloretos na água. Assim, a qualidade da água em relação a esses parâmetros depende da qualidade da água do rio.

2.3 EFLUENTE INDUSTRIAL

Toda água usada na fábrica, que não é incorporada no produto e que não é perdida para a atmosfera é fonte geradora de efluente industrial. Águas residuais provenientes de linhas, drenos, purgas e ralos das áreas industriais são coletados em uma rede principal, tanto na planta de Nitrocelulose como na planta de Sulfúrico. A vazão média total de efluente é da mesma ordem do consumo médio de água industrial, cerca 400 m³/h.

O efluente industrial bruto recebe um pré-tratamento em estação de tratamento própria, denominada ETE, e, posteriormente, segue para Sabesp (ETE São Miguel) para receber tratamento secundário. A Figura 12 apresenta um esquema do pré-tratamento empregado na ETE da unidade industrial.

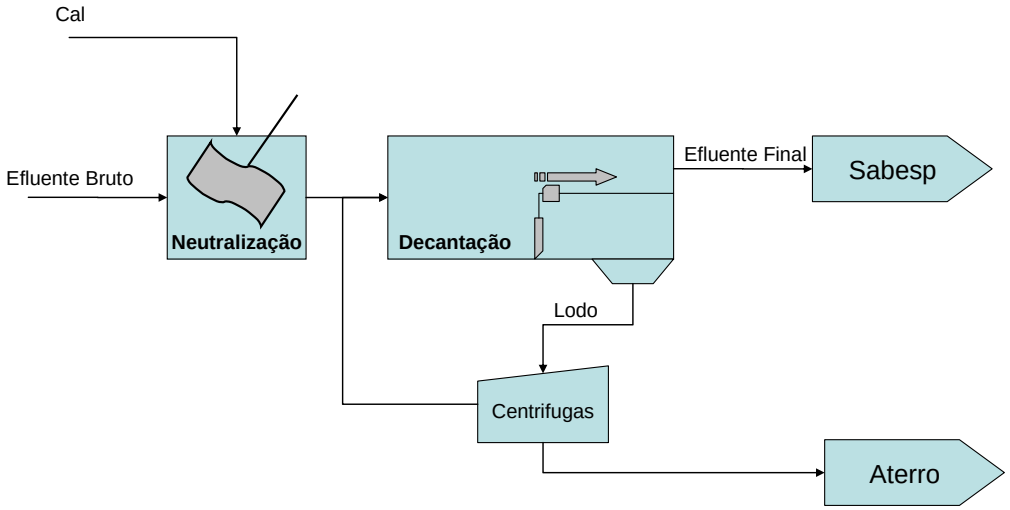


Figura 12 – Esquema do Processo da ETE

As duas correntes de efluente, das unidades de Sulfúrico e de Nitrocelulose, são misturadas na chamada caixa de mistura. O efluente bruto misturado entra na ETE onde passará para a etapa de neutralização. A Tabela 2 apresenta a caracterização do efluente bruto e do efluente final enviado à Sabesp.

Tabela 2– Caracterização do Efluente Bruto e Final

Parâmetro	Bruto	Final	Unidade
Condutividade	9440	3220	us/cm
DBO	427	794	mgO2/L
DQO	1366	1261	mgO2/L
Dureza Cálcio	-	490	mg/L
pH	2,84	7,6	-
Sól. Suspensos Totais	264	262	mg/L
Sól. Totais Dissolvidos	1364	3136	mg/L
Sulfato	733	727	mg/L
Nitrato	353	353	mg/L
Cloreto	135	149	mg/L

A Figura 13 compara os valores dos parâmetros do efluente bruto e do efluente final. Pode-se observar que:

- como esperado, a ETE não remove DBO, DQO, sólidos dissolvidos, sulfato, nitrato e nem cloretos. Inclusive adiciona-se DBO e sais dissolvidos devido à neutralização do efluente com cal de carbureto;
- há redução de condutividade devido à neutralização do efluente e à remoção dos sais formados;
- a neutralização do efluente é eficiente;

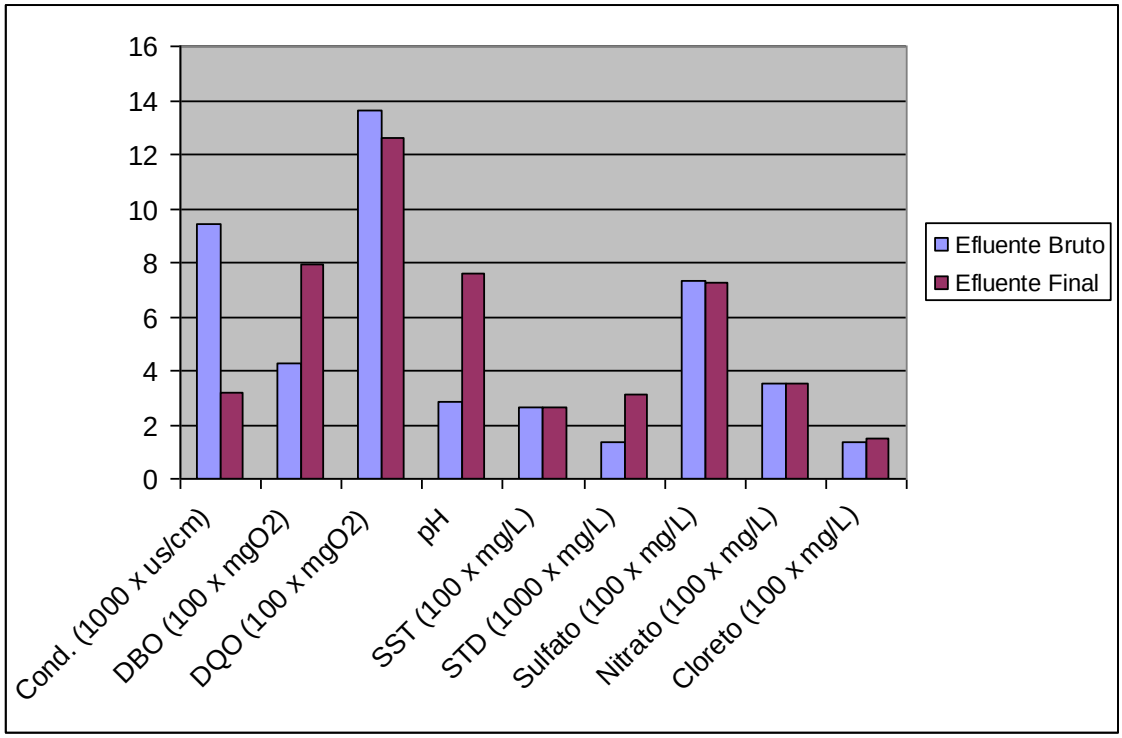


Figura 13 – Comparativo da qualidade de efluente bruto e final

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

A otimização do consumo e o reúso de água são técnicas genéricas que devem ser aplicadas em todos os setores da sociedade: áreas residenciais, comerciais e industriais.

Hespanhol (1997) descreveu e detalhou várias possibilidades de reúso de água. Os esgotos domésticos e residenciais são possíveis fontes de água. Possíveis consumidores são: a indústria, a agricultura, a recreação e o abastecimento urbano.

Se por um lado o consumo de água em residências e no comércio segue um padrão (torneiras, banheiros, descargas e outros), o mesmo não ocorre na indústria. Na indústria há diversos tipos diferentes de consumo, cada qual com suas características e critérios de qualidade. Assim, para fins de reúso industrial, deve-se avaliar cada caso particular.

O setor industrial já vem desenvolvendo soluções para reusar águas residuais há mais de 25 anos. Desde a década de 70, o tema reúso de água vem sendo abordado na indústria (Carnes et al.,1973; Hospondarec & Thompson, 1974 e Mishra et al., 1974). Takama et al. (1980) apresentaram um trabalho pioneiro sobre o uso de programação matemática com o intuito de reusar água industrial.

A Tabela 3 mostra os critérios de qualidade de água estabelecida por Higgins (1989). Os parâmetros utilizados por Higgins são: SDT (Sólidos Totais Dissolvidos), DQO (Demanda Química de Oxigênio), SST (Sólidos Suspensos Totais) e Dureza.

Trabalhos como Asano & Mills (1990), Asano (1991) e Asano & Levine (1995) discutem de maneira ampla as categorias de reúso e seus elementos essenciais à sua implantação. Asano et al. (1998) estudaram, dividiram e classificaram metodologias para minimização de consumo e reúso de água.

Tabela 3 – Grau de qualidade requerida à água

Grau de qualidade	Parâmetros			
	SDT (mg/L)[a]	DQO (mg/L)	SST (mg/L)	Dureza (mg/L)[b]
Tipo I: água ultrapura	< 10	<1	0	0
Tipo II: água de processo de alta qualidade	10 - 60	0 – 10	0	<30
Tipo III: água tratada	20 - 60	0 – 10	0 – 10	30-75
Tipo IV: água bruta ou reciclada	60 - 800	10 - 150	10 -100	-

a) Valores baseados em dados fornecidos pela ANEEL
b) Valores baseados e pela classificação da água em função de dureza
c) SDT – sólidos totais dissolvidos; DQO – demanda química de oxigênio; SST – sólidos suspensos totais
Fonte: HIGGINS, 1989

Distintas metodologias e tecnologias foram desenvolvidas, objetivando a aplicação em reúso. A técnica “pinch”, por exemplo, foi a pioneira para trocadores de calor em refinarias de petróleo, elaborada por Wang & Smith (1994a, b). Whang & Smith (1995) mostraram que o método apresentado poderia ser adaptado para situações onde ocorrem perdas de água. A metodologia é baseada na integração de processos consumidores de água com o intuito de reaproveitar efluentes e reduzir o consumo de água fresca. A metodologia “water pinch” visa reduzir o consumo de água e a geração de efluentes através da integração de sistemas e/ou processos consumidores de água. Seu desenvolvimento foi um avanço importante nos estudos de otimização do consumo de água em processos industriais. Até então, os sistemas eram avaliados isoladamente, de maneira que a possibilidade de ganhos através da integração de dois ou mais processos não era abordada.

Na mesma linha de pesquisa, Dhole et al (1996) difundiram e popularizaram metodologia usando a técnica “water pinch”. Kuo & Smith (1998) introduziram uma abordagem gráfica com o objetivo de simplificar ainda mais esta técnica.

Winjesinghe et al (1996) estudaram o reúso aplicado em torres de resfriamento. Testes em escala piloto comprovaram que o uso em torres de resfriamento de água de reúso clorada após tratamento secundário é tecnicamente possível. Os testes foram realizados comparando o rendimento do sistema alimentado com água potável e com água de reúso. Os resultados mostram que o desempenho do sistema e o crescimento de biofilme em ambos os casos foram similares.

Chang (2000) avaliou as possibilidades de minimização de desperdício e reúso de água em unidades industriais de Nitrocelulose. Algumas propostas podem ser citadas, tais como:

- instalação de sistemas de re-concentração de ácido nítrico;
- instalação de sistema de concentração de ácido sulfúrico;
- instalação de sistema de absorção de NOx;
- instalação de sistema de retificação de Isopropanol.

O trabalho de Chang apresenta uma abordagem interessante, pois propõe, além de reúso de água, a otimização do consumo e a recuperação de outros produtos químicos, tais como: ácido sulfúrico, ácido nítrico e isopropanol.

As idéias e metodologias propostas por Chang já haviam sido implementadas pela empresa abordada antes da realização deste estudo e, portanto, elas não serão objetos de avaliação deste trabalho.

Com foco em processos de refino de petróleo, Bagajewicz (2000) revisou técnicas de projetos de redes de águas, concluindo que os modelos podem apresentar resultados satisfatórios se aspectos conceituais forem adequadamente introduzidos. Savelsky & Bagajewicz (2000a, b) analisaram a questão da otimalidade associada ao planejamento e à alocação de águas e águas residuais com um único contaminante. Posteriormente, baseado em programação linear, Bagajewicz et al. (2002) apresentaram uma técnica rigorosa para minimizar o consumo de utilidades em redes de água.

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

Mancuso & Santos (2003) mostraram que os consumidores potenciais de água de reúso em uma indústria são:

a) Torres de Resfriamento
b) Caldeiras
c) Construção Civil
d) Pontos de lavagem de pisos, ruas e equipamentos
e) Irrigação, jardinagem e paisagismo

f) Processos industriais (reações químicas, cozimentos, processos de absorção, lavagens de produtos, lavagens de resíduos, lavagens de gases e outros)

Nos casos dos itens da construção civil e de lavagens (itens c - d) a qualidade requerida da água é baixa e não existem fatores muito restritivos ao reúso. Para a aplicação da água em irrigação e paisagismo pode-se tornar necessário a aprovação do órgão de controle ambiental, pois, existe o risco de contaminação do solo.

Para a aplicação de água de reúso 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 reúso de águas duras, pois, gerariam incrustação na rede de resfriamento, como mostra BETZ (1991).

Com relação ao reúso de água para caldeiras, ele é factível do ponto de vista técnico, sobretudo com o desenvolvimento dos novos processos de tratamento de água utilizando membranas. No entanto, vale ressaltar que caldeiras são consumidores muito exigentes em relação à qualidade da água de abastecimento. De acordo com a ASME (1994), a pureza requerida para a água de alimentação de uma caldeira é tanto maior quanto maior a pressão de operação do sistema de vapor, ou seja, sistemas de vapor de alta pressão requerem água de elevada qualidade. Normalmente utiliza-se água desmineralizada como "*make up*" de uma caldeira.

O tipo de reúso mais aplicado em sistemas de vapor é a recuperação do próprio condensado, segundo a detentora da tecnologia Spirax Sarco (2007), que, além de promover economias associadas ao consumo de água e de geração de efluentes, também implica recuperação de calor e, conseqüentemente, redução no consumo de combustível da caldeira.

Segundo Jacob et al(2010), 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.

Savulesco et al(2005) estudou a recuperação de água e de energia térmica simultaneamente. Neste cenário, não somente a qualidade da água, em termos de contaminação, é importante, mas também sua temperatura no ponto consumidor e a

sua entalpia. Em casos onde há diversos consumos de distintas correntes de água, cada qual com uma temperatura diferente, há a possibilidade de, além de reusar a água, avaliar o potencial de recuperação da energia térmica contida nas correntes efluentes.

Cichocki (2005) utilizou metodologias de segregação de efluentes, objetivando o reúso. Os projetos, as fábricas e os processos desenvolvidos no passado não foram concebidos com o conceito de reuso. Ao contrário, foram concebidos com o conceito de descarte de efluentes e resíduos. Nesses sistemas antigos, diferentes correntes (drenagens, purgas, efluentes e outros) com diferentes origens e, conseqüentemente, com diferentes características físico-químicas e contaminações diversas são misturadas em um só sistema de captação e enviadas para tratamento dito de “fim de tubo”. Este 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.

O conceito de 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 reúso em cascata.

O tratamento descentralizado de fluxos é econômico e permite o uso mais efetivo de ferramentas de reúso. No caso estudado por Cichoki (2005), purgas de torres de resfriamento foram segregadas do efluente e recicladas para processos produtivos.

O atual desafio dos engenheiros é desenvolver processos que se aproximem de processos ideais de descarte zero de líquido, ou seja, processos nos quais não há geração de efluentes aquosos, apontaram Goldblatt et al (1993).

Koppol et al (2003) mostraram que reduções na emissão de efluente liquido e até mesmo o descarte zero são possíveis, através de um estudo de caso em uma indústria de papel. Além disso, em outros casos estudados pelos autores, em diversas indústrias do ramo químico, apesar de não se atingir o descarte zero, os resultados apontam para reduções representativas no consumo de água fresca.

Alves et al (2006) mostraram que é possível implementar melhorias nos processos industriais de maneira a obter uma “descarga quase zero”. Utilizando tecnologias inovadoras na área de tratamento de efluentes e otimizando o sistema de resfriamento, através da substituição da torre de resfriamento convencional por um sistema de resfriamento hibrido água / ar, foram atingidas reduções substanciais na emissão de efluentes de uma unidade industrial petroquímica.

Na maioria dos casos, o reúso não substitui a necessidade de água fresca numa unidade industrial, pois, poucos sistemas conhecidos atingem resultados com reúso 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 reúso, conforme mostra Maron (2006).

Matsumara (2007) abordou o reúso de água numa indústria alimentícia. O autor mostrou que, utilizando técnicas de conservação, captação de água de chuva, reúso direto de efluente tratado e reúso em cascata, foi possível reduzir em até 12,74% o consumo de água em uma avícola.

Alves et al (2008) estudaram a minimização no consumo de água na geração de efluentes em uma coluna de “*stripping*” usada para remoção de VOC´s (compostos orgânicos voláteis) de uma corrente de efluente industrial. O trabalho propõe a utilização de um refervedor 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.

Alves (2009) aponta diversas metodologias que podem ser adotadas para aplicar o reúso nas indústrias, dentre elas:

- uso direto do efluente da ETE (Estação de Tratamento de Efluentes);
- uso do efluente da ETE após tratamentos adicionais (que visam adequar o efluente à qualidade requerida);
- uso em cascata dos efluentes, de modo que o efluente que sai de um processo seja realimentado em outro processo, sem necessidade de tratamento.

Das três opções, a última é a mais interessante, pois, além de reduzir o consumo de água, não implica aumento no consumo de produtos associados ao tratamento de efluentes e purificação da água.

Bresciani (2009) estudou a otimização do consumo de água no processo de dessalgação de petróleo. A alternativa de injeção de salmoura efluente na própria etapa de dessalgação possibilita uma redução representativa no consumo de água fresca de uma refinaria. Em continuidade aos estudos de otimização do uso e reúso de água na indústria de petróleo, Bresciani et al (2009) desenvolveram um modelo que permite estudar a influência de variáveis controláveis do processo na etapa de separação de emulsões de água/petróleo, o que propiciou o aumento do reciclo de água no processo de dessalgação. Bresciani et al (2010) também apresentaram uma metodologia que possibilita calcular a quantidade de água que pode ser removida de uma emulsão água/petróleo em diferentes condições operacionais. Esta técnica permite com que o processo de separação seja otimizado.

Outra metodologia difundida que visa a otimização do uso e reúso da água é a chamada "*Water Source Diagram*" (WSD), apresentada por Gomes et al (2007). Neste artigo a técnica foi aplicada no estudo de caso de um único contaminante, mas ela pode ser facilmente estendida para a avaliação de casos de contaminações múltiplas. Campos et al (2009) apresentaram resultados da utilização da técnica de WSD em diversos setores industriais. Na indústria de papel conseguiu-se uma redução no consumo de água de cerca de 90%. Nas indústrias têxteis e alimentícias, as reduções foram da ordem de 17,9% e 24,5%, respectivamente. Em uma indústria do setor petroquímico, utilizando a abordagem de múltiplos contaminantes, atingiu-se uma redução de até 22% no consumo de água. Em continuidade aos estudos associados à aplicação de WSD, Souza et al (2010) apresentaram resultados oriundos da aplicação da técnica em outra indústria têxtil. Através do reúso contínuo de água de lavagem, o trabalho mostrou que foi possível reduzir em até 64% o consumo de água na unidade.

3.2 SEPARAÇÃO DE MISTURAS ÁGUA / ÁLCOOL ISOPROPÍLICO

A técnica tradicional de separação de álcool e água é a destilação. A destilação é uma técnica antiga e vastamente difundida na indústria química que visa separar componentes de uma mistura liquida em ponto de bolha com base na diferença de suas volatilidades.

No que tange o desenvolvimento de novas tecnologias para separação de misturas de água / álcool, a maioria dos trabalhos que vem sendo desenvolvidos utilizam técnicas de separação por meio de membranas artificiais, denominada de pervaporação.

Yeom & Huang (1991) apresentaram um modelo matemático para a separação de líquidos baseado na técnica de pervaporação. Huang & Moon (1999) utilizaram a técnica de pervaporação para estudar a separação e misturas etanol/água e isopropanol/água. O trabalho apresentou resultados promissores. Chen et al (2001) estudaram a técnica de pervaporação associada à separação da mistura etanol/água em diversas condições operacionais. Concluíram que a temperatura e concentração de etanol na mistura influem fortemente na performance do processo.

Segundo Hilmioglu & Tulbentci (2004), a pervaporação deve ser considerada uma técnica alternativa de separação. Ela pode não ser aplicável em toda a faixa de concentração existente (de 0 a 100%) e tampouco ela deve substituir completamente as técnicas de destilação, mas a pervaporação se mostra ser uma ferramenta econômica para complementar a destilação em processos que necessitem a quebra de azeótropos. Hilmioglu & Tulbentci (2003) mostraram também que pode-se controlar a seletividade das membranas, a vida útil do equipamento e a performance do processo de separação alterando a composição da membrana empregada.

Outros experimentos mostram que é possível prover distintas características às membranas somente alterando sua composição. Estudos mostram que ao elevar a concentração de algenato de sódio na formulação das membranas, estas atingem maiores níveis de seletividade, conforme descrito em Membranes Technology (2002).

