

Avaliação do condensado limpo para integração de processo em uma indústria de celulose

RESUMO

A produção de celulose a partir do processo químico Kraft é caracterizada pela elevada demanda energética, intensidade de capital e diversos riscos ambientais. Dentro desse contexto, a otimização constante do processo produtivo torna-se um diferencial para as indústrias do setor, motivo pelo qual o presente trabalho objetivou encontrar alternativas para o aproveitamento do excesso de condensado limpo gerado na etapa de evaporação, visando minimizar seu descarte e reduzir a temperatura e carga orgânica do efluente. A partir de análises laboratoriais e balanços de processo foi possível caracterizar o condensado limpo e identificar que seus principais desafios para a integração no processo são sua cor característica, pH e elevada matéria orgânica, limitando as oportunidades de aproveitamento. Em seguida, com o estudo de viabilidade técnica, identificou-se como uma possível solução a integração energética do condensado para aquecimento da água desmineralizada, seguido do aproveitamento do mesmo substituindo água na lavagem das toras. Essa iniciativa minimizaria os impactos no efluente, devido à menor carga orgânica enviada para o mesmo, reduziria o consumo de vapor, pelo aquecimento da água desmineralizada, e reduziria os custos com tratamento de água, por não ser mais necessário água para lavagem das toras.

PALAVRAS-CHAVE: Produção de celulose; Condensados da evaporação; Integração de processo.

Gabriel Espíndola de Araújo

g.e.araujo@outlook.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Bruno de Carvalho Gonçalves

Bruno.bcgoncalves@gmail.com

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Luciano Peske Ceron

luciano.ceron@pucrs.br

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

1 INTRODUÇÃO

A celulose, polissacarídeo considerado um componente essencial na estrutura das plantas, é uma matéria-prima polimérica de disponibilidade inquestionável, estrutura complexa e propriedades impressionantes. Formada por uma série de ligações entre um mesmo monômero (glicose), a celulose é considerada um homopolímero caracterizado por ser biodegradável, hidrofílico e fibroso (KLEMM et. al., 2005). No âmbito industrial, a celulose é a base para formação de diversos materiais, dentre eles plásticos, filmes, e uma ampla gama de papéis, onde estão incluídos os para impressão e para fins sanitários (FIEP; SINPACEL, 2016).

O setor de celulose e papel é um elemento de elevada importância para a economia mundial, principalmente devido à receita gerada por impostos e serviços e o impacto exercido por todas as atividades relacionadas à sua cadeia produtiva. Em particular, a indústria de celulose totalizou aproximadamente 106,7 milhões de toneladas com exportações e importações no período de 2015, o que equivaleu a uma movimentação de 65,1 bilhões de dólares (FIEP; SINPACEL, 2016). Neste cenário, o Brasil esteve colocado como o quarto maior produtor de celulose do mundo em 2015, enquanto, em termos de exportação, o Brasil alcançou o posto de primeiro colocado neste mesmo período. A competitividade do produto brasileiro que levou o país a atingir esta colocação é o preço da celulose, o qual foi determinado, em 2015, como sendo aproximadamente 20 % inferior à média mundial (DEPEC/BRADESCO, 2016). O baixo preço de venda do produto faz com que o lucro das indústrias de celulose no país esteja diretamente relacionado com um baixo custo de produção. Este fator, somado às características de elevado impacto ambiental e demanda energética atrelados ao setor de papel e celulose, torna necessário investimentos constantes em melhoria de processo (DEPEC/BRADESCO, 2017).

Diversas alternativas tecnológicas foram desenvolvidas com o passar do tempo para a produção industrial de celulose, destas o processo kraft é o mais aplicado em nível mundial. Este modelo de produção visa dissolver a lignina preservando ao máximo a resistência das fibras e obtendo, desta forma, uma pasta forte (kraft, em alemão) (SMOOK, 1982). Mesmo seu rendimento variando entre 50 e 60 % e resultando na formação de uma polpa caracteristicamente escura que requer mais estágios de branqueamento, o principal motivo da vasta aplicação desta tecnologia é a eficiência na recuperação de químicos (PIOTTO, 2003).

Os processos industriais para a produção de celulose a partir da madeira, como o kraft, apresentam desafios para minimizar os impactos ambientais, sejam por emissões atmosféricas, efluentes hídricos ou resíduos sólidos. Destas três categorias os efluentes líquidos, ou águas residuárias, são os que demandam maior atenção, devido ao elevado volume gerado e o potencial de afetar negativamente os corpos hídricos receptores pela formação de lodo, espuma, impactos térmicos, problemas com cor e compostos tóxicos (CABRERA, 2017). Dentre as características das águas residuárias, as que mais se destacam são a elevada temperatura, a coloração, a alta carga orgânica e a possibilidade de apresentar compostos organoclorados, extremamente agressivos ao meio ambiente. Em termos de carga orgânica, os pontos de maior contribuição na

indústria são a lavagem das toras, lavagem da polpa na linha de fibras e a geração dos condensados na evaporação (KAMALI; KHODAPARAST, 2015).

