MARCELO HAMAGUCHI

ANÁLISE DO CIRCUITO DE ÁGUA EM PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE PAPEL IMPRENSA INTEGRADA COM
PRODUÇÃO DE PASTAS TERMOMECÂNICAS

São Paulo
2007

MARCELO HAMAGUCHI

ANÁLISE DO CIRCUITO DE ÁGUA EM PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE PAPEL IMPRENSA INTEGRADA COM
PRODUÇÃO DE PASTAS TERMOMECÂNICAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do Título de Mestre em
Engenharia.

São Paulo
2007

MARCELO HAMAGUCHI

ANÁLISE DO CIRCUITO DE ÁGUA EM PROCESSO DE
FABRICAÇÃO DE PAPEL IMPRENSA INTEGRADA COM
PRODUÇÃO DE PASTAS TERMOMECÂNICAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Química

Orientador:
Prof. Dr. Song Won Park

São Paulo
2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência do seu orientador.

São Paulo, 28 de Setembro de 2007

Assinatura do autor:

Assinatura do orientador:

FICHA CATALOGRÁFICA

Hamaguchi, Marcelo

**Análise do circuito de água em processo de fabricação de papel imprensa integrada com produção de pastas termomecânicas / M. Hamaguchi. -- ed.rev. -- São Paulo, 2007.
162 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Água (Uso; Redução) 2.Programação linear 3.Polpação (Fabricação; Simulação) 4.Papel (Fabricação; Simulação) 5.Método Pinch I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Song Won Park pela orientação.

Aos amigos do Departamento de Engenharia Química, Laboratório de Controle e Simulação de Processos, pela motivação e amizade.

Ao amigo Lafaety Carneiro, por sua importante colaboração durante as etapas de visitas técnicas, coleta de dados e apresentação do processo produtivo.

RESUMO

A indústria de papel e celulose passa por constantes desafios para solucionar problemas relacionados ao alto consumo de água industrial. Uma alternativa é utilizar ferramentas como a Integração de Processos, onde é possível aplicar técnicas gráficas como o “Water Pinch” ou técnicas com programação matemática para otimizar o circuito de água. Para contribuir com o setor, as técnicas foram aplicadas no presente trabalho utilizando-se dados reais coletados em uma unidade produtora de polpa termomecânica e papel imprensa. Com os dados, um caso base em um simulador foi desenvolvido para iniciar a análise por Integração de Processos. A análise é baseada no aproveitamento das correntes de águas residuais em outras etapas do processo sob restrições na concentração limite de contaminantes, especificamente finos e sólidos dissolvidos.

Diferentemente dos trabalhos apresentados na literatura que alegam que a solução encontrada trata-se de valores otimizados, os resultados mostram que os valores encontrados através da programação matemática e do método Pinch são teoricamente corretos, porém, quando novamente simuladas sob estas novas condições obtidas por Integração de Processos, as condições operacionais da unidade industrial mostram-se inadequadas. As concentrações limites de contaminantes previamente estabelecidos pelas técnicas utilizadas são frequentemente ultrapassadas nos resultados de recálculo por simulação, e portanto, as soluções de Integração de Processos devem ser corrigidas antes de implantação. Por isso, os valores previstos, por exemplo, de redução de consumo de até 38% no projeto realístico atinge o valor de 23%, o que ainda é um bom resultado. O trabalho ainda mostra que a programação matemática é eficaz e rápida para encontrar soluções com múltiplos contaminantes, enquanto o método Pinch é mais voltado para casos com contaminante simples.

ABSTRACT

The Pulp and Paper industry has constantly struggled to solve problems related to high water consumption. One alternative is to use tools like Process Integration, where graphical methods and mathematical programming can be applied to optimize the water circuit. To contribute to the Pulp and Paper sector, the methods were applied in the present work using real process data that have been collected in an integrated thermomechanical and newsprint mill. With these data, a base case simulation was developed to initiate the analysis by Process Integration. The analysis is based on residual water reuse in other process stages under propriety constraints like contaminants concentration limits, specifically the dissolved solids and fine fibers.

Differently from works presented in the references that claim that solutions found are optimized values, the results of this work show that values found by mathematical programming and pinch method are theoretically correct, however, the operational conditions of the mill become inadequate when simulated under new conditions achieved by Process Integration. The concentration limits of contaminants previously established for the methods have their values frequently exceed after recalculation by simulation, and thus, the solutions by Process Integration must be corrected before using them. So, if the predicted value for reduction of fresh water consumption is, for example, 38%, in the realistic project this value will reach only 23%, which is still a good result. The work also shows that mathematical programming is efficient to find solutions when there are multiple contaminants, while pinch method is more adequate for those cases with single contaminant.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Diminuição no consumo de água na indústria de papel. Fonte: Mutjé <i>et al.</i> (2002)	14
Figura 2.1	Representação de transferência de massa entre correntes de água e de processo	19
Figura 3.1	Diagrama geral simplificado da fabricação de pasta termomecânica	27
Figura 3.2	Cavacos refinados em um estreito espaço entre dois discos rotativos de metal.	29
Figura 3.3	Diagrama simplificado do sistema de fabricação de papel.	33
Figura 3.4	Refinação de cavacos do Cadsim	47
Figura 3.5	Depuração e Lavagem do Cadsim	49
Figura 3.6	Tanques do Cadsim	50
Figura 3.7	Filtros <i>Save-all</i> do Cadsim	50
Figura 3.8	Simulação do processo de refinação de cavaco, lavagem, filtração e preparação de massa em Cadsim	52
Figura 3.9	Simulação do processo de fabricação de papel em Cadsim	53
Figura 3.10	Comparação gráfica de dados coletados e simulados	61
Figura 4.1	Estrutura da Integração de Processos	68
Figura 4.2	(a) Variação da concentração do contaminante e, (b) curva composta de concentração. Fonte: Wang; Smith (1994).	72
Figura 4.3	Obtenção do ponto de mínimo consumo de água. Fonte: Wang; Smith (1994).	74
Figura 4.4	Representação esquemática do exemplo 2. Fonte: Mann; Liu (1999).	76

Figura 4.5	Representação gráfica do exemplo 2 (passo 1). <i>Fonte: Mann; Liu (1999).</i>	77
Figura 4.6	Representação gráfica do exemplo 2 (passo 2). <i>Fonte: Mann; Liu (1999).</i>	78
Figura 4.7	Representação gráfica do exemplo 2 (passo 3). <i>Fonte: Mann; Liu (1999).</i>	79
Figura 4.8	Curva composta dupla após alteração no processo 3. <i>Fonte: Mann; Liu (1999).</i>	80
Figura 4.9	Representação esquemática do exemplo 2 após a alteração no processo 3. <i>Fonte: Mann; Liu (1999).</i>	80
Figura 4.10	Representação esquemática do exemplo 3. <i>Fonte: Jacob et al. (2002)</i>	81
Figura 4.11	Construção da curva composta dupla para o exemplo 3. <i>Fonte: Jacob et al. (2002)</i>	81
Figura 4.12	Ponto Pinch da curva composta dupla para o exemplo 3. <i>Fonte: Jacob et al. (2002)</i>	82
Figura 4.13	Mistura de fontes para atingir limites do exemplo 3. <i>Fonte: Jacob et al. (2002)</i>	83
Figura 4.14	Extração de contaminantes para atingir limites. <i>Fonte: Jacob et al. (2002)</i>	84
Figura 4.15	Representação gráfica para programação linear. <i>Fonte: Man; Liu (1999)</i>	87
Figura 4.16	Representação do exemplo 4 para circuito aberto. <i>Fonte: Jacob et al. (2002)</i>	91
Figura 4.17	Representação esquemática do exemplo para circuito fechado ($\alpha=[0 \ 0 \ 1 \ 1]$) após a aplicação de programação linear	94

Figura 5.1	Esquema ilustrando as principais correntes de água do processo.	99
Figura 5.2	Curva composta dupla para sólidos dissolvidos em máquina de papel	101
Figura 5.3	Curva composta dupla para fibras em máquina de papel (passo 1)	102
Figura 5.4	Curva composta dupla para fibras em máquina de papel (passo 2)	103
Figura 5.5	Mistura de fontes para atingir limite de concentração de fibras (passo 3)	104
Figura 5.6	Curvas de concentração de sólidos dissolvidos em processo integrado. Caso para um contaminante.	107
Figura 5.7	Curvas de concentração de fibras em processo integrado	108
Figura 5.8	Curva para atingir limite de concentração de fibras em processo integrado	108
Figura 5.9	Curvas de concentração de sólidos dissolvidos em processo integrado. Caso para múltiplo contaminante.	111
Figura 5.10	Modificações no caso 3 para atingir limites permitidos para concentração de sólidos dissolvidos	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados coletados durante visita técnica no setor de TMP	39
Tabela 2	Dados coletados durante visita técnica na máquina de papel	42
Tabela 3	Resultados da simulação do processo produtivo para caso-base	56
Tabela 4	Demanda de água para os processos desenvolvidos no exemplo.	72
Tabela 5	Carga de contaminante para todos os intervalos de concentração.	73
Tabela 6	Dados limites para o exemplo. <i>Fonte: Mann; Liu (1999).</i>	76
Tabela 7	Novos dados limites para o exemplo, modificando o processo 3	79
Tabela 8	Dados para exemplificar programação matemática	91
Tabela 9	Resultados obtidos após aplicar programação linear no exemplo 4	93
Tabela 10	Tabela com as correntes de água	97
Tabela 11	Fontes de água ordenadas para fibras em de produção de papel	100
Tabela 12	Demandas ordenadas para fibras em produção de papel	100
Tabela 13	Subdivisão da fonte 2 após a aplicação do método Pinch	104
Tabela 14	Distribuição das fontes para as demandas com método Pinch	104
Tabela 15	Fontes de água consideradas em processo integrado	106
Tabela 16	Demandas ordenadas para fibras e SD em processo integrado	106

Tabela 17	Subdivisão da fonte 4 após a aplicação do método Pinch	109
Tabela 18	Distribuição das fontes para as demandas com método Pinch em processo integrado (valores de vazão de água em kg/min)	110
Tabela 19	Distribuição das fontes para as demandas com programação matemática	112
Tabela 20	Distribuição das fontes utilizando programação matemática em processo integrado (valores de vazão de água em kg/min)	114
Tabela 21	Alterações observadas nas vazões das fontes pós otimizadas (em L/min)	115
Tabela 22	Alterações observadas nas consistências das fontes (em %)	116
Tabela 23	Alterações observadas nas concentrações de SD das fontes (em ppm)	117
Tabela 24	Alterações observadas nas vazões das demandas pós otimizadas (em L/min)	118
Tabela 25	Alterações observadas nas concentrações de SD das demandas (em ppm)	119
Tabela 26	Alterações observadas nas consistências das demandas (em %)	121
Tabela 27	Demandas do caso 3: corrigido para atingir limite estabelecido	123
Tabela 28	Fontes do caso 3: corrigido para atingir limite estabelecido	124
Tabela 29	Vazão total de água nos elfuentes para cada caso (em kg/min)	125
Tabela 30	Vazão total de fibras nos elfuentes para cada caso (em kg /min)	126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TMP	Thermo Mechanical Pulping
CMP	Chemi-Mechanical Pulping
CTMP	Chemi-Thermo-Mechanical Pulping
PI	Process Integration
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
LP	Linear Programming
NLP	Non-Linear Programming
SD	Sólidos Dissolvidos
F	Fonte
D	Demanda

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Desafios no uso de água na indústria de celulose e papel	14
1.2	Objetivos do trabalho	15
1.3	Estrutura da dissertação	16
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
2.1	Introdução	17
2.2	Integração de processos	17
2.3	Método Pinch	18
2.4	Técnicas de Programação Linear e Não-linear.....	21
2.5	Simulação na indústria de Celulose e Papel	23
3	DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL E A SUA SIMULAÇÃO	25
3.1	Introdução	25
3.2	Pastas Termomecânicas e Máquina de Papel Imprensa.....	26
3.2.1	Fabricação de Pasta Termomecânica	26
3.2.2	Preparação de Massa para a Fabricação do Papel	31
3.2.3	Circuito de Baixa Consistência na Fabricação do Papel	32
3.2.4	Fabricação de Papel	33
3.2.5	Sistema de Recuperação de Fibras da Fabricação do Papel	33
3.2.6	Caixa de Entrada da Máquina de Papel	34
3.2.7	Seção de Formação da Máquina de Papel.....	35
3.2.8	Seção de Prensas da Máquina de Papel.....	36
3.2.9	Seção de Secagem da Máquina de Papel.....	36
3.3	Dados coletados	37
3.3.1	Dados da produção de pasta termomecânica	39
3.3.2	Dados da produção de Papel Imprensa	42
3.4	Simulação	44
3.4.1	Simulador CadSim	44
3.4.2	Objetos para simulação do Caso Base.....	46
3.4.3	Estruturação do processo produtivo em CadSim	51
3.5	Resultados da Simulação do Caso Base.....	55
3.5.1	Comparação de dados simulados com dados reais.....	60
4	ANÁLISE DO CIRCUITO DE ÁGUA	63
4.1	Generalidades sobre o circuito de água	63

4.1.1	Circuito de água na produção de TMP	63
4.1.2	Circuito de água na Produção de Papel	64
4.2	Integração de Processos.....	66
4.3	Análise por método Pinch	68
4.3.1	Conceito de Water Pinch	68
4.3.2	Aplicação do Método Pinch	70
4.4	Análise com programação matemática	85
4.4.1	Conceito	85
4.4.2	Programação Linear.....	86
4.4.3	Aplicação do método de programação linear	88
5	ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA O CIRCUITO DE ÁGUAS DA FÁBRICA DE TMP E PAPEL IMPRENSA	95
5.1	Principais fontes e demandas	95
5.2	Resultados do método Pinch.....	100
5.2.1	Análise somente para a máquina de papel aplicando pinch	100
5.2.2	Análise para processo TMP integrada à máquina de papel aplicando pinch.....	105
5.3	Resultados do método por programação linear	112
5.3.1	Análise somente para máquina de papel aplicando programação linear	112
5.3.2	Análise para processo TMP integrado à máquina de papel aplicando programação linear.....	113
5.4	Discussão de resultados	115
6	CONCLUSÃO	127
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

1 INTRODUÇÃO

1.1 Desafios no uso de água na indústria de celulose e papel

Estudos ambientais indicam que já é notável a redução de algumas fontes naturais de água, um recurso imprescindível para o desenvolvimento econômico e social de uma nação. E a indústria de papel e celulose, por possuir um consumo específico de água relativamente alto, deve iniciar uma movimentação importante em busca de novas tecnologias, ou até mesmo, de métodos convencionais que possibilitem uma aplicação abrangente sobre a minimização na captação de água. Paralelamente, engenheiros e cientistas devem constantemente impulsionar as pesquisas na área de reutilização de água em processos industriais para acompanhar a tendência demonstrada na figura 1.1.

Figura 1.1. Consumo de água na indústria de papel. Fonte: Mutjé *et al.* (2002)

Ao mesmo tempo, a legislação ambiental é rigorosa, preocupando-se cada vez mais com o crescimento incontrolado da população mundial, ou seja, são desafios que merecem atenção dos profissionais da área. Explorar ferramentas que hoje estão mais difundidas entre os profissionais do meio

acadêmico é um importante passo para caminhar rumo aos desafios do uso de água na indústria.

Há soluções para a indústria de papel reduzir o consumo de água limpa captada dos rios. E tendo isso em vista, o presente trabalho enfoca uma aplicação de ferramentas de otimização em uma indústria de papel imprensa. Mas é bom enfatizar que nenhuma técnica, por mais inovadora que seja, obterá resultados sem a conscientização de profissionais sobre a importância na redução do consumo de água.