No caso específico da mistura de água e álcool isopropilico há a formação de um azeótropo, isso significa que existe uma limitação termodinâmica para separação destes compostos em uma destilação tradicional. Mujiburohman et al (2005) mostraram que o ponto de azeotropo da mistura binária água e álcool isopropílico em condições atmosféricas é de 87% de isopropanol (mássico), ou seja, mesmo que uma coluna de destilação simples tenha infinitos pratos, a concentração máxima que se obtém de álcool em seu topo é de cerca de 87%.

A fim de se obter isopropanol em concentrações mais elevadas é preciso aplicar outras técnicas de separação. Pode-se, por exemplo, utilizar colunas heterogêneas de destilação azeotrópica, como mostra Chien (1999).

A técnica se resume em concentrar o álcool em uma coluna de destilação simples até próximo de seu ponto de azeótropo, de onde ele é removido pelo topo e condensado. O isopropanol condensado então é alimentado em uma segunda coluna onde é adicionado um terceiro composto, o ciclohexano, por exemplo. Chien (1999) explica que o objetivo da adição do terceiro composto é quebrar o azeótropo da mistura e então a destilação pode continuar até a concentração desejada sem limitações termodinâmicas.

Segundo Mujiburohman et al (2005), uma outra técnica que vem sendo desenvolvida para destilações de misturas que formam azeótropos é a chamada destilação adsortiva, que consiste na aplicação simultânea de técnicas de destilação e adsorção seletiva em uma única tecnologia. Numa primeira coluna de destilação a mistura seria enriquecida até logo abaixo do ponto de azeótropo. A mistura enriquecida seria submetida a um processo de adsorção seletiva em sílica que removeria água da mistura até que ela tenha superado o ponto de azeótropo. Logo após a etapa de adsorção, a mistura de água e álcool concentrado é enviada a uma segunda coluna de destilação para ser concentrada até o nível desejado.

4. METODOLOGIA

Este trabalho foi realizado baseado em um estudo de caso real e aborda o reúso de água em uma indústria química específica. Apesar de se tratar de um caso específico, a metodologia utilizada e descrita a seguir é genérica e ampla, de maneira que pode ser utilizada em diversos campos de atuação distintos.

A metodologia apresentada é estruturada seguindo a orientação básica de avaliar os processos que usam água na fábrica, questionando a causa da geração do efluente, as possibilidades de racionalização da água, tratamentos, reúso ou reciclagem do efluente. Isso exige uma abordagem integrada sobre a questão do uso da água e gerenciamento de efluentes. A metodologia básica consiste na identificação de cada uso de água, caracterizando a vazão, a concentração dos poluentes na entrada e na saída e a concentração limite para cada poluente em cada processo; no estudo de possíveis reúsos e tratamentos para cada processo; na montagem e solução do problema de alocação, envolvendo os usos e possíveis reusos e processos de tratamento. Por fim, a solução teórica ideal obtida é submetida a critérios práticos, gerando soluções aplicáveis na planta.

A seqüência de ações consideradas neste estudo envolve:

- Análise conceitual do processo produtivo;
- Levantamento do cenário atual de consumo de água;
    - Construção do balanço hídrico geral;
    - Levantamento do balanço hídrico detalhado;
    - Especificação de qualidade da água;
- Levantamento do cenário atual da emissão de efluentes;
- Identificação e avaliação de oportunidades de racionalização e alternativas de reúso
    - Cruzar cenários atuais de água e efluente;
    - Identificar tecnologias alternativas;
    - Avaliar as alternativas encontradas;
- Identificação dos potenciais ganhos econômicos na redução do consumo de água e na redução da geração de efluentes;
- Identificação dos benefícios ambientais;

- Identificação dos benefícios institucionais

4.1 ANÁLISE CONCEITUAL DO PROCESSO

No caso específico de estudos sobre o reúso de água na indústria, esta etapa envolve conhecer detalhadamente o processo produtivo industrial, suas etapas, especificações, restrições e consumos (água, matérias primas, insumos e outras utilidades).

Para tanto, deve-se iniciar os trabalhos avaliando a documentação existente: PI&D´s, fluxogramas de processo, procedimentos operacionais, relatórios de desempenho e outros. Em seguida, deve-se fazer o reconhecimento de campo, checando as informações obtidas nos documentos analisados com a situação real de campo. É o momento de sanar as dúvidas remanescentes, ouvir idéias dos engenheiros de operação e processo e operadores, identificar restrições operacionais e definir possíveis gargalos de processo.

Muitas idéias irão surgir e dúvidas serão sanadas durante as visitas em campo, mas também novas questões irão aparecer, de maneira que o ciclo visita em campo seguido de estudo teórico deve prosseguir até que haja domínio completo sobre o processo produtivo, suas particularidades, peculiaridades, rotinas e restrições.

Na etapa de análise conceitual do processo, as principais ações são estudar, visitar e conversar.

4.2 LEVANTAMENTO DO CENÁRIO ATUAL DO CONSUMO DE ÁGUA

.

Essa etapa envolve a análise detalhada dos processos 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 identificar os pontos de maior consumo de água e, conseqüentemente, avaliar oportunidades de racionalização, otimização e reuso.

4.2.1 CONSTRUÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO GERAL

O balanço hídrico é um balanço de massa realizado para o componente “água”, podendo ser do tipo detalhado ou geral. Para um projeto de reúso industrial é aconselhável realizar um balanço hídrico geral para a fábrica toda e um balanço hídrico detalhado (corrente a corrente) com foco no sistema a ser estudado.

O balanço hídrico geral é útil para quantificar as demandas médias de água e as emissões médias de efluente por unidade. Com o balanço hídrico geral estabelecido, é possível determinar os pontos de maior consumo de água, os pontos de maior geração de efluentes e os respectivos valores médios. Portanto, após sua conclusão, será possível determinar quais são as unidades que apresentam maior potencial de racionalização e reúso e escolher um volume de controle para o estudo.

Normalmente, as informações sobre consumo total de água e emissão total de efluente são conhecidas, de maneira que a elaboração do balanço hídrico geral é uma etapa rápida. Caso essas informações não estejam disponíveis, elas devem ser devidamente calculadas e/ou estimadas.

Conhecido o balanço hídrico geral, pode-se optar por avaliar o reúso de água em toda a fábrica ou focar a avaliação do reúso somente nos sistemas que apresentam maior consumo de água. Esta avaliação deve ser realizada caso a caso. Neste trabalho em específico, após a realização do balanço hídrico geral, definiu-se como volume de controle somente a unidade de Nitrocelulose, pois essa unidade consome 75% de toda a água da fábrica.

4.2.2 LEVANTAMENTO DO BALANÇO HÍDRICO DETALHADO

Em geral, as empresas não detêm informações detalhadas sobre o consumo de água de suas unidades industriais, havendo, portanto, a necessidade de levantá-las. Na maioria dos casos, conhece-se apenas o consumo total de água da unidade, sendo que a distribuição de água por equipamento ou sistema nem sempre está disponível. Da mesma forma, as empresas tendem a conhecer a vazão total de seus efluentes, mas desconhecem as vazões individualizadas. Assim, a próxima etapa do

desenvolvimento de um estudo de reúso de água industrial é o que se chama da criação do balanço hídrico detalhado.

O balanço hídrico detalhado deve contemplar a vazão de todas as correntes envolvidas no processo. Quando as informações de vazão não estão disponíveis, estas devem ser medidas, calculadas ou devidamente estimadas, levando-se em considerações os desvios aceitáveis em cada caso.

Ao final desta etapa, será possível observar:

- a magnitude de todas as correntes aquosas;
- quais são os pontos do processo que mais consomem água;
- quais são os pontos do processo que mais geram efluentes.

O balanço hídrico detalhado é uma ferramenta poderosa que resume o cenário de consumo de água e de geração de efluentes em um só documento. Esta ferramenta é a base para as análises das possibilidades de racionalização e reúso.

4.2.3 ESPECIFICAÇÃO DA QUALIDADE DE ÁGUA

Quando se fala em demanda de água há duas informações que são essenciais: a quantidade e a qualidade da água. Para avaliar corretamente um sistema de fornecimento de água, há a necessidade de ambas as informações.

Cada operação ou serviço que envolva água têm uma função e uma qualidade requerida diferente. Água potável, por exemplo, deve ser relativamente pura, microorganismos patogênicos devem estar ausentes e é desejável a presença de cálcio, sódio, magnésio, bicarbonato, entre outros. Água de alimentação de caldeiras deve ser pura, desmineralizada e não conter sais. Água destinada à lavagem de equipamentos não deve ser agressiva ao contato com a pele e tampouco deve ser corrosiva, mas não necessita de severas restrições de qualidade. Assim, para propor alternativas de reúso é preciso conhecer, além da ordem de grandeza das demandas, as especificações de qualidade necessárias em cada consumo. Caso essas especificações não existam, elas deverão ser discutidas e estimadas.

Muitas vezes as especificações de água de processo já existem, mas precisam ser melhores compreendidas e, talvez, flexibilizadas. Na maioria dos casos, as especificações são estabelecidas visando garantir a qualidade do processo em

geral, atendendo inclusive as etapas mais restritivas. Ou seja, cria-se uma regra de qualidade tão restritiva, de maneira que a água que nela se enquadre tenha qualidade suficiente para ser utilizada em qualquer etapa do processo produtivo. Por exemplo, se em uma dada unidade industrial há dois pontos de consumo de água, por exemplo: uma caldeira (consumidor exigente) e um ponto de lavagem de equipamentos (consumidor grosseiro), a especificação da qualidade de água para essa unidade deve ser suficientemente restritiva de maneira a atender as necessidades de ambos os serviços. Portanto, mesmo em um sistema onde há severas restrições de qualidade de água, pode haver locais de consumo grosseiro.

Vale lembrar que caso seja exigida a mesma qualidade de água em todos os pontos consumidores, o reúso torna-se impraticável. Logo, para desenvolver um projeto de reúso de sucesso é preciso conhecer o processo a fundo, discutir, redefinir e flexibilizar as novas especificações de qualidade de água em cada ponto do processo.

4.3 LEVANTAMENTO DO CENÁRIO ATUAL DA GERAÇÃO DE EFLUENTE

Uma vez elaborado o balanço hídrico, têm-se as informações associadas à magnitude do consumo de água e à geração de efluentes. O item anterior trata do detalhamento da qualidade da água necessária em cada ponto do processo, ao invés da tradicional e generalista “especificação geral de água de processo”. Analogamente, há a necessidade de caracterização da qualidade das correntes de efluente, individualmente.

Os efluentes gerados devem ser identificados com base em análise dos processos e operações que utilizam água, tanto como matéria prima como produto auxiliar. As características dos efluentes variam em virtude da tecnologia empregada, do regime de operação, da matéria-prima e insumos, do tempo de funcionamento da indústria e da qualificação dos operadores (MIERZWA & HESPANHOL, 2005). Assim, a análise detalhada de cada um dos processos desenvolvidos proporciona informações valiosas.

Em geral, é preciso que os efluentes gerados por um determinado processo passem por uma caracterização física, química e/ou biológica, para que possam ser

avaliados realisticamente. Nesta caracterização devem ser analisados todos os parâmetros que estão presentes na especificação da qualidade de água de processo e que de alguma forma afetam a qualidade do produto final, além dos compostos normalmente encontrados no efluente.

O Apêndice A apresenta, como exemplo, a tabela de caracterização realizada para as correntes de água e efluente contempladas no balanço hídrico detalhado.

4.4 IDENTIFICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE OPORTUNIDADES DE RACIONALIZAÇÃO E ALTERNATIVAS DE REÚSO

Uma vez que ambos os balanços hídricos e a caracterização das correntes foram realizados, os cenários atuais de consumo de água e de emissão de efluentes estão estabelecidos e os esforços podem ser orientados para os pontos de maiores demandas. Assim, pode-se iniciar a etapa de identificação de oportunidades de racionalização e alternativas de reuso.

Racionalizar o uso da água é uma das primeiras alternativas de um programa de gerenciamento de recursos hídricos. As principais ferramentas 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 reúso, devem ser levados em consideração os seguintes aspectos: 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 maneiras distintas: reúso direto de efluentes, reúso e/ou reciclagem de efluentes tratados. Muitos casos exigem alterações nos procedimentos de coleta e armazenagem de efluentes. No caso de reúso de efluentes tratados, uma das principais preocupações é o processo de concentração de contaminantes específicos, que reduz o potencial de reúso e pode comprometer as atividades que utilizarão essa água. De modo geral, a implantação de qualquer prática de reúso de água ou efluente deve considerar limitações técnicas, operacionais e econômicas.

4.4.1 CRUZANDO OS ATUAIS CENÁRIOS DE ÁGUA E EFLUENTE

A primeira maneira de se buscar alternativas de reúso é cruzar todas as informações levantadas nos cenários atuais de consumo de água e de geração de efluentes. Esta abordagem é realizada respondendo as seguintes questões:

1. Existe alguma corrente que está sendo desprezada junto ao efluente cuja qualidade atenderia a especificação de qualidade de água em algum ponto do processo produtivo? Qual?
2. Existe alguma corrente que está sendo desprezada junto ao efluente e que poderia atender a especificação de qualidade de algum ponto consumidor de água caso fosse submetida a algum tipo de tratamento? Qual é a corrente e qual é o tratamento necessário?

Uma vez avaliadas todas as correntes envolvidas na análise, deve-se listar todas as alternativas levantadas. Posteriormente, estas alternativas deverão ser discutidas e avaliadas tanto do ponto de vista técnico quanto econômico.

No caso específico deste trabalho, é possível citar três alternativas de reúso encontradas cruzando as informações de água e efluente:

- o complemento à recuperação de finos;
- a segregação das drenagens da Homogeneização;
- a concentração parcial de Isopropanol;

4.4.2 IDENTIFICAÇÃO DE TECNOLOGIAS ALTERNATIVAS

Esta abordagem deve ser realizada respondendo as seguintes questões:

1. Há alguma alteração de tecnologia no processo produtivo que possa implicar em menores restrições à qualidade necessária de água?
2. Há alguma alteração de tecnologia no processo produtivo que possa implicar em redução no consumo de água, minimização de emissão de efluentes e/ou propicie o reúso?

3. Há alguma alteração em condições de processo que venham a diminuir uma possível contaminação de alguma corrente de efluente? Esta melhora de qualidade da corrente de efluente poderia propiciar alguma possibilidade de reúso?

Da mesma forma que no item anterior, todas as alternativas aqui levantadas devem ser listadas e, posteriormente, avaliadas.

No caso específico deste trabalho, pode-se citar duas estratégias de racionalização e reúso, envolvendo avaliação de tecnologias alternativas:

- O uso de refervedores nas colunas de álcool;
- O aquecimento indireto nos digestores;

4.4.3 AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS ENCONTRADAS

Após o levantamento das alternativas de racionalização e reúso, elas devem ser avaliadas no âmbito técnico, no âmbito financeiro e no ambiental. Para avaliar tecnicamente as alternativas, além de aplicar metodologias clássicas como o HAZOP, é aconselhável realizar reuniões de alinhamento com representantes do Departamento de Produção e do Departamento de Segurança da empresa. O intuito das reuniões é apresentar as novas idéias e ouvir sugestões, tanto do ponto de vista conceitual, como operacional.

Caso a alternativa proposta seja viável, passa-se para a fase de projeto básico do sistema em estudo. Nessa fase, devem ser dimensionados os principais equipamentos, bem como linhas e bombas. Estes dimensionamentos devem ser realizados com base nos dados de vazão e nos dados de qualidade previamente levantados.

Uma vez que a alternativa proposta esteja tecnicamente aprovada, conceituada e dimensionada, pode-se passar para a fase de avaliação econômica da alternativa. Neste caso, é necessário realizar uma estimativa preliminar de custo do projeto e uma estimativa da economia associada à operação do sistema.

A estimativa de custo do projeto pode ser realizada tanto na prática, solicitando orçamentos reais para fornecedores de equipamentos, como pode ser realizada

através de correlações bem conhecidas e largamente empregadas, Tais correlações podem ser encontradas em literatura especializada (Peters & Timmerhaus, 2003).

Por outro lado, a estimativa da economia associada à operação do sistema deve ser realizada utilizando valores reais do custo unitário da água e do efluente, pois, estes custos podem apresentar grande variação. Normalmente, o custo unitário variável nada mais é que a soma de custos variáveis, custos de manutenção e o custo de depreciação dos ativos associados aos sistemas de água e efluente, tudo isso dividido pelo volume de água consumida e/ou de efluente emitido. Note que, para este custo unitário, não se deve levar em consideração os custos fixos, pois, estes não podem ser abatidos para projetos deste tipo.

A economia referente à operação do sistema de reúso, no que tange o custo com água e efluente, é o produto do volume de água reusada pelo seu custo unitário variável.

Vale lembrar que existem exemplos de reúso que proporcionam economias de outras naturezas. Assim, para calcular a economia global associada a uma proposta de racionalização e reúso deve-se, além de estimar as economias diretas associadas à redução na demanda de água e na geração de efluentes, levar também em consideração possíveis economias de outras naturezas, tais como: redução no consumo de outros insumos e/ou produtos químicos, redução no consumo de energia elétrica e recuperação térmica.

No caso estudado, por exemplo, foram propostas alternativas para recuperação e envio do condensado em ponto de saturação para os desaeradores das caldeiras da fábrica. Nestas alternativas, portanto, foi levada em consideração a economia de combustível (gás natural) que o reúso de água quente proporcionaria às caldeiras da fábrica.

Uma vez estimada a economia operacional global da alternativa proposta e o custo do projeto, pode-se calcular o tempo de retorno do investimento, a taxa de retorno e, portanto, realizar uma análise financeira.

A terceira análise a ser realizada deve ser a avaliação ambiental. A racionalização e o reúso de água podem trazer benefícios ambientais de diversas naturezas. Tais benefícios devem ser avaliados, estimados e/ou calculados. Entre os benefícios passíveis de obtenção em estudos deste tipo, pode-se citar:

- A redução do consumo de produtos químicos no tratamento de água e efluente;

- A redução na geração de lodo nos respectivos tratamentos;
- A redução da emissão de gases do efeito estufa, associados ao consumo de energia elétrica e ao consumo de combustíveis fósseis.

Acredita-se que o enfoque adotado nesta metodologia é mais adequado que a abordagem tradicional, que avalia apenas o efluente, que é o efeito, apontando processos de tratamento que normalmente são de viabilização complexa e cara.

5. ESTUDO DAS POSSIBILIDADES DE REÚSO DE ÁGUA

5.1 LEVANTAMENTO DOS BALANÇOS HÍDRICOS

As Figuras 14 e 15 apresentam os balanços hídricos gerais dos sistemas de água artesiana e industrial, respectivamente. Optou-se pela construção de dois balanços hídricos, pois, trata-se de sistemas distintos.

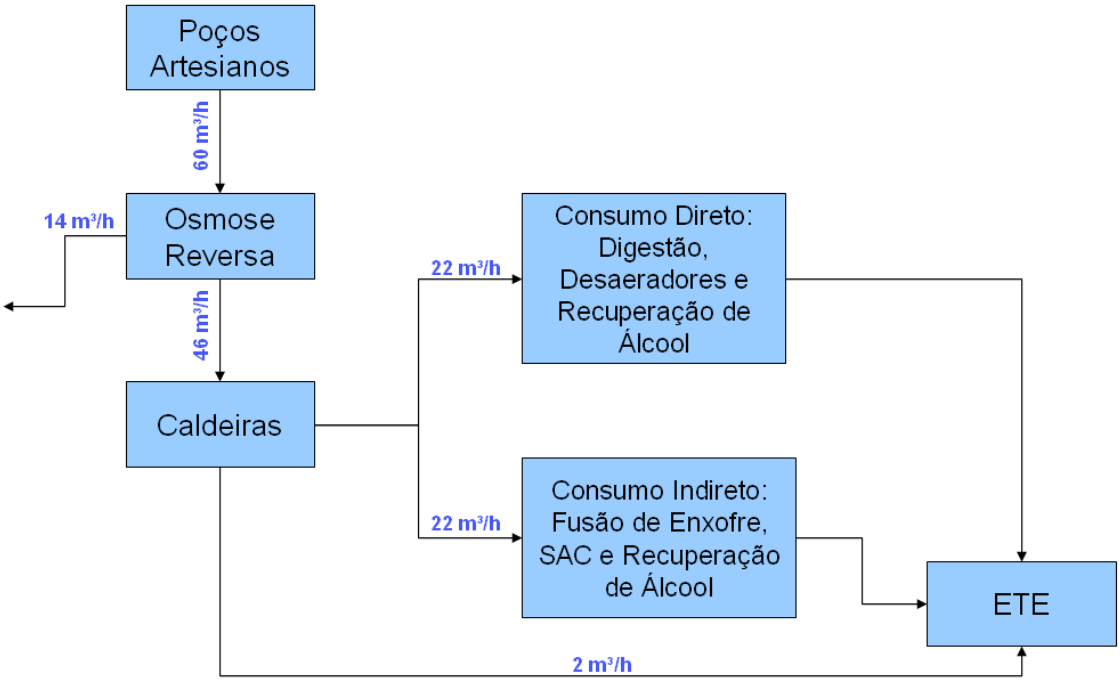


Figura 14 – Balanço Hídrico Geral de Água Artesiana

Da Figura 15, nota-se que o consumo médio total de água industrial é de cerca de 400 m³/h e que a grande consumidora de água é a unidade de Nitrocelulose que consome diretamente cerca de 270 m³/h de água industrial (água de processo) e cerca de 30 m³/h em seus sistemas de resfriamento, totalizando um consumo de 300 m³/h (75% do consumo total da fábrica).