As melhorias nos processos de obtenção da pasta celulósica são inúmeras. Todavia, os processos kraft ainda têm como base a extração da celulose com reações químicas, cujas características são a elevada demanda energética, intensidade de capital e a necessidade de tecnologias avançadas para mitigação dos diversos impactos ambientais. Por estes motivos, o presente trabalho objetiva a otimização do processo produtivo da Linha Guaíba 2 da CMPC Celulose Riograndense a partir do estudo das oportunidades de aproveitamento do excesso de condensado na evaporação, buscando, principalmente, a redução nos custos e nos impactos ambientais associados.

O estudo visa, inicialmente, analisar o condensado alvo para identificar sua composição e principais características, além de realizar um balanço de massa e energia no sistema para determinar as suas condições operacionais. Conhecido o objeto de estudo visa-se buscar a melhor alternativa de integração do mesmo no processo produtivo a partir de uma análise de viabilidade técnica. Em seguida, o objetivo final do trabalho é avaliar, por meio de uma análise de viabilidade econômica, se a melhor alternativa tecnicamente é aplicável em termos econômicos.

2 METODOLOGIA

A análise de processo para aproveitamento do condensado contaminado foi realizada através de um estudo de viabilidade técnica dos possíveis destinos para a utilização deste composto, a fim de minimizar seu impacto no efluente. Este estudo foi dividido em três seções, onde a primeira etapa foi a caracterização completa do condensado com diferentes análises laboratoriais, em seguida o balanço de massa e energia do sistema e por fim a análise de viabilidade técnica de diferentes oportunidades de aproveitamento do condensado. Todas as três etapas do estudo foram realizadas na empresa parceira, CMPC Celulose Riograndense, e com auxílio do corpo técnico da mesma.

2.1 Caracterização do condensado

A identificação da composição do condensado reaproveitado no estudo foi realizada por meio de análises químicas e físico-químicas realizadas no laboratório da própria empresa, o qual segue os procedimentos padrões estipulados na 22ª Edição do Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater. As análises necessárias para a caracterização completa do condensado incluíram pH, turbidez, DQO e DBO₅, sólidos suspensos totais, cor aparente, análises de metais solúveis por ICP-OES e análise de ânions por cromatografia iônica (APHA, 2012).

2.1.1 Análise de pH e turbidez

O procedimento para identificação do pH do condensado segue os métodos 4500-H+ A e B do Standard Methods. Sendo um procedimento mais simplificado, o mesmo é realizado em duplicatas com o auxílio de um pHmetro, no qual as

amostras devem ser analisadas logo após a coleta e suas duplicatas intervaladas com a análise de um controle de pH 7,0. Da mesma forma que o pH, a turbidez também é uma análise mais direta que pode ser realizada basicamente com o auxílio de um turbidímetro, no qual é inserida uma cubeta com amostra e obtêm-se o resultado das duplicatas em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez). O procedimento como um todo segue os padrões dos métodos 2130 A e B do Standard Methods (APHA, 2012).

2.1.2 DQO e DBO5

A Demanda Química de Oxigênio (DQO), expressa em mg O₂/L, é a variável que dimensiona a quantidade de matéria orgânica possível de ser decomposta por rotas químicas. Para estes experimentos utilizou-se dos padrões estipulados nos métodos 5220 A e C do Standard Methods, onde é definido que as análises devem ser realizadas em duplicata e com o auxílio de um controle de DQO de 125 mg/L. A primeira etapa do processo consiste em adicionar a amostra junto com os reagentes dicromato de potássio 0,01667 M, ácido sulfúrico e sulfato de prata em um tubo de digestão, onde os mesmos permanecem por 2 horas a uma temperatura de 150 °C. Em seguida, o produto da reação é titulado com tituladorpotenciométrico e eletrodo de platina utilizando sulfato ferroso amoniacal (0,1 M), bem como uma prova em branco. Os resultados deste teste são aplicados na equação padrão para obtenção da quantidade de oxigênio necessária por litro de solução analisada (APHA, 2012).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio a 5 dias (DBO5) representa a quantidade de matéria orgânica possível de ser decomposta por rotas biológicas, expressa em mg O₂/L. O procedimento para a realização destas análises é baseado nos métodos 5210 A e B do Standard Methods, o qual inclui as etapas de preparação da água de diluição, o processo de semeadura, a incubação por 5 dias a uma temperatura de 20 °C e a determinação do oxigênio dissolvido. Diferente do cálculo de DQO, a DBO5 é determinada a partir da diferença entre o delta de oxigênio dissolvido da amostra e da prova em branco, após cinco dias de experimento (APHA, 2012).