1.2 Objetivos do trabalho

O presente trabalho tem como principal finalidade estudar o circuito de água do processo produtivo de TMP (Thermo-Mechanical-Pulping) integrada a máquina de papel imprensa, utilizada principalmente para a produção de jornais e revistas. A produção desse tipo de papel no Brasil é feita por uma indústria que produz anualmente 185 mil toneladas de papel imprensa.

Através de alguns dados coletados, seu processo produtivo será analisado utilizando-se um simulador dinâmico dedicado ao setor de celulose e papel. Com os resultados da simulação, ferramentas de otimização serão implementadas com o objetivo de encontrar alternativas para minimizar o consumo de água fresca e a geração de efluente.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação foi desenvolvida de acordo com a estrutura indicada a seguir:

Capítulo 2: Apresenta uma revisão de trabalhos relevantes já publicados sobre as técnicas de Integração de Processos, que abordam a questão do reuso de água em unidades industriais através de métodos de otimização e gráficos. Na seção Water Pinch, será feita uma revisão abrangente da ferramenta, pois se trata de uma tecnologia convencional bastante estudada no mundo acadêmico.

Capítulo 3: Descreve o processo produtivo de pastas termomecânicas e papel imprensa da unidade fabril adotada para o estudo de caso. Em seguida, sua simulação foi realizada e descrita com enfoque no circuito de água. Informações sobre o software utilizado, assim como os dados coletados e simulados, estão descritos nesse capítulo.

Capítulo 4: Apresenta uma descrição do circuito de água da unidade fabril juntamente com a metodologia a ser aplicada sobre os métodos water pinch e programação linear.

Capítulo 5: Capítulo dedicado a conclusões e discussões sobre os diferentes métodos por integração de processo. Serão relatadas as dificuldades e vantagens observadas durante a aplicação dos métodos.

Capítulo 6: Consolida as conclusões do trabalho e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 7: Reúne as referências bibliográficas consultadas e utilizadas para o desenvolvimento do trabalho.

Apêndices: Reúnem informações importantes porém não necessárias ao contexto principal da dissertação.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

As técnicas utilizadas para minimizar o consumo de água em um complexo industrial incluem o reaproveitamento desta água no circuito de fabricação da indústria. Segundo Wang; Smith (1994,1995), existem três casos: o reuso direto da água decorrente de uma operação em outra área, reuso através de recuperação por um tratamento parcial para remover contaminantes, e reciclo das correntes de água junto com esta recuperação para remoção de contaminantes.

A análise de circuito de águas por integração de processos é uma abordagem recorrente nos processos químicos industriais, que pode ser desenvolvida através de métodos gráficos ou por otimização matemática. Porém, é necessário aplicar algumas ferramentas de simulação, preferivelmente de modelos dinâmicos, junto com técnicas de otimização ou de aproximação de melhores soluções, para obter resultados de minimização de uso de água utilizando métodos de integração de processos.

2.2 Integração de processos

O projeto de um sistema industrial de águas, para utilizar de modo eficiente os recursos disponíveis, é um problema complexo que envolve balanceamentos de diferentes compromissos, e por isso, é necessário estudar a integração de processos sob o enfoque mais matemático, com a modificação de diferentes combinações de uso de água. El-Halwagi; Manousiouthakis (1989) introduziram a noção de “Mass Exchanger Network Synthesis” (MEN) para uma transferência preferencial de um contaminante chave de um sistema com correntes ricas para um sistema com correntes pobres em contaminante.

Alva-Argaéz *et al.* (1998) discutem de um modo genérico a minimização de geração de efluentes usando uma abordagem integrada com programação

inteira-mista. Assumindo que alterações drásticas no processo não podem ser feitas por questões de custo, é preciso combinar técnicas que aumentem a eficiência do sistema de água através de práticas de reuso e recuperação de águas residuais. Utilizando o conceito de integração de processos, os autores descrevem uma combinação de técnicas gráficas chamada “water pinch” com ferramentas de programação matemática. A técnica consiste no desenvolvimento de um modelo superestruturado do sistema a ser analisado, englobando as características do processo de forma detalhada. Mas, para avaliar sua eficiência, deve-se levar em consideração o grau de fechamento do circuito de água em uma fábrica existente. Proporcionar reduções significativas é uma tarefa simples se uma unidade fabril possui um circuito praticamente aberto. Porém grandes desafios podem ser encontrados, por exemplo, em uma máquina de papel, onde minuciosas análises de restrições de contaminantes devem ser impostas para garantir um eficiente resultado.

Smith (2000) em seu artigo sobre o estado da arte em integração de processos, enfatiza que no passado, meados dos anos 80, a técnica de integração de processo era mais utilizada na área de conservação de energia. Ultimamente, a técnica tem se estendido bastante para aumentar eficiências em troca de massa. Bagajewicz; Savelski (2001) discorrem sobre projetos de sistema de utilização de água onde apenas um simples contaminante está presente no processo. Em sua publicação são ilustradas metodologias propostas para encontrar alternativas de melhorias em projetos industriais onde o uso de água é intenso, sendo possível otimizá-los através de técnicas de programação linear.

2.3 Método Pinch

O método Pinch para análise de redução de consumo de água tem encontrado algumas críticas e restrições, principalmente por tratar a troca de massa de modo muito similar à troca de energia. Entretanto, periodicamente têm surgido aplicações com Pinch associado à troca de massa, o que torna

obrigatório a revisão deste método e também a literatura pertinente ao método.

A ferramenta Pinch por troca de massa segue os mesmos princípios do Thermal Pinch, desenvolvido para troca de energia. Os primeiros estudos nessa direção foram introduzidos em 1989 por El-Hawagi e Manousiouthakis na Universidade da Califórnia, onde foram tratados os problemas relacionados à troca de massa entre correntes de processo, rica e pobre de contaminantes.

Figura 2.1 - Representação de transferência de massa entre correntes de água e de processo.

Wang; Smith (1994), consideraram o problema de transferência de contaminantes de uma corrente de processo para uma corrente de água através de métodos gráficos. O método poderia ser aplicado na área de minimização do consumo de água, considerando que contaminantes são transferidos, conforme figura 2.1, de uma corrente de processo (Q_p) para uma corrente de água (Q_{ag}). Observa-se na figura 2.1, que a concentração de contaminantes na entrada (C_e) do processo industrial é maior para a corrente Q_p do que para a corrente Q_{ag} , que por sua vez, possui a concentração de contaminantes maior na saída (C_s) do processo industrial. As técnicas são baseadas em modelos de uma unidade de processo como sendo uma unidade de transferência de massa. Porém a aplicabilidade do método de Wang e Smith é dificultada quando circuitos miscíveis de água-água são frequentes, como ocorre na indústria de celulose e papel. Além disso, a técnica não impõe restrições práticas como a distância geográfica de uma tubulação ou outras restrições de processo que proibam o reuso de

água de uma unidade para outra. Essa preocupação foi citada por Jödicke *et al.* (2001), que publicaram uma técnica de programação linear envolvendo custos operacionais e de investimento.

Com o intuito de desenvolver novos métodos gráficos, Dhole *et al.* (1996) denominaram de “curva composta dupla” o método no qual o gráfico é construído através de curvas de demanda e de fontes, ou seja, consumidores e geradores de água de determinados processos respectivamente. Suas vazões são introduzidas na abcissa da curva enquanto na ordenada são colocadas as respectivas purezas de cada corrente. Tanto o método apresentado por Wang e Smith, quanto o apresentado por Dhole e colaboradores, serão revistos no presente trabalho.

Savulescu *et al.* (2005) aplicam método Pinch para minimização do consumo de água e energia em fabricação de cartão com celulose Kraft de uma unidade industrial.

O método utilizado por Wang; Smith (1994, 1995) e por Kuo (1996), fornece importantes critérios sobre os problemas em sistemas de água. A ferramenta gráfica também foi citada por Hallale (2002), que apresenta um novo método para minimizar o uso de água fresca e a geração de efluentes. O autor considera o método desenvolvido por Dhole como atrativo, porém deficiente por não representar o sistema em estudo de forma clara. Hallale aponta corretamente que a mistura de diferentes fontes pode afetar o resultado final, ou seja, o resultado da técnica não pode ser considerado correto por que depende do modelo de mistura das fontes, que é na verdade parte do projeto do circuito de água.

Jacob *et al.* (2002) analisam, como uma parte do trabalho, a rede de água em processos de papel e celulose por método Pinch, mais especificamente relacionada com processos de destintamento de papel e de TMP com papel imprensa. Foi mostrado que a análise pelo método gráfico não foi muito eficiente na unidade de destintamento, pois o processo já operava em

circuito bastante fechado e o sistema proposto para mudanças assemelhava-se com o existente. No caso da fabricação de TMP e papel imprensa, o método Pinch não foi capaz de atingir um objetivo: a concentração em excesso de sólidos dissolvidos deve ser evitada durante o processo, mas ao mesmo tempo, fibras residuais devem ser recuperadas por fazerem parte da composição do papel, ou seja, o método deveria ser aplicado para múltiplos componentes com objetivos opostos. Porém, o método Pinch não se mostrou uma ferramenta adequada para esse propósito, sendo necessário, a aplicação de programação matemática linear para superar os obstáculos.

Dunn; Wenzel (2001a, 2001b, 2002), em uma série de trabalhos divididos em três partes, discutem métodos de projeto com integração de processos para conservação de água e redução de efluentes em indústria. Manan *et al.* (2004) aplicam método Pinch modificado e seus procedimentos de cálculos, com exemplos de ilustração.

2.4 Técnicas de Programação Linear e Não-linear

A programação linear surge como uma forte ferramenta, pois pode ser aplicada para levar simultaneamente em conta vários contaminantes no circuito de água. Papalexandri *et al.* (1994) apresentam uma técnica para síntese de MEN (Mass Exchanger Network) baseada em programação matemática não linear inteira mista (MINLP). Alva-Argaez *et al.* (1998) basearam-se nessa técnica de otimização para reduzir a vazão de efluentes em uma refinaria. Na função objetivo, os autores incluíram termos para o custo de operação, de água fresca em uma base anual, e para o custo de capital devido a tubulação e investimentos requeridos para o tratamento.

Jacob *et al.* (2002) ilustram, além do citado método pinch, a aplicação de programação linear em circuito de água em processos de reciclagem de papel e destintamento, com bons resultados. Em sua conclusão, os autores recomendam a aplicação do método em outras fábricas de celulose e papel.

Segundo Jödicke *et al* (2001), muitos circuitos de água otimizados através de ferramentas de integração de processos são rejeitados por engenheiros pelo fato dos resultados não levarem em consideração os custos de bombeamento e comprimento de tubulações. Em sua publicação, um modelo de programação linear inteira mista (MILP) é desenvolvido para superar esses obstáculos. O modelo minimiza os custos totais de um empreendimento, que pode ser dividido em custos operacionais e de investimento. Com os resultados da aplicação do modelo em uma unidade industrial, vários circuitos foram gerados e discutidos levando em consideração os aspectos econômico, ambiental e técnico.

Recentemente, Mariano *et al.* (2007) descreveram como a ferramenta “water pinch” pode ser utilizada nos dias atuais. Mencionam que a ferramenta é formulada como um problema de programação não linear altamente restrita para se aproximar cada vez mais de um modelo real. Devido a existência de diversos tipos de operações com água, custo e eficiência de seu tratamento e inúmeros tipos de contaminantes, o critério para o uso eficiente da água torna-se essencialmente não linear, multi objetivo e conflitante. Em sua publicação, estendem a análise por método Pinch englobando, além da minimização do consumo de água, o custo de infra-estrutura. Em trabalhos futuros, Mariano e colaboradores pretendem criar restrições para selecionar processos diferentes de forma eficiente, ou seja, se a tecnologia para tratamento de efluentes for selecionada baseado no tipo de contaminantes, a remoção da substância poderia ser feita de forma mais eficiente se o próprio processo for selecionado e otimizado em termos de custo e eficiência.

Cao *et al.* (2007) afirmam que a programação matemática linear pode ser formulada para problemas com simples contaminante e a programação não-linear para múltiplos contaminantes. Entretanto, afirmam os autores, esta programação não-linear não é a mais adequada, e propõem o método heurístico baseado em algoritmo genético.

2.5 Simulação na indústria de Celulose e Papel

A simulação de processos na indústria de celulose e papel (Syberg; Wild; Simons, 1992) pode se tornar uma ferramenta útil à medida em que a integração de massa e energia ganha importância quando o assunto é reduzir o consumo específico de água nas indústrias. Porém, segundo Jutila; Leiviska (1981), problemas com a simulação na indústria de celulose e papel estão relacionados com o ajuste do modelo em casos onde há correntes de reciclo no processo, o que pode causar uma limitação nos estudos de caso. E o problema persiste até os dias atuais. Além disso, testes dos modelos podem se tornar deficientes por falta de dados necessários para uma verificação completa do balanço. Como exemplo, o artigo destaca a dificuldade em introduzir dados de média e alta consistência de polpa no modelo, pois a taxa de produção de fibras não é medida com precisão até o produto final. Sendo assim, dados simulados podem ser precisamente calculados somente na teoria, porém não podem ser comparados com dados de produção de períodos curtos.

Desde a década de 80, as ferramentas de simulação têm-se desenvolvido de forma satisfatória, tanto em relação ao desempenho nos cálculos de iterações quanto em teorias aplicadas a modelos para simular estudos de casos. Para exemplificar simulações de processo em máquinas de papel imprensa, Dabros *et al* (2005), por exemplo, desenvolvem um modelo a partir da operação de uma unidade fabricante de pasta termomecânica integrada a quatro máquinas de papel imprensa. A simulação é desenvolvida através de simulação modular dinâmico seqüencial, onde as flutuações de variáveis medidas (fluxo, temperatura e consistência da polpa) e não medidas (sólidos dissolvidos e distribuição do comprimento de fibras) na caixa de entrada são quantificadas através de uma função objetivo utilizando o método simplex geométrico Nelder-Mead e o método de algoritmo genético. Com o resultado, foi possível analisar as quebras de folhas que são recirculadas para o processo e desenvolver alternativas para aumentar a estabilidade da máquina de papel. Porém, dificuldades surgem quando o

modelo é utilizado para outros estudos de caso, pois parâmetros e variáveis que distinguem um processo de outro não são contemplados.

Turon *et al.* (2005) simulam uma unidade produtora de papel revestido. A coleta de dados foi feita através de medições, análises de amostras e estimativas por balanço de massa. O objetivo principal é otimizar o circuito de água e matérias-primas como a fibra implantando ferramentas matemáticas. No trabalho, os autores reproduzem o estudo de casos com precisão, o que possibilita a predição de parâmetros operacionais. Isso ocorreu principalmente por causa da escolha criteriosa de dados de processo e a utilização eficiente do método escolhido para ajuste de parâmetros.

Lappalainen, Mäkinen (2006) desenvolvem um estudo dos sólidos dissolvidos e colóides com simulação dinâmica da produção de pasta mecânica. Como alguns sólidos são prejudiciais, e outros benéficos, durante a produção, o objetivo do trabalho foi criar balanços dinâmicos destes sólidos dissolvidos e colóides em todo o processo para entender seu comportamento através de sensores virtuais de predição. Mais uma vez, o artigo também enfatiza a questão das oscilações do processo que dificilmente são acompanhados no modelo. O problema pode ser minimizado se a coleta de dados for feita a médio ou longo prazo para analisar parâmetros em situações reais de processo.