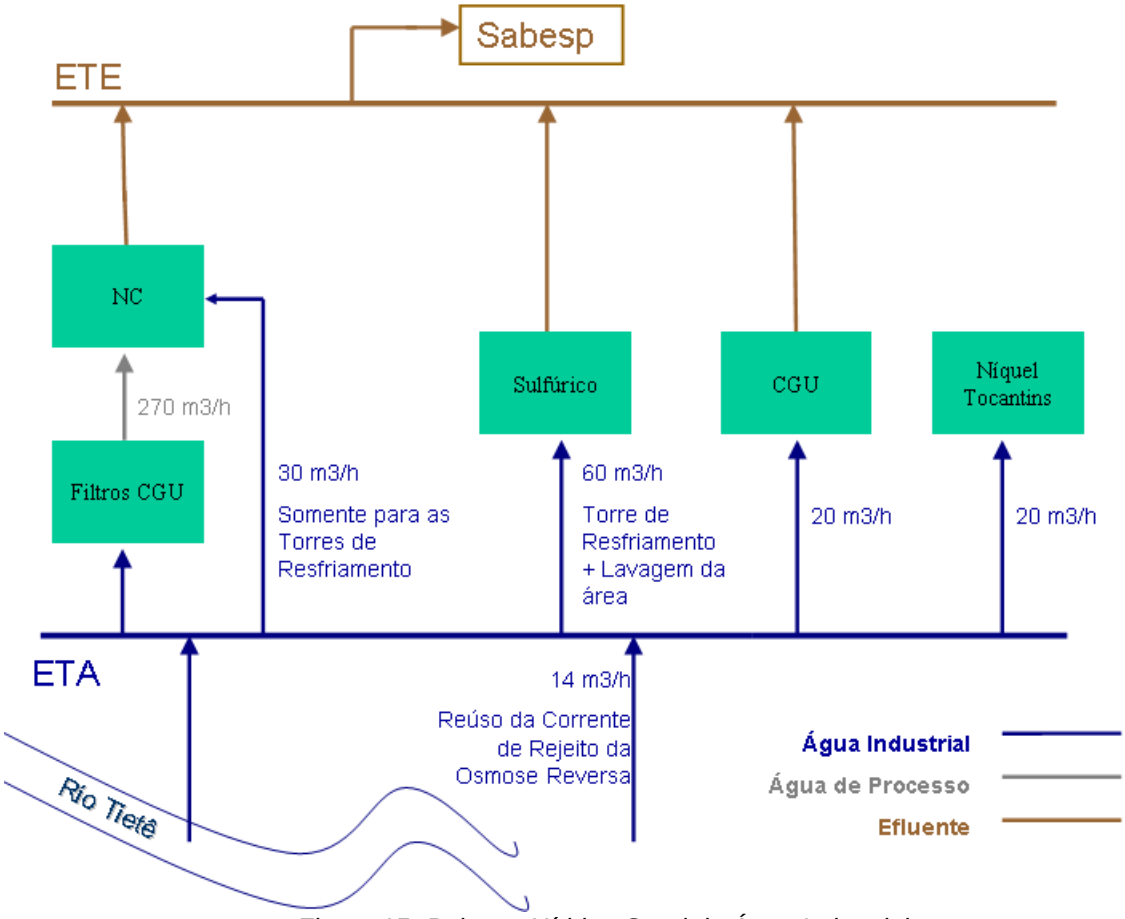


Figura 15- Balanço Hídrico Geral da Água Industrial

A CGU (Central de Geração de Utilidades) é a unidade de geração de água desmineralizada, de vapor, de ar comprimido e de energia elétrica. A unidade denominada de Níquel Tocantins é uma unidade produtiva vizinha que compra cerca de 20 m³/h de água industrial.

Avaliando as Figuras 14 e 15, analisando a magnitude dos consumos de água e conhecendo os processos produtivos, conclui-se que a Nitrocelulose é a unidade que apresenta o maior potencial de reúso, de maneira que este será o volume de controle adotado no trabalho.

Logo, as próximas etapas de execução do trabalho são o reconhecimento do processo produtivo da unidade de Nitrocelulose, seu consumo de água e a construção de seu balanço hídrico detalhado.

A Figura 16 representa o balanço hídrico detalhado da unidade de NC, mostrando as correntes relevantes de água e efluente. São apresentadas também as vazões de cada corrente, permitindo a fácil identificação dos principais pontos consumidores de água e geradores de efluente.

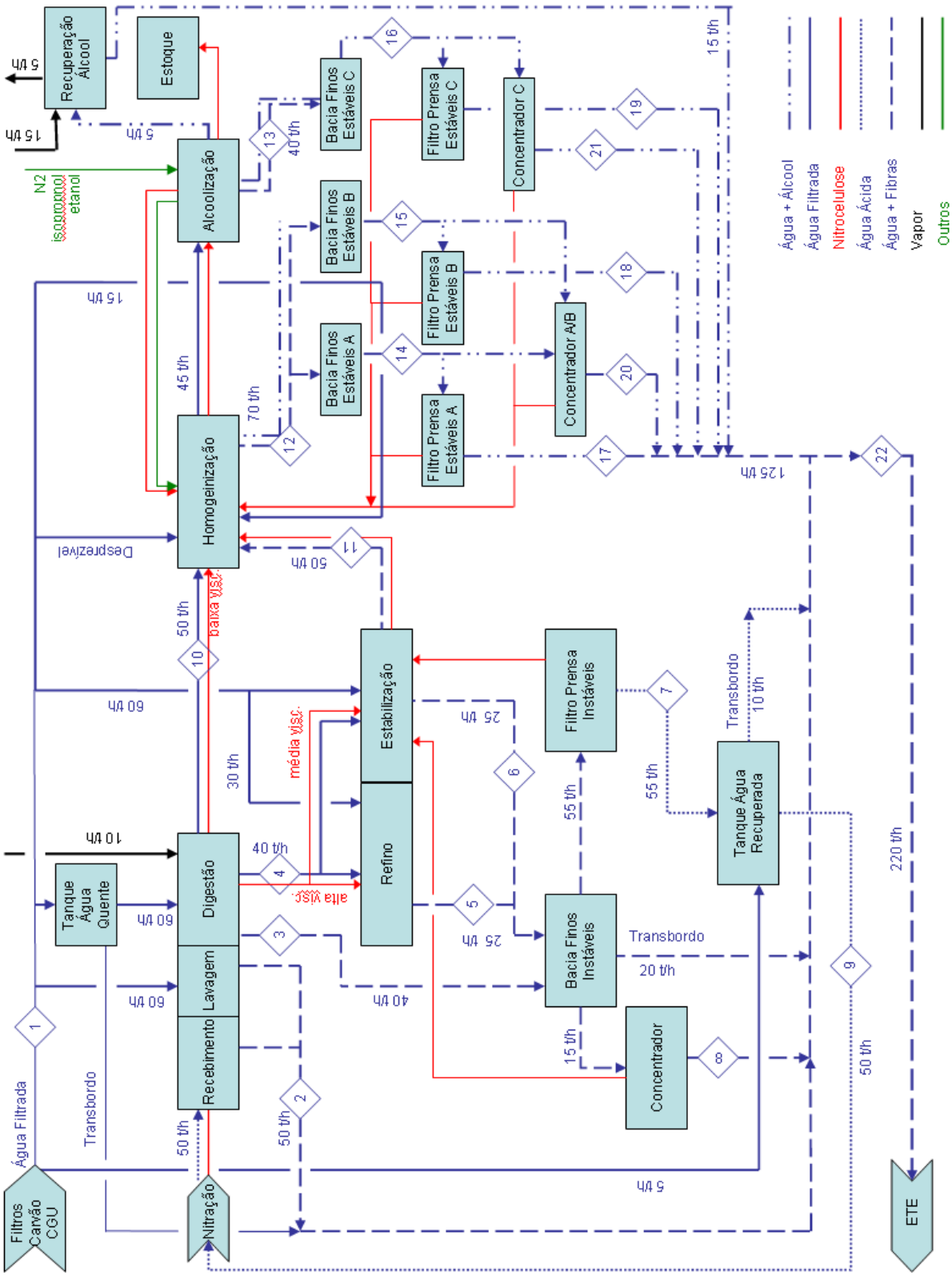


Figura 16 – Balanço Hídrico Detalhado da unidade de Nitrocelulose

O balanço hídrico detalhado apresentado na Figura 16 é um produto importante do desenvolvimento de estudos de adequação do consumo de água. Além de ser de difícil obtenção, pois, normalmente os dados de vazão não estão disponíveis, trata-se da base de dados inicial para qualquer análise de viabilidade técnica de reúso e é um dos resultados mais importantes deste trabalho.

Da Figura 16, nota-se que 200 t/h de água industrial são consumidas diretamente em operações unitárias do processo produtivo de NC, bem como 25 t/h de vapor (dos quais 5 t/h seriam recuperados nas caldeiras – projeto em desenvolvimento). Portanto, há a geração de 220 t/h de efluentes associados às operações unitárias do processo produtivo de NC.

Como o consumo total de água industrial contabilizado na unidade é de cerca de 270 t/h, conclui-se que há um consumo de cerca de 70 t/h de água industrial utilizada para outros fins, tais como: lavagens de área e de equipamentos, desobstruções de linhas, pequenos consumos na área de Nitração, Alcoolização, Recuperação de Álcool e outros.

Conforme expõe o capítulo anterior, a fim de se obter mais informações úteis à elaboração de propostas de reúso, é necessário realizar, além do levantamento do balanço hídrico, um levantamento da qualidade das correntes de água e efluente. No entanto, também não havia registros satisfatórios dessas análises, de maneira que foi estabelecido um plano de amostragem e caracterização de todas correntes envolvidas. As correntes foram amostradas, analisadas e os resultados das análises estão inseridos no Apêndice A.

Com base nas análises das correntes (Apêndice A) e no balanço hídrico detalhado (Figura 16), pode-se avaliar possíveis alterações de processo que propiciem reduções no consumo e reúso de água. As possibilidades foram avaliadas, propostas foram elaboradas e seguem detalhadamente descritas no item 5.3 deste capítulo.

5.2 INFORMAÇÕES ADICIONAIS – RECUPERAÇÃO DE CONDENSADO

O reúso mais comumente utilizado em sistemas de vapor é a recuperação do próprio condensado gerado nos pontos consumidores.

O vapor é o fluido de aquecimento mais difundido na indústria. Na maioria dos seus usos, o vapor tem, única e exclusivamente, a função de aquecimento, seja em reatores, digestores, vasos ou linhas aquecidas (Spirax Sarco, 2007).

Filosoficamente falando, o sistema de vapor é uma maneira eficiente de transportar energia. Em uma central de geração de utilidades, consome-se combustível em um queimador, gera-se calor e, conseqüentemente, aquece-se água para produzir vapor. Este vapor será enviado quente aos pontos de consumo que o utilizarão para aquecer equipamentos e/ou processos.

O vapor é gerado em caldeiras utilizando água desmineralizada e calor (seja oriundo da queima de gás natural, de óleo diesel, de bagaço de cana ou recuperando o calor gerado em um reator industrial). Portanto, o ato de gerar vapor, nada mais é que aproveitar o calor liberado em uma reação para volatilizar a água e armazenar a energia em forma de entalpia. Uma característica vantajosa de sistemas de vapor é que eles dispensam bombeamento. O vapor é gerado pressurizado e essa pressão será a força motriz para o seu transporte. Outra vantagem dos sistemas de vapor é que eles centralizam o aquecimento, ou seja, caso uma fábrica necessite de dez pontos de aquecimento, ao invés de se instalar dez queimadores, instala-se uma grande caldeira que irá gerar vapor de aquecimento para os dez pontos consumidores.

Em casos de consumo de vapor em equipamentos de troca indireta, gera-se condensado que, normalmente, apresenta elevada pureza, pois, trata-se de água desmineralizada que passou por um “processo industrial de destilação” (vaporizada na caldeira e condensada no ponto de consumo).

A concepção da recuperação do condensado é reutilizar o vapor consumido para produzir mais vapor ao invés de alimentar água desmineralizada fresca nas caldeiras. A idéia é captar o condensado no ponto de consumo e encaminhá-lo ao desaerador das caldeiras. Como o condensado é gerado em seu ponto de saturação (quente), além da economia de água há recuperação de energia térmica, o que implica em economia de combustível da caldeira (no caso estudado, economia de gás natural).

Caldeiras são consumidores de água muito exigentes, portanto, a qualidade do condensado deve ser evidenciada antes de conceber seu reúso. Águas contendo gases dissolvidos, principalmente o oxigênio, águas ácidas e/ou águas contendo cloretos não devem ser abastecidas em caldeiras, pois iriam promover corrosão nos

tubos de aquecimento. Tampouco águas com elevada dureza devem ser alimentadas, pois, podem incrustar os tubos de aquecimento, implicando em deficiência na troca térmica, superaquecimento e, conseqüentemente, ruptura dos tubos (Spirax Sarco, 2007). Em ambos os casos haveria um sério risco de acidentes e/ou explosões.

Ao realizar um diagnóstico da qualidade do condensado, não é raro encontrar indícios de contaminações, que devem ser sanadas. Existem várias possíveis origens de contaminação do condensado. Algumas das causas mais comuns são o arraste da água de caldeira (Spirax Sarco, 2007), a contaminação por falha de processo, a corrosão de linhas e/ou equipamentos.

Para sanar tais contaminações pode-se:

- buscar a fonte da contaminação, substituindo o equipamento que apresenta falha e/ou corrosão;
- Em caso de contaminação através do processo, pode-se prever uma etapa de tratamento;

Os processos de tratamento de desmineralização tradicionais empregam membranas de osmose reversa e as resinas de troca iônica. Como a maioria das membranas comercializadas não tem resistência térmica, caso se tenha interesse em recuperar também o calor da corrente quente, é recomendada a abordagem do problema utilizando a técnica de troca iônica, pois, já existem resinas resistentes à temperatura (Spirax Sarco, 2007).

5.3 ALTERNATIVAS DE REÚSO

Neste item são descritas e avaliadas as propostas de modificação no processo produtivo de NC que propiciam reduções no consumo de água e na geração de efluentes. As propostas descritas estão associadas a alterações de processo nas seguintes áreas/sistemas: Digestão, Homogeneização, Recuperação de Finos Estáveis, Recuperação de Alcoóis.

A Figura 17 apresenta o balanço hídrico da unidade de NC editado, ressaltando na cor laranja os sistemas que são abordados neste estudo e onde as propostas de modificações seriam aplicadas.

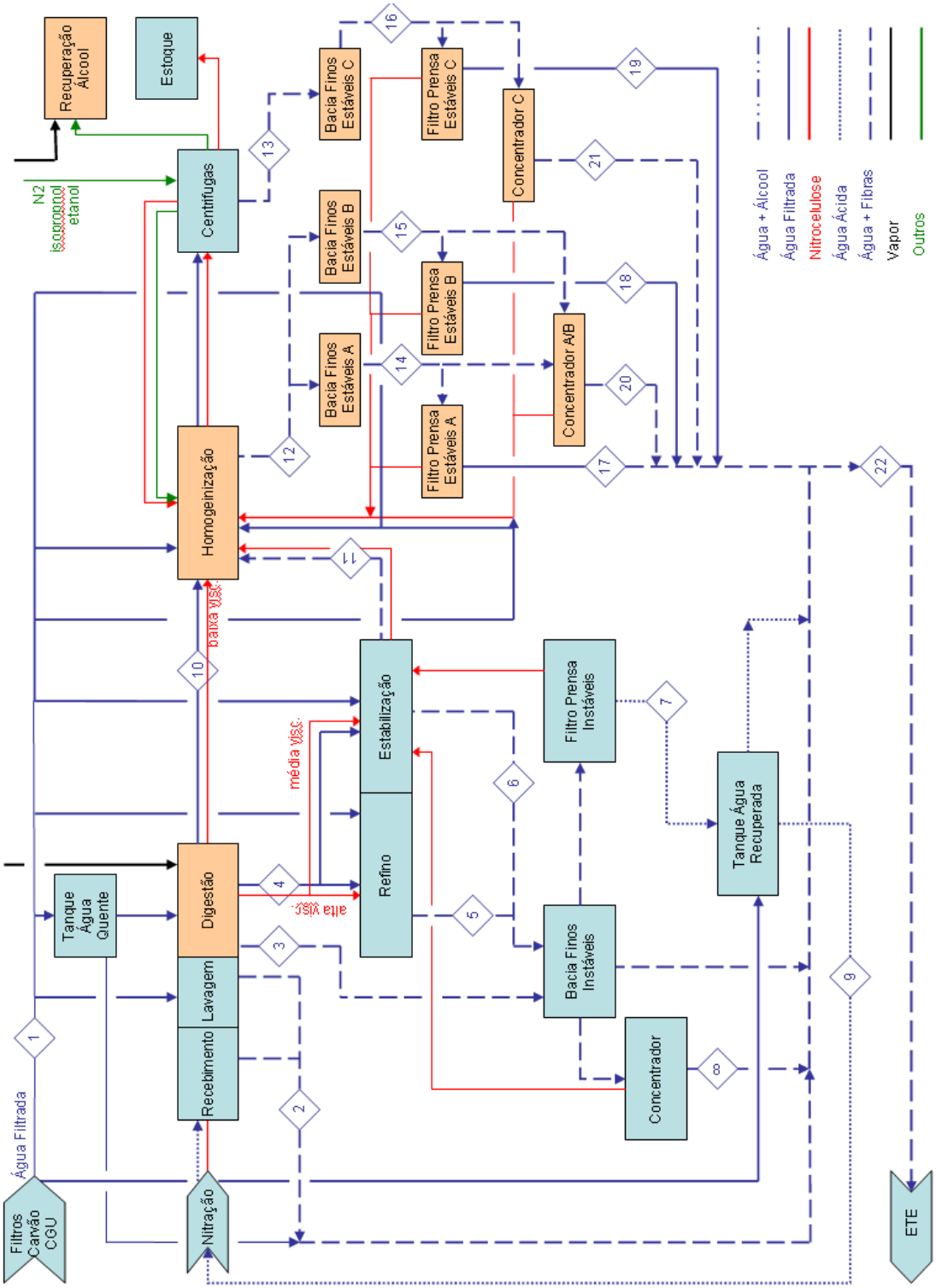


Figura 17 – Balanço hídrico com destaque aos sistemas passíveis de reúso

5.3.1 Complemento à Recuperação de Finos

Com base no balanço hídrico detalhado, 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 execução, denominado “RECUPERAÇÃO DE FIBRAS DE NC – ÁREA 19”. O projeto original trata da modificação da tecnologia empregada nos sistemas de recuperação de fibras estáveis.

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

Segue uma breve explanação sobre o projeto original e sobre a modificação proposta. A NC é transportada em água até a Alcoolização. Na Alcoolização a NC será desidratada e alcoolizada para sua comercialização. A água residual removida contém uma quantidade grande de finos de NC. Hoje, esta água contendo produto é encaminhada à área de recuperação de finos estáveis (bacia de finos, concentradores e filtros-prensa).

A área de recuperação de finos apresenta 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, denominados de Nitrosel, 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 NC – ÁREA 19” visa captar algumas das correntes de água residual oriundas das centrífugas da alcoolização (corrente de número 13 do balanço hídrico detalhado), armazená-las em tanques pulmão dedicados e utilizar filtros tipo vela com retro-lavagem a ar para separar e recuperar as fibras de NC. Deste modo, as fibras podem ser recuperadas sem que haja mistura de tipos diferentes, e podem retornar direto ao homogeneizador de origem. O projeto original visa somente à recuperação das fibras. A água removida nos filtros seria desprezada junto ao efluente.

Em complemento ao projeto original, a proposta deste item é que a água removida seja encaminhada a um tanque de água recuperada, em vez de integrar o

efluente, permitindo o seu reúso. Segue uma explicação mais detalhada sobre a alternativa.

A proposta deste item é alterar o projeto original em execução, que somente visa a modernização do processo de recuperação de fibras e não contempla o reúso água. Nesta proposta, a água seria enviada a um tanque denominado “água com álcool” ao invés de ir para a rede de esgoto. A Figura 18 apresenta um esquema do sistema proposto.