2.1.3 Sólidos suspensos totais

A análise dos sólidos suspensos totais é um dos indicadores fiscalizados pelo órgão ambiental no efluente líquido da indústria. Sua análise é realizada de acordo com os métodos 2540 A, B, C, D e E do Standard Methods, no qual se determina que a amostra deva ser filtrada com sistema de vácuo. Utiliza-se o papel filtro Millipore AP40 como meio filtrante e, após separados todos os sólidos suspensos da amostra líquida, o filtrado é levado para estufa e dessecador para remover sua umidade. O seu peso é registrado e o resultado fornecido em mg/L (APHA, 2012).

2.1.4 Cor aparente

Análise realizada a partir do método 2120 C do Standard Methods, a cor aparente é determinada a partir da leitura de absorvância ou transmitância de

uma amostra em um espectrofotômetro Pharo 300. Neste, a amostra é introduzida em uma cubeta, bem como a prova em branco e o controle, e o resultado é o a indicação da absorvância do composto. A partir deste dado, a cor aparente é calculada utilizando uma equação dependente da curva de calibração e da diluição (APHA, 2012).

2.1.5 Análise de metais solúveis em ICP-OES

Os procedimentos para a realização da Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Acoplado por Indução (ICP-OES) seguem os métodos 1060 C, 2340 B, 3030 A, B, D E e F, além do método 3112 B do Standard Methods. Nestes, inicia-se o procedimento da análise com a digestão adequada das amostras de acordo com suas características. Em seguida as amostras são filtradas através de membranas de 0,45 μm e acidificadas com ácido nítrico até $\text{pH} < 2$ para serem analisadas no ICP-OES. O resultado é obtido diretamente no equipamento em unidades de mg metal/L. O equipamento utilizado para as análises é o ICP-OES Optima 5300 DV (APHA, 2012).

2.1.6 Cromatografia Iônica

A cromatografia iônica é realizada no cromatógrafo Metrohm 930 Compact IC flex, o qual é composto de dois sistemas independentes capazes de trabalhar com ânions, cátions e ácidos orgânicos. Apesar da possibilidade de utilização de ambos os sistemas, a empresa padronizou qual o sistema mais adequado, o tipo de coluna, a pré coluna, o efluente, a faixa de pH da amostra e o tempo aproximado de corrida de acordo com o método 3120 B do Standard Methods. Foram realizadas análises para identificação de cloreto, nitrato, sulfato e fosfato, cujos resultados são obtidos diretamente no equipamento em ppm de cada ânion (APHA, 2012).

2.2 Balanço de massa e energia

A quantidade de condensado a ser aproveitado no processo, bem como suas características operacionais, foram determinadas a partir do balanço de massa e energia do sistema. Para tal utilizou-se as medições de vazão, temperatura, pressão e abertura de válvula indicadas pelo gerenciador de dados PI system da OSIsoft, software utilizado pela empresa para gerenciar os dados obtidos pelo seu sistema digital de controle distribuído (SDCD). Este sistema apresenta as informações do processo em cada instante coletado e permite realizar diversas operações matemáticas diretamente ao extrair os dados, como médias, desvios e interpolações (OSIsoft).

Os balanços foram, então, elaborados a partir das médias de vazão, temperatura e pressão das correntes relacionadas à geração e consumo do condensado, a fim de identificar o seu excesso continuamente descartado para o efluente que passaria a ser reaproveitado. Determinou-se setembro de 2016 como sendo o período ideal para o cálculo das médias com o PI, uma vez que este foi o mês de maior estabilidade da linha.

2.3 Análise de viabilidade técnica das oportunidades

A busca por alternativas de reaproveitamento de rejeitos dentro de um processo produtivo pode tornar-se um processo árduo e maçante, uma vez que podem ser encontradas diversas opções de solução para o problema, dificultando a definição da melhor alternativa. Desta forma separou-se esta busca em três etapas, das quais a primeira foi um brainstorm de possíveis alternativas para o problema. Em seguida, selecionaram-se duas opções mais viáveis com auxílio de trabalhos presentes na literatura que tratavam do tema foco no estudo. Conhecendo as limitações da planta e as melhores tecnologias desenvolvidas até o momento na indústria de celulose, as três das melhores alternativas foram então avaliadas tecnicamente e uma destas selecionada como a mais indicada solução para o problema.

3 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

3.1 Caracterização do condensado

As análises laboratoriais do condensado limpo, produzido no processo de evaporação do licor negro, foram realizadas com o intuito de compreender melhor a composição do mesmo e avaliar se existe alguma semelhança de qualidade entre este condensado e outros fluidos no processo. Desta forma, utilizou-se como base para comparação os parâmetros que determinam a qualidade da água gerada na estação de tratamento de água e utilizada na produção. Os dados referentes aos parâmetros da água foram obtidos no próprio banco de dados da companhia.