No presente trabalho, descreve-se no próximo capítulo, o processo produtivo e a coleta dos dados de produção e, a seguir, no capítulo 4, a integração de processos pelo método Pinch de Dhole *et al.* (1996) e o método de otimização por programação matemática utilizado por Jacob *et al.* (2002). Porém, para a aplicação da programação matemática nesta fábrica de TMP e na máquina de papel, a função objetivo será baseada em uma técnica linear que não englobará a análise de redução de custos e sim, a vazão de água em cada ponto de consumo de água fresca, que estará sob restrições de concentração de contaminantes e fibras.

3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO INDUSTRIAL E A SUA SIMULAÇÃO

Neste capítulo, uma introdução sobre os diferentes processos de polpação será feita, dando-se em seguida, ênfase à descrição do processo produtivo de pasta termomecânica integrada à máquina de papel imprensa da unidade fabril. A descrição foi baseada no texto de Oliveira (2004) e tecnicamente complementada pelo livro editado por Sundholm (1999) sobre pastas mecânicas. Para finalizar, será descrito o funcionamento do simulador Cadsim com os dados inicialmente coletados.

3.1 Introdução

O objetivo de um processo de polpação é separar as fibras da madeira para torná-las adequadas para a fabricação de papel.

Basicamente, a polpa pode ser classificada em pasta química ou pasta de alto rendimento, sendo que essa última pode ou não ser tratada com compostos químicos. Para pasta química, o processo mais utilizado é o “Kraft”, que proporciona uma capacidade para recuperação dos compostos químicos de polpação. As pastas de alto rendimento podem ser classificadas em pasta puramente mecânica, quimiomecânica (CMP), termomecânica (TMP), e quimiotermomecânica (CTMP). A TMP será o foco principal do presente trabalho.

Em termos de propriedades tais como a resistência e pureza do papel, a pasta química é a mais recomendada. Além disso, a fabricação de pasta mecânica preserva a lignina por não existir sua degradação química no processo de fabricação; portanto ocasiona, com o decorrer do tempo, um amarelamento no papel. Isso é perceptível nos jornais e revistas, que são produzidos a partir de pastas mecânicas. Outra desvantagem do processo mecânico é o consumo específico elevado de energia elétrica.

No processo mecânico, as fibras da madeira são processadas para proporcionar um rendimento da estrutura celulósica de aproximadamente 95%, sendo que em processos químicos essa porcentagem dificilmente chega a 50% devido ao tratamento térmico e à reação de compostos da madeira com produtos químicos que ocasionam a destruição de parte dos componentes da madeira.

3.2 Pastas Termomecânicas e Máquina de Papel Imprensa

Na unidade fabril em questão, a madeira utilizada para a fabricação de pasta termomecânica é predominantemente o *pinus taeda*, uma fonte de fibra longa que oferece boa produtividade e qualidade para fabricação de papel imprensa. Além da pasta termomecânica, é necessário o uso de pasta química, para conferir resistência física ao papel.

A fábrica possui duas linhas de produção de TMP, constituídas de diferentes equipamentos e processos. Consequentemente, as propriedades físicas da polpa final variam de acordo com a capacidade utilizada de cada linha. Mas para a fabricação do papel, as polpas se misturam para alcançar a capacidade de produção desejada.

3.2.1 Fabricação de Pasta Termomecânica

Como pode ser observado na figura 3.1, o setor de TMP desta fábrica é dividido em duas linhas de produção, sendo que a maior parte está concentrada na linha 2, ou seja, a mais nova e tecnologicamente mais avançada.

Figura 3.1. Diagrama geral simplificado da fabricação de pasta termomecânica

O processo se inicia com a lavagem do cavaco, não representado na figura 3.1. A função desta seção de lavagem é separar dos cavacos qualquer material indesejável, tais como areia, pedras ou metal. Isto é necessário para proteger o equipamento contra danos e para remover materiais que possam prejudicar a qualidade da pasta. Após o processo de lavagem, é feito o transporte do cavaco proveniente para o silo de estocagem. Os cavacos são extraídos do silo para alimentar um vaso, ou distribuidor pressurizado, de impregnação a alta pressão de seguinte modo: os cavacos lavados seguem para o silo vibratório, onde são descarregados para uma rosca de alimentação e selagem, que além de servir como tampão de selagem do sistema pressurizado dos refinadores, faz o papel de medidor e de controle de produção. A rosca comprime os cavacos e extrai certa quantidade de água juntamente com alguns constituintes solúveis da madeira, ao mesmo tempo que auxilia a impregnação dos cavacos pelo vapor. Essa etapa de pressurização permite uma impregnação de vapor com um conseqüente amaciamento da lignina, para facilitar o processo de desfibrilação mecânica nos refinadores de cavacos.

O bloco referente a refinação de cavacos, da linha 1 mostrada na figura 3.1, é descrito a seguir. Após a impregnação os cavacos são transferidos para o refinador de cavacos, composta de dois refinadores, onde a estrutura fibrilar é mecanicamente processada para a formação de pasta termomecânica. A consistência de saída do primeiro refinador, esquematizado na figura 3.2, é de aproximadamente 30-35%, levando em consideração que a zona de refinação deve ser determinada pela consistência de entrada e pela quantidade de água adicionada. Alguns fatores como o diâmetro do disco, a velocidade do disco, vibração e temperatura influenciam a qualidade da polpa de saída.

Figura 3.2. Cavacos refinados em um estreito espaço entre dois discos rotativos de metal. Pelo menos um dos discos rotaciona com alta velocidade.

A refinação nesta linha 1 é feita em dois estágios: no refinador primário, que refina os cavacos, e em seguida no refinador secundário, onde é refinada a pasta produzida no primeiro refinador proporcionando um melhor acabamento às fibras. Do refinador primário, a polpa é direcionada para um separador centrífugo denominado ciclone. A polpa entra no ciclone tangencialmente e é direcionada para o fundo, de onde é descarregada para o refinador secundário. O vapor gerado, que poderia ser recuperado e utilizado em etapas como a impregnação de cavacos, é direcionado para a atmosfera através do ciclone.

A pasta celulósica que sai do refinador primário segue para o refinador secundário que também recebe uma parte dos rejeitos da prensa. Um terceiro refinador recebe a maior parte dos rejeitos da prensa. Por isso este terceiro refinador é considerado refino de rejeitos tanto da linha 1 quanto da linha 2, apesar de uma parte dos rejeitos totais também entrar no refinador secundário da linha 1. Da saída do refinador secundário segue-se para um tanque de latência. Quando cavacos são desfibrados a altas temperaturas e alta consistência, como ocorre no refinador, as fibras são deformadas devido ao processo. Durante o processo de refinação, as fibras são comprimidas, torcidas e encurvadas. Esse fenômeno é chamado de latência e deve ser removida, o que pode ser feita através de agitação da polpa a baixa consistência (3 a 5%) e altas temperaturas.

Após a remoção de latência, é possível melhorar as condições de drenabilidade, opacidade, formação da folha e obter melhores propriedades físicas de resistência. Portanto, da saída do refinador de rejeitos, a polpa segue para o tanque de latência da linha 1.

Para aumentar significativamente a produção com qualidade superior, diminuir o custo de produção e reduzir o consumo de fibras de celulose, foi implantada a linha 2 de TMP. O processo é similar à linha 1, com algumas características adicionais, tais como o tipo de refinador em si com o seu ciclone pressurizado.

Na linha 2, uma rosca distribuidora projetada para dividir o fluxo de cavacos em duas partes idênticas, alimenta as duas zonas do mesmo refinador uniformemente. Aqui também existe um refinador primário da qual se segue para um secundário, de onde as fibras celulósicas são descarregadas a uma consistência de 45% para o tanque de latência.

Após o tanque de latência a pasta segue para os depuradores, onde é feita a remoção das impurezas e das fibras residuais contidas na polpa, o que pode prejudicar a qualidade da folha e causar quebras do papel na máquina. A separação é feita em aceites e rejeitos. Os rejeitos das duas linhas são direcionados para um tanque e em seguida para as prensas de rejeitos. Nessa etapa, a água extraída é reutilizada no processo e o rejeito enviado para um refinador de rejeitos. Os aceites seguem para os filtros, que possuem a função de concentrar a massa a uma consistência entre 7 e 10%. Posteriormente, a pasta é novamente diluída de forma controlada como parte do processo de lavagem.

Dois tipos de filtros executam a etapa de lavagem em duas linhas em paralelo: o filtro a tambor e o filtro a disco. O primeiro é constituído de um cilindro, com a parte externa revestida com uma tela fina, apoiado sobre uma chapa perfurada sobre as canaletas de drenagem. Cada canaleta está ligada através do eixo tubular até a válvula de vácuo, localizada em uma das

extremidades do tambor. As fibras da pasta ficam retidas na tela e a água é coletada nas canaletas. O segundo filtro é constituído por discos com telas posicionados paralelamente uns aos outros. Os discos possuem dupla face e funcionam com vácuo. A pasta circula lateralmente às telas sendo succionadas e aderidas na tela dos discos. Os discos giram lentamente e as fibras são coletadas na parte superior do equipamento através de jatos de água com pressão suficiente para descolar as fibras da tela. A pasta diluída é estocada e a água extraída retorna ao processo. A pasta é estocada em um tanque de pasta não branqueada, da qual pode ser enviada para uma torre de branqueamento ou para uma torre de estocagem de TMP.

3.2.2 Preparação de Massa para a Fabricação do Papel

A pasta celulósica é estocada a uma consistência de aproximadamente 5%. Na descarga do tanque, a pasta de celulose é diluída com água branca, isto é, com a água proveniente do desaguamento na máquina de papel, e bombeada para o refinador. A refinação da celulose ocorre entre os discos dos refinadores. A maior ou menor quantidade de fibrilos formados depende do grau de aproximação entre os discos do refinador. Com os discos mais próximos, existe um maior grau de refinação e um consumo de energia maior. O grau de refinação necessário da celulose é determinado a partir das propriedades do produto final, o papel. A partir do monitoramento, principalmente da resistência à tração e ao rasgo, o operador tem uma referência sobre o grau de refinação a ser aplicado à celulose. Uma maior refinação tende a aumentar a resistência à tração e a diminuir a resistência ao rasgo. Fica claro aqui que existem dois processos com o mesmo nome de refinação: o desmembramento de fibras da estrutura da madeira, para produzir pasta celulósica de alto rendimento em TMP, e o tratamento mecânico de pastas celulósicas para melhorar as propriedades do papel produzido na máquina de papel.

A presente unidade fabril tem uma característica diferente, a de submeter à refinação apenas a pasta celulósica Kraft adquirida. A pasta de celulose

refinada é misturada com as demais matérias-primas constituintes do papel, ou seja: pasta mecânica, pasta termomecânica, celulose, refugo e massa recuperada. O tanque de mistura recebe a proporção desejada de cada um dos componentes. O refugo é bombeado de tanques contendo resíduos de papéis, que são continuamente gerados durante a seção de formação para obter a largura desejada da folha na máquina de papel. Problemas operacionais como falha na formação de bobinas ou quebras de folha na máquina de papel também geram resíduos, porém de forma periódica. Resíduos ainda são gerados durante o início da produção, pois é um período necessário para a estabilização do processo. O refugo é engrossado em um filtro e posteriormente estocado.

3.2.3 Circuito de Baixa Consistência na Fabricação do Papel

No setor de preparação de massa, a mistura possui uma consistência ajustada de aproximadamente 3%. A polpa deve então ser diluída e depurada para que possa seguir para a caixa de entrada da máquina de papel com características desejáveis para uma boa formação do papel. A mistura é alimentada na caixa de nível, onde é garantida uma pressão constante da caixa de nível na alimentação. A alimentação da mistura ocorre na saída do tanque de água branca, sendo em seguida admitida na bomba de mistura, após ter sido diluída com a água branca para uma consistência da ordem de 1%.

A pasta proveniente da bomba de mistura é bombeada para o sistema de tratamento para retirar pequenos resíduos. O último tratamento da pasta antes de ser admitida na máquina de papel é uma depuração e desaeração. Estas duas operações são efetuadas em um sistema de *cleaners* que consiste essencialmente de um conjunto de depuradores centrífugos arranjados em quatro estágios, dos quais os três primeiros estão ligados a um sistema de vácuo. As frações aceitas do primeiro, segundo e terceiro estágios são alimentadas em um tubulão coletor horizontal, bipartido

verticalmente. A mistura é bombeada com vazão constante para os depuradores do sistema de *cleaners*, composto por quatro estágios.

3.2.4 Fabricação de Papel

Um diagrama simplificado da fabricação de papel imprensa está mostrado na figura 3.3. Neste item, pelo fato de possuir grande importância no circuito de água, cada etapa do processo de fabricação de papel será explicada.

Figura 3.3. Diagrama simplificado do sistema de fabricação de papel.

3.2.5 Sistema de Recuperação de Fibras da Fabricação do Papel

A água branca extraída na seção de formação tem um teor considerável de fibras. E com esse objetivo, o sistema de recuperação de fibras é normalmente implantado para a separação de dois componentes: água e fibras.

Para essa finalidade, dois filtros a disco operando em paralelo são utilizados. Porém antes de ser enviada para os equipamentos, é necessário aumentar o

teor de fibras da água branca para facilitar a formação de uma camada filtrante. Isso é realizado através da adição de pasta termomecânica e/ou celulose para obter uma consistência mais adequada à função dos filtros.

O filtro é constituído por discos com telas de material sintético posicionados paralelamente um ao outro. Os discos possuem dupla face e funcionam sob pressão negativa. Conseqüentemente, a pasta que circula lateralmente às telas são succionadas e a massa aderida às paredes dos discos forma uma manta. Os discos, que estão parcialmente submersos, rotacionam lentamente para que as fibras sejam coletadas na parte superior do equipamento através de jatos de água. A água utilizada para realizar os jatos é proveniente da própria água filtrada no equipamento.

3.2.6 Caixa de Entrada da Máquina de Papel

A caixa de entrada ocupa uma posição de extrema importância no processo de fabricação de papel e é responsável pela adição de massa com fibras em suspensão ao longo de toda a largura da máquina. O método de operação da caixa de entrada determina acentuadamente a qualidade da folha de papel, a capacidade produtiva e o grau de eficiência da máquina de papel.

A caixa de entrada recebe a polpa preparada e tem por função distribuir as fibras na tela da mesa de formação da folha. Ela é o elemento posicionador mais importante para o ajuste do perfil transversal do papel, mantendo uma gramatura estável e proporcionando uma orientação adequada das fibras. A caixa de entrada, distribuindo uniformemente as fibras no sentido da máquina de papel durante longo tempo, procura garantir valores constantes das características físicas para o papel em cada ponto da folha fabricada.

A suspensão de fibras deve entrar na tela desaguadora com as seguintes características: jato fechado no sentido transversal da tela, espessura do jato calibrada, mistura homogênea, velocidade constante e com direção e sentidos fixos. Para obtenção de tais características é necessário que a

polpa alimentada seja distribuída ao longo do bocal de saída com um jato calibrado. A estratificação da folha de papel nestas telas chama-se formação.

3.2.7 Seção de Formação da Máquina de Papel

O tipo de formador desta unidade fabril consiste de duas telas, onde o papel formado entre elas apresenta propriedades semelhantes em ambas as superfícies. Conseqüentemente há poucas diferenças entre as absorções de tinta em ambos os lados, proporcionando uma característica requerida pelos clientes, que normalmente processam a impressão nos dois lados. A seção possui um sistema completo de rolos que conduzem o funcionamento adequado das telas inferior e superior

A seção de pré-desaguamento é composta por mesa da tela, sistema de régua e caixas de sucção úmidas. Nesta área apenas uma das superfícies do papel está em contato com a tela. A mesa da tela tem a função de suportar a tela ao receber o jato de massa vindo da caixa de entrada e constitui o primeiro elemento de desaguamento. O segundo elemento é uma caixa constituída de um sistema de régua. Os últimos elementos de desaguamento da seção de pré-formação são as caixas de sucção úmidas, acionadas através de bombas de vácuo.