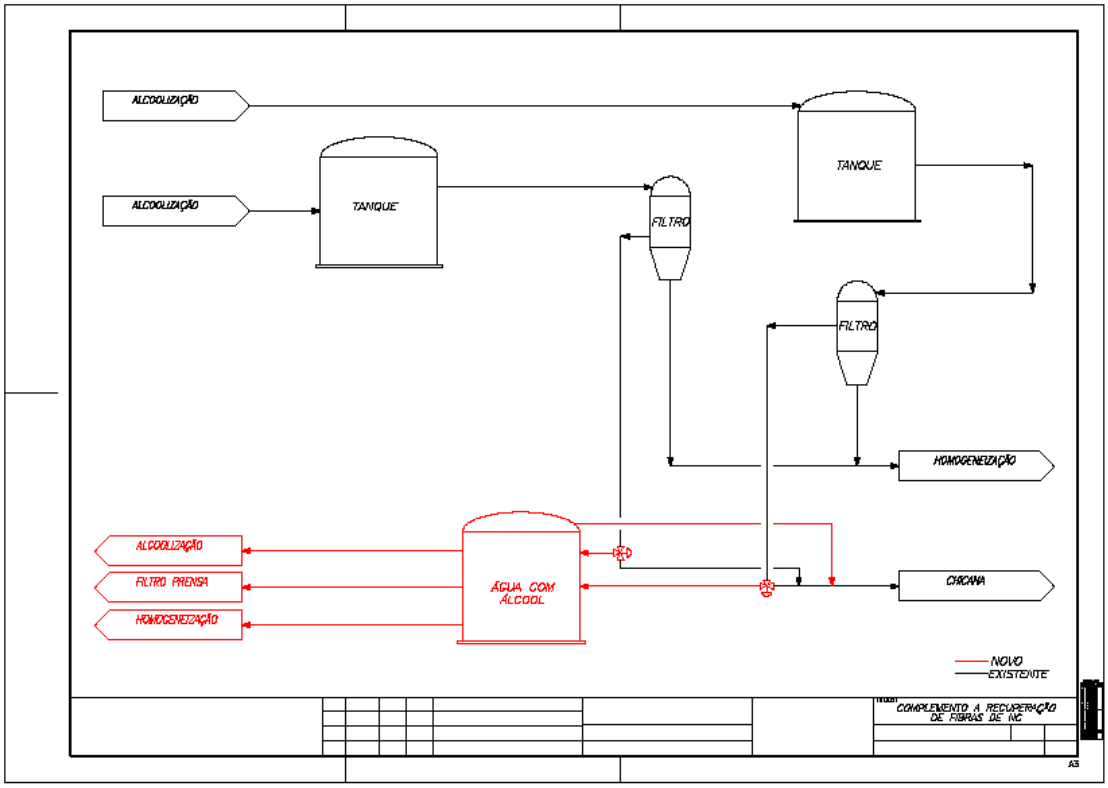


Figura 18 – Fluxograma - Complemento à Recuperação de Finos

A idéia é 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 estão instalados no segundo andar do prédio, de maneira que a água escoará por gravidade até o tanque. Por outro lado, deverá ser previsto um sistema de bombeamento para distribuição da água aos consumidores.

A vazão de água a ser disponibilizada para reúso será de 40 m³/h e conterá traços de álcool (concentrações podem variar de 500 a 5.000 ppm).

Esta faixa de concentração é baixa o suficiente para não propiciar relevante volatilização dos alcoóis e, conseqüentemente, ausência de risco de deflagração.

Por outro lado, esta concentração é alta o suficiente para propiciar contaminação de produtos, assim os pontos de consumo devem ser bem avaliados de maneira a mitigar esse risco.

Uma possível consumidora desta água é a área de alcoolização que poderá utilizá-la para: lavagem da área, lavagem dos equipamentos, abatimento da corrente gasosa de alcoóis volatilizados, desobstrução de linhas e outros.

Além do uso na alcoolização, pode-se prever a utilização desta água para realizar o transporte e o manuseio de Nitrosel, ou seja, para bombear as fibras dos filtros-prensa e dos concentradores até a Homogeneização, para bombear a Nitrosel da Homogeneização à Alcoolização e para qualquer outro uso associado à Nitrosel (seja na etapa de homogeneização, seja na área dos filtros-prensa, seja nos concentradores ou na área das bacias de finos). A água contendo álcool residual também poderá ser utilizada na região das colunas de destilação da área de recuperação de álcool (desobstrução de linhas e de equipamentos, lavagens da área e de equipamentos, descontaminações e outros).

Foi realizada uma estimativa preliminar de custo de instalação do sistema acima proposto. A Tabela 4 apresenta os resultados desta estimativa:

Tab. 4 – Estimativa Preliminar de Custo – Complemento à Recuperação de Finos

Equipamento	Custo
Tanque Fibra	R$ 40 mil
Bombas	2x R$ 25 mil
Tubulação	R$ 50 mil
Engenharia e Montagem	R$ 100 mil
Custo Total Estimado	**R$ 240 mil**

Assim, estima-se o custo total do projeto em R$ 240 mil. Se por um lado a execução do projeto tem um custo associado, por outro, há uma economia associada à operação do sistema decorrente da redução no consumo de água industrial e da redução na emissão de efluente.

Baseado em balanços financeiros confidenciais da companhia, que levam em consideração os custos variáveis da ETA, os custos variáveis da ETE, os custos de manutenção dos sistemas e os custos associados à depreciação das instalações,

chegou-se a conclusão que para cada m³ reduzido no consumo de água, há uma economia de R$2,82 (valor válido para o ano de 2010).

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$112,80/h ou R$ 988.000,00/ano.

Para calcular a taxa 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 reúso. Logo:

ECONOMIA (R$) = 112,80 (R$/h) x 24 (h/dia) x 365 (dia/ano)

ECONOMIA POTENCIAL = R$ 988.128,00/ano

ECONOMIA ASSUMIDA = 0,5 x ECONOMIA POTENCIAL

ECONOMIA ASSUMIDA = R$ 494.064,00/ano.

Comparando-se as estimativas de custo e de economia associados ao projeto, nota-se que o investimento é recuperado em 0,48 anos, ou seja, menos de seis meses.

Do ponto de vista ambiental, a alternativa propõe uma redução de até 10% do consumo total de água da fábrica, o que e implicaria na redução de 32 t/ano na geração de lodo associada ao processo de tratamento de água e uma redução de 228 t/ano de geração de lodo associada ao processo de tratamento do efluente. Além disso, esta alternativa implicaria em uma redução de cerca de 10% no consumo de produtos químicos associados ao tratamento de água e de efluente, entre eles: cloro (g) e/ou hipoclorito, PAC (policloreto de alumínio), coagulante, soda caustica e peróxido de hidrogênio.

5.3.2 Concentração Parcial de Isopropanol

No item anterior foi proposto um sistema com o objetivo de reusar água contendo traços de álcool para finalidades que aceitem tal característica. Neste item será analisada a possibilidade de, em vez de reusar diretamente a corrente de água contendo álcool, tratar essa corrente e recuperar parcialmente o álcool nela contido.

Avaliando as análises realizadas, notam-se níveis relevantes de etanol e de isopropanol na corrente de água residual que retorna das centrifugas da área de alcoolização. Essa corrente tem em média 800 ppm de isopropanol, 620 ppm de etanol e uma vazão total de 40 m^3/h.

Como o etanol e o isopropanol têm alto valor agregado, decidiu-se por avaliar as possibilidades de recuperação não somente da água, mas também dos alcoóis.

A primeira questão a ser respondida é: qual dos alcoóis deve ser recuperado? Ambos serão recuperados? Para responder a essa questão é necessário voltar às atenções para as áreas de aplicação de Nitrocelulose.

A Nitrocelulose é um aditivo de tintas de impressão e, entre outros, é utilizada na indústria de embalagens. Alguns setores, como o de embalagens alimentícias, somente adquirem Nitrocelulose embebida em etanol e não admitem traços de contaminação de isopropanol no produto. Esse comportamento não é observado no mercado de Nitrocelulose em isopropanol.

Frente a isso, a possibilidade de recuperação de etanol residual mostra-se mais difícil, pois, caso o produto comercializado não seja totalmente livre de contaminações, traria impactos negativos nos resultados comerciais. Em contrapartida, a recuperação de isopropanol não apresenta estes problemas.

Do ponto de vista econômico, o quadro é ainda mais favorável ao isopropanol. Os preços unitários pagos pela tonelada de etanol e de isopropanol são, respectivamente: R$1.012,00 e R$2.736,00 (Dados fornecidos pelo Depto. Controladoria da empresa, baseados em Jul/10).

Assim, decidiu-se pelo desenvolvimento de um sistema de recuperação de isopropanol devido à ausência de restrições severas de qualidade e ao seu alto custo, o que proporcionaria um ganho econômico representativo.

A próxima questão a ser resolvida é encontrar uma maneira eficiente para concentrar o isopropanol a fim de viabilizar sua recuperação (o isopropanol é utilizado com 99% de pureza).

A unidade de Nitrocelulose já contempla um sistema de recuperação de Isopropanol, cujo fluxograma é apresentado no Anexo A. O sistema é alimentado com isopropanol residual (com cerca de 50%, em massa). A primeira coluna separa o álcool até concentrações próximas ao ponto de azeótropo. O isopropanol é, então, condensado e alimentado na segunda coluna, onde há adição de ciclohexano com o intuito de quebrar o azeótropo. Uma mistura de ciclohexano, água e isopropanol é

removida pela corrente de topo. Uma corrente rica em isopropanol (99%) é removida como produto de fundo.

A primeira idéia que surgiu seria utilizar este mesmo sistema existente para concentrar a corrente residual contendo álcool, ou seja, a coluna seria também alimentada com essa corrente residual. Logo, a estratégia utilizada foi simular os sistemas atual e proposto, comparar os resultados e estimar possíveis ganhos.

Para a simulação do sistema de destilação azeotrópica existente foi utilizado o software PROII, versão 8.3 e o pacote termodinâmico ALCO01 (especial para misturas contendo alcoóis). Todos os detalhes típicos e as configurações do sistema foram inseridos na simulação. A especificação utilizada foi recuperação de 98% do isopropanol alimentado na primeira coluna, a composição da corrente de fundo da primeira coluna (99% de água) e a vazão de isopropanol recuperado (4200 kg/h). Os resultados obtidos na simulação estão muito próximos da realidade operacional do sistema, como apresentado na Figura 19.

Stream Name Stream Description		FUNDO	IPA	FEED1	FEED2	STEAM
Phase		Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor
Temperature	C	116,764	100,403	35,000	50,000	119,000
Pressure	KG/CM2	1,953	2,053	1,033	2,000	1,959
Total Mass Rate	KG/HR	10581,886	4200,000	10,100	12741,000	6226,990
Total Weight Comp. Rates	KG/HR					
H2O		10439,0498	40,5623	2,6406	5351,2202	6226,9902
IPROPNOL		142,8355	4159,4380	6,8086	7134,9600	0,0000
CH		0,0000	0,0000	0,6509	254,8200	0,0000
Total Weight Comp. Percents						
H2O		98,6502	0,9658	26,1441	42,0000	100,0000
IPROPNOL		1,3498	99,0342	67,4115	56,0000	0,0000
CH		0,0000	0,0000	6,4444	2,0000	0,0000

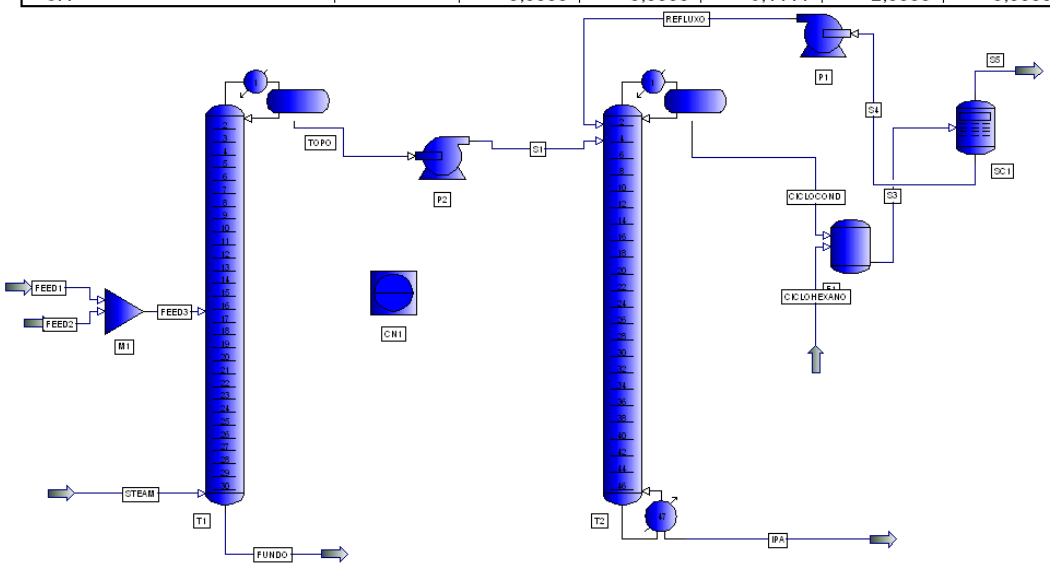


Figura 19 – Simulação do sistema existente de recuperação de Isopropanol

Para a simulação da alternativa de processamento da corrente de água residual contendo álcool no mesmo sistema, usou-se como referência a simulação do sistema existente e adicionou-se uma segunda corrente de alimentação a ser processada na coluna (40 m³/h, com 0,08% de isopropanol e 0,062% de etanol). A Figura 20 apresenta os resultados obtidos nessa segunda simulação.

Stream Name Stream Description		FUNDO	IPA	FEED1	STEAM	RESIDUAL
Phase		Liquid	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid
Temperature	C	117,001	100,952	35,000	119,000	25,000
Pressure	KG/CM2	1,953	2,053	1,033	1,959	2,000
Total Mass Rate	KG/HR	61544,871	4189,999	10,100	16462,648	40000,000
Total Weight Comp. Rates	KG/HR					
H2O		60805,8276	0,4561	2,7524	16462,6478	39943,2000
IPROPNOL		717,3505	4188,8632	6,5456	0,0000	32,0000
CH		0,0000	0,0000	0,7928	0,0000	0,0000
ETHANOL		21,6930	0,6797	0,0092	0,0000	24,8000
Total Weight Comp. Percents						
H2O	Property Table	98,7992	0,0109	27,2516	100,0000	99,8580
IPROPNOL		1,1656	99,9729	64,8080	0,0000	0,0800
CH		0,0000	0,0000	7,8491	0,0000	0,0000
ETHANOL		0,0352	0,0162	0,0913	0,0000	0,0620

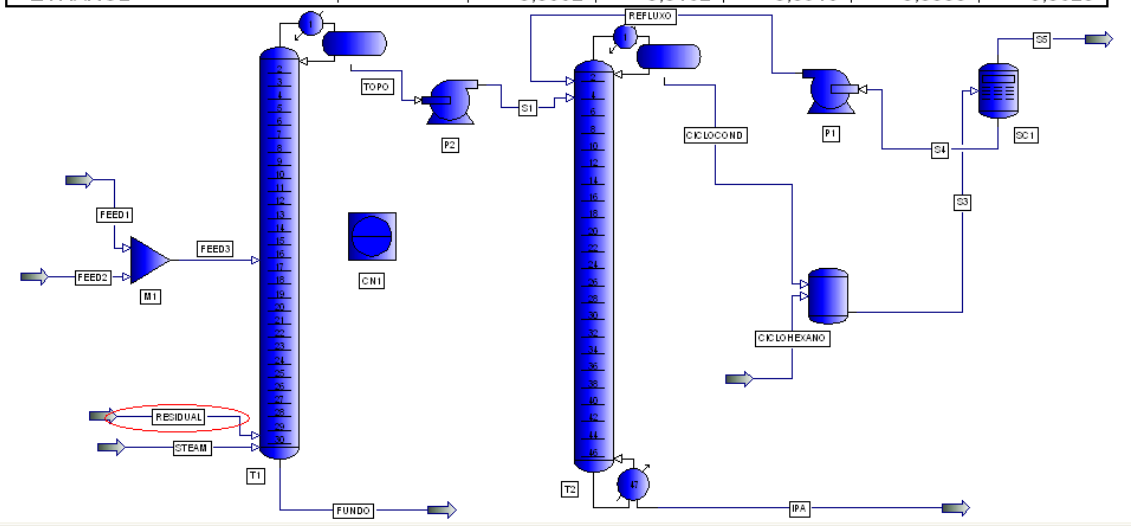


Figura 20 – Simulação de recuperação direta da corrente residual diluída

Note a corrente de residual foi alimentada no último prato da coluna, pois este é o prato no qual o perfil de concentração da coluna mais se aproxima da composição da corrente residual que está sendo alimentada.

Comparando as duas simulações, pode-se observar que em ambos os casos atingiu-se a concentração requerida ao isopropanol. Na simulação da alternativa proposta, houve um ganho de 29,43 kg/h de isopropanol recuperado associado a um aumento de 10.236 kg/h no consumo de vapor.

O custo unitário do isopropanol é R$2.736,00/t, logo, a recuperação de 29,43 kg/h propicia uma economia de R$ 80,52/h. Por outro lado, levando-se em consideração a produtividade específica da caldeira e o custo unitário do gás natural (15,9 kg de vapor/Nm³ de GN e R$0,91/Nm³ de GN, respectivamente), pode-se calcular o custo operacional para produzir os 10.236 kg/h extras de vapor. Com base nos resultados da simulação, calculou-se o custo operacional em cerca de R$ 644,00/h.

Como o custo estimado para a produção de vapor é bem superior à economia operacional estimada associada à recuperação de isopropanol, conclui-se que a alternativa de processamento direto da corrente de água residual no sistema existente de destilação azeotrópica não é atrativa, de maneira que há a necessidade de buscar outra solução.

A corrente de água residual contendo álcool, oriunda das centrífugas da alcoolização, tem fluxo de 40 t/h com 0,08% de Isopropanol (mássico), ou seja, são 32 kg/h de Isopropanol em uma corrente muito diluída. Caso fosse possível concentrar esta corrente de maneira a obter uma corrente de menor vazão e maior concentração, ela poderia ser absorvida pelo sistema de destilação existente e reduzir seu custo operacional. Assim sendo, foi avaliada a alternativa de pré-concentração da corrente residual.

Inicialmente avaliou-se a possibilidade de utilizar pervaporação para separar a mistura água/isopropanol. A possibilidade foi descartada devido à baixa concentração de álcool na corrente. Estudos recentes mostram que a pervaporação é uma alternativa interessante para separar misturas álcool/água, mas sua eficiência oscila em função de parâmetros como a faixa de concentração da mistura, a temperatura do sistema e a composição da membrana. Já foi comprovada a eficiência da pervaporação para separação de misturas de isopropanol com concentrações superiores a 40%, mas resultados positivos como esses ainda não foram obtidos para misturas muito diluídas. Assim, foi abandonada a idéia de utilização de pervaporação para a recuperação do isopropanol e voltou-se o foco do trabalho para o desenvolvimento de um sistema tradicional de destilação.

A próxima alternativa a ser detalhada consiste na pré-concentração da corrente de residual, antes de ser alimentada ao sistema de destilação existente. Pode-se dividir este processo nas seguintes etapas:

- captar a corrente residual gerada no retorno das centrifugas da alcoolização;
- pré-concentrar esta corrente em uma nova coluna de destilação;
- enviar a corrente pré-concentrada ao tanque de isopropanol residual;
- processar a corrente pré-concentrada em conjunto com o isopropanol residual no sistema existente de destilação azeotrópica;

A Figura 21 apresenta um fluxograma referente ao sistema proposto.

Nesse esquema, a água residual que alimenta o sistema proposto retorna das centrífugas da alcoolização e é enviada para os filtros tipo vela instalados no sistema da Homogeneização, conforme explicado no item 5.2.1, com objetivo de separar Nitrocelulose da água.

Após a etapa de filtração, a água removida é enviada a um reservatório (tanque de água residual com álcool). Esta água residual contém, em média, 800 ppm de isopropanol. Do reservatório, a corrente é alimentada em um sistema de destilação com o intuito de pré-concentrar a corrente diluída. Esta corrente é bombeada e pré-aquecida, trocando calor com o vinhoto da própria coluna, antes de alimentá-la efetivamente.

A coluna proposta é pequena, pois, sua função é somente concentrar a corrente alimentada de maneira a remover a maioria da água pelo fundo e a maioria do isopropanol parcialmente concentrado pelo topo.

A corrente de topo é condensada e enviada ao tanque de isopropanol residual (existente), e posteriormente, ao sistema existente de recuperação de isopropanol. A corrente de fundo é resfriada e enviada a um tanque com água recuperada contendo álcool. Posteriormente, esta corrente poderia ser reusada conforme descrito no item 5.2.1 Complemento à Recuperação de Finos.

A próxima etapa de desenvolvimento é simular a alternativa proposta, com o intuito de dimensionar a nova coluna, calcular o custo do projeto, o custo operacional do sistema e os ganhos associados à recuperação de isopropanol.