A Tabela 1 apresenta os resultados das análises realizadas no condensado, bem como os respectivos valores limites para o fluido ser considerado de mesma qualidade que a água tratada. É possível notar que, em diversos parâmetros, o condensado limpo apresentaria qualidade suficiente para ser considerado semelhante à água tratada. Todavia, em termos de carga orgânica, o condensado apresentou DQO e DBO significativamente superiores, impedindo que o mesmo seja integrado como água de processo em qualquer etapa da produção sem a utilização de alguma técnica corretiva. Além da matéria orgânica, o condensado também apresentou elevada cor aparente, turbidez e pH, o que implicaria na necessidade de corrigir, também, estes parâmetros para o aproveitamento em etapas que necessitem maior pureza no processo.

Tabela 1. Resultados das análises de caracterização do condensado limpo.

Corrente	Água Tratada	Condensado Limpo
Alumínio Solúvel (mg·L ⁻¹)	0,041	0,003
Magnésio Solúvel (mg·L ⁻¹)	1,525	0,014
Ferro Solúvel (mg·L ⁻¹)	0,010	0,009
Sódio Solúvel (mg·L ⁻¹)	14	11
Potássio Solúvel (mg·L ⁻¹)	2,975	0,590
Cloreto (mg·L ⁻¹)	7,55	0,22
Sulfato (mg·L ⁻¹)	28,25	1,70
Nitrato (mg·L ⁻¹)	0,825	0,380
Sólidos Suspensos (mg·L ⁻¹)	<1	<1
Cor Aparente (mg(PtCo)·L ⁻¹)	<1	196
pH	6,4	9,7
Turbidez (NTU)	0,3	2,4
DQO (mgO ₂ ·L ⁻¹)	<40	300
DBO5 (mgO ₂ ·L ⁻¹)	<1	170

Cabe salientar que as análises disponíveis no laboratório da empresa não permitiram identificar quais os compostos orgânicos que totalizam a carga orgânica do condensado. Todavia, levando em consideração que a relação DBO5/DQO encontrada foi superior a 0,5, pressupõe-se que a maioria dos compostos seja de pequeno tamanho molecular, como metanol, o que permite uma fácil degradação pelos microrganismos, aproximando os valores de DQO e DBO5. Além da relação DBO5/DQO, outro parâmetro que permite estimar a composição da matéria orgânica presente no condensado é a sua cor aparente. A grande diferença entre a cor do condensado e da água sugere a presença de moléculas de enxofre ligadas aos compostos orgânicos, como o dimetilsulfureto e as mercaptanas. A coloração característica destes compostos também limita a aplicação do condensado limpo em etapas que o mesmo tenha contato com a polpa já branqueada, por exemplo.

Os resultados da caracterização demonstraram que o condensado limpo oriundo da evaporação possui certas restrições em seu reaproveitamento, devido sua coloração, pH e carga orgânica, principalmente. Isto impede, em geral, sua utilização nas etapas que exigem elevado grau de pureza, como os processos da planta química e secagem da celulose branqueada.

3.2 Balanço de massa e energia

O balanço de massa e energia da geração e consumo dos condensados da evaporação foi essencial para a determinação das condições de processo do condensado limpo a ser reaproveitado. O resultado deste balanço é apresentado por um fluxograma simplificado do sistema de tancagem intermediária dos condensados da evaporação (Figura 1), uma vez que desta forma foi possível representar simplificada as entradas dos condensados da evaporação, a distribuição para os respectivos consumidores e o envio do excesso para o efluente. Junto ao fluxograma encontra-se uma tabela descritiva das principais