O vácuo é aumentado lentamente de acordo com o avanço da folha, desde a mesa da tela até o rolo formador, situado no início da seção. No rolo formador o desaguamento é feito através do vácuo existente nas câmaras de sucção e também devido à tensão da tela inferior contra a massa. A partir da primeira zona de sucção do rolo formador, o aumento de vácuo passa a ser mais acentuado sem afetar a retenção, pois neste ponto a folha já está praticamente formada.

Depois do rolo formador, tem-se na tela superior um defletor de sucção, que desvia a água expelida por centrifugação da camisa do rolo formador para

uma calha de saída e que promove um desaguamento da folha pelo lado da tela superior.

As duas telas se separam sobre o rolo de sucção da tela, que conta com três zonas de vácuo, sendo que a folha permanece sobre a tela inferior. Após o rolo de sucção, a folha apresenta teores secos entre 16 e 18%.

3.2.8 Seção de Prensas da Máquina de Papel

A prensagem é uma seção importante para a remoção de água da folha. Além disso, a seção pode proporcionar lisura, aumentar a densidade da folha e aumentar a operacionalidade da folha na área de secagem. A prensagem representa uma economia no custo de remoção de água, pois através do processo de evaporação, energia térmica é requerida. Porém como há dificuldades em extrair toda a água através de prensas, essa seção fica responsável por minimizar o consumo de vapor na seção de secagem.

A remoção de água ocorre quando a folha passa por um ponto de contato entre dois rolos. O feltro utilizado transporta a folha e absorve a água retirada durante a prensa.

3.2.9 Seção de Secagem da Máquina de Papel

O objetivo da secagem é a evaporação da água residual na folha de papel, após o processo de prensagem. A folha é conduzida à seção de secagem através de uma passagem que se torna mais fácil quanto mais seca estiver a folha, pois nesse estado a tensão que a folha consegue suportar é maior.

Os cilindros secadores estão dispostos em duas fileiras horizontais, de modo que a folha passa alternadamente pela parte superior dos cilindros superiores e pela parte inferior dos cilindros inferiores. A folha úmida passa pelas duas fileiras de cilindros secadores até atingir um teor seco de aproximadamente 90%. A água é gradualmente evaporada e arrastada pelo

ar quente. Na passagem do papel pelos cilindros secadores, a folha absorve o calor sensível do vapor que aquece os cilindros. Em seguida ocorre a evaporação com liberação de vapor no espaço entre os cilindros, provocando dessa maneira, um esfriamento na folha, que fica apta a absorver calor sensível novamente.

3.3 Dados coletados

Foram necessárias visitas técnicas de alguns dias à unidade fabril com o objetivo de coletar os dados mais importantes para o balanço no simulador. Houve algumas ocorrências inesperadas durante a produção diária, impedindo dessa maneira, a coleta de todas as informações em uma mesma base de produção final. Sendo assim, valores de diferentes datas e horários foram coletados. Quando possível, históricos de informações de processo foram analisados. Mas devido a indisponibilidade de tempo dos operadores e do curto período de visita, a grande parte dos dados provém de valores instantâneos coletados de um a quatro vezes em dias e horários diferentes dependendo da importância da corrente para o balanço no simulador.

A maior parte dos valores foi coletada em telas do SDCCD - Sistema Digital de Controle Distribuído, que acompanha os valores de produção através de medidores de campo. Valores necessários, porém não disponíveis no SDCCD, foram extraídos de históricos de produção. Houve valores baseados na experiência de operadores e engenheiros de cada área. A consistência de rejeitos e aceites de alguns depuradores, assim como a vazão de água para os chuveiros dos filtros, são exemplos de alguns dados não medidos sistematicamente, cujos valores foram anotados após reuniões com engenheiros e operadores.

O balanço mássico preliminar de Oliveira (2004) desta unidade fabril foi utilizado como referência para analisar diferenças. Outros dados não medidos e necessários para a simulação foram baseados em fluxogramas de projeto ou estimados, em último caso, através do diâmetro de tubulação.

Em uma unidade industrial dificilmente há instalações completas com medidores de vazão, gerando assim, uma grande barreira para projetos que necessitem de um estudo para aumentar a eficiência no uso de água e energia.

Ainda assim, os dados são considerados coerentes com as faixas de variações naturais de uma unidade real, que nunca está em regime permanente total, e estas análises vêm da experiência do autor quando auxiliou Oliveira (2004) na análise preliminar deste trabalho de 2004. Por saber destas dificuldades de conciliação de dados industriais, os valores foram discutidos com os engenheiros, operadores e também com este autor do levantamento de 2004.

Portanto, tomou-se o cuidado de listar, na tabela 1, o modo como o dado foi coletado. Entretanto, deve-se lembrar de que, desde que os valores obtidos estejam consistentes com a experiência fabril, aqui o mais importante não são os valores em si destes dados, e sim, a coerência da construção do caso base de simulação, para ser utilizado em estudos de alternativas.

Por isso, mostra-se posteriormente, no presente trabalho, que o simulador apresenta bom fechamento geral dos valores das correntes, apesar da existência das inúmeras correntes de ciclos. Notadamente, para o usuário de simuladores de processos, ciclos são fontes de dificuldades de ajustes e “convergências” de resultados.

Naturalmente, nem todas as medidas coletadas foram utilizadas no trabalho. As tabelas 1 e 2 listam todos os valores coletados sem discriminar as que foram utilizadas para a construção do caso base.

3.3.1 Dados da produção de pasta termomecânica

Tabela 1 - Dados coletados durante visita técnica no setor de TMP

Geral	coletado	simulado	unidade	Observação
Produção da TMP1	4,76	4,50	t/h	SDCD (média de 3 dias)
Produção da TMP2	19,0	18,0	%	SDCD (média de 3 dias)
Água clara utilizada no período	4948	4292	m ³	boletim diário (média 3 dias)
Água fresca utilizada no período	800	787	m ³	boletim diário (média 3 dias)
Toras consumidas no período	1780	-	m ³	SDCD (média de 3 dias)
Gasto aproximado com energia elétrica	2000000	-	US\$/mês	Informado pelo engenheiro
Vazão específica de químico para branqueamento	6,0	6,0	kg/t	Coleta no SDCD
Vapor para impregnação do cavaco no dia	106,0	-	t	Coleta no SDCD

Refinador primário (linha 2)	coletado	simulado	unidade	Observação
Fluxo de entrada de cavaco	280,0	260,0	kg/min	SDCD (média de 3 dias)
Consistência de entrada da polpa	50	50	%	Informação de projeto
Consistência de saída da polpa	45	45	%	Informação de projeto
Água de diluição na descarga do refinador	185,0	356,2	kg/min	SDCD (média de 3 dias)
Água de selagem	180,0			
Rendimento do refinador	98,0	98,9	%	Informação de Projetos
Potência consumida	17,4	17,4	MW	SDCD (média de 3 dias)

Refinador secundário (linha 2)	coletado	simulado	unidade	
Consistência de entrada da polpa	45	45	%	Informação de projeto
Consistência de saída da polpa	44	44	%	Informação de projeto
Água de selagem	265,0	384,1	kg/min	SDCD (média de 3 dias)
Água de diluição na descarga do refinador				
Rendimento do refinador	97,0	98,9	%	Informação de Projetos
Potência consumida	15,4	15,4	MW	SDCD (média de 3 dias)

Refinador baixa consistência	coletado	simulado	unidade	
Vazão de fibras	286,8	271,9	kg/min	Coleta no SDCCD
Consistência de saída da polpa	3,5	2,8	%	Informação de projeto
Água de selagem	174	200	kg/min	Coleta no SDCCD
Água de diluição na descarga do refinador	177			
Rendimento do refinador	97,0	98,9	%	Informação de Projetos
Potência consumida	1,098	1,10	MW	Coleta no SDCCD

Tanque de Latência (linha 2)	coletado	simulado	unidade	
Temperatura de Latência	90	87	°C	SDCCD (média de 3 dias)
Vazão de água adicionada para diluição	5400	8279,3	kg/min	SDCCD (média de 3 dias)
Consistência da Polpa	3,0 a 4,5	2,9	%	Informado por Operador

Refinador primário (linha 1)	coletado	simulado	unidade	
Fluxo de entrada de cavaco	235	62	kg/min	Informado por Operador
Consistência de entrada da polpa	50	50	%	Informação de projeto
Vazão de saída da polpa	43 a 45	40	kg/min	Coleta no SDCCD
Consistência de saída da polpa	30 a 35	38	%	Informação de projeto
Água de diluição na descarga do refinador	150	94	kg/min	Coleta no SDCCD
Rendimento do refinador	97,0	98,9	%	Informação de Projetos
Potência consumida	6,5	6,5	MW	Coleta no SDCCD

Refinador de rejeitos	coletado	simulado	unidade	
Consistência de entrada da polpa	28 a 30	32	%	Informação de projeto
Consistência de saída da polpa	26 a 28	29	%	Informação de projeto
água de diluição	135,0	61,5	kg/min	Coleta no SDCCD
Rendimento do refinador	97,0	98,9	%	Informação de Projetos
Potência consumida	6	6	MW	Coleta no SDCCD

Depuração 1ª (linha 2)	coletado	simulado	unidade	
Vazão de entrada da polpa	8440,0	9394,6	kg/min	Coleta no SD CD
Consistência de entrada da polpa	3,5 a 4,5	2,9	%	Informado por Operador
Consistência do aceite	2,5 a 3,0	2,2	%	Informado por Operador
% de rejeitos	57,0	38,0	%	Coleta no SD CD
Vazão de aceite	4260,0	5800,0	kg/min	Informação de projeto
Consistência do rejeito	4,0 a 4,5	3,7	%	Informado por Operador

Depuração 1ª (linha 1)	coletado	simulado	unidade	
Vazão de entrada da polpa	4440,0	5375,6	kg/min	Informação de projeto
Consistência de entrada da polpa	3,5 a 4,5	2,93	%	Informado por Operador
Consistência do aceite	2,70	2,88	%	Informado por Operador
% vazão de rejeitos	14,0	21,39	%	Coleta no SD CD
Vazão de aceite	3260,0	4225,6	kg/min	Informação de projeto
Consistência do rejeito	3,5 a 4,5	3,1	%	Informado por Operador

Depuração 2ª (linha 2)	coletado	simulado	unidade	
Consistência de entrada da polpa	2,5 a 3,5	3,66	%	Informado por Operador
Consistência do aceite	2,5 a 3,5	2,97	%	Informado por Operador
% de rejeitos	62,0	40,0	%	Coleta no SD CD
Consistência do rejeito	3,5 a 4,5	4,66	%	Informado por Operador

Filtros Engrossadores tambor	coletado	simulado	unidade	
Vazão de entrada da polpa	5520,0	5957,3	kg/min	Coleta no SD CD
Consistência de entrada da polpa	2,5 a 3,5	2,4	%	Informado por Operador
Consistência da água filtrada	0,05	0,05	%	Informado por Operador
Vazão de polpa engrossada	2380,0	2071,4	kg/min	Coleta no SD CD
Consistência da polpa engrossada	6,5 a 7,5	6,5	%	Coleta no SD CD

Filtros Engrossadores disco	coletado	simulado	unidade	
Vazão de entrada da polpa	3260	4225,6	kg/min	Informação de projeto
Consistência de entrada da polpa	2,5 a 3,5	2,9	%	Informado por Operador
Consistência da água filtrada turva	0,05	0,05	%	Informação de projeto
Consistência da água filtrada clara	0,03	0,03	%	Informação de projeto
Consistência da polpa	6,5	6,5	%	Informação de projeto

Prensa de Rejeitos	coletado	simulado	unidade	
Vazão de entrada de rejeitos	2950,0	2076,0	kg/min	Informação de projeto
Consistência de entrada da polpa	2,5 a 3,5	2,4	%	Informação de projeto
Vazão de saída de água filtrada	2400,0	1856,6	kg/min	Informação de projeto
Consistência da água filtrada	0,5	0,5	%	Informado por Operador
Vazão de polpa prensada	320,0	229,3	kg/min	Informação de projeto
Consistência da polpa prensada	28,0 a 32,0	29,0	%	Informado por Operador

3.3.2 Dados da produção de Papel Imprensa

Tabela 2 - Dados coletados durante visita técnica na máquina de papel

Área da Produção de Papel	coletado	simulado	unidade	Observação
Produção de Papel	21,5	22,0	t/h	Coleta no SDGD
Teor seco na saída da secagem	91,0 a 91,5	91,2	%	Coleta no SDGD
Teor seco na saída das prensas	42 a 43	44,0	%	Informação de projeto
Teor seco na entrada das prensas	13,5 a 14,5	13,0	%	Informação de projeto
Largura da Máquina	6,7	-	m	Informação de projeto
Gramatura do Papel	2400	-	g/cm ²	Informado por Operador
Velocidade da tela	1190	-	m/min	Coleta no SDGD
Consistência da celulose para a preparação de massa	3,0 a 4,0	3,5	%	Informado por Operador

Área da Produção de Papel	coletado	simulado	unidade	Observação
Consistência da TMP para a preparação de massa	3,5 a 4,0	3,5	%	Informado por Operador
Consistência da água branca extraída da seção de formação	0,45 a 0,55	0,40	%	Informação de projeto
Vazão de massa que entra na caixa de entrada	54234,0	54015,6	kg/min	Coleta no SDCCD
Consistência da massa que entra na caixa de entrada	0,98 a 1	1,00	%	Coleta no SDCCD
Consumo de água fresca	4927,7	4928,0	m ³ /dia	boletim diário (média 4 dias)
Vazão de água branca para recup. de fibras (filtro 1)	14573,0	16186,7	kg/min	Coleta no SDCCD
Potência consumida do refinador 1	405	405	kW	Coleta no SDCCD
Potência consumida do refinador 2	420	420	kW	Coleta no SDCCD
Potência consumida do refinador 3	242	242	kW	Coleta no SDCCD
Vazão de água branca para recup. de fibras (filtro 2)	9816,0	13626,2	kg/min	Coleta no SDCCD
% de TMP na preparação de massa	68,0	65,0	%	Coleta no SDCCD
% de celulose na preparação de massa	7,6	5,7	%	Coleta no SDCCD

Obs: a coluna de valores simulados refere-se a resultados obtidos na seção “3.5 - Resultados da Simulação do Caso Base”

3.4 Simulação

Um simulador de processo, para os engenheiros químicos, é um programa de computador que calcula balanços de massa e energia do processo produtivo. Esses simuladores, em comparação a cálculos manuais por calculadoras e planilhas eletrônicas, aumentam a qualidade e reduzem os custos de projeto de um processo. As documentações ficam mais compreensíveis, especialmente para problemas complexos e em larga escala. Permitem facilmente as análises de alternativas, além de uma poderosa padronização de estudo ao se calcular balanços mássicos e energéticos. Conseqüentemente, a interação entre o objeto de estudo e as pessoas passa a ser de forma dinâmica e padronizada.

As técnicas de simulação podem ser classificadas quanto à linguagem de computador como orientadas a equações ou orientada a correntes, e também quanto a processos como dinâmico ou estacionário. Na simulação dinâmica pode ser classificada como sistema contínuo ou discreto, e na simulação em regime estacionário como simultâneo ou seqüencial.

3.4.1 Simulador CadSim

O CadSim¹, orientado ao processo dinâmico, foi escolhido para analisar os balanços mássicos e energéticos. O software foi utilizado para simular a integração das duas linhas de produção de TMP com a máquina de papel imprensa da fábrica em análise.