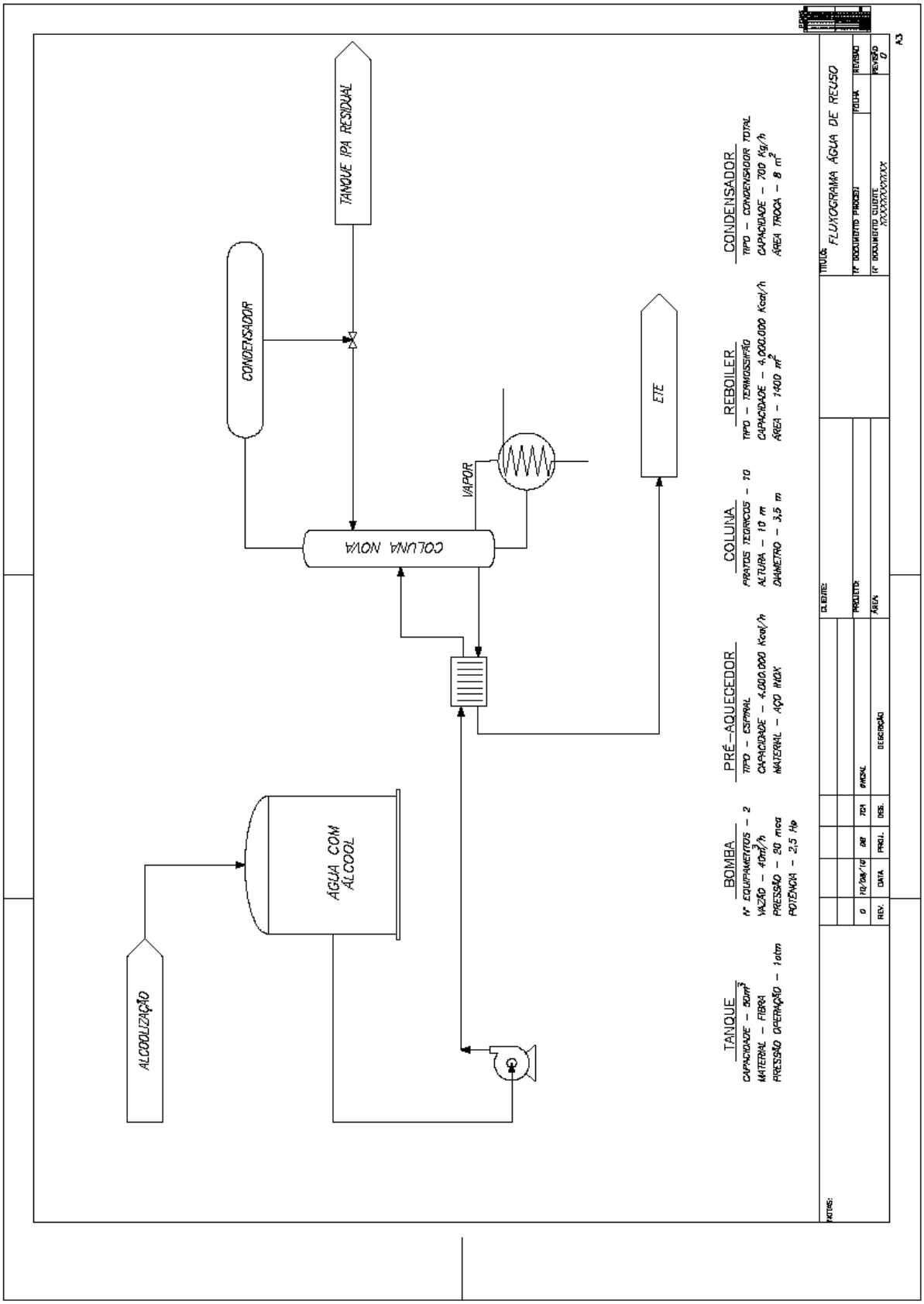


Figura 21 – Esquema da Recuperação Parcial de IPA

Como a alternativa proposta envolve a associação em série de três colunas de destilação e a simulação desta série de colunas seria muito complexa, optou-se por simplificar a alternativa simulando as etapas de destilação em separado. Segue um resumo da metodologia:

1. Simular apenas o novo sistema de destilação;
    a. Obter dados da corrente pré-concentrada a ser alimentada nas colunas existentes;
    b. Obter o número de estágios teóricos;
    c. Obter as cargas térmicas necessárias;
2. Partindo da simulação do sistema de destilação azeotrópica existente, adicionar a alimentação da corrente pré-concentrada obtida na simulação anterior e simular o novo sistema;
    a. Obter dados de produção e consumo do novo sistema;
3. Comparar os resultados das simulações.

Novamente, utilizando o software PROII (versão 8.3) e o pacote termodinâmico ALCO01 (especial para misturas contendo alcoóis), foi simulada uma coluna de destilação capaz de admitir a corrente de residual e realizar sua pré-concentração. As especificações utilizadas foram vazão do produto de topo da coluna e razão de refluxo. Com uma coluna com sete pratos teóricos (incluindo o refervedor e o condensador como estágios), admitindo carga térmica de 3.979.000 Kcal/h de aquecimento no refervedor e de 163.800 Kcal/h de resfriamento no condensador, conseguiu-se uma corrente de topo pré-concentrada com vazão de 50,7 kg/h e concentração de isopropanol de 50%. Os resultados desta simulação são apresentados na Figura 22.

Stream Name Stream Description		DILUIDO	PRE-CONC	AGUA+ALC
Phase		Liquid	Liquid	Liquid
Temperature Pressure	C BAR	25,000 1,961	87,245 1,300	25,000 1,800
Total Mass Rate Total Weight Comp. Rates ETHANOL IPROPNOL H2O Total Weight Comp. Percents ETHANOL IPROPNOL H2O	KG/HR KG/HR	40000,000 24,8000 32,0000 39943,1992 0,0620 0,0800 99,8580	50,793 9,0580 25,3966 16,3385 17,8332 50,0001 32,1667	39949,207 15,7420 6,6034 39926,8594 0,0394 0,0165 99,9441

Column Name Column Description		T1
Condenser Duty Reboiler Duty	MM KCAL/HR MM KCAL/HR	-0,1638 3,9790

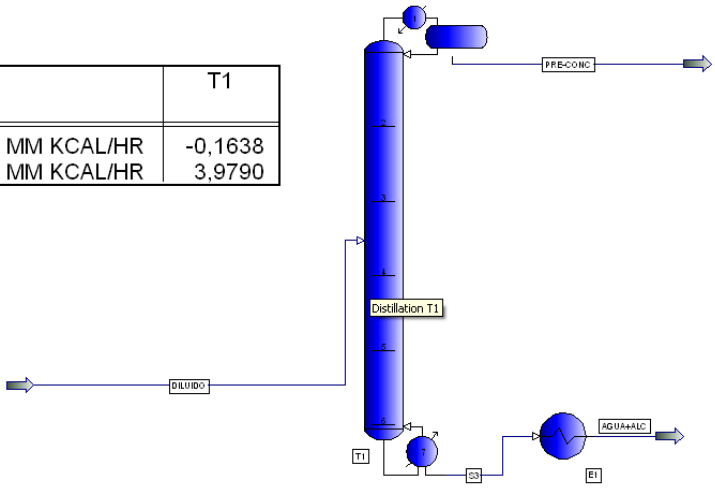


Figura 22 – Simulação da nova coluna de pré-concentração de isopropanol

Esta corrente pré-concentrada é encaminhada ao tanque de isopropanol residual e, após mistura com o restante do álcool residual oriundo da Alcoolização, alimenta as colunas existentes para posterior enriquecimento a 99%.

Para a simulação desta segunda etapa de recuperação, partiu-se da simulação do sistema de destilação azeotrópica existente, acrescentando uma segunda corrente de alimentação, a corrente pré-concentrada obtida na etapa anterior.

A Figura 23 mostra os resultados desta última simulação.

Para facilitar a avaliação dos resultados, a Tabela 5 apresenta uma comparação entre as simulações dos sistemas atual e proposto. Vale observar que, além do ganho econômico associada à recuperação de isopropanol, esta alternativa também traz ganhos associados ao reúso da corrente de fundo da nova coluna (corrente denominada “AGUA+ALC”, apresentada na Figura 22). Este reúso foi devidamente detalhado no item 5.3.1 e propicia uma economia de até R$112,80/h.

Stream Name Stream Description		FUNDO	IPA	FEED1	FEED2	STEAM	PRE-CONC
Phase		Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor	Liquid
Temperature	C	116,746	100,302	35,000	50,000	119,000	86,840
Pressure	KG/CM2	1,953	2,053	1,033	2,000	1,959	1,326
Total Mass Rate	KG/HR	10592,102	4220,000	10,100	12741,000	6226,990	50,793
Total Weight Comp. Rates	KG/HR						
H2O		10447,5752	49,0848	2,6260	5351,2202	6226,9902	16,3386
IPROPNOL		143,3434	4169,7529	6,8102	7134,9600	0,0000	25,3965
CH		0,0000	0,0000	0,6477	254,8200	0,0000	0,0000
EA		1,1829	1,1621	0,0161	0,0000	0,0000	9,0579
Total Weight Comp. Percents							
H2O		98,6355	1,1631	25,9998	42,0000	100,0000	32,1670
IPROPNOL		1,3533	98,8093	67,4280	56,0000	0,0000	50,0000
CH		0,0000	0,0000	6,4132	2,0000	0,0000	0,0000
EA		0,0112	0,0275	0,1590	0,0000	0,0000	17,8330

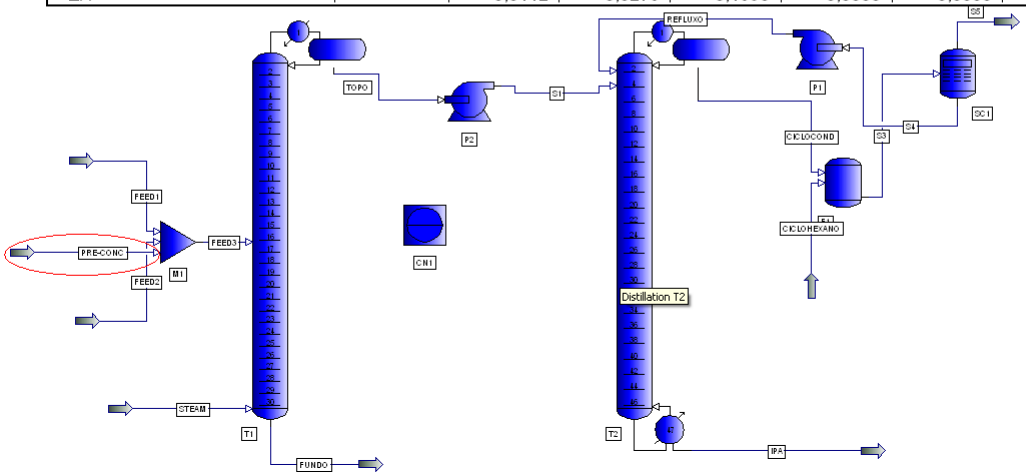


Figura 23 – Simulação do sistema existente admitindo corrente pré-concentrada.

Tabela 5 – Comparação entre o cenário atual e o proposto

	Sistema Atual	**Sistema Proposto**
Isopropanol Recuperado (kg/h)	4159	4169
Concentração do Isopropanol	99%	98,8%
Custo do Isopropanol (R$/t)	2.736,00	2.736,00
Custo Produto Recuperado (R$/h)	11.379,00	11.406,00
Ganho com Isopropanol (R$/h)	**27,30**	
Ganho com Água e Efluente	**112,80**	
Consumo Vapor (kg/h)	6.226	13.805
Consumo GN (Nm^3/h)	391	868
Custo Operacional (R$/h)	355,00	790,00
Aumento de Custo (R$/h)	**435,00**	

Os resultados apresentados na Tabela 5 foram obtidos utilizando como custo unitário de gás natural o valor de R$ 0,91/Nm³ e o valor de 15,9 kg de vapor/Nm³ de GN para a produtividade especifica da caldeira. Neste caso, estimou-se um ganho associado à recuperação de isopropanol da ordem de R$27,30/h, um ganho associado ao reúso de água da ordem de R$112,80/h e um aumento do custo operacional da ordem de R$435,00/h, de maneira que a alternativa proposta ainda não é atrativa do ponto de vista econômico.

Se a proposta não é atrativa do ponto de vista econômico, do ponto de vista ambiental seus resultados são discutíveis. Apesar de propor a recuperação de um produto químico e a redução de carga poluidora no efluente, o processo de recuperação proposto necessita de vapor, consome gás natural e, portanto, sua operação emite gases do efeito estufa.

É possível fazer uma avaliação da magnitude desta emissão. Realizando um balanço de carbono, podem-se calcular os fatores de emissão de carbono equivalente por tonelada produzida e transportada de isopropanol. Este valor foi calculado em 4,409 $t_{CO2}e/t_{IPA}$ e leva em consideração as emissões associadas à sua produção e transporte marítimo e terrestre. Ou seja, para cada tonelada de isopropanol recuperado, haveria uma redução de emissão de 4,409 toneladas de dióxido de carbono equivalente associado a compra do produto novo.

Por outro lado, haveria a emissão de gases do efeito estufa associados ao processo de destilação do isopropanol (aumento no consumo de gás natural na caldeira). Assim, para prosseguir com a análise de emissão de gases, deve ser realizado um balanço de carbono entre os processos de compra e de destilação de isopropanol.

Redução de emissões associadas à Compra e transporte de Isopropanol:

- Economia de isopropanol (kg/h) – 10 kg/h ou 80 t/ano;
- Emissão de Carbono Equivalente do Isopropanol – 4,409 $t_{CO2}e/t_{IPA}$;
- Redução de emissão de gases do efeito estufa – 352 $t_{CO2}e$/ano.

Aumento das Emissões associadas à destilação de Isopropanol:

- Aumento no Consumo de Vapor (1 barg) – 7579 kg/h;
- Aumento no consumo de GN – 477 Nm3/h ou 3.816.000 Nm3/ano;

- Emissão de carbono equivalente na queima de GN – 1,96 $kg_{CO2}e/Nm^3$;
- Aumento nas emissões de gases do efeito estufa (associadas à combustão de gás natural) – 7.500 $t_{CO2}e$/ano;

No que tange a economia de isopropanol, haveria uma redução na emissão de gases do efeito estufa de 352 $t_{CO2}e$/ano, associada a seu processo produtivo e transporte. Haveria também um aumento de 7.500 $t_{CO2}e$/ano de emissão associada à queima de gás natural para destilação e recuperação do álcool. Logo, o processo proposto iria aumentar as emissões de gases do efeito estufa e, portanto, do ponto de vista de emissões atmosféricas esta alternativa também não é atrativa.

Uma solução sustentável deve impactar positivamente nos cenários ambiental, social e financeiro. Como a proposta de recuperação parcial de isopropanol não é atrativa do ponto de vista financeiro e seus resultados ambientais são discutíveis, ela não se enquadra nas premissas do desenvolvimento sustentável e esta alternativa não mais será abordada neste trabalho.

5.3.3 Segregação das Drenagens da Homogeneização

Avaliando a Figura 16, o balanço hídrico detalhado da unidade de Nitrocelulose, pode-se notar que já existe um sistema de reúso em operação: o reúso de água para transporte de fibras da Nitração. Ele opera captando água oriunda do sistema de recuperação de finos instáveis e a utiliza novamente para transportar Nitrocelulose da etapa de Nitração para a Digestão.

O sistema de recuperação de finos instáveis recebe drenagens das áreas de Digestão, Estabilização e Refino. O objetivo deste sistema é recuperar fibras que por ventura tenham escapado das telas dos vasos. Assim, encaminham-se essas drenagens aos filtros-prensa e/ou aos concentradores para remover as fibras da água. As fibras voltam para o processo e a água é enviada ao tanque de água recuperada, de onde é reusada.

Percebe-se que existe outro sistema de recuperação de fibras análogo: o sistema de recuperação de finos estáveis. Um dos pontos que diferencia os dois sistemas é que este último não foi concebido com reúso de água.

A diferença de concepção dos dois sistemas deve-se à presença de álcool no processo de recuperação de fibras estáveis. A presença de álcool em água não é aceita no processo produtivo à montante da homogeneização, sob nenhuma condição, sendo este o principal empecilho à implantação de estratégias para o reúso da água oriunda do sistema de recuperação de finos estáveis.

Por outro lado, a soma das vazões dos permeados e de "*overflow*" do sistema de recuperação de finos estáveis é da ordem de 110 m^3/h. Trata-se de uma vazão grande, que não é reusada e tem um bom potencial, caso a questão do álcool seja sanada.

Para propor alterações neste sistema, é preciso entendê-lo melhor. O sistema de recuperação de finos estáveis capta água das drenagens da homogeneização, capta também a água que retorna da alcoolização e as estoca em pequenos reservatórios denominados bacias de finos, conforme mostra a Figura 8 – Sistema de Recuperação de Finos Estáveis.

O sistema é composto por três bacias de finos. A bacia A recebe somente drenagens da homogeneização, a bacia B recebe as drenagens da homogeneização e tem uma possibilidade operacional de admitir água de retorno da alcoolização. A bacia C só recebe água da alcoolização.

As bacias captam a água contendo finos e as transferem ou para os filtros-prensa ou para os concentradores. Há a possibilidade operacional de enviar água de qualquer bacia de estáveis para qualquer filtro e/ou concentrador de estáveis. Dessa forma, pode-se esperar que o permeado dos filtros e o "*overflow*" dos concentradores sejam uma mistura das drenagens da Homogeneização e do retorno da Alcoolização. É por esse motivo que há presença de traços de álcool de forma generalizada e não se consegue uma recuperação de água eficiente no sistema estável de recuperação de fibras. É com base nestas observações que se propõe a alternativa de segregação das drenagens da Homogeneização.

A idéia de segregação das drenagens é simples e análoga ao conceito de coleta seletiva de lixo, ou seja, a proposta é sair de uma estrutura que mistura todas as drenagens para uma estrutura que separe essas drenagens por tipo, de maneira organizada e que possibilite sua reciclagem. Conforme visto anteriormente, o tratamento em separado de fluxos é econômico e permite o uso mais efetivo de ferramentas de reúso (Cichocki, 2005).

Se por um lado, todas as drenagens das homogeneizações contêm finos, por outro lado, tem-se drenagens com características bem distintas uma das outras.

Caso um homogeneizador esteja preparando um lote de NC de baixa viscosidade (oriunda da Digestão), sua drenagem terá caráter ácido. Se a drenagem for de um lote oriundo da Estabilização, ela terá um caráter neutro. Se a drenagem for oriunda de um homogeneizador que recebeu barricas de reprocesso ou o homogeneizador estiver formando um lote de Nitrosel, ela terá traços de álcool.

Assim, a proposta conceitual do reúso deste item é:

- criar um sistema automático para segregação das drenagens da Homogeneização (corrente 12 do balanço hídrico). Lotes de baixa viscosidade teriam seus drenos encaminhados ao sistema de reúso de água ácida. Lotes de alta e média viscosidade seriam encaminhados ao sistema de reúso de água neutra;
- água de reúso ácida seria recuperada para a Digestão onde poderá ser utilizada no cozimento e na lavagem das fibras;
- água de reúso neutra seria recuperada para a Estabilização, onde poderá ser utilizada no processo de estabilização;
- drenagens contendo álcool serão enviadas à rede de efluente;

Note que a proposta em questão não contempla o reúso das drenagens contendo álcool. A proposta foi elaborada dessa forma, pois, conforme explica o item 5.2.1, os lotes da homogeneização que admitem traços de álcool seriam consumidores de água de reúso com álcool, de maneira que as suas drenagens já seriam provenientes de reuso. Assim, um novo reúso dessa mesma água implicaria em acúmulo de álcool no sistema.

A vazão média total das drenagens do processo de homogeneização é da ordem de 70 m^3/h. No entanto, a alternativa proposta foi concebida desprezando as drenagens que contém álcool, uma vez que seriam provenientes de correntes de água de reúso.

Como cerca de 5 a 10% das drenagens são provenientes de reúso, assume-se que cerca de 5 m^3/h de drenagens contendo álcool serão desprezadas e, portanto, a recuperação de água será da ordem de 65 m^3/h.

A aplicação do conceito de segregação das drenagens é bem simples. O sistema de drenagem atual é composto por uma linha principal que interliga as

bacias de finos estáveis a todos os homogeneizadores. Trata-se de somente uma linha que se ramifica para todos os vasos do prédio da Homogeneização.

A Homogeneização é completamente automatizada, de maneira que os tipos de lotes formados em cada vaso são selecionados e controlados via supervisório.

A Figura 24 apresenta o esquema do processo atual, enquanto a Figura 25 apresenta a proposta de modificação.

Desta forma, a proposta deste item contempla a inserção de válvulas automáticas para controlar e dividir as drenagens de forma organizada. Três válvulas seriam instaladas nas entradas das bacias e uma quarta na linha de envio para a rede de efluente. Assim, quando o operador seleciona via PLC um lote de um dado tipo a ser montado, o sistema automaticamente seleciona o destino da água em seu conteúdo, realiza as manobras de válvulas e transporta a água ao sistema de recuperação correto.

Note que a alteração necessita apenas da aquisição de dois tanques de água recuperada, de bombas de distribuição, de quatro válvulas automáticas, de alterações de programação do software que controla o sistema e da montagem das tubulações de água recuperada.