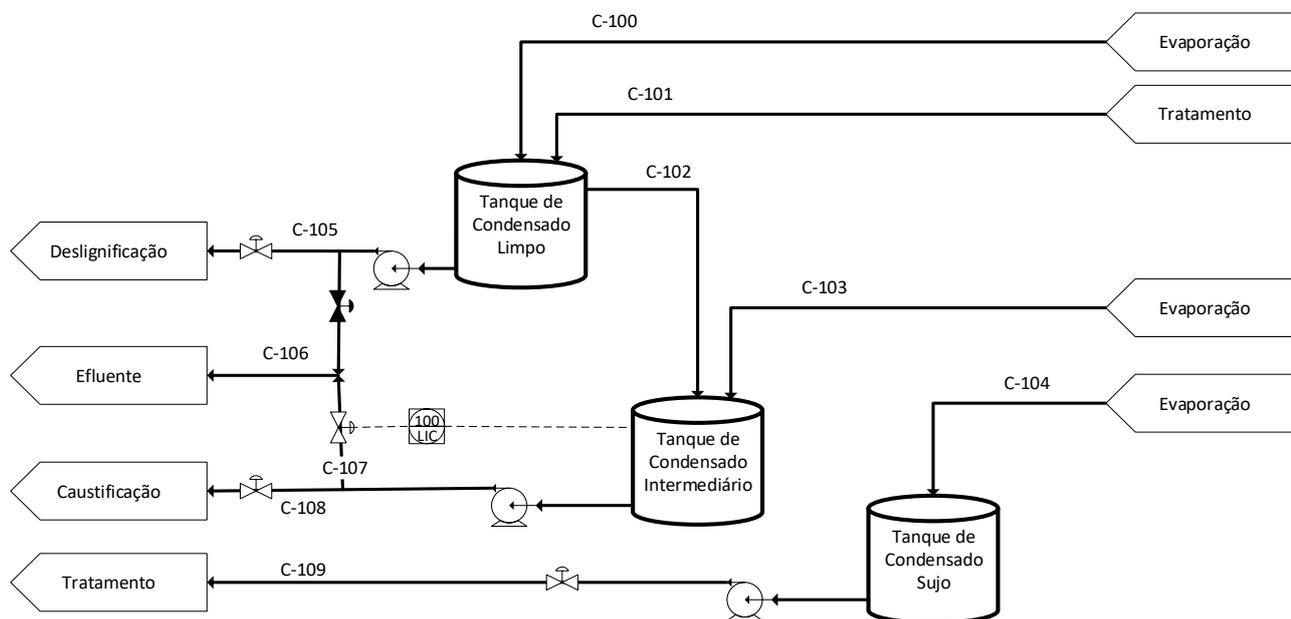
correntes deste sistema, a qual contém os valores médios das variáveis de interesse para o mês de setembro de 2016, obtidos através do software PI.

Neste sistema, o condensado limpo é gerado pela condensação de vapores em um tanque flash e no tratamento do condensado sujo, resultando em uma mistura de elevada qualidade frente aos outros condensados da evaporação ($DQO \approx 300 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$), com temperatura de $90 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão de $1213,0 \text{ m}^3/\text{h}$. Esta mistura é armazenada em seu respectivo tanque, do qual é enviada para a deslignificação para ser utilizada nas lavagens. Todavia, a vazão deste consumo é inferior à quantidade de condensado gerada, resultando em um excesso que é transbordado para o tanque intermediário.

Este segundo tanque possui, também, uma entrada de condensado intermediário proveniente dos tanques flash da evaporação, o qual apresenta temperatura ($\approx 61,5 \text{ }^\circ\text{C}$), vazão ($\approx 158,8 \text{ m}^3/\text{h}$) e qualidade ($DQO \approx 1150 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$) inferiores ao condensado limpo. A mistura de condensado limpo e intermediário formada neste tanque é consumida pela caustificação, porém, novamente, este consumo é inferior à quantidade recebida no tanque, formando um excesso que é enviado para efluente pelo controle de nível do tanque. Este excesso apresenta temperatura de aproximadamente $83 \text{ }^\circ\text{C}$, vazão de $316,5 \text{ m}^3/\text{h}$ e qualidade intermediária entre o limpo e intermediário com DQO de $530 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$, devido à mistura destes dois elementos no tanque.

O condensado sujo, por sua vez, é enviado do tanque para o tratamento em uma coluna stripper, onde sua quantidade de matéria orgânica é reduzida até sua DQO aproximar-se de $250 \text{ mgO}_2 \cdot \text{L}^{-1}$, tornando sua qualidade similar ao condensado limpo. O produto de fundo desta coluna é enviado para o tanque de condensado limpo e torna-se uma das fontes deste condensado. Cabe salientar que a quarta categoria de condensado da evaporação, condensado vivo, não foi incluído no balanço por ser totalmente ausente de contaminação, sendo, então, tratado de forma diferente.

Figura 1. Acima o fluxograma explicativo do sistema de tancagem dos condensados da evaporação, explicitando os pontos de geração e consumo. Abaixo a tabela caracterizando as correntes do fluxograma.



Corrente	Vazão (m ³ /h)	Temperatura (°C)	Pressão (kgf/cm ²)	DQO (mgO ₂ ·L ⁻¹)
C ⁻¹⁰⁰	768,7	99,3	1,7	330
C ⁻¹⁰¹	444,3	74,9	1,0	250
C ⁻¹⁰²	442,5	90,3	1,0	300
C ⁻¹⁰³	158,8	61,5	2,6	1150
C ⁻¹⁰⁴	444,3	68,0	2,7	6500
C ⁻¹⁰⁵	770,5	90,3	4,7	300
C ⁻¹⁰⁶	316,5	82,7	5,2	530
C ⁻¹⁰⁷	316,5	82,7	5,2	530
C ⁻¹⁰⁸	284,8	82,7	5,2	530
C ⁻¹⁰⁹	444,3	68,0	5,6	6500

Fonte: Elaboração própria (2017).