Esse simulador possui uma eficiente interface gráfica que permite ao usuário construir um fluxograma de processo de forma rápida e dinâmica, possibilitando a criação de simulações de processos existentes ou em projeto. É uma ferramenta capaz de fazer balanços mássicos e energéticos em vários processos químicos em condições dinâmicas. Pode ser utilizado

¹ www.aurelsystems.com

para projetar, encontrar soluções para processo de desgargamento, analisar problemas de controle, aumentar eficiência de processo, e treinar operadores de uma unidade fabril.

O Cadsim proporciona uma interface de simulação em tempo real, onde o desenho original se torna uma ferramenta de simulação animada e interativa. O usuário pode alterar condições do processo durante a simulação, oferecendo um método eficaz de análise. Os resultados são atualizados automaticamente a cada iteração e podem ser posicionados em qualquer local do desenho.

É possível acessar as funções em tempo real de qualquer objeto de simulação para alterar, por exemplo, as propriedades de um controlador ou set-points. É possível incluir animações para demonstrar nível de tanque, condições de bombas ou a abertura e o fechamento de válvulas.

O simulador é de interesse especial a engenheiros de processos para analisar problemas operacionais, prever futuras condições de processo, e pesquisar soluções para controle dinâmico ou problemas de estabilidade em uma unidade industrial. Alguns exemplos de usos de simulação dinâmica em projetos e operação de processos incluem:

- Análise e otimização:
 - Processo para otimizar a qualidade e custo de operação.
 - Estudo de condições futuras de operação.
 - Gerenciamento de água através do controle de redução e uso.
 - Estudos de condições transientes
 - Estudos de condições operacionais por conceito: "What if"
 - Análise de requisitos para parada e partida da unidade industrial.
 - Gerenciamento de produção através de interações entre áreas
 - Estudos energéticos
 - Estudos para fechamento de circuitos

- Programação de seqüências de operações
- Treinamento de operadores
- Controle de processo e ajuste de propriedades.
- Desenvolvimento de estratégia para controle e construção de modelos.

3.4.2 Objetos para simulação do Caso Base

A interpretação do desenho no Cadsim é feita através de bibliotecas dinamicamente carregadas com blocos de simulação como equipamentos, controladores, lógicas, etc. O simulador possui uma biblioteca específica com módulos para simular processos da área de celulose e papel. Portanto, o software é adequado para o estudo de caso do presente trabalho, onde o foco é a polpação mecânica para fabricação de papel imprensa.

O Cadsim possui modo de desenho para construir o modelo do fluxograma de processo. É possível inserir de forma rápida um objeto de trabalho a partir das bibliotecas incluídas no Cadsim, ou fazer seu próprio desenho com características e formas desejadas. Formas mais familiares para visualização são importantes durante o processo de simulação. Os módulos mais importantes utilizados durante a simulação do presente trabalho foram:

- Refinador de Cavacos
- Depurador
- Tanques
- Filtros, Prensas e Lavadores
- Máquina de Papel (subdivididos em vários objetos)

As seguintes variáveis na entrada e na saída são atribuídas para cada corrente de polpa: vazões de água, fibras e sólidos dissolvidos, temperatura, consistência, concentração de sólidos dissolvidos, entalpia e fluxo total da

corrente. Para o componente vapor, as principais variáveis são: vazão, temperatura e pressão, fluxo volumétrico e entalpia do vapor.

3.4.2.1 Refinador de Cavacos

O módulo simula a refinação de cavacos para produzir pasta refinada, gerando vapor como subproduto. Quando frações de fibras estão presentes, a redução das grandes frações sujeita a um alto nível energético é descrita por relações exponenciais. Se mais energia é aplicada, a redução da fração de fibra tende a ser mais severa, e vice versa. A natureza dessa variação é específica para cada refinador e deve ser caracterizado em cada caso.

Correntes de entrada:

Cavacos ou polpa em alta consistência
Água de diluição

Correntes de saída:

Vapor
Polpa refinada

Parâmetros do módulo:

Energia elétrica consumida
Rendimento do refinador
Consistência de entrada e saída do refinador

Figura 3.4 - Refinação de cavacos do Cadsim

A técnica adotada pelo objeto é baseada em um caso onde descreve-se a redução de fibras em um refinador particular sob condições típicas. Em essência, o caso típico diz que se uma alimentação com fração de fibra é refinada nesse refinador operando sob uma energia típica de refino, a polpa refinada conterá uma determinada fração.

A diluição da polpa é feita após o refino. Qualquer fibra que entra na água de diluição não será refinada. As fibras que são perdidas durante o refino são adicionadas ao componente previamente definido como ORGANIC. Se tal definição não for encontrada pelo objeto simulado, ele procura um

componente definido como INORGANIC. Portanto, é de responsabilidade do usuário a definição correta dos componentes de simulação.

No estudo de caso foram utilizados cinco refinadores para simular as duas linhas de produção de TMP. No total há um refinador de cavacos na linha 1 e dois refinadores na linha 2, além de dois responsáveis pela refinação de rejeito de pastas de ambas as linhas.

3.4.2.2 Depuração e Lavagem

A depuração é uma etapa importante para alcançar uma boa qualidade de polpa e uma operação contínua da máquina de papel. Um único resíduo nocivo na polpa de aceite pode causar problemas na qualidade da operação e do produto.

A principal diferença entre depuração e lavagem está no objetivo de cada etapa. Enquanto a depuração rejeita fibras visando à homogeneidade nas propriedades dimensionais como espessura e comprimento, a lavagem proporciona uma adequação de densidade e área superficial das fibras. A configuração do sistema de depuração e lavagem depende da qualidade da polpa de aceita, da matéria prima utilizada, e do processo de polpação.

O módulo SCREEN realiza o balanço de aceites e rejeitos da polpa. O módulo WASHER simula a lavagem de polpa usando a relação entre o fator de diluição e a taxa de deslocamento da manta formada nos filtros lavadores. Essa relação pode ser alterada de acordo com cada lavador, sendo possível, portanto, modelar diferentes equipamentos.

Figura 3.5 - Depuração e Lavagem do Cadsim

3.4.2.3 Tanques

O objeto CHEST modela o comportamento de uma mistura perfeita. Cada componente (M) é acumulado em um tanque pela diferença entre a entrada e saída:

$$\frac{dm_{\text{tank}}}{dt} = M_{in} - M_{out}$$

As concentrações de saída e internas ao tanque são as mesmas, levando em consideração o conceito de mistura perfeita.

Figura 3.6 - Tanques do Cadsim

3.4.2.4 Filtros *Save-all*

O objetivo principal é recuperar as fibras e a água, que pode ser reutilizada como fonte de diluição e lavagem. O objeto pode ser utilizado para analisar dois ou três tipos de filtrados, operação muito comum durante a fabricação de polpa e papel. Como observado na figura 3.7, há geração de água turva, água clara e água super clara. É aconselhável o usuário ter certeza de que a consistência de entrada da polpa está sempre entre a consistência da manta produzida e a consistência do filtrado.

Correntes de entrada:

Água com baixa concentração de fibras
Água para chuveiros do filtro

Correntes de saída:

Água com maior concentração de fibras
Filtrado supeclaro (baixa concentração de fibras)
Filtrado claro (concentração de fibras maior que o superclaro)
Filtrado turvo (concentração de fibras maior que o claro)
Polpa com fibras recuperadas

Parâmetros do módulo:

Consistência da manta
Consistência dos dois filtrados
Porcentagem mássica do filtrado mais claro

Figura 3.7 - Filtros *Save-all* do Cadsim

3.4.2.5 Máquina de Papel

A máquina de papel foi construída a partir de vários objetos, não possuindo portanto um módulo específico para a máquina. No Cadsim, é possível construir uma estrutura adequada ao processo em estudo. O exemplo pode ser observado na montagem da simulação, que está representada pelas figuras 3.8 e 3.9.

A máquina consiste principalmente de mesa de formação de folhas, sistema de prensas e secagem. Sendo assim, seus blocos podem ser representados basicamente por objetos que simulem extração de água e fibras.

3.4.3 Estruturação do processo produtivo em CadSim

Nas figuras 3.8 e 3.9 estão apresentados os processos desenvolvidos no simulador CadSim. A figura 3.8 descreve a produção de pasta termomecânica, a preparação de massa e a figura 3.9 o circuito da máquina de papel, perfazendo dessa maneira, uma estrutura única desenvolvida no simulador.

As principais etapas do processo produtivo da unidade fabril em estudo foram inseridas na simulação do balanço de massa. A partir dos objetos do Cadsim descritos nessa seção, juntamente com os dados coletados, iniciou-se o processo de estruturação de correntes e equipamentos, como pode ser observado nas figuras 3.8 e 3.9.

Figura 3.8 - Simulação do processo de refinação de cavaco, lavagem, filtração e preparação de massa em Cadsim

Figura 3.9 - Simulação do processo de fabricação de papel em Cadsim

A estrutura foi dividida em três componentes: polpa, vapor, e produto químico para branqueamento. As variáveis mais importantes da corrente de polpa são vazões de sólidos dissolvidos, de fibras, de água e a temperatura, onde posteriormente são calculadas as consistências de cada corrente de polpa. O vapor é o componente gerado durante a etapa de refinação de cavacos, onde há um consumo de grande parte da energia elétrica utilizada na fábrica. Durante a simulação, é possível observar a vazão de vapor que é extraída como subproduto durante a refinação, assim como sua temperatura e pressão. E foi constatado que muitos valores estão bem próximos da realidade. O componente representado pelo produto químico possui importância menor para o resultado da simulação, pois sua vazão pode ser desconsiderada em relação às correntes de polpa e o processo produtivo não exige altos níveis de branqueamento.

As correntes de água fresca são representadas por correntes de polpa com concentração nula de fibras. A concentração de fibras em outras águas varia de acordo com o tipo de água gerado em determinados equipamentos do processo tais como, filtro prensa, filtro engrossador, máquina de papel, e peneiras inclinadas.

O cavaco proveniente do pátio de madeiras é considerado uma corrente de polpa com aproximadamente 50% fibras e 50% água, com uma concentração de sólidos dissolvidos nula. Após os refinadores, os sólidos passam a ser diferente de zero, pois dependendo do rendimento e da potência consumida no equipamento, sua concentração pode variar.

Os pontos de maior interesse estão nas etapas onde os diferentes tipos de água são gerados ou consumidos. Através de dados históricos de diferentes fábricas, sabe-se que o maior consumidor está no silo de água branca, onde a polpa misturada é diluída para atingir uma consistência adequada para a caixa de entrada. Ao mesmo tempo, sabe-se que o maior gerador de água está na seção de formação da máquina de papel. Através da tabela 3 de resultados da simulação, esse fato pode ser observado. Porém a ausência

de medidores de vazão na fábrica impede a comparação de valores com dados reais da unidade fabril em estudo.

A água fresca é utilizada principalmente nos chuveiros de lavagem de rolos e telas da máquina. Quando há um desbalanceamento entre a produção de pastas e a produção de papel, água fresca também pode ser utilizada para *make-up* das torres de água branca. Porém isso ocorre de forma esporádica.

Como os dados foram coletados de diferentes fontes e datas, resultados mais coerentes com a produção real são conseguidos através de análises minuciosas da simulação. Dificilmente o modelo no simulador é estruturado com a complexidade de uma indústria existente, mas é possível chegar a um resultado bastante expressivo através de análises das correntes e etapas mais importantes do processo.

A produção final do balanço simulado é coerente com a produção de três dias normais. Porém isso foi feito após várias análises do processo integrado, pois alguns dados foram fornecidos verbalmente através de operadores especialistas.

3.5 Resultados da Simulação do Caso Base

Na tabela 3 estão listados os principais resultados da simulação envolvendo a produção de pasta mecânica e papel imprensa. A associação das correntes com as figuras 3.8 e 3.9 pode ser feita através da primeira coluna da tabela 3. Os dados de entrada coletados foram introduzidos na simulação e o sistema foi ajustado para atingir valores coerentes com a realidade.

Tabela 3 - Resultados da simulação do processo produtivo para caso-base

Módulo	Corrente	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consistência
Nº	Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
2	Saída de cavaco do silo (linha 2)	260,0	0,00	260,00	50,000
3	Entrada de polpa no refinador primário (linha 2)	260,0	0,00	260,00	50,000
3	Água de diluição no refinador primário (linha 2)	356,2	4066 ppm	0,30	0,082
3	Saída de polpa do refinador primário (linha 2)	311,1	4,32	257,40	45,000
4	Entrada de polpa no refinador secundário (linha 2)	311,1	4,32	257,40	45,000
4	Água de diluição no refinador secundário (linha 2)	384,1	4066 ppm	0,32	0,082
4	Saída de polpa do refinador secundário (linha 2)	328,4	8,70	264,90	44,000
5	Água de diluição antes do tanque de latência	8279,3	4066 ppm	6,93	0,082
---	Água fresca para TMP	786,8	0,00	0,00	0,000
5	Saída de polpa do tanque de latência	9394,3	42,50	271,90	2,800
6	Entrada de polpa no refinador baixa consistência	4556,5	20,60	131,90	2,800
6	Saída da polpa do refinador baixa consistência	4556,5	22,20	130,30	2,770
7	Entrada de polpa no refinador baixa consistência	4838,1	21,90	140,00	2,800
7	Saída de polpa do refinador baixa consistência	4838,1	23,60	138,30	2,770
8	Saída de polpa do tanque de latência	9394,6	45,80	268,60	2,770
14	Entrada de polpa na depuração primária	9394,6	45,80	268,60	2,770
14	Aceite da depuração primária	5800,0	28,30	130,00	2,180
14	Rejeito da depuração primária	3594,6	17,50	138,60	3,700
14	Diluição de rejeito primária	39,8	4066 ppm	0,03	0,082
17	Entrada de polpa na depuração secundária	3511,1	17,10	133,90	3,660
17	Aceite da depuração secundária	2100,0	10,20	64,50	2,970
17	Rejeito da depuração secundária	1411,0	6,87	69,40	4,660

Módulo	Corrente	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consistência
Nº	Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
17	Diluição de rejeito da depuração secundária	54,7	4066 ppm	0,05	0,082
9	Entrada de polpa no refinador primário (linha 1)	62,0	0,00	62,00	50,000
9	Água de diluição no refinador primário (linha 1)	94,0	4747 ppm	0,28	0,300
9	Saída de polpa do refinador primário (linha 1)	114,3	1,19	61,50	34,800
10	Entrada de polpa no refinador secundário (linha 1)	244,5	1,77	114,90	31,800
10	Água de diluição no refinador secundário (linha 1)	61,5	4747 ppm	0,19	0,300
10	Saída de polpa do refinador secundário (linha 1)	275,4	3,45	113,80	29,000
11	Entrada de polpa no refinador de rejeitos	109,1	0,47	44,80	29,000
11	Água de diluição no refinador de rejeitos	47,2	4747 ppm	0,14	0,300
11	Saída de polpa do refinador de rejeitos	153,9	1,25	44,40	22,200
12	Água de diluição do tanque de latência	4946,3	4066 ppm	3,79	0,080
13	Entrada de polpa na depuração primária (linha 1)	5375,6	25,20	163,20	2,930
13	Aceite da depuração primária (linha 1)	4225,6	19,80	126,20	2,880
13	Rejeito da depuração primária (linha 1)	1150,0	5,39	37,00	3,100
19	Entrada de polpa na prensa 2	946,4	4,51	49,00	4,900
19	Saída da Polpa da Prensa 2	109,1	0,47	44,80	29,000
19	Filtrado da Prensa 2	847,3	4747 ppm	4,28	0,500
20	Entrada de polpa na prensa 1	1129,6	5,39	58,50	4,900
20	Saída da Polpa da Prensa 1	120,2	0,57	53,40	29,000
16	Aceite da peneira inclinada (após depuração)	605,7	4747 ppm	2,44	0,400
16	Rejeito da peneira inclinada (após depuração)	2000,6	9,54	103,60	4,900
29	Entrada na peneira inclinada (após prensa)	1856,7	8,86	9,37	0,500
29	Aceite da peneira inclinada (após prensa)	1781,2	4747 ppm	5,38	0,300