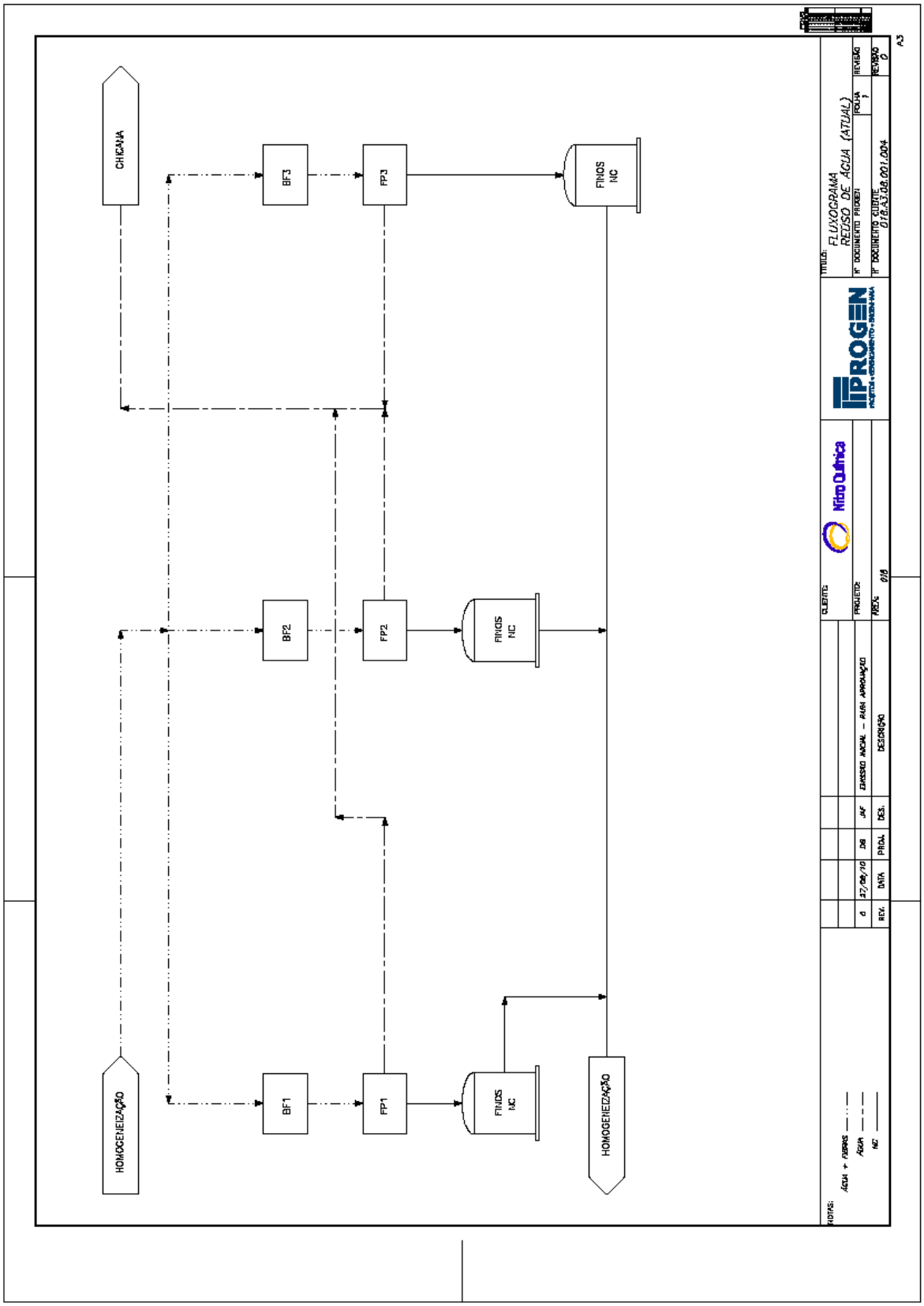


Figura 24 – Sistema Atual de Drenagens da Homogeneização

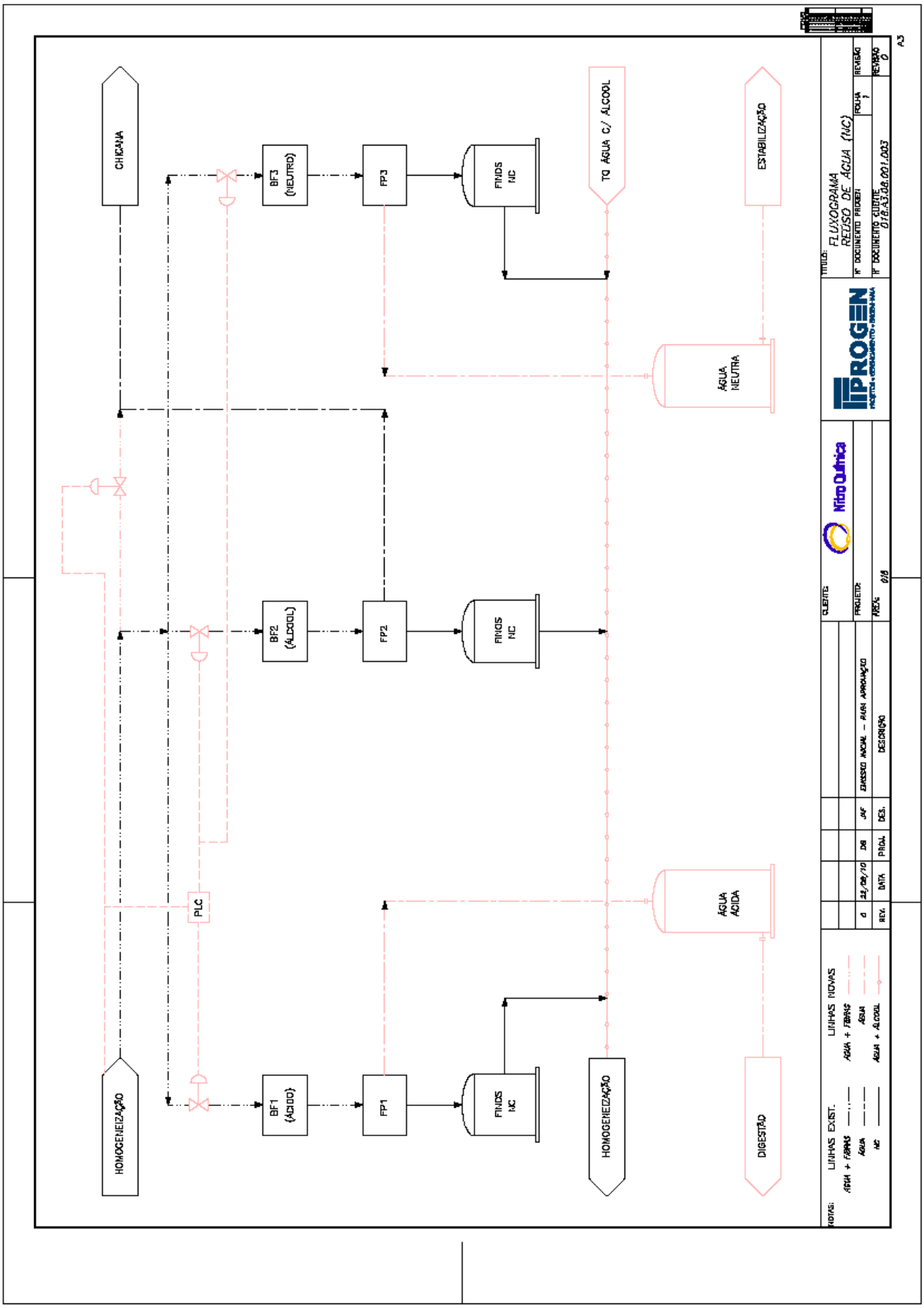


Figura 25 – Sistema Proposto de Drenagens da Homogeneização

Foi realizada uma estimativa preliminar de custo de instalação do sistema acima proposto, somente levando em consideração as informações de processo dos principais equipamentos. A Tabela 6 apresenta esta estimativa:

Tabela 6– Estimativa Preliminar de Custo – Segregação das Drenagens da Homogeneização

Equipamento	Custo
Tanques Fibra	2x R$ 40 mil
Bombas de Água Neutra	2x R$20 mil
Bombas de Água Ácida	2x R$25 mil
Tubulação	R$ 100 mil
Instrumentação	R$ 80 mil
Engenharia e Montagem	R$ 150 mil
Custo Total Estimado	**R$ 500 mil**

Uma vez estimado custo do projeto, pode-se avaliar a economia associada a sua operação e, como anteriormente, o valor de R$2,82/m³ será utilizado para o cálculo de economia associada ao reúso. O sistema proposto tem capacidade máxima de recuperação de 65 m³/h de água, logo, a economia máxima em potencial associada a esta alternativa é de R$183,30/h.

Para calcular o retorno do investimento, vamos assumir um coeficiente de segurança de 50%, ou seja, assumindo que somente metade da água disponível seja reusada e que o restante fosse desprezado, seja por motivos de ausência de demanda nos pontos consumidores ou por indisponibilidade do sistema de recuperação. Logo:

ECONOMIA (R$) = 183,30 (R$/h) x 24 (h/dia) x 365 (dia/ano)

ECONOMIA POTENCIAL = R$ 1.605.708,00/ano

ECONOMIA ASSUMIDA = 0,5 x ECONOMIA POTENCIAL

ECONOMIA ASSUMIDA = R$ 802.854,00/ano.

Comparando-se as estimativas de custo e de economia associados ao projeto, nota-se que o retorno do investimento é de 0,62 anos, ou seja, pouco mais de 7 meses.

Do ponto de vista ambiental, a aplicação desta proposta implicaria em uma redução de até 16% do consumo total de água da fábrica. Isso representa uma redução de 51 t/ano na taxa de geração de lodo no processo de tratamento de água e uma redução de 365 t/ano na taxa de geração de lodo no processo de tratamento do efluente. Além disso, esta alternativa implicaria também em uma redução de 16% no consumo de produtos químicos associados ao tratamento de água e de efluente, entre eles: cloro (g) e/ou hipoclorito, PAC (policloreto de alumínio), coagulante, soda caustica e peróxido de hidrogênio.

5.3.4 Aquecimento Indireto nos Digestores

A quarta proposta a ser apresentada é a chamada “Aquecimento indireto nos Digestores”. Conforme exposto anteriormente, há uma etapa no processo produtivo de Nitrocelulose denominada Digestão. A Digestão é a etapa de cozimento das fibras de NC e é a responsável por determinar as características de viscosidade e de estabilidade do produto.

Uma característica comum a todos os digestores é que eles foram concebidos com injeção direta de vapor. Todo o vapor consumido é borbulhado em solução, logo, o vapor é integrado à mistura. Quando a digestão 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 é necessária.

O objetivo deste item é avaliar a alternativa de substituição da tecnologia de aquecimento dos digestores, que hoje operam com injeção direta de vapor, passando para aquecimento indireto (meia cana, camisa ou serpentina), propiciando a recuperação do condensado gerado. 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.

Por outro lado, há informações relativas à segurança de processo que devem ser cuidadosamente avaliadas. Conforme dito 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. Assim, não é recomendável utilizar vasos serpentinados para a etapa de Digestão de Nitrocelulose.

Uma pergunta que freqüentemente aparece nessa ocasião é: Mas a serpentina não está imersa em água? Qual é a possibilidade de haver Nitrocelulose seca no vaso? Bom, ao longo de anos de operação a possibilidade é factível. Como a maioria dos sólidos, a Nitrocelulose tende a decantar e se depositar. Em cantos ou brechas dos equipamentos ela não só se deposita como acaba se acumulando. Conforme o equipamento é utilizado, horas e horas de operação sob pressão passam e os depósitos acontecem camada sobre camada.

Quando a incrustação tem espessura tal que isole parte da Nitrocelulose depositada do contato com a água, temos uma situação de risco eminente, potencializado pelo contato com o calor oriundo das serpentinas. Portanto, foi excluída a possibilidade de uso de digestores serpentinados e passou-se a avaliar única e exclusivamente a possibilidade de aquecimento externo ao vaso (camisa ou meia-cana).

Mas somente o aquecimento externo não garante os níveis de segurança exigidos neste processo. Por exemplo, imagine que uma linha de vapor fosse acionada, alimentando um digestor vazio (neste exemplo, vazio significa isento de água, mas não necessariamente significa isento de Nitrocelulose). Caso este digestor realmente estivesse sem água, mas contendo resíduos de Nitrocelulose, ter-se-ia uma situação de contato de uma superfície quente com Nitrocelulose seca, ou seja, risco eminente. Assim, caso a alternativa proposta venha a ser executada é importante incluir na etapa de detalhamento do projeto metodologias para avaliação dos riscos envolvidos (por exemplo, um "*Hazop*"), bem como dispositivos que garantam a segurança do processo.

O foco deste trabalho é indicar possibilidades factíveis de reúso de água, indicar seus benefícios, apontar as limitações e os riscos envolvidos nas propostas. O detalhamento do projeto, bem como a discussão prolongada sobre possíveis

dispositivos que garantiriam a segurança do sistema proposto iriam fugir do tema central deste trabalho, mas vale ressaltar que os dispositivos de segurança existem e que as possibilidades para mitigação dos riscos são variadas.

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 superfície do digestor 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 digestor.

Conforme exposto acima, as possibilidades de mitigação são variadas, mas as discussões seriam demasiadamente longas e sairiam do cerne deste trabalho, de maneira que o assunto deve ser tratado numa etapa posterior caso esta proposta venha a ser implementada.

Uma vez determinados os fatores limitantes de processo, o próximo passo é realizar um balanço financeiro para avaliar a viabilidade da proposta. Para tanto, são necessárias duas informações básicas: a diferença de preço entre um vaso com troca indireta e um vaso com injeção direta e a economia associada à sua operação.

5.3.4.1 Dimensionamento do Vaso Encamisado

Assume-se, como premissa, que serão substituídos os equipamentos da linha B, pois, são os mais antigos e os mais próximos do fim de vida. O desenho dos atuais digestores da linha B é apresentado no Anexo B.

Esses vasos necessitam de uma carga térmica de 500.000 kcal/h de aquecimento, ou seja, 580.000 W. Para obter a área de troca necessária ao sistema de aquecimento indireto pode-se aplicar a equação global de troca térmica:

$$Q = A \times U \times \Delta T \qquad (2)$$

Q - Calor necessário ao aquecimento (W)

A - Área de troca térmica (m^2)

U - Coeficiente global de troca térmica ($W/m^2\ °C$)

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

O vapor utilizado é vapor saturado à 5,5 barg, cuja temperatura é de 160°C. Por outro lado, a temperatura média das digestões é de 130°C. Assim sendo, o ΔT médio é de 30°C (diferença média entre a T_{meio} e a T_{vapor}).

O valor do coeficiente global de troca é U = 1000 W/m² °C; (http://www.spiraxsarco.com/resources/steam-engineering-tutorials/steam-engineering-principles-and-heat-transfer/heating-with-coils-and-jackets.asp)

Logo, A = 20 m².

Considerando vasos em aço inox e com capacidade de 22,8 m³, o custo para o vaso encamisado é de R$540.000,00 e o custo para o vaso com injeção direta é de R$450.000,00. Estes valores foram obtidos através de contato com uma caldeiraria especializada, cujo orçamento segue no Anexo C.

5.3.4.2 Custos Operacionais

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

- Carga térmica máxima por digestor – 580.000 W;
- Temperatura média da digestão = 130°C;
- Perdas térmicas do condensado para o ambiente desprezíveis;
- Temperatura ambiente é 25°C;
- Produtividade da caldeira = 15,9 kg_{vapor}/Nm^3_{GN};

Para calcular o custo operacional no aquecimento direto com vapor vivo, é necessário calcular o consumo de vapor nessa situação. Neste caso o vapor é borbulhado na solução, de maneira que ele fica incorporado à mistura.

Trata-se de vapor de 5,5 barg (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 à 5,5 barg e água saturada à 130°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 130°C) = 546 kJ/kg

$\Delta H = 2214$ kJ/kg

Na situação atual de injeção de vapor, há transferência média de 2214 kJ para cada quilo de vapor injetado no digestor. Assim, pode-se calcular o consumo de vapor para atingir a carga térmica máxima do digestor em questão (linha B – 580.000 W).

$$q_v = Q / \Delta H \qquad (3)$$

Q – Calor necessário ao aquecimento (kJ/h)
ΔH – Entalpia disponível por quilo de vapor (kJ/kg)
q_v – Consumo de vapor (kg/h)

$q_v = 942$ kg/h

Portanto, o consumo de vapor é de 942 kg/h para realizar a transferência de 580.000 W para o digestor. No caso de troca indireta, o vapor passaria pela camisa externa ao vaso e, através de sua superfície, trocaria calor com o meio sem contato direto. Nessa situação, a entalpia disponível por quilo de vapor é o próprio calor latente do vapor à pressão de operação.

Calor latente (5,5 barg) = 2088 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 aos desaeradores das caldeiras.

Como os desaeradores são alimentados com água desmineralizada à temperatura ambiente e é utilizado vapor para aquecimento, haverá uma redução no consumo de vapor no desaerador ao recuperar condensado quente. Assim, apesar do aumento no consumo de vapor no digestor há uma economia de vapor no desaerador.

Os desaeradores produzem água desaerada à 105°C (H = 436 kJ/kg) através da injeção de vapor saturado à 1,0 barg (H = 2076 kJ/kg).

H_{vapor} = 2076 kJ/kg

$H_{água\ desaerada}$ = 436 kJ/kg

$\Delta H_{disponível}$ = 1640 kJ/kg

Para cada quilo de vapor injetado no desaerador, são transferidos 1640 kJ para o sistema. Caso o desaerador seja alimentado com condensado da digestão (H = 546 kJ/kg) ao invés de água desmineralizada à temperatura ambiente (H = 105 kJ/kg) haverá um ganho de 441 kJ/kg referente à energia térmica associada ao condensado. Isso significaca que haverá necessidade de menos vapor para aquecer o desaerador.

Portanto, é necessário realizar um balanço de massa e um balanço de energia, para o volume de controle do desaerador, a fim de determinar a diferença do consumo de vapor nos dois cenários. Como o desaerador deve produzir uma dada quantidade de água desaerada (a 105°C), uma vez que se modifica a entalpia de uma corrente de entrada, altera-se a vazão requerida de vapor para aquecimento e isso afeta diretamente o balanço material do equipamento, de maneira que os balanços mássicos e energéticos estão intimamente correlacionados. Assim, se faz necessário um cálculo interativo, para resolver simultaneamente os BM e BE.

Os balanços foram resolvidos utilizando a ferramenta “Solver” do Excel. A planilha de cálculo é apresentada no Apêndice B. A Tabela 7 mostra os resultados dos balanços realizados.

Tabela 7 – Economia de vapor por digestor substituído

Consumo de Vapor com injeção direta	0,942 t/h
Consumo de Vapor para Digestor encamisado	1,000 t/h
Geração de Condensado no Digestor	1,000 t/h
Perdas por flash	11,8 %
Condensado Recuperado	0,88 t/h
Redução no consumo de Vapor no Desaerador	0,188 t/h
Aumento no Consumo de Vapor na Digestão	0,058 t/h
Redução total no consumo de Vapor	**0,130 t/h**

Nota-se dos resultados acima apresentados que, com a substituição de um digestor, haverá uma redução global de 130 kg/h no consumo de vapor. De acordo com as premissas adotadas, deve-se utilizar o valor da produtividade da caldeira

Aalborg, que é de 15,9 kg de vapor/Nm³ de GN, para os cálculos da economia associada. Nesse caso, a economia em termos de gás natural é de 8,19 Nm³/h, o que equivale a um ganho econômico de cerca de R$53.000,00/ano.

Além da economia associada ao combustível, tem-se uma economia da ordem de R$ 17.000,00/ano associada à desmineralização da água e ao tratamento do efluente. Portanto, estima-se uma economia operacional total de cerca de R$ 70.000,00/ano por digestor substituído.

5.3.4.3 Avaliação da Alternativa Proposta

Do ponto de vista econômico, há um acréscimo de R$90.000,00 no custo do digestor provido de troca indireta, no entanto, a economia gerada com seu uso é de R$70.000,00/ano. Com base nisso, estima-se o tempo de retorno do investimento em 15,4 meses, que é um retorno atrativo.

No âmbito ambiental, a substituição de apenas um digestor com injeção de vapor vivo por outro munido de aquecimento indireto permite o reúso de 880 kg/h de condensado quente e uma redução 1,6% no consumo de água artesiana. Além disso, haverá uma redução de 8,19 Nm³/h no consumo de gás natural, cerca de 1% do consumo total da fábrica, o que representa uma redução na emissão de gases de efeito estufa de 135 t CO2e / ano.

Do ponto de vista político-estratégico da empresa, esta alternativa é importantíssima para um plano de continuidade operacional em longo prazo. Os processos produtivos não podem ser mantidos sem a distribuição de vapor. Este, por sua vez, depende exclusivamente da alimentação de água artesiana no sistema de desmineralização. Portanto, utilizando uma lógica seqüencial, nota-se que os processos produtivos dependem diretamente da disponibilidade de água artesiana.

A disponibilidade de água artesiana vem apresentando uma tendência decrescente, outorgas para perfuração de novos poços não estão sendo liberadas e, portanto, o consumo de água artesiana é um ponto de preocupação no que tange a estratégia de continuidade operacional em longo prazo. Logo, projetos que propiciem a recuperação de condensado e uma menor demanda de água artesiana,

além de propiciar retorno financeiro, são importantes no que tange o planejamento estratégico da empresa.

5.3.5 Uso de Refervedores nas Colunas de Álcool

Conforme descrito anteriormente, a unidade de Nitrocelulose conta com dois sistemas de destilação para recuperação de alcoóis: o sistema de destilação de etanol e o de isopropanol.