O balanço do processo demonstra que ao transbordar-se o excesso de condensado limpo para o tanque intermediário e enviar a quantidade excedente desta mistura para o efluente acaba-se reduzindo a temperatura da corrente descartada de aproximadamente 90 °C, temperatura do excesso de condensado limpo, para 83 °C. Contudo, esta manobra também eleva a carga de matéria orgânica da corrente enviada para o efluente de aproximadamente 300 mgO₂·L⁻¹ para 530 mgO₂·L⁻¹, uma vez que, ao misturar-se com o condensado intermediário, o excesso acaba contaminado com a maior quantidade de carga orgânica do mesmo.

A próxima etapa do estudo, análise de viabilidade técnica, visou buscar por alternativas que minimizassem o envio do excesso de condensado para o efluente, integrando o mesmo ao processo. Devido ao fato de a mistura entre os condensados limpo e intermediário resultar no aumento de 76% na carga orgânica desta corrente e uma redução de 8% na temperatura, identificou-se que seria mais vantajoso e viável integrar os 316,5 m³/h do excesso de condensado

limpo antes desta mistura, tornando este o pilar base para a elaboração de alternativas na próxima seção do estudo.

3.3 Análise de viabilidade técnica

Inicialmente, pela técnica de brainstorming, elaboraram-se diversas possíveis soluções para integração do condensado limpo, das quais duas foram selecionadas como as mais viáveis com auxílio de trabalhos anteriores e da operação local. Após, realizou-se a análise de viabilidade técnica das alternativas visando obter uma única solução.

3.3.1 Alternativa 1 – Aumento da eficiência da lavagem marrom e deslignificação

Na linha produtiva onde o estudo foi realizado, a lavagem marrom é a etapa que antecede o reator de deslignificação com oxigênio, sendo uma das principais responsáveis pela eliminação das impurezas presentes na polpa após o cozimento. Estas impurezas, ou carryover, influenciam significativamente nas reações de deslignificação com oxigênio, reduzindo sua eficiência por consumir o oxigênio em reações paralelas de decomposição da matéria orgânica arrastada pela polpa. Esta redução implica em uma maior dificuldade para atingir os objetivos da etapa e, conseqüentemente, um maior consumo de oxigênio.

A primeira alternativa proposta como forma de reaproveitar o excesso de condensado limpo foi utilizá-lo para melhorar a qualidade das lavagens que antecedem o reator de deslignificação, visando melhorar a eficiência da deslignificação. O fluido utilizado na lavagem marrom é um licor de lavagem oriundo do próprio condensado e, portanto, de qualidade inferior. Ao substituir uma parte deste licor pelo excesso de condensado, seria utilizado um fluido de maior qualidade para melhorar a lavagem marrom e minimizar o carryover para o reator da etapa de deslignificação com o oxigênio, aumentando a eficiência deste processo.

Trabalhos anteriores já demonstraram resultados satisfatórios ao misturar uma parte deste licor da lavagem marrom com condensado, realizando um “mix” do fluido de lavagem de melhor qualidade (MENDES, 2013). Contudo, nestes estudos também foram realizados ajustes nos fatores de diluição destas etapas, uma vez que a adição do condensado no “mix” de lavagem aumenta o valor destes fatores. Se uma opção semelhante fosse implementada na empresa alvo do estudo, as dificuldades hidráulicas do sistema que limitam o fator de diluição impediriam a modificação.

Desta forma, a alternativa 1 sugere a substituição de uma parcela do filtrado de lavagem pelo excesso de condensado limpo, visando resultados semelhantes aos encontrados em literatura e, ao mesmo tempo, evitando o aumento do fator de diluição. Entretanto, para realizar esta substituição sem incrementos no FD, seria necessário abrir o sistema de lavagem marrom, ou seja, enviar uma parcela do filtrado de lavagem para efluente, evitando o desbalanceamento dos tanques. Esta manobra resultaria no descarte indesejável de químicos para o efluente, resultando em custos por essa perda e custos para o tratamento deste efluente.

Portanto, como Brogdon (2015) destaca, um trabalho de integração e melhoria de processo deve levar em consideração o todo, evitando atingir uma otimização local em que somente uma área é favorecida e outros setores acabam prejudicados. Tendo este modelo de análise em mente, a alternativa 2, bem como a 1, traria dificuldades operacionais para os sistemas auxiliares a linha de fibras, principalmente a evaporação e tratamento de efluente, acarretando em custos indesejáveis.

3.3.2 Alternativa 2 – Integração energética e mássica combinadas

O envio do excesso de condensado quente descartado tem impactado no tratamento de efluentes, em especial na etapa de resfriamento nas torres, onde mesmo acaba volatilizando devida sua alta temperatura. Esta evaporação acarreta na propagação de odor para a comunidade e resulta em impactos ambientais indesejados. Além destes efeitos, eliminar um composto com alta temperatura do sistema significa retirar energia do sistema forçadamente, perdendo a chance de aproveitá-la internamente.