Módulo	Corrente	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consistência
Nº	Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
29	Rejeito da peneira inclinada (após prensa)	75,4	0,36	3,99	5,000
21	Entrada de polpa no filtro a disco	4225,6	19,80	126,20	2,900
21	Saída da polpa do filtro a disco	1795,0	8,41	125,40	6,500
21	Filtrado claro do filtro disco	2537,3	4662 ppm	0,76	0,030
21	Filtrado turvo do filtro disco	1087,2	4662 ppm	0,55	0,050
21	Água do chuveiro do filtro disco	1193,9	4662 ppm	0,51	0,040
22	Entrada de polpa no conjunto de filtro a tambor 1	5957,3	29,03	146,70	2,390
22	Saída da polpa do conjunto de filtro a tambor 1	2071,4	10,05	144,70	6,500
22	Filtrado do conjunto de filtro tambor 1	4097,7	4849 ppm	2,06	0,050
22	Água do chuveiro do conjunto de filtro tambor 1	211,8	4662 ppm	0,09	0,040
23	Entrada de polpa no conjunto de filtro tambor 2	1942,7	9,47	47,80	2,390
23	Saída da polpa do conjunto de filtro tambor 2	675,4	3,26	47,20	6,500
23	Filtrado do conjunto de filtro tambor 2	1446,4	4849 ppm	0,73	0,050
23	Água do chuveiro do conjunto de filtro tambor 2	179,1	4662 ppm	0,08	0,040
32	Entrada de polpa no filtro save all 2	13626,2	34,00	139,90	1,010
32	Saída da polpa do filtro save all 2	3500,5	8,73	131,10	3,600
32	Filtrado claro do filtro save all 2	7933,5	2487 ppm	3,98	0,050
32	Filtrado superclaro do filtro save all 2	1058,1	2487 ppm	0,27	0,025
32	Filtrado turvo do filtro save all 2	1582,7	2487 ppm	4,77	0,300
32	Água do chuveiro do filtro save all 2	449,0	2487 ppm	0,21	0,050
33	Entrada de polpa no filtro save all 1	16186,7	40,40	166,10	1,010
33	Saída da polpa do filtro save all 1	4053,7	10,10	151,80	3,600
33	Filtrado claro do filtro save all 1	9517,2	2487 ppm	4,78	0,050

Módulo	Corrente	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consistência
Nº	Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
33	Filtrado superclaro do filtro save all 1	1258,1	2487 ppm	0,27	0,025
33	Filtrado turvo do filtro save all 1	1894,9	2487 ppm	9,55	0,500
33	Água do chuveiro do filtro save all 1	548,4	2487 ppm	0,26	0,050
27	Saída de polpa do tanque 3 de TMP	4541,8	21,70	317,20	6,500
35	Saída de polpa do tanque 2 de TMP	3311,1	13,90	175,00	5,000
37	Saída de polpa do tanque 1 de TMP	3969,3	14,50	144,50	3,500
37	Água de diluição para tanque 1 de TMP	1254,9	2451 ppm	1,03	0,082
31	Água de diluição para tanque de massa branqueada	1483,3	2451 ppm	1,21	0,082
38	Saída de polpa do tanque de celulose	980,0	0,01	36,00	3,540
48	Saída de polpa do tanque de mistura	11002,0	31,70	430,00	3,720
43	Saída do tanque de massa recuperada	7554,3	18,80	282,80	3,600
44	Saída do tanque de água da tela	23452,5	54,20	70,50	0,300
50	Entrada no cleaner 4º estágio (4 cleaners)	1516,5	3,70	6,00	0,390
50	Aceite do cleaner 4º estágio	607,2	1,47	1,80	0,300
51	Entrada no cleaner 3º estágio (31 cleaners)	3371,2	8,17	12,00	0,350
51	Aceite do cleaner 3º estágio	1854,8	4,50	6,00	0,320
51	Rejeito do cleaner 3º estágio	1516,5	3,67	6,00	0,390
52	Entrada no cleaner 2º estágio (49 cleaners)	11024,2	26,70	73,00	0,660
52	Aceite do cleaner 2º estágio	8260,1	20,00	62,80	0,750
52	Rejeito do cleaner 2º estágio	2764,1	6,69	10,20	0,370
52	Entrada no cleaner 1º estágio (157 cleaners)	54924,9	133,10	561,80	1,000
52	Aceite do cleaner 1º estágio	43900,7	106,40	488,70	1,100
52	Rejeito do cleaner 1º estágio	11024,2	26,70	73,00	0,660

Módulo	Corrente	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consistência
Nº	Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
55	Água branca na seção de formação 1	41310,4	2273 ppm	160,20	0,386
55	Água branca na seção de formação 2	13012,8	2273 ppm	31,40	0,240
55	Polpa após seção de formação	2283,9	5,20	343,00	13,000
61	Saída do couch Pit	1765,4	4,20	20,40	1,140
56	Água branca na seção de prensa	1859,1	2273 ppm	8,58	0,460
56	Polpa após seção de prensa	424,8	0,90	334,40	44,000
57	Polpa após secador	31,3	0,97	334,40	91,200
62	Após o silo: mistura para 1% de consistência	54924,9	2417 ppm	561,80	1,000
64	Saída do Tanque de refugo	754,4	1,83	23,40	3,000
65	Entrada filtro de refugo	1862,1	4,44	23,40	1,240
65	Saída da polpa do filtro de refugo	754,4	1,83	23,40	3,000
65	Filtrado do filtro de refugo	1406,8	2380 ppm	0,14	0,010
65	Água do chuveiro do filtro de refugo	299,1	2487 ppm	0,14	0,050
54	Entrada na depuração, antes da caixa de entrada	54015,6	130,90	557,50	1,000
54	Aceite da depuração	53955,6	130,70	552,50	1,000
---	Água fresca para MP	3420,0	0,00	0,00	0,000

3.5.1 Comparação de dados simulados com dados reais

Como já foi explicado no subcapítulo referente à coleta de dados, um outro grande desafio na simulação de uma unidade fabril é a manipulação de resultados confiáveis, ou seja, a obtenção de valores próximos dos dados reais de processo. Sendo assim, uma comparação gráfica pode ser demonstrada para analisar os desvios dos dados coletados em relação aos simulados, o que pode ser feito a partir de gráficos demonstrados na figura 3.10.

Figura 3.10 - Comparação gráfica de dados coletados e simulados.

Sempre haverá desvios entre os dados dependendo da forma como os valores são coletados na unidade fabril. É recomendável definir períodos e coletar as informações de diferentes instrumentos na mesma base de tempo. Indústrias com padrões básicos de controle de processo possuem bancos de dados operacionais armazenados em computadores. Porém a unidade em estudo armazena apenas dados de correntes mais importantes para análise de problemas. Sendo assim, foram utilizadas diferentes fontes de coleta de dados para completar a simulação, o que gerou determinados desvios em algumas correntes simuladas.

Um outro modo de tratar com estes dados, após uma coleta estatisticamente significativa, e coerente com a possibilidade de se efetuar co-aptação das variáveis não medidas, seria o cálculo com reconciliação de dados. Esta abordagem está fora do escopo do presente trabalho, que busca obter um caso base de simulação para analisar as possibilidades da redução de uso de água através de Integração de Processos.

4 ANÁLISE DO CIRCUITO DE ÁGUA

4.1 Generalidades sobre o circuito de água

O setor de Papel e Celulose, independente do tipo de pasta produzida, é um consumidor intenso de água. Isso ocorre porque extrair fibras de uma estrutura vegetal exige processos de diluição e lavagem com constante controle de consistência. É necessário possuir na entrada da máquina de papel, por exemplo, uma vazão controlada de polpa com aproximadamente 99% constituída de água.

Ao mesmo tempo, etapas relevantes como filtração e extração se tornam fontes de águas que devem, ao máximo possível, ser aproveitadas no circuito para reduzir o impacto sobre o custo operacional e principalmente sobre o meio ambiente. O grande desafio está em analisar possibilidades de reutilizar essas águas residuais e, ao mesmo tempo, reduzir o consumo de água fresca. Conseqüentemente, a captação de água do rio pode ser diminuída e a eficiência no uso de recursos naturais aumentada.

Portanto, com a existência do circuito de águas, o objetivo do trabalho é analisar e manipular as diferentes correntes de água para reduzir o consumo de água fresca. Tal possibilidade será baseada nas concentrações limites de fibras e sólidos dissolvidos em cada etapa de consumo de água. Como a unidade fabril atualmente não demonstra confiança para utilizar toda a água residual da máquina devido a restrições de contaminantes, o presente estudo possibilitará uma análise mais profunda para tentar substituir parte do consumo de água fresca através das ferramentas de otimização.

4.1.1 Circuito de água na produção de TMP

Os principais pontos de consumo de água considerados durante a produção de TMP estão na diluição e lavagem de polpa e chuveiros dos filtros engrossadores. A reutilização da água proveniente da lavagem de cavacos

não será considerada no trabalho por ser uma água com alto teor de areia ou outros tipos de resíduos que compromete a qualidade da polpa ou o funcionamento de equipamentos. A água para lavagem de cavacos é composta em grande parte por água fresca, porém água residual da máquina de papel pode ser enviada para complementar a fonte.

Na etapa de fabricação de TMP altas vazões de água são geradas principalmente nos filtros de engrossamento e prensas de rejeitos, porém, o consumo de água para diluição e lavagem de polpa, diluição de rejeitos e chuveiros de filtros é maior que a vazão de água gerada no setor de produção de TMP. Sendo assim, água clara do setor de produção de papel é enviada para complementar a vazão de consumo. Mas não é recomendável a completa substituição da água fresca no circuito, o que pode ocasionar, por exemplo, o acúmulo de elementos inorgânicos não processuais, prejudicando dessa maneira, a qualidade da polpa e o funcionamento de alguns equipamentos.

4.1.2 Circuito de água na Produção de Papel

A máquina de papel é um dos principais objetos para análise de redução no consumo de água, pois a cada etapa do processo, ou seja, as seções de formação, prensagem e secagem, águas com qualidades diferentes são extraídas da polpa com o intuito de atingir gradativamente a conformidade do papel. As etapas de filtração para recuperar fibras e refugos são outras fontes geradoras de água de processo e são classificadas como clara, turva ou super clara. Por outro lado, água fresca é consumida principalmente no chuveiro das telas da máquina.

A água extraída da seção de formação, denominada água branca, possui a concentração de fibras mais alta entre as águas. Quanto aos sólidos dissolvidos, a concentração é maior nas águas geradas na etapa de produção de pasta mecânica.

Grande parte da água branca extraída na seção de formação é enviada para a bomba de mistura localizada no tanque de água branca, responsável pela diluição da massa para aproximadamente 1% de consistência. O objetivo é diluir e adequar a polpa para a caixa de entrada da máquina de papel. A água branca restante da seção de formação é direcionada para o tanque de água da tela. Desse tanque, grande parte da água é enviada para o sistema de recuperação de fibras, onde paralelamente são geradas as águas citadas anteriormente. O excedente é enviado para a torre de água branca, com capacidade para 1200m³.

A água turva retorna para o filtro de recuperação de fibras. Porém a maior parte das águas claras e superclaras procedentes da recuperação é enviada para uma outra torre de mesma capacidade, denominada torre de água clara. Dessa torre, a água é distribuída para diferentes pontos da fábrica, inclusive para o setor de fabricação de TMP. O transbordo dessa torre de água clara pode ser reduzido durante a análise do circuito de água da unidade fabril, pois o fluxo transbordado é totalmente direcionado para o tratamento de efluentes. Não há medição na fábrica que indique exatamente o fluxo perdido, porém através do balanço no CadSim, foi possível estimar uma perda de aproximadamente 1400 L/min.

É bom enfatizar que não é recomendável reutilizar a água extraída da seção de prensas por estar contaminada com resíduos de feltros, que são telas que facilitam a remoção de água extraída durante a prensagem da folha. Outro efluente atualmente gerado que também não será reutilizado é o rejeito proveniente do circuito de baixa consistência, responsável por retirar os últimos resíduos prejudiciais da polpa para produção de papel.

4.2 Integração de Processos

Integração de Processos é uma ferramenta de gerenciamento utilizada para otimizar recursos mássicos e energéticos em unidades industriais através de tecnologias convencionais. Com a integração de processos (PI), é possível desenvolver sistemas eficientes de massa e energia em grandes complexos industriais. A PI é baseada na aplicação de metodologias que facilitam a seleção e modificação de processos.

O lado crítico da integração de processos é o fato dela ser baseada em técnicas de análises sistemáticas e rigorosas, e não somente nas boas idéias e experiências. Mas ela oferece ao engenheiro uma técnica estruturada para identificar ineficiências no processo, onde é possível selecionar as melhores oportunidades para futuras otimizações.

Porém há algumas barreiras que podem ser citadas quanto ao uso do PI, como:

- Preocupações com equipamento de informática adicional, causando problemas de alto custo.
- Falta de entendimento das técnicas em muitas indústrias, o que gera repulsão do engenheiro de fábrica ao uso de ferramentas científicas.
- O impacto da mudança na confiabilidade, flexibilidade e manutenção de processos industriais.
- O risco de distúrbios no processo produtivo.
- Longo período de retorno financeiro em alguns casos.

Portanto, uma análise minuciosa sempre deve ser feita antes de iniciar um projeto através de PI, lembrando que, apesar de barreiras, há vantagens que possam justificar os investimentos.

- A integração de processos pode ser usada para projetos de novas unidades fabris ou modificações de instalações já existentes, e pode

ser aplicada para vários tipos de problemas industriais. A seguir, são citados alguns exemplos de aplicação:

- Diminuir consumo de energia e emissão de gases;
- Recuperar energia de um dado processo, entre processos, e em toda a unidade industrial;
- Otimizar a configuração de utilidades, incluindo co-geração, minimização do dimensionamento de caldeiras e geração de vapor de processo;
- Eliminação de gargalos do processo ou equipamentos (coluna de destilação, por exemplo), assim como do sistema de utilidades;
- Minimização do consumo de água e da geração de efluente;
- Identificação de estratégias de investimentos a médio e longo prazo.

Os métodos mais comuns para o estudo através de Integração de Processos são:

- Análise Pinch: é utilizada para otimizar sistemas através de métodos gráficos. Esta técnica conduz a uma análise sistemática do sistema, enquanto leva em consideração não somente a quantidade, mas também a qualidade da energia e da massa.
- Análise Exergética e outras técnicas termodinâmicas são capazes de comparar em uma base comum, a eficiência de vários processos incluindo a transferência de calor, reações químicas, operações de separações (membranas, coluna de destilação, etc), ou outros processos mecânicos como compressão e expansão. A análise exergética facilita a avaliação de perdas (ou irreversibilidades) na maioria dos sistemas, e a escolha de soluções para reduzir essas ineficiências.
- Técnicas de programação matemática são usadas para modelar e otimizar um processo ou parte dele, incluindo métodos de otimização determinísticos (programação linear e não linear, com ou sem variáveis inteiras) e algoritmos genéticos.

A tecnologia por Integração de Processo pode ser estruturada da seguinte forma:

Figura 4.1 - Estrutura da Integração de Processos

As técnicas utilizadas no presente trabalho são relativas ao método “Water Pinch” e na programação matemática.