O sistema de destilação de etanol é composto por uma coluna de destilação que opera com vapor vivo. No caso do isopropanol, o sistema é composto por duas colunas, das quais uma opera com injeção direta de vapor e a segunda já contempla aquecimento por meio de um refervedor.

A proposta deste item é avaliar os ganhos associados à substituição do sistema de aquecimento das colunas, que utiliza a injeção direta de vapor vivo, pelo aquecimento através de refervedores, propiciando a recuperação do condensado gerado.

Seguem dados das colunas de destilação:

Coluna de Etanol:

- Aquecimento – vapor vivo;
- Consumo de vapor (nominal) – 9,6 t/h;
- Tipo do vapor – vapor saturado; 1,0 barg

Primeira Coluna de Isopropanol:

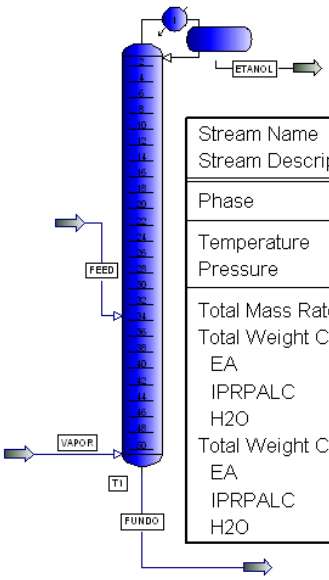
- Aquecimento – vapor vivo;
- Consumo de vapor (nominal) – 6,2 t/h
- Tipo do vapor – vapor saturado; 1,0 barg

Segunda Coluna de Isopropanol:

- Aquecimento – Refervedor;
- Consumo de vapor no refervedor (nominal) – 6 t/h;
- Tipo do vapor – vapor saturado; 1,0 barg;

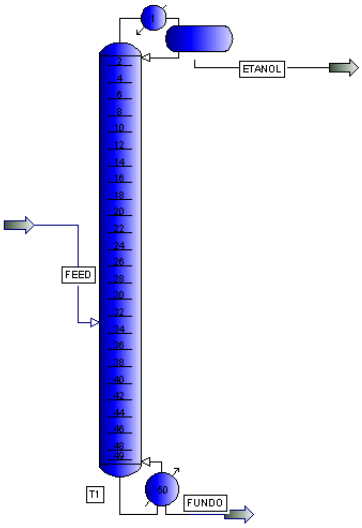
Para iniciar a avaliação das alternativas, foram realizadas simulações da coluna de etanol operando com e sem refervedor, utilizando o simulador PRO II e o pacote

termodinâmico ALCO01 (especial para misturas contendo alcoóis). Elas foram realizadas atendendo as capacidades nominais de projeto dos sistemas. As Figuras 26 e 27 apresentam os resultados das simulações para o processo de destilação de etanol:



Stream Name Stream Description		FEED	FUNDO	ETANOL	VAPOR
Phase		Liquid	Liquid	Liquid	Vapor
Temperature	C	65,000	112,281	78,156	122,000
Pressure	KG/CM2	1,600	1,578	1,033	2,053
Total Mass Rate	KG/HR	11422,000	12969,344	8048,998	9596,312
Total Weight Comp. Rates	KG/HR				
EA		7435,7218	6,5477	7429,2241	0,0000
IPRPALC		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
H2O		3986,2782	12962,7965	619,7736	9596,3115
Total Weight Comp. Percents					
EA		65,1000	0,0505	92,3000	0,0000
IPRPALC		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
H2O		34,9000	99,9495	7,7000	100,0000

Figura 26 – Simulação da coluna de etanol atual



Stream Name Stream Description		FEED	FUNDO	ETANOL
Phase		Mixed	Liquid	Liquid
Temperature	C	65,000	112,109	78,156
Pressure	KG/CM2	0,547	1,578	1,033
Total Mass Rate	KG/HR	11422,000	3373,010	8049,000
Total Weight Comp. Rates	KG/HR			
EA		7435,7220	6,5113	7429,2263
IPRPALC		0,0000	0,0000	0,0000
H2O		3986,2780	3366,4987	619,7732
Total Weight Comp. Percents				
EA		65,1000	0,1930	92,3000
IPRPALC		0,0000	0,0000	0,0000
H2O		34,9000	99,8070	7,7000

Column Name Column Description		T1
Condenser Duty	M*KCAL/HR	-4,9541
Reboiler Duty	M*KCAL/HR	5,1869

Figura 27 – Simulação da coluna de etanol operando com refervedor

Na simulação realizada considerando injeção de vapor vivo (Figura 26), obteve-se um consumo de 9596 kg/h de vapor (valor coerente com os dados de projeto). No

caso da simulação com refervedor (Figura 27), foi obtida uma carga térmica de 5.186.900 kcal/h. Neste caso, assumindo o consumo de vapor de 1 barg (saturado), cujo calor latente é de 525 kcal/kg, o consumo de vapor seria de 9880 kg/h.

Apesar do consumo de vapor ser superior no caso do refervedor, haveria a geração de 9880 kg/h de condensado que, caso fosse recuperado, implicaria em uma economia de vapor nos desaeradores. Esta economia será quantificada mais adiante.

A próxima etapa é simular o sistema de destilação azeotrópica de isopropanol operando com e sem refervedor. As Figuras 28 e 29 trazem os resultados obtidos de tais simulações, que também foram realizadas utilizando o software PROII (versão 8.3) e o pacote termodinâmico ALCO01.

A Figura 28 apresenta os resultados da simulação do processo real de destilação azeotrópica. Foi obtido o valor de 6226 kg/h para o consumo de vapor na primeira coluna, que também é próximo do valor de projeto.

A Figura 29 apresenta os resultados da simulação deste mesmo sistema operando com um refervedor na primeira coluna e mostra que a carga térmica associada ao aquecimento seria de 3.529.300 kcal/h. Neste caso, como o vapor consumido também seria saturado a 1 barg (calor latente de 525 kcal/kg), isso significa um consumo de 6722 kg/h.

Stream Name Stream Description		FUNDO	IPA	FEED1	FEED2	STEAM
Phase		Liquid	Liquid	Liquid	Liquid	Vapor
Temperature	C	116,764	100,403	35,000	50,000	119,000
Pressure	KG/CM2	1,953	2,053	1,033	2,000	1,959
Total Mass Rate	KG/HR	10581,885	4200,000	10,100	12741,000	6226,990
Total Weight Comp. Rates	KG/HR					
H2O		10439,0498	40,5623	2,6406	5351,2200	6226,9900
IPROPNOL		142,8355	4159,4377	6,8086	7134,9600	0,0000
CH		0,0000	0,0000	0,6509	254,8200	0,0000
Total Weight Comp. Percents						
H2O		98,6502	0,9658	26,1441	42,0000	100,0000
IPROPNOL		1,3498	99,0342	67,4115	56,0000	0,0000
CH		0,0000	0,0000	6,4445	2,0000	0,0000

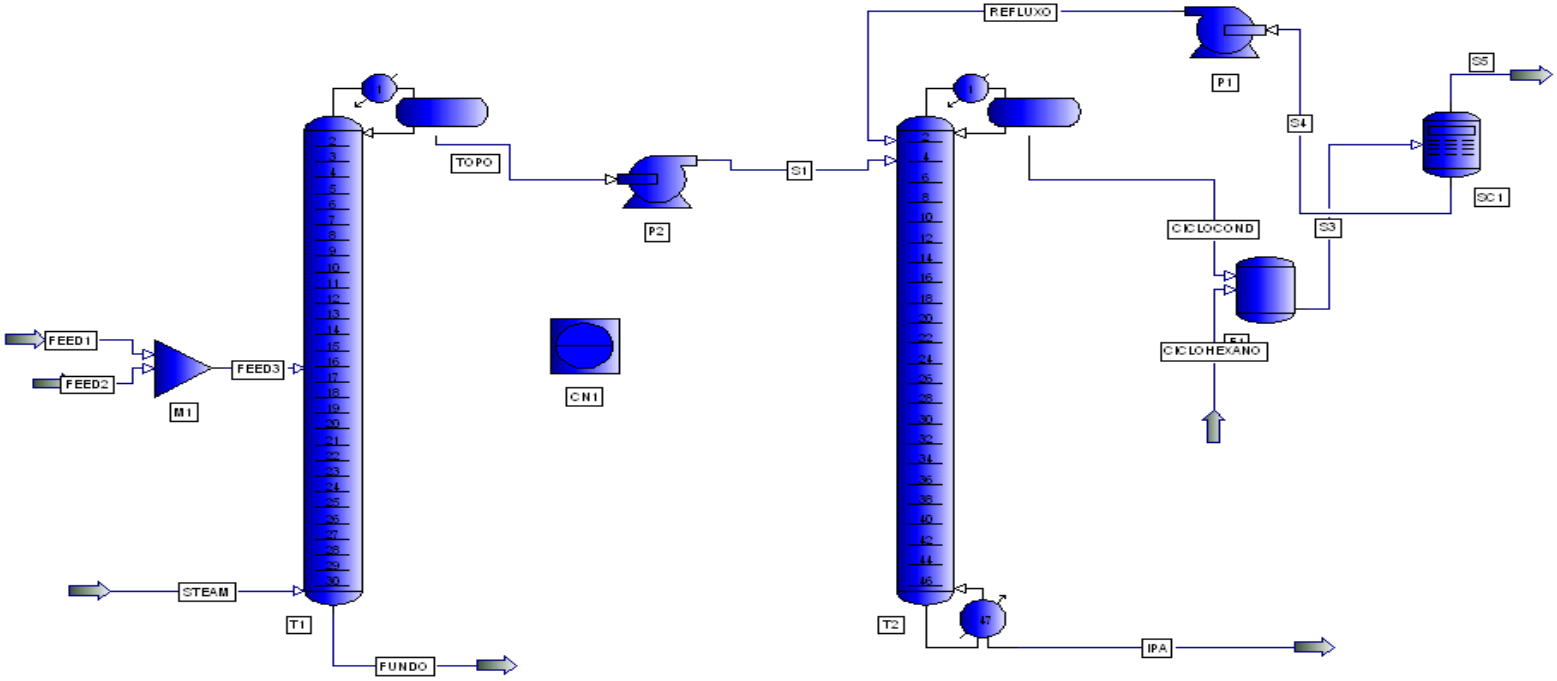


Figura 28 – Simulação do sistema existente de recuperação de Isopropanol

Stream Name Stream Description		ALIMENTACAO	TOPO-COL1	FUNDO-COL1	ISOPROPANOL
Phase		Liquid	Liquid	Liquid	Liquid
Temperature	C	50,000	74,774	118,622	100,754
Pressure	KG/CM2	2,000	1,078	1,953	2,053
Total Mass Rate	KG/HR	12741,000	8530,524	4220,576	4220,000
Total Weight Comp. Rates	KG/HR				
H2O		5351,2200	1140,4184	4213,4346	14,0857
IPROPNOL		7134,9600	7134,6674	7,1417	4205,9143
CH		254,8200	255,4380	0,0000	0,0000
Total Weight Comp. Percents					
H2O		42,0000	13,3687	99,8308	0,3338
IPROPNOL		56,0000	83,6369	0,1692	99,6662
CH		2,0000	2,9944	0,0000	0,0000

Column Name Column Description		T1
Condenser Duty	M*KCAL/HR	-3,0770
Reboiler Duty	M*KCAL/HR	3,5292

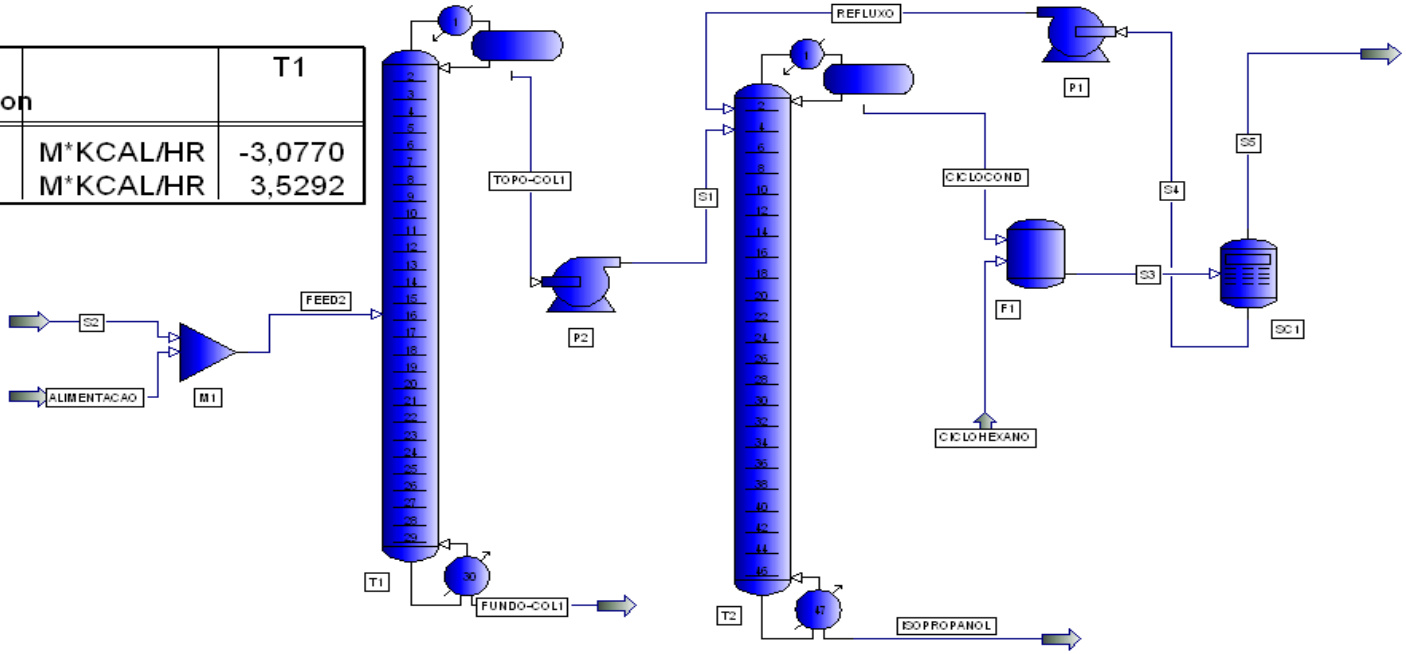


Figura 29 – Simulação do sistema de recuperação de Isopropanol com refervedor

Em ambos os casos, no sistema de recuperação de etanol e no de isopropanol, a instalação de um refervedor implicaria na geração de condensado e na possibilidade de recuperá-lo. Mas vale lembrar que parte do condensado gerado é perdido pelo fenômeno denominado de “flash”.

No processo de remoção do condensado de dentro do sistema de vapor, realizado pelos purgadores, ocorre a despressurização do condensado (originalmente em ponto de orvalho). Esta despressurização implica em queda da temperatura de saturação do fluido (que é função da pressão) e, conseqüentemente, em volatilização instantânea de parte da massa de água condensada. Segue o calculo de perdas por “*flash*”:

$H_{cond\ ;\ 1\ barg}$ = 505 KJ/Kg

$H_{cond\ ;\ atm}$ = 417 KJ/Kg

L_{atm} = 2257 KJ/Kg

Fração Vaporizada = $(H_{cond\ ;\ 1\ barg} - H_{cond\ ;\ atm}) / L_{atm}$ = 0,037

Assim, há perda de 3,7% do condensado formado para a atmosfera, de maneira que efetivamente seriam recuperados, em carga máxima, 9514 kg/h de condensado do sistema de etanol e 6473 kg/h de condensado do sistema de isopropanol. Este condensado seria encaminhado aos desaeradores da fábrica onde haveria uma redução no consumo de vapor.

De modo a estimar a economia associada à recuperação deste condensado, foram resolvidos simultaneamente, utilizando o “solver” do excell, os balanços material e energético no volume de controle do desaerador da caldeira. O memorial de cálculo e os resultados de economia associados à instalação de refervedores nas colunas seguem no Apêndice C. Para estimar o ganho do projeto, foi assumida a operação dos refervedores a uma carga média de 80%.

Os resultados mostram que há uma economia de 2835 kg/h de vapor no desaerador, mas há um aumento de 780 kg/h no consumo de vapor nas colunas, de maneira que a economia global é de 2055 kg/h de vapor (o que representa uma economia de R$155,00/h).

A Tabela 8 resume os resultados obtidos associados a instalação de refervedores nas colunas:

Tabela 8 – Resumo dos ganhos associadas à instalação dos refervedores

Consumo Atual Nominal de Vapor nas Colunas	15,822 t/h
Futuro Consumo Nominal de Vapor nas Colunas	16,602 t/h
Aumento no consumo de vapor nas colunas	0,780 t/h
Geração Total de Condensado (80% de carga)	13,281 t/h
Perdas por Flash	3,7%
Condensado Recuperado (80% carga)	12,776 t/h
Redução no consumo de vapor do desaerador	2,835 t/h
Redução total no consumo de vapor	2,055 t/h
Economia	**R$155,00/h**

Assim, estimou-se uma economia associada a recuperação do condensado de R$155,00/h que, para uma operação anual, representa uma economia R$1,09MM/ano.

A fim de prosseguir com a avaliação econômica, é preciso estimar o custo do projeto. Para tanto, a premissa utilizada é de que não será necessário comprar bombas de condensado e montar tubulações até o desaerador, pois, assume-se que esta estrutura estará disponível. Essa premissa é válida, pois, há outro projeto em andamento, com objetivo de recuperar o condensado do refervedor existente, que já prevê essa infra-estrutura. O projeto de recuperação do condensado gerado no refervedor da segunda coluna de isopropanol já está sendo concebido prevendo as futuras vazões de condensado oriundas dos refervedores propostos. Assim, os custos associados a esta proposta estão relacionados única e exclusivamente à instalação dos refervedores.

Foi realizado contato com uma caldeiraria especializada para orçar o custo dos refervedores. O custo orçado por equipamento foi de R$596.000,00. O orçamento é apresentado no Anexo D).

A Tabela 9 apresenta a estimativa preliminar de custo do projeto:

Tabela 9 – Estimativa Preliminar de Custo – Instalação de Refervedores nas Colunas

Equipamento	Custo
Refervedores	2x R$ 600 mil
Mecânica	R$100 mil
Instrumentação	R$ 80 mil
Engenharia	R$ 100 mil
Montagem	R$ 70 mil
Custo Total Estimado	**R$ 1.550 mil**

No que tange a avaliação financeira, o custo total do projeto foi estimado em R$ 1,55 MM e sua economia operacional estimada em cerca de R$1,09 MM/ano, para o caso de operação em 80% da carga máxima. Neste cenário, a implementação da proposta traria o retorno total do investimento em pouco mais de 17 meses.

Do ponto de vista ambiental, assumindo a mesma premissa de 80% da carga, a alternativa propõe a recuperação de 12.800 kg/h de condensado, o que implica em uma redução de cerca de 15.000 kg/h no consumo de água artesiana (25% do consumo total da fábrica) e uma redução de mesma magnitude na vazão de efluente. Além disso, a proposta proporciona uma redução de 130 Nm^3/h no consumo de gás natural, que representa 22% do consumo total de gás natural da fábrica, e que resulta numa redução de emissões de gases do efeito estufa da ordem de 2200 t CO2e / ano.

6. CONCLUSÕES

Foram detectadas, sugeridas e avaliadas cinco propostas de reúso, das quais quatro são atrativas do ponto de vista financeiro, ambiental e estratégico.

Na alternativa denominada “Complemento à recuperação de finos”, estimou-se investimento de R$ 240 mil, com reúso em potencial de 40 m³/h de água e retorno de investimento em menos de seis meses. Além de disso, a execução desta proposta implica 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 nova 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, a proposta é muito atrativa do ponto de vista financeiro, uma vez que necessita de baixo investimento e proporciona uma economia representativa.

Com relação à segunda alternativa apresentada, denominada de “Concentração parcial de isopropanol”, estimou-se um ganho associado à recuperação de isopropanol da ordem de R$27,30/h, um ganho associado ao reúso de água da ordem de R$112,80/h e um aumento do custo operacional da ordem de R$435,00/h, de maneira que a alternativa proposta não é atrativa do ponto de vista econômico. Se a proposta não é atrativa do ponto de vista econômico, do ponto de vista ambiental seus resultados são discutíveis. Apesar de propor a recuperação de um produto químico e a redução de carga poluidora no efluente, o processo de recuperação proposto necessita de vapor, consome gás natural e, portanto, sua operação emite gases do efeito estufa. A alternativa em questão não apresentou resultados satisfatórios do ponto de vista financeiro e no aspecto ambiental os seus resultados são questionáveis, de maneira que a proposta não se mostrou atrativa.