A segunda opção de projeto tem como foco a integração energética do excesso de condensado limpo, aproveitando sua energia e reduzindo a temperatura do mesmo antes de ser enviado para efluente. O principal ponto de uma integração energética é a redução dos custos com utilidades quentes e frias, minimizando, principalmente, o consumo de vapor e água de resfriamento. No caso desta proposta 2, o objetivo é o aproveitamento da energia presente no condensado limpo para reduzir o consumo de vapor na linha produtiva.

Dentro do processo de produção de celulose, a terceira área que mais consome vapor é a caldeira de recuperação, principalmente para o pré-aquecimento de ar e água. A água de alimentação é uma mistura de condensados não contaminados recuperados do processo e água desmineralizada, onde as temperaturas de entrada no tanque de alimentação são aproximadamente 110 °C e 42 °C, respectivamente. Neste tanque, a mistura de condensado e água desmi deve ser aquecida até 133 °C com vapor para eliminar o oxigênio presente na mesma, sendo necessária, para tal, uma quantidade de vapor superior a 90 t/h. Esta quantia está diretamente interligada à temperatura de alimentação do condensado e da água desmi, motivo pelo qual já se utiliza um pré-aquecimento da água desmi com os gases de exaustão da caldeira, que eleva a temperatura da mesma de 32 para 42 °C.

A segunda opção visa integrar energeticamente o excesso de condensado limpo e a água desmineralizada que alimenta a caldeira, elevando a temperatura da mesma para reduzir o consumo de vapor da caldeira. A partir de um sistema simplificado, composto de uma bomba para cada fluido, tubulações, instrumentação e um trocador casco tubo, identificou-se a possibilidade de aquecer a água desmineralizada até 67 °C, reduzindo a temperatura do excesso de condensado para 53 °C. Este aproveitamento energético implica na redução de aproximadamente 22 t/h de vapor de baixa pressão, anteriormente utilizados no aquecimento da água desmi.

A temperatura mais baixa do excesso de condensado após a troca de calor com a água desmi abre um novo leque de possibilidades de integração mássica, do qual se identificou como sendo viável sua utilização para limpeza das toras no

pátio de madeira. Atualmente a limpeza das toras é realizada com a água da torre de resfriamento, funcionando como uma purga para a mesma, devido ao fato desta água não retornar. Contudo, esta manobra tem feito com que o sistema das torres fique muito aberto, tomando custoso o seu tratamento e operação. A opção de substituir a água de resfriamento por condensado A resfriado mostra-se uma alternativa vantajosa, uma vez que a lavagem das toras não requer um fluido com elevada qualidade. Esta modificação reduziria os custos de operação das torres de resfriamento e, principalmente, eliminaria o consumo de 200 m³/h de água necessários nesta lavagem.

A alternativa 2 proposta apresenta um potencial de retorno econômico elevado, além de possibilitar melhorias operacionais importantes para a linha produtiva, sem impactar negativamente em outros setores. Por este motivo, a alternativa 2 foi selecionada como sendo a tecnicamente mais viável e possível solução para o problema estudado.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo possibilitou encontrar uma potencial solução para minimizar os impactos ambientais e reduzir custos de produção na linha produtiva Guaíba 2 da CMPC Celulose Riograndense. Esta solução foi elaborada tendo como pilar base a integração energética e/ou mássica do condensado limpo produzido na etapa de evaporação do licor negro. Primeiramente caracterizou-se o condensado limpo por meio de ampla gama de análises laboratoriais que permitiram identificar que, apesar de não apresentar um teor de impurezas elevado, as características mais marcantes deste condensado são sua carga orgânica elevada (DQO de 300 mg O₂/L) e coloração escura, as quais impedem que o mesmo seja aproveitado em etapas do processo que demandam elevada qualidade. Levando em consideração sua composição, identificou-se, por meio de balanços mássicos e de energia, as condições operacionais em que o mesmo é gerado e consumido.

A partir destes balanços observou-se que o aproveitamento do condensado limpo antes que este transborde e misture-se com o condensado intermediário apresenta maiores vantagens para o processo, uma vez que mantém a temperatura do mesmo em aproximadamente 90 °C e evita-se que ocorram contaminações. Diversas alternativas foram elaboradas para possibilitar o aproveitamento desta corrente de excesso de condensado limpo, entretanto somente duas foram previamente selecionadas como as mais viáveis tecnicamente.

Estas duas alternativas foram estudadas com base em trabalhos anteriores e a partir das informações da indústria em questão. O resultado desta análise foi que a opção mais viável tecnicamente seria a integração energética do condensado limpo para aquecimento da água desmi que alimenta a caldeira, seguido de um aproveitamento mássico para substituir a água de resfriamento na lavagem das toras. Esta iniciativa permite reduzir o consumo de vapor na caldeira de recuperação em aproximadamente 22 t/h, o que antes era utilizado para aquecimento da água desmi. A quantidade de vapor economizado poderia ser direcionada para a geração de energia elétrica, trazendo um retorno econômico com a venda de energia.