4.3 Análise por método Pinch

Grandes progressos têm marcado os estudos sobre configurações de circuitos de água para minimizar o consumo de água fresca e geração de efluentes ao mesmo tempo em que restrições de processo como concentrações críticas de contaminantes são respeitadas. A ferramenta “Water Pinch”, foi desenvolvida a partir do método “Thermal Pinch”, uma ferramenta que se mostrou eficaz para análises e otimização de sistemas complexos de troca térmica. Sendo assim, a mesma metodologia foi desenvolvida para sistemas de troca de massa, dando-se origem aos estudos através do método Pinch para sistemas com troca de massa.

4.3.1 Conceito de Water Pinch

Segundo Mann, Liu (1999), a tecnologia “Water Pinch”, também chamada de ponto de mínimo consumo de água, fornece respostas para inúmeras questões sobre o gerenciamento de água quando há necessidade do

desenvolvimento de novas unidades industriais ou reformas de fábricas existentes. Para sistemas de água e efluentes, é possível responder questões como:

- Como seria uma nova estrutura para distribuição de água ou como a estrutura existente deve ser alterada?
- Qual é o potencial para máximo reuso e mínima geração de efluentes em processo produtivo?
- Qual é a mínima vazão de tratamento em um sistema de tratamento de efluentes de um processo produtivo?
- Como desenvolver um novo sistema de tratamento de efluentes ou como modificar o sistema existente para atingir a mínima vazão?
- Como um processo produtivo deve ser modificado para maximizar o reuso de água e minimizar a geração de efluentes?

É importante observar que, isoladamente, a avaliação do ponto de mínimo consumo de água não é suficiente para responder à última pergunta, pois não considera a eficiência de utilização de água no processo.

Para responder essas questões, Mann, Liu(1999) dividem a tecnologia “water pinch” em três partes: análise, síntese, e alteração.

Análise: Identificando, a priori, o consumo mínimo de água fresca e geração de efluentes em operações que utilizam água (*water-pinch analysis*).

Síntese: Desenvolvendo uma estrutura de distribuição de água e coleta de efluentes que atenda os fluxos mínimos previamente identificados, por meio da prática de reuso e regeneração. (*water-pinch synthesis*).

Alteração: Modificando de modo efetivo uma estrutura de distribuição de água e coleta de efluentes existente para maximizar o reuso e minimizar a geração de efluentes através da real modificação do processo (*water-pinch retrofit*).

Caso haja algum tipo de desperdício em qualquer operação, o ponto de mínimo consumo será obtido incorporando-se este desperdício. Por essa razão, durante a etapa de avaliação, é necessário identificar e eliminar os desperdícios de água para que os resultados sejam os melhores possíveis.

4.3.2 Aplicação do Método Pinch

A hipótese para a determinação do “water pinch” é que a água é utilizada para assimilar contaminantes. Fazendo uma analogia entre sistemas com a troca de calor (Thermal Pinch), pode-se dizer que correntes com tendência de “doar” contaminantes equivalem a correntes com maior temperatura do método Thermal Pinch. Similarmente, correntes com tendência de “receber” contaminantes, equivalem a correntes com menor temperatura.

O método pode ser aplicado sem ou com reuso de água, porém como o enfoque é a minimização de água e efluentes em um sistema, o maior interesse está na aplicação do método com reuso. Para descrever os casos com reuso, duas técnicas Pinch serão descritas: a tradicional, introduzida por Wang, Smith (1994) para analisar a carga de contaminantes de maneira facilitada, e outra apresentada por Dhole *et al* (1996) para os sistemas onde há maior importância no fluxo de água e onde a troca de massa ocorre entre correntes miscíveis. É importante mencionar que a segunda técnica possui maior aplicabilidade para o setor de Celulose e Papel e será implementada nesse trabalho.

4.3.2.1 Water Pinch com reuso de água e foco na carga de contaminantes

Para este caso, é possível utilizar o efluente gerado em um determinado processo diretamente em outro, desde que a concentração do contaminante no efluente seja inferior à concentração limite na entrada de outro processo. Ao mesmo tempo em que esse procedimento se realiza, ocorre a redução da

demanda de água e da geração de efluentes, ressaltando-se que a carga de contaminante não é alterada.

O método Pinch para esse caso consiste na técnica gráfica apresentada por Wang; Smith (1994), que relaciona a variação de concentração do contaminante na água utilizada nos processos com a carga transferida para a água. Através do método, gera-se uma curva composta de concentração onde o objetivo é encontrar um ponto de mínimo consumo de água em um determinado sistema com trocas de massa.

Em sua publicação sobre o reuso de água, Mierzwa; Hespanhol (2005) mencionam a determinação da curva em quatro etapas. Na primeira, constrói-se um gráfico que considere todos os processos onde a água é utilizada, relacionando a concentração de contaminante em função da carga acumulada. Nesse gráfico a variação da concentração é absoluta, enquanto a carga de contaminante é relativa, o que significa que um processo é iniciado no ponto em que o anterior foi encerrado.

Na segunda etapa, divide-se o eixo das ordenadas do gráfico em intervalos, nos quais estão representados os valores de concentração do contaminante na entrada e saída de cada processo. Na terceira etapa, determina-se a carga de contaminante para cada intervalo de concentração definido e constrói-se uma nova curva de variação da carga de contaminante. Na quarta e última etapa, as curvas compostas de concentração podem ser construídas, eliminando-se as curvas originais de variação da concentração do contaminante com a carga e mantendo apenas os intervalos nos quais as curvas não se sobrepõem.

Exemplo 1: Método gráfico de curva composta de concentração

A partir de um simples exemplo, também publicado no livro de Mierzwa; Hespanhol (2005), serão ilustradas as quatro etapas citadas anteriormente para a construção da curva composta de concentração.

Tabela 4 - Demanda de água para os processos desenvolvidos no exemplo.

Processo	$D_{mi, total}$ (kg/h)	Condições limites para água		f_{H_2O} (t/h)	Carga Acumulada (kg/h)
		$C_{i, entra}$ (mg/L)	$C_{i, sai}$ (mg/L)		
1	2,50	0	75	33,33	2,50
2	1,50	50	100	30,00	4,00
3	1,25	80	150	17,86	5,25

As duas primeiras etapas referem-se aos intervalos de concentrações de contaminantes e carga acumulada para a construção do gráfico. Uma análise inicial pode ser observada no gráfico a seguir:

Figura 4.2 - (a) Variação da concentração do contaminante e, (b) curva composta de concentração. Fonte: Wang; Smith (1994).

A terceira etapa refere-se à determinação da carga de contaminante para cada intervalo de concentração. Como podem ser observadas, as colunas de fluxo e da carga de contaminante da tabela 5 estão indicadas na abcissa da figura 4.2(b).

Tabela 5 - Carga de contaminante para todos os intervalos de concentração.

Intervalo de concentração	Processo	Fluxo (t/h)	Carga de contaminante (kg/h)	Carga Acumulada (kg/h)
0-50	1	33,33	1,67	1,67
50-75	1 e 2	63,33	1,58	3,25
75-80	2	30	0,15	3,40
80-100	2 e 3	47,86	0,96	4,36
100-150	3	17,86	0,89	5,25

Finalmente, a quarta etapa refere-se à construção do gráfico da curva composta de concentração, como pode ser visto na figura 4.3. Após a construção da curva, é possível determinar o ponto de mínimo consumo de água (water pinch) construindo uma curva que representa a variação da concentração do contaminante na água utilizada no sistema versus carga de contaminante acumulada. A curva relacionada à água de alimentação passa pela origem, ou seja, a concentração inicial do contaminante é zero e vai aumentando à medida que a água vai incorporando o contaminante. Quanto menor a vazão de água limpa utilizada no sistema, para a mesma carga de sais transferida, maior será a inclinação da curva de alimentação. Desta forma, quanto mais próxima da curva composta de concentração estiver a curva de água de alimentação, menor será a necessidade de água limpa, ressaltando-se que a curva de água de alimentação deve permanecer abaixo ou no mesmo nível da curva composta de concentração, para que o contaminante possa ser transferido.

Com base nesses conceitos, e observando a figura 4.3, quando a curva de alimentação de água sofre uma rotação em relação à origem, aproximando-se da curva composta de concentração, o ponto de mínimo consumo de água será aquele em que a curva de alimentação tangencia a curva composta de concentração.

Figura 4.3 - Obtenção do ponto de mínimo consumo de água. Fonte: Wang; Smith (1994).

Esta condição indica que não é necessário adicionar água fresca ao sistema acima do ponto de mínimo consumo de água. A leitura dos valores relacionados à carga de contaminante e à respectiva concentração proporciona a mínima vazão de água a ser alimentada. Pelo gráfico, a carga de contaminantes acumulada até o ponto de mínimo consumo de água é 4,36 kg/h e a concentração do contaminante na água é de 100 mg/L. Portanto, considerando a massa específica da corrente 1000 mg/L, o fluxo mínimo de água será:

$$f_{\min} = \frac{\Delta_{mi,\min}}{C_{i,\min}} \cdot 10^3 = 43,6 \text{ t/h} \quad (4.1)$$

Conforme a tabela 4, antes do reuso, se o consumo total de água fresca nos três processos era de 81,16 t/h, conclui-se que houve uma redução de aproximadamente 46% no consumo de água fresca.

O método citado acima pode ser aplicado em casos onde as correntes doadoras e receptoras de contaminantes não se misturam, como por exemplo, em circuitos de lavagem de correntes em indústrias petroquímicas,

onde uma fase orgânica e outra aquosa são de grande interesse. Mas em operações onde ocorre mistura, as correntes vão constantemente perdendo suas identidades à medida que são misturados em etapas do processo. E para a indústria de celulose e papel, onde há grandes circuitos miscíveis de água-água, esse método pode se tornar um obstáculo. Para superar essa dificuldade, foi apresentado um método onde a maior importância está na análise de vazões de água e não na carga de contaminantes. Esse método, onde são definidas as fontes e as demandas de água de processo, está descrita na próxima seção.

4.3.2.2 Water Pinch com reuso de água e foco na vazão de água

Essa seção apresenta um método gráfico introduzido por Dhole *et al* (1996) para lidar com condições onde há uma importância maior na vazão de água e onde uma determinada corrente terá diferentes concentrações de contaminantes na entrada e na saída de um processo. Essa ferramenta gráfica, segundo Jacob *et al* (2002), tem sido aplicada com sucesso na área de Celulose e Papel, onde sistemas miscíveis de água-água são bastante comuns.

A partir do gráfico em questão, é possível gerar uma curva composta dupla, formada por fontes e demandas de água em determinados processos. A curva pode ser utilizada para encontrar o consumo desejado de água fresca com vazões fixas e para analisar os potenciais de sistemas existentes que utilizam água com vazões fixas. A saída de cada operação que utiliza água pode ser considerada uma *fonte* de água. Analogamente, a entrada de cada operação que utiliza água é considerada uma *demand*a que possui um limite de concentração e deve ser satisfeita com uma determinada fonte. Esse é o princípio básico de funcionamento do método.

As vazões das fontes e demandas são indicadas na abscissa, enquanto as respectivas purezas ficam indicadas na ordenada em ordem decrescente.

Exemplo 2: Método gráfico de fonte e demanda de água (curva composta dupla)

Tabela 6 - Dados limites para o exemplo. *Fonte: Mann; Liu (1999).*

Processo	Carga de contaminante (kg/h)	$C_{i, \text{entra}}$ (ppm)	$C_{i, \text{sai}}$ (ppm)	Fluxo (t/h)
1	1,0	0	50	20
2	0,8	20	100	10
3	1,5	0	75	20
4	3,0	40	100	5

A tabela 6 apresenta dados de concentrações limites de entrada e saída de um circuito de água assim como as vazões fixas de quatro processos operacionais. As concentrações são especificações do processo e podem ser modificadas para proporcionar um consumo de água fresca e geração de efluentes menores. No esquema da figura 4.4, o sistema opera com água fresca nos quatro processos. O Water Pinch será implementado nesse exemplo para demonstrar o método e sua capacidade em otimizar sistemas através de manipulação de vazão e concentração das correntes. Quando o sistema opera em circuito aberto como o exemplo citado nessa seção, a ferramenta pode trazer resultados satisfatórios.

Figura 4.4 - Representação esquemática do exemplo 2. *Fonte: Mann; Liu (1999).*

Na figura 4.5, os dados de vazão das fontes e demandas foram colocados na abcissa enquanto as concentrações das respectivas correntes foram inseridas na ordenada. Observa-se que no topo da ordenada está representada a água fresca, sendo que a concentração de contaminantes diminui à medida que se aproxima da origem do eixo. A linha sólida da figura

4.5 representa as fontes de água. Por exemplo, o trecho 1 da linha sólida corresponde à fonte de água do processo 1, ou seja, 20 t/h de água disponível a 50 ppm. É importante ressaltar que o valor da vazão é representado pela distância do trecho, ou seja, para o trecho 1 tem-se (65 – 45) t/h, o que equivale a 20 t/h.

Figura 4.5 - Representação gráfica do exemplo 2 (passo 1). Fonte: Mann; Liu (1999).

À direita da curva, traçam-se as curvas referentes às demandas. Nesse caso são inseridas as vazões e concentrações das demandas que são requeridas. O trecho 1 da linha tracejada da figura 4.5 representa uma demanda pelo processo 1 de 20 t/h, que deve ser alimentado por água fresca por limitar a concentração em 0 ppm.

Para identificar oportunidades de reuso de água e minimizar a geração de efluentes através da curva composta dupla, move-se a linha de demanda para a esquerda, como representado na figura 4.5, até encontrar a linha de fontes na região denominada “water pinch”. Para esse exemplo, a região é chamada de “freshwater pinch” por não possuir fontes que satisfaçam as entradas das demandas, que pode ser observada na figura 4.6.

Figura 4.6 - Representação gráfica do exemplo 2 (passo 2). *Fonte: Mann; Liu (1999).*

Deve-se ter cuidado para reconhecer as diferenças entre o water pinch da curva composta de concentração e o water pinch da curva composta dupla. Nessa última, o water pinch não é definido pela concentração de contaminantes e sim por uma linha vertical que indica na abcissa o valor da vazão requerida.

Em circuitos onde grande parte dos processos utiliza água fresca, há uma grande possibilidade do Water Pinch se tornar uma ferramenta eficiente. Na figura 4.7, estão sendo mostradas as linhas de demanda e fontes nas condições limites de cada processo, como indica a tabela 6. Para esse exemplo, uma boa parte das correntes de fontes pode ser reutilizada. Isso será observado através da exibição no gráfico de cada demanda com sua concentração máxima de entrada e de cada fonte com sua concentração máxima de saída.

Figura 4.7 - Representação gráfica do exemplo 2 (passo 3). Fonte: Mann; Liu (1999).

Para esse exemplo, foi escolhido aumentar a concentração de entrada do processo 3 acima da concentração de saída do processo 1 para que a água seja reutilizada. Mas para isso, é preciso modificar o processo para que os valores limites da tabela 6 não sejam violados. Nesse caso, modifica-se o processo 3 para permitir o reuso da água que sai do processo 1 para o processo 3. Tabela 7 de novos limites pode ser construída.

Tabela 7 - Novos dados limites para o exemplo, modificando o processo 3

Processo	Carga de contaminante (kg/h)	$C_{i, \text{entra}}$ (ppm)	$C_{i, \text{sai}}$ (ppm)	Fluxo (t/h)
1	1,0	0	50	20
2	0,8	20	100	10
3	1,5	50	125	20
4	3,0	40	100	5

A curva para a nova condição é mostrada na figura 4.8. Observa-se que agora o consumo de água fresca passou de 55 t/h para 35 t/h. Na figura, foi introduzido um “reuse pinch”, que significa um ponto onde o reuso de água termina e a geração de efluentes se inicia. Em outras palavras, a esquerda da “reuse pinch”, todas as fontes vão para o tratamento de efluentes.