A terceira alternativa proposta é a chamada “Segregação das drenagens da Homogeneização”. Esta alternativa tem potencial de reúso de até 65 m³/h (o que representa 16% do consumo total de água industrial). Neste caso, calculou-se um custo de R$ 500.000,00 e uma economia de cerca de R$ 800 mil/ano. Assim, haveria o retorno do investimento em 0,62 anos, ou seja, pouco mais de sete meses. A alternativa proposta neste item se enquadra no reúso em cascata, sem a

necessidade de pré-tratamento. Conforme indicam trabalhos recentes (ALVES, 2009), o reúso em cascata é o tipo mais interessante de reúso, pois, além de reduzir o consumo de água, não implica em aumento no consumo de produtos associados ao tratamento de efluentes e purificação da água. A aplicação desta proposta resultaria numa redução de até 16% no consumo total de água da fábrica, bem como em uma redução de mesma ordem na geração de lodo e no consumo de produtos químicos, ambos associados ao tratamento de água e de efluente. Caso seja implantado, o projeto proporcionará economia anual representativa, retorno do investimento em um curto período e redução de impactos ambientais, portanto, além de ser viável do ponto de vista técnico, a alternativa é atrativa do ponto de vista financeiro e ambiental.

A quarta proposta é a chamada “Aquecimento indireto nos digestores”. Foi visto que há uma diferença de R$90.000,00 no custo de um digestor com troca indireta para um digestor com injeção direta. O digestor com troca térmica indireta permite a recuperação de 880 kg/h de condensado aos desaeradores, o que implica em uma redução de 8,19 Nm^3/h no consumo de gás natural e uma economia efetiva de R$70.000,00/ano. Assim, a proposta apresenta um retorno do investimento em 15,4 meses. No âmbito ambiental, a substituição de apenas um digestor com injeção de vapor vivo por outro munido de aquecimento indireto permite uma redução de 1,6% no consumo de água artesiana, uma redução de 8,19 Nm^3/h no consumo de gás natural (1% do consumo total da fábrica) e, portanto, propicia uma redução na emissão de gases de efeito estufa da ordem de 135 t CO2e / ano. Apesar de se tratar da alternativa que envolve o menor custo associado, ela proporciona uma rentabilidade inferior quando comparada com as propostas anteriores. Por outro lado, conforme explicado anteriormente, trata-se de uma proposta estratégica no que tange a continuidade operacional em longo prazo, pois, proporciona uma alternativa para reduzir a dependência de água artesiana e a emissão de gases estufa.

A quinta e última proposta feita é o chamado “Uso de Refervedores nas colunas de Álcool”. A alternativa propõe a instalação de refervedores com o intuito de aquecer as colunas e propiciar a recuperação de condensado. Neste caso, estimou-se um custo para implantação do projeto de R$ 1,55 MM e uma economia média de R$ 1,09 MM/ano, o que representa um retorno do investimento em 17 meses. Do ponto de vista ambiental, assumindo operação em 80% da carga, a alternativa

proporcionaria o reúso de 12,8 t/h de condensado, implicando em uma redução de cerca de: 15 t/h no consumo de água artesiana (25% do consumo total de água artesiana da fábrica), 130 Nm^3/h no consumo de gás natural (22% do consumo total) e 2.200 t CO2e / ano na emissão de gases do efeito estufa. Do ponto de vista estratégico, a alternativa em questão tem um peso ainda mais relevante, pois, conforme dito anteriormente, os processos produtivos dependem da geração de vapor que, por sua vez, depende do abastecimento de água artesiana, cuja disponibilidade vem apresentando tendência decrescente. Portanto, propostas para redução da demanda de água artesiana são estratégicas e essenciais para garantir a continuidade operacional em longo prazo.

De maneira geral, o trabalho propõe a implantação de quatro das cinco alternativas levantadas. As quatro alternativas sugeridas são positivas do ponto de vista ambiental, pois, reduzem a necessidade de água fresca e diminuem a quantidade de efluente gerado. Além disso, caso elas sejam implantadas, o consumo de produtos químicos seria reduzido, bem como a geração de resíduos sólidos oriundos dos processos de tratamento de água e efluente. Algumas delas impactam inclusive no consumo de gás natural e na emissão de gases do efeito estufa.

Quando somadas, as propostas geram uma redução de até 118 m^3/h no consumo de água (39% do consumo total da unidade de NC), de até 138 Nm^3/h no consumo de gás natural (23% do consumo total da fábrica), de 84 t/ano na geração de lodo associada ao tratamento de água e de 598 t/ano na geração de lodo associada ao tratamento de efluentes.

Do ponto de vista financeiro, as quatro alternativas sugeridas apresentaram curtos períodos de retorno do investimento, demonstrando que o reúso de água, além de ser uma prática sustentável e ambientalmente correta, é uma ferramenta útil para reduzir os custos de uma unidade industrial.

A Tabela 10 resume os resultados obtidos no trabalho e a Figura 30 traz o novo balanço hídrico da unidade de NC caso as propostas venham a ser implementadas.

Tabela 10 – Resumo dos resultados obtidos

Alternativa	Custo (R$)	Reúso de água (t/h)	Outro Ganho	Economia Efetiva (R$/ano)
Complemento à recuperação de finos	R$ 240 mil	40	-	R$ 494 mil
Segregação das drenagens da Homogeneização	R$ 500 mil	65	-	R$ 800 mil
Aquecimento Indireto nos digestores	R$ 90 mil	0,88	8,19 Nm³/h de GNl	R$ 70 mil
Uso de refervedores nas colunas de álcool	R$ 1,55 MM	12,8	130 Nm³/h de GN	R$ 1,09 MM

Pode-se observar que as quatro propostas propiciam o reúso 118 m³/h de água, conforme mostrado na Tabela 10. No entanto, avaliando-se a Figura 30 (balanço hídrico após a implementação das propostas), nota-se que o balanço indica uma redução de apenas 75 t/h na geração de efluente quando comparado com a Figura 16 (balanço hídrico atual), onde a geração de efluente é de 220 t/h. Isso decorre do fato do balanço hídrico ter sido elaborado levando em consideração apenas consumos diretos nas operações unitárias e do fato dele não contemplar os consumos periféricos da unidade, tais como: lavagens da área, lavagens de equipamentos, descontaminações, desobstruções de linhas, abatimento de gases e outros.

Como uma das alternativas sugeridas, a alternativa de reúso 5.3.1 Complemento à Recuperação de Finos, propõe o reúso de água em consumos periféricos da fábrica, seus ganhos (redução de cerca de 40 m³/h no consumo de água industrial) não estão contemplados neste balanço, apesar de haver redução no consumo de água. Por outro lado, apesar de não impactar no balanço de massa, o reúso proposto na alternativa proposta 5.3.1 está representada no balanço,

recebendo água do novo sistema de recuperação de finos e reusando na Alcoolização e na Homogeneização.

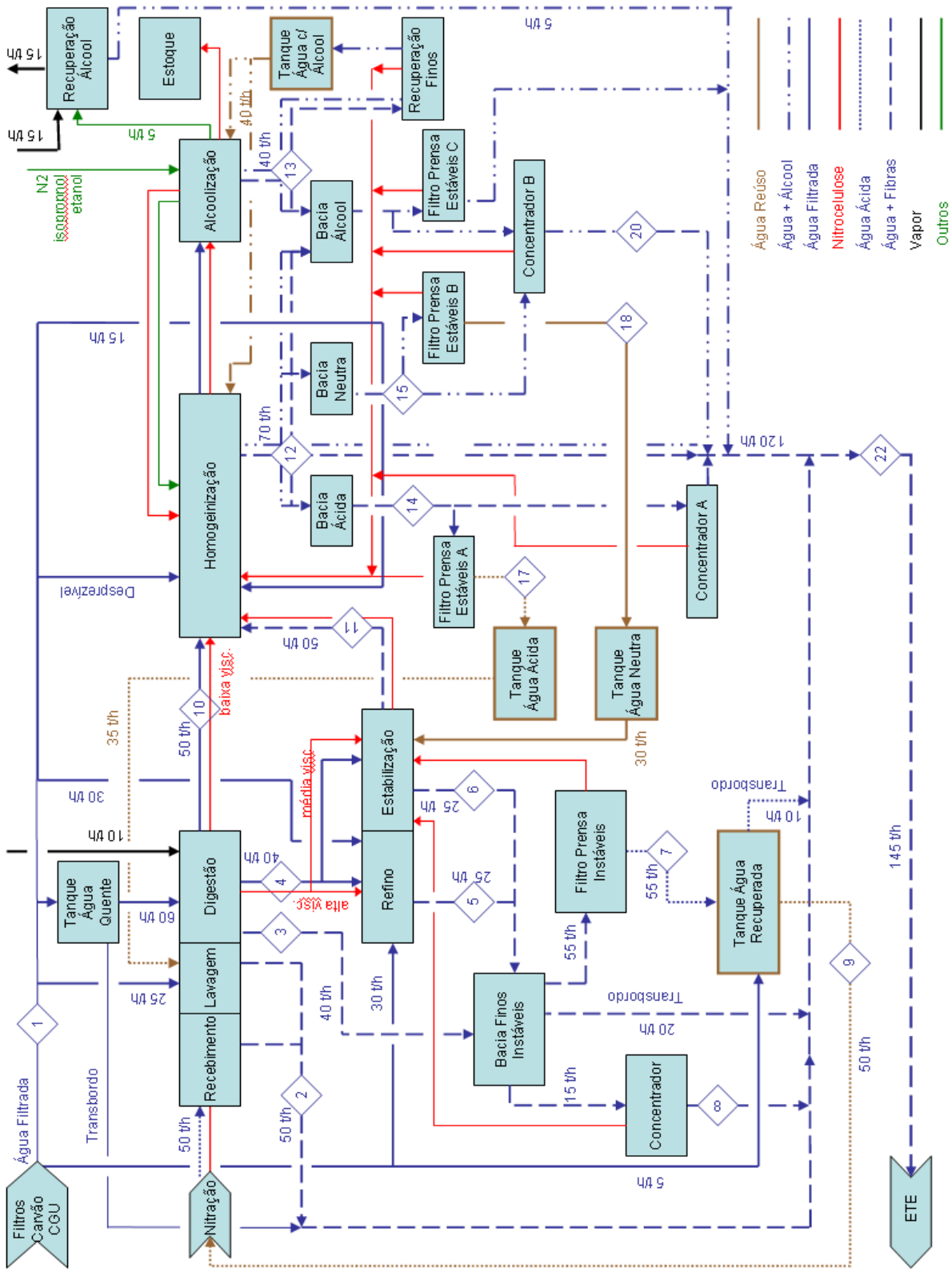


Figura 30 – Balanço hídrico futuro após a implantação das propostas de reúso

REFERÊNCIAS

_____Decreto n◦ 8.468, de 8 de Setembro de 1976, que aprova o regulamento da Lei n◦ 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a Prevenção e o Controle da Poluição do Meio Ambiente.

_____ Lei n° 10.785 de 18 de setembro de 2003, Município de Curitiba, Paraná.

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

ALMATÓ, M.; ESPUNA, A.; PIUIGJANER, L.; Optimisation of water use in batch process industries, Computers and Chemical Engineering, volume 23, December, 1999.

ALVES, R. M. B.; GUARDANI, R.; BRESCIANI, A.E.; NASCIMENTO, L.; NASCIMENTO, C. A. O. Water reuse: a successful almost zero discharge case. Anais da 16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Engineering, Computer Aided Chemical Engineering 21B, Elsevier, 1845-1850, 2006.

ALVES, R. M. B.; BRESCIANI, A. E.; NASCIMENTO, C. A. O. – Strippers for wastewater minimization in an oleofin process unit. In: CHISA 2008 – 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, 2008, Praga.

ALVES, S. S. - Conservação e Reúso de Água na Indústria de Cosmético – Estudo de Caso da Natura Cosméticos, Dissertação de mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

ARÉVALO, J.; GARRLÓN, G.; PLAZA, F; MORENO, B.; PÉREZ, J.; GÓMEZ, M. A.; – Wastewater reuse after treatment by tertiary ultrafiltration and membrane bioreactor (MBR): a comparative study, Desalination, volume 243, 32-41, 2009.

ASANO, T.; MILS, R. A. Planning and analysis for water reuse projects. Journal AWWA, 82 (1), 38-47, 1990.

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 volume 10. Technomic Publishing Inc., Lancaster, 1998. 1528 p.

ASME – The American Society of Mechanicals Engineers – “Consensus on Operating practices for the control of feedwater and boiler water chemistry in modern industrial boilers” p. 22-23, 1994.

BAGAJEWICZ, M. A review of recent design procedures for water networks in refinaries and process plants. Computer and Chemical Engineering, volume 24, Elsevier, 2093 – 2113, 2000.

BAGAJEWICZ, M; MARGORI R; SAVELSKI, M – Robust method to obtain optimal and sub-optimal design and retrofit solutions of water utilization systems with multiple contaminants in process plants. Computer and Chemical Engineering, volume 24, Elsevier, 1461-1466, 2000.

BETZ HANDBOOK OF INDUSTRIAL WATER CONDITIONING, P.167-238 1991.

BRESCIANI, A. E.; ALVES, R. M. B.; NASCIMENTO, C. A. O. – Redução no consumo de água em plantas de processo pela substituição de resfriador a água por resfriador a ar. Revista Petro & Química, 281, 82-86, 2006.

BRESCIANI, A. E. & NASCIMENTO, C. A. O. – Análise do processo de dessalgação do petróleo. Otimização do uso da água. Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

BRESCIANI, A. E.; ALVES, R. M. B.; NASCIMENTO, C. A. O. – Coalescence of water droplets in cude oil emulsiond: analithical solution, Chemical Engineering and Technology, volume 33, 237-243, 2010.

BRESCIANI, A. E.; MENDONÇA, C. F. X.; ALVES, R. M. B.; NASCIMENTO, C. A. O. – Modeling the kinetics of the coalescence of water droplets in crude oil emulsions subject an electric field, with the cellular automata technique, Computers and Chemical Engineering, Elsevier, volume 34, 1962-1968, December, 2010.

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, Elsevier, Volume 27, 1149-1154, 2009.

CARNES, B. A.; FORD, D. L.; BRADY, S. O. Treatment of refinery wastewater for reuse. Proceedings of the National Conference on Complete Water Reuse. Washington, DC 1973.

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

CHIEN, I-L. Experimental Investigation of Optimal Conventional Control Strategy for a heterogeneous Azeotropic Distillation Column, Computers and Chemical Engineering, Elsevier, volume 23, 249-252, 1999.

CHEN, S. H.; LIOU, R. M.; HSU, C. S.; CHANG, D. J. ; YU, K. C. CHANG, C. Y. – Pervaporation separation water/ethanol mixture through lithiated polysulfone membrane, Journal of Membrane Science, Elsevier, Volume 193, 59-67, 2001.

CICHOKI, A. – Conservação de Água – Um desafio para a indústria de hoje – WWW.tratamentodeagua.com.br/informativos/acervo.php

DAEE – Departamento de Águas e Energia Elétrica, Plano Estadual de Recursos Hídricos: 2004/2007 resumo, São Paulo, 2006, 92 p.

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

GOLDBLATT, M.; ABLE, K. S.; FEATHERS, J. E.;. Zero Discharge: What, Why, and How, Engineering Progress, volume 89, 22-27, 1993.

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

HARDIN, G. The tragedy of the commons. Science, volume. 162, p.1243-1248, 1968.

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

HILMIOGLU, N. D. & TULBENTCI, S. – Separation of IPA/Water mixtures by pervatporation: sorpotion and pervaporation results, Vacuum, 72, 35-40, 2004.

HOSPONDAREC, R. W., THOMPSON, S. J. Oil-steam system for water reuse Proceedings of the American Institute of Chemical Engineering workshop, vol. 7, 1974.

HUANG, R. H. Y. M. & MOON, G. Y. – Characteristics of sodium alginate membranes for the pervaporation dehydration of ethanol-water and Isopropanol-water mixtures, Journal of Membrane Science, Elsevier, volume 160, 101-113, 1999.

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, Elsevier, volume 250, 833-839, 2010.

KOPPOL, A.; BAGAJEWICZ, M. J.; DERICKS, B. J.; SAVELSKI, M. J. On zero water discharge solutions in the process industry, Advances in Environmental Research, Elsevier, volume 8 (2), 151-171, 2003.

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

LI, X. Z. & ZHAO, Y. G. Advanced treatment of dyeing wastewater for reuse, Water Science Technology, volume 39, number 10, 249-255, 1999.

MAJOZI, T. Wastewater minimization using central reusable water storage in batch plants, Computers & Chemical Engineering, Elsevier, volume 29, Issue 7, 1631-1646, 2005.

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

MANCUSO, P. C. S., SANTOS, H. F. Reuso de água. Núcleo de informações em Saúde Ambiental da Universidade de São Paulo. Barueri-SP. Editora: Manole; 576p. 2003.

MATSUMARA, E. – Perspectiva para conservação e reuso de na água na industria de alimentos – estudo de uma unidade de processamento de frangos, Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 211p, 2007.

MAY, S. Caracterização, tratamento e reúso de águas Cinzas e aproveitamento de águas pluviais em edificações, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

MEMBRANES TECHNOLOGY – OCTOBER 2002 – 14p.

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, Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

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

MISHRA, P. N.; FAN, L.T.; ERCKSON, L. E. Application of mathematical optimization techniques in computer aided design of wastewater treatment systems. Water (II). American Institute os Chemical Engineering Symposium Series, 71, 145, 1975.

MUJIBUROHMAN, M. SEDIAWAN, W, B. SULISTYO, H. A preliminary study: Distillation of isopropanol-water mixture using fixed adsortive distillation method, Separation and Purification Technology, Elsevier, volume 48, Issue 1, 85-92, 2005.

PERRY´S Chemical Engineers Handbook – 6 th edition. p. 11-19/11-20

PETERS, M., TIMMERHAUS K. D., WEST, R. Plant Design and Economics for Chemical Engineers, Fifth Edition, 2003.

REBOUÇAS, A. C., BRAGA, B., TUNDISI, J. G. Águas Doces no Brasil: Capital Ecológico, Uso e Conservação, Escrituras, Edição 3, 2006.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo, Relatório de Sustentabilidade 2007, 2008.

SAVELSKI, M., BAGAJEWICZ, M. – Design of water utilization systems in process with a single contaminant, Waste Management, Elsevier, 20 , 659-664, 2000a.

SAVELSKI, M., BAGAJEWICZ, M. – On optimality conditions of water utilization systems in process plants with single contaminants. Chemical Engineering Science, Elsevier, 55(21), 5035-5048, 2000b.

SAVULESCO, L.; KIM, J.; SMITH, R.; – Studies on simultaneous energy and water minimization – Part.II: Systems with maximum re-use of water, Chemical Engineering Science, Elsevier, volume 60, Issue 12, 3291-3308, 2005.

SAVULESCO, L., POULIN, B., HAMMACHE, A., BÉDARD, S., Water and Energy Savings at a Kraft Paperboard Mill Using Process Integration, CANMET Energy Technology Centre, Varennes, 2000.

SINGHA, N. R.; KAR, S.; RAY, S.; RAY, S. K.;– Separation of Isopropyl Alcohol-Water mixtures by pervaporation using croslink IPN membranes, Chemical Engineering Process, Elsevier, Volume 49, 1020-1029, 2009.

SOUZA, A. A. U.; MELO, A. R.; PESSOA, F. L. P.; SOUZA, S. M. A. G. U. – The modified water source diagram method applied to reuse of textile industry continuous washing water, Reuse Conservation and Recycling, Elsevier, Volume 54, Issue 12, 1045-1411, 2010.

SPIRAX SARCO - http://www.spiraxsarco.com/br/applications/overview/steam-generation/steam-generation-applications.asp?loop=1&id=3&level=1

SPIRAX SARCO – The steam and Condensate loop, First Edition, 2007.

TCHOBANOGLOUS, G. & ANGELAKIS, A. N. Technologies for wastewater treatment appropriate for reuse: potential for application in Greece, Water Science and Technology, volume 33, Issues 10-11, 15-24, 1996.

TOZE, S. Water reuse health risks – real vs. perceived. Desalination, Elsevier, Volume 187, 41-51, 2006.

TUNDISI, J. G. Novas perspectivas para a gestão de recursos hídricos, Revista USP, n. 70, p. 24-35, 2006.

UNEP - www.unep.org/

UNITED NATIONS. Water for industrial reuse, Economic and social council, Report E/3058STECA/50, United Nations, New York, 1958.

UNITED STATES DEPARTMENT OF LABOR - http://data.bls.gov/cgi-bin/surveymost?wp

WANG, Y. P. & SMITH, R. Wastewater minimization, Chemical Engineering Science, Elsevier, Volume 49, Issue 7, 981-1006, 1994a.

WANG, Y. P. & SMITH, R. Design of distributed effluent treatment systems. Chemical Engineering Science, Elsevier, Volume 49, Issue 18, 3127-3145, 1994b.

WANG, Y. P. & SMITH, R. Wastewater minimization with Flowrate Constraints. Chemical Engineering Research & Design, Volume 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, Volume 33, Issues 10-11, 1996, p 363-369.

WCED. Our common future. Oxford University Press, World Commission on Environmental and Development, Oxford, 1987

World Health Organization (WHO), Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd edition., World Health Organization, Geneva, 2004.

YEOM, C. K. & HUANG, R. Y. M. – Modelling of the pervaporation separation of ethanol-water mixtures through crosslink poly (vinyl alcohol) membrane, Journal of Membrane Science, Elsevier, Volume 67, 1992.

ZBONTAR, L. & GLAVIC, P. Total site: wastewater minimization. Wastewater reuse and regeneration reuse. Resources, Conservations and Recycling, Volume 30, Issue 4, 261-275, 2000.