Reduzir a temperatura do condensado e utiliza-lo na lavagem das toras reduz a necessidade do tratamento de água na indústria em aproximadamente 200 m³/h. Assim como as economias no tratamento de água, evitar que o condensado seja descartado quente minimiza a propagação de odor para a vizinhança por conta da evaporação do efluente com alta temperatura. Por fim, a escolha de integrar o excesso de condensado limpo antes da mistura com o condensado intermediário reduz em média 0,84 t/d de carga orgânica enviada para o efluente, minimizando os custos no tratamento deste efluente.

As vantagens apresentadas pela alternativa 2 são bastante atrativas, impactando positivamente na redução dos custos de produção e minimização dos impactos ambientais. Todavia, para certificar-se da viabilidade da aplicação deste projeto, sugere-se, como próximos passos para o estudo, que seja realizada uma análise de viabilidade econômica da proposta, incluindo o retorno econômico associado a cada etapa e os custos de implementação e operação do projeto.

5 AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar à empresa CMPC Celulose Riograndense por ter financiado o programa de estágio de nível superior em engenharia química, durante o qual foi possível a elaboração deste trabalho. Além disso, nossos agradecimentos ao corpo técnico da CMPC por todos os ensinamentos e por ter auxiliado nas discussões e definições técnicas presentes no trabalho a fim de encontrar a melhor alternativa para o caso estudado.

Clean condensate evaluation for process integration on a cellulose industry

ABSTRACT

The cellulose production through Kraft process is characterized by its high energy demand, capital intensity and various environmental risks. Because of this scenario, a constant process optimization is important for industrial differentiation, reason why the present work had the objective to find alternatives for the clean condensate excess integration. This process change would minimize the amount of condensate sent to the effluent, reducing its temperature and organic charge. Through laboratory analysis and process balance it was possible to characterize the clean condensate and identify that the main difficulties for process integration are the color, pH and high organic matter content, limiting the reuse alternatives. After that, with the technic viability study, it was identified as a possible solution the energetic integration of condensate to heat the demi water, followed by the mass integration of it to substitute the wood washing water. This project would minimize impacts on the effluent, due to the less organic matter sent to the treatment plant, reduce vapor consumption, with the demineralized water heating, and reduce water treatment costs, as there will be no need of water to the wood washing.

KEY WORDS: Cellulose production; Condensates from evaporation; Process integration.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA), et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 2012.

BROGDON, B. N. Improved steady-state models for chlorine dioxide delignification sequences that include washer carryover effects. *TappiJournal*, 14(2), 93-103, 2015.

CABRERA, M. N. Pulp Mill Wastewater: Characteristics and Treatment. In: *BiologicalWastewaterTreatmentandResource Recovery*. InTech, 2017.

DEPEC. Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos - Bradesco. Papel e Celulose. Boletim. Junho, 2017

DEPEC. Departamento de Pesquisas e Estudos Econômicos - Bradesco. Papel e Celulose. Boletim. Setembro, 2016

FIEP; SINPACEL. Panorama setorial: indústria de celulose, papel, embalagens e artefatos de papel: Paraná 2016. Curitiba, 2016.

KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment. *Ecotoxicology and environmental safety*, 114, 326-342, 2015.

KLEMM, D., HEUBLEIN, B., FINK, H. P., & BOHN, A. Cellulose: fascinating biopolymer and sustainable raw material. *AngewandteChemieInternationalEdition*, 44(22), 3358-3393, 2005.

MENDES, A. F. Impacto da lavagem da polpa marrom no branqueamento, na evaporação e no meio ambiente. Tese em Tecnologia de Celulose e Papel, Universidade Federal de Viçosa, 2013.

OSIsoft. PI System. Disponível em <<https://www.osisoft.pt/pi-system/>>. Acesso em 29 set. 2017.

PIOTTO, Z. C. Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel-Estudo de Caso. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2003.

SMOOK, G.A. Handbook for Pulp & Paper Technologists. Tappi, USA. 1982.

TRAN, H.; VAKKILAINNEN, E. K. Thekraft chemical recovery process. Tappi Kraft Pulping Short Course. Canadá, 2008.3.

Recebido: 01 jun. 2018.

Aprovado: 23 jul. 2018.

DOI: 10.3895/rbpd.v7n3.8627

Como citar: ARAÚJO, G. E.; GONÇALVES, B. C.; CERON, L. P. Avaliação do condensado limpo para integração de processo em uma indústria de celulose. **R. bras. Planej. Desenv.**, Curitiba, v. 7, n. 3, Edição Especial Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, p.444-459, ago. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rbpd>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Gabriel Espíndola de Araújo
Av. Ipiranga, 6681 - Partenon, Porto Alegre - RS

Direito autorial: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