Figura 4.8 - Curva composta dupla após alteração no processo 3. *Fonte: Mann; Liu (1999).*

Figura 4.9 - Representação esquemática do exemplo 2 após a alteração no processo 3. *Fonte: Mann; Liu (1999).*

Exemplo 3: Método gráfico de curva composta dupla para desagregação e lavagem de polpa celulósica

Para exemplificar um sistema relacionado com o setor de celulose e papel, o caso a seguir demonstra a aplicação da curva composta dupla em processamento de polpa. Paralelamente, um artifício de mistura de correntes de fontes será mencionado para possibilitar a manipulação de valores de concentrações. O objetivo é adequar as concentrações de contaminantes das fontes aos limites de entradas de cada demanda.

Figura 4.10 - Representação esquemática do exemplo 3. *Fonte: Jacob et al. (2002)*

A curva de fontes e demandas para esse exemplo está descrita na figura 4.11. O mesmo procedimento do exemplo 2 foi adotado para esse caso. É importante notar que as linhas de fontes e de demandas foram iniciadas na vazão zero. Mas para encontrar o resultado, o importante é fazer com que as duas linhas não se cruzem, ou seja, deslocar a linha tracejada, de demanda, para a direita e encontrar a região de “pinch”, como pode ser observado na figura 4.12.

Figura 4.11 - Construção da curva composta dupla para o exemplo 3. *Fonte: Jacob et al. (2002)*

Figura 4.12 – Ponto Pinch da curva composta dupla para o exemplo 3. *Fonte: Jacob et al. (2002)*

Observa-se que três regiões aparecem na figura 4.12, podendo dessa maneira, fornecer as seguintes informações:

- O consumo mínimo requerido de água fresca pelo processo. A água fresca é utilizada acima do ponto de pinch para satisfazer as demandas que exigem alto grau de pureza, ou seja, D3 e parte de D2.
- A vazão mínima de efluente gerada pelo processo. O efluente aparece abaixo do ponto de pinch e origina da fonte de menor pureza (F1);
- As demandas que podem ser satisfeitas pelas fontes disponíveis, ou seja, D1 satisfeita por parte de F1 e D2 satisfeita em parte por F2 e F3;

Esse sistema pode ser melhorado para reduzir o consumo de água fresca e geração de efluentes se o “water pinch” for alterado. Isso pode ser feito ou aumentando a pureza de parte de F1 ou diminuindo as restrições de pureza de D2. Com isso, é possível deslocar a linha de demanda para a esquerda até encontrar um novo ponto de pinch. A primeira opção pode ser satisfeita,

como mencionado anteriormente, através de uma técnica de mistura entre corrente de fontes ou através da extração de contaminantes de F1. A segunda opção requer mudanças nas condições do processo 2, ou seja, na etapa de lavagem do exemplo em questão.

A segunda opção geralmente requer maiores investimentos por provocar alterações no equipamento e possuir maiores riscos, o que tornaria a sua prática menos atrativa. Portanto, a primeira opção tende a ser mais consistente.

Na figura 4.13, a quantidade mínima requerida de F1 ($F1'$) foi misturada com uma fonte com pureza mais próxima da sua, ou seja, com F3. Com isso cria-se a fonte ($F1' + F3$) para atingir a pureza de D2 e assim, deslocar a linha de demanda para a esquerda e encontrar um novo “pinch point”. O restante do circuito se manteve intacto.

Figura 4.13 – Mistura de fontes para atingir limites do exemplo 3. *Fonte: Jacob et al. (2002)*

Figura 4.14 – Extração de contaminantes para atingir limites. *Fonte: Jacob et al. (2002)*

Apesar de o exemplo enfatizar a técnica de mistura, a figura 4.14 demonstra uma outra técnica, a de extração. A mesma quantidade de F1 (F1') foi tratada em uma etapa de extração para atingir a pureza da demanda D2. Os resultados são bastante semelhantes.

Observando as figuras 4.13 e 4.14, é possível dizer que a análise pode informar locais ótimos para uma etapa de extração, a vazão mínima a ser tratada, e a quantidade mínima de contaminantes a ser extraída.

O ponto Pinch e a curva composta ajudam a identificar pontos que possam ser aperfeiçoados em projetos de unidades fabris existentes. É importante que as fontes abasteçam as demandas do mesmo lado do ponto pinch, ou seja, utilizar a vazão de água de uma fonte acima do ponto pinch em uma demanda abaixo do mesmo ponto, aumentará o consumo além do pretendido. Além disso, utilizar água fresca para satisfazer demandas abaixo do ponto pinch, ou enviar água de fontes acima do ponto para o tratamento de efluentes terá o mesmo efeito.

Além do método utilizado na figura 4.13, outras saídas para melhorar a configuração do sistema podem ser desenvolvidas. É possível, por exemplo, aumentar a pureza da fonte F2 ou diminuir as restrições de entrada em D3. O processo iterativo pode ser repetido para cada ponto de pinch até a geração de efluente e a água fresca requerida, se reduzirem a zero. No exemplo 3, o efluente poderia ser eliminado primeiro e a água fresca requerida seria reduzida para seu valor mínimo. Mas cada saída dependerá do custo de investimento e facilidades para alterar o sistema e atingir os valores desejados.

O método da curva composta segundo Jacob *et al.* (2002), pode ser aplicado de duas maneiras diferentes dependendo da configuração do processo inicial:

- Se a configuração inicial do processo for completamente aberta, onde nenhuma corrente de saída das fontes é reutilizada e todas as demandas são atendidas por água fresca, como mostrada na figura 4.4 do exemplo 2, a configuração ótima pode ser encontrada. Porém como o fluxograma do sistema otimizado seria muito diferente do original, altos investimentos seriam necessários.
- Se a configuração da fábrica de celulose e papel já possuir níveis de fechamento razoáveis, com algumas fontes já reaproveitadas internamente e algumas demandas sendo satisfeitas por água fresca. Nesse caso, a configuração otimizada pode não ser atingida.

Porém a possibilidade de reabrir um circuito fechado e estudar novas alternativas que otimizem a configuração do sistema também pode ser viável. Mas também depende, como mencionado, do custo de investimento e tempo para modificações.

4.4 Análise com programação matemática

4.4.1 Conceito

Essa seção enfatiza o conceito de otimização matemática, considerada um método efetivo para análise, síntese, e alteração em sistemas industriais que

visam o reuso de água e a minimização de efluentes. Para utilizar o método, duas ferramentas podem ser inseridas no conceito de otimização: a programação matemática linear (LP) ou não linear (NLP).

A LP pode ser utilizada para determinar a mínima vazão de água fresca em uma operação que envolva um contaminante. Quando há necessidade de uma ferramenta para resolver problemas mais complexos, a NLP é a mais indicada.

Técnicas de Otimização matemática são efetivas para minimizar uma função objetivo sujeita a restrições entre variáveis independentes. Programação Linear é uma ferramenta eficiente capaz de encontrar valores mínimos de uma função objetivo linear sujeita a restrições lineares, enquanto que a Programação Não Linear é utilizada para minimizar funções não lineares sujeita a restrições não lineares.

Segundo Jacob *et al.* (2002), a programação matemática linear é uma ferramenta eficiente para analisar, simultaneamente, a redução de água industrial ao mesmo tempo em que fibras contidas em águas residuais podem ser recuperadas.

4.4.2 Programação Linear

Em sua forma básica, um problema de LP consiste de três grupos de equações: função objetivo, restrições implícitas e restrições explícitas. A função objetivo, $y(x)$, é a propriedade funcional a ser maximizada ou minimizada. Como exemplo, é possível aplicar em equações simples e representar graficamente os valores mínimos de uma função objetivo:

Minimizar: $y(x) = 2x_1 + x_2$ (4.2)

sujeitos a

$$A: x_1 + x_2 \geq 1$$

$$B: -x_1 + x_2 \leq 1$$

$$C: x_2 \leq 1$$

$$D: x_1 \geq 0$$

$$E: x_2 \geq 0$$

Para esse caso, pede-se para encontrar valores de x_1 e x_2 que minimizem a função objetivo $y(x)$.

Figura 4.15 - Representação gráfica para programação linear. Fonte: Man; Liu (1999)

A partir da região hachurada, limitada pelas restrições implícitas e explícitas, é possível observar que os valores de x que minimizam a função y está no ponto $(0,0)$.

Tanto a técnica de programação não linear quanto linear é habilitada para lidar com problemas de reuso de água e tratamento de efluentes. Há sistemas com múltiplos contaminantes e com operações que utilizam água que podem não se adequar ao conceito Pinch, mas podem ser complementadas com a programação matemática.

Essa dissertação descreve uma comparação entre a técnica Pinch e a programação matemática, a fim de abordar um estudo eficiente para o presente estudo de caso, ou seja, a avaliação do circuito de água em uma fabricação de TMP e papel imprensa.

Para o presente trabalho, além da análise para redução de água fresca no processo, a programação matemática também permite realizar análises de perda de fibras, o que reduziria a quantidade de fibras previamente tratadas para o efluente.

4.4.3 Aplicação do método de programação linear

A Programação Linear é uma ferramenta capaz de superar as desvantagens do método gráfico na aplicação em uma máquina de papel. A técnica pode ser usada para otimizar um circuito de água através da análise por multicomponentes, ao contrário do método Pinch, onde somente um componente era restringido.

O objetivo da tecnologia é encontrar uma configuração ótima de um circuito de água, minimizando o consumo de água fresca, maximizando o reciclo de fibras e satisfazendo a máxima quantidade demandada de água pelo processo através das fontes de água disponíveis. Para formular um problema, Jacob *et al.* (2002) mencionam que as seguintes informações devem ser fornecidas:

Para cada fonte de água devem ser informadas: a vazão s_i , a concentração de contaminantes c_i , e a concentração de sólidos finos f_i , onde $i=1$ até m é o número de fontes de água existentes no processo. No caso dos sólidos finos, uma função objetivo pode ser desenvolvida para analisar a perda de fibras durante o processo produtivo.

Para cada demanda: a vazão D_i , a máxima concentração de contaminantes admissível C_i , e a máxima concentração de sólidos finos admissível F_i , onde $i=1$ até n é o número de demandas.

As máximas concentrações C_i e F_i representam os limites reais de sólidos dissolvidos e fibras em determinadas etapas de processo. Por exemplo: A máxima quantidade de fibras na água para que não ocorra o entupimento dos bocais, e a máxima quantidade de sólidos finos na caixa de entrada para que não ocorram deficiências na qualidade do papel.

Um valor para C_i e F_i deve ser especificado para fins computacionais, mesmo se nenhuma corrente é requerida para a operação do processo. Esse valor é importante para não criar restrições artificiais.

O resultado da otimização será uma lista de variáveis definindo a configuração do circuito de água. Essas variáveis, superiores ou iguais a zero, correspondem aos valores de vazão da fonte i que satisfaz a demanda j . Há $n(m+1)$ variáveis que são simbolizados por p_{ij} ($i=0,m$; $j=1,n$, onde $i=0$ corresponde à água fresca). As restrições podem ser formuladas da seguinte maneira:

- A vazão total de demandas alimentada por uma fonte i não deve superar a vazão disponível dessa fonte:

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} \leq F_i \quad (4.3)$$

- Cada demanda j deve ser totalmente satisfeita:

$$\sum_{i=0}^m p_{ij} = D_j \quad (4.4)$$

- A quantidade de contaminante fornecida a uma demanda j não deve ser superior ao valor máximo admissível definido para essa demanda:

$$\sum_{i=1}^m c_i p_{ij} \leq D_j C_j \quad (4.5)$$

- A quantidade de fibras celulósicas fornecida a uma demanda j não deve ser superior ao valor máximo admissível definido para essa demanda:

$$\sum_{i=1}^m f_i p_{ij} \leq D_j F_j \quad (4.6)$$

A função objetivo $f(x)$ é a quantidade que deve ser minimizada sob restrições definidas por equações lineares nas equações (4.3) a (4.6). Como o objetivo da análise é minimizar o consumo de água fresca, tem-se a seguinte função objetivo:

$$f(x) = \sum_{j=1}^n p_{0j} (\text{Consumo de água fresca}) \quad (4.7)$$

Para um estudo mais abrangente, uma função objetivo para o minimizar as perdas de fibras pode ser implementada:

$$f(x) = -\sum_{i=1}^m (\alpha_i f_i \sum_{j=1}^n p_{ij}) \quad (\text{Rejeição de finos}) \quad (4.8)$$

Uma técnica para resolver o problema é encontrar o mínimo da função objetivo (4.7) e depois executar uma nova etapa de otimização com a função objetivo (4.8) usando o mínimo valor como uma restrição adicional.

Para gerar diferentes soluções, uma técnica consiste em executar a etapa de otimização com diferentes valores iniciais de variáveis. As variáveis de p_{ij} podem ser impostas como zero para valores iniciais.

O principal objetivo da técnica mencionada acima é reduzir a vazão de efluentes e o consumo de água fresca através de restrições qualitativas e quantitativas impostas pelo programa. Apesar da possibilidade de analisar profundamente a recuperação de fibras no circuito, tal estudo não será focado no presente trabalho.

Exemplo 4: Aplicação de programação matemática para otimização de rede de água para lavagem de polpa celulósica.

A Programação Matemática Linear pode ser aplicada em casos simples como apresentado por Jacob *et al.* (2002), onde foi utilizado um programa desenvolvido em Visual Basic para minimizar as funções citadas

anteriormente. A implementação do método no presente trabalho é executada através da função *linprog* do programa *MatLab*.

Valores de vazões e concentrações de fontes e demandas do exemplo apresentado por Jacob *et al.* (2002) está representado na tabela 8. O sistema possui quatro fontes de águas residuais e três demandas. O objetivo é, através da Programação Matemática Linear, gerar uma combinação de correntes que minimize o uso de água fresca através das restrições impostas pelo programa. A vazão inicial de água fresca é de 1300 L/min.

O exemplo a seguir possui quatro fontes ($i = 4$) e três demandas ($j = 3$) e está esquematizado na figura 4.16.

Tabela 8 - Dados para exemplificar programação matemática

Fontes	vazão disponível (L/min)	concentração de fibras (%)	concentração de contaminates (ppm)
F1	500	0,3	100
F2	2000	0,1	110
F3	400	0,5	110
F4	300	0,5	60

Demandas	vazão requerida (L/min)	concentração de fibras limite (%)	concentração de contaminates limite (ppm)
D1	1200	0,5	120
D2	800	0,4	105
D3	500	0,1	80

Figura 4.16.- Representação do exemplo 4 para circuito aberto. Fonte: Jacob *et al.* (2002)

As restrições citadas na metodologia são detalhadas a seguir, onde cada variável p_{ij} significa a vazão de água da fonte i que será utilizada na demanda j para atender o objetivo da função linear, que é minimizar o consumo de água fresca p_{0j} . A princípio, o principal objetivo é minimizar a função $p_{01}+p_{02}+p_{03}+p_{04}$

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \sum_{j=1}^n p_{0j} \\
 \text{sujeitos a,} \quad & \sum_{i=1}^n p_{ij} \leq F_i \quad \left\{ \begin{array}{l} p_{01} + p_{02} + p_{03} \leq F_0 \\ p_{11} + p_{12} + p_{13} \leq F_1 \\ p_{21} + p_{22} + p_{23} \leq F_2 \\ p_{31} + p_{32} + p_{33} \leq F_3 \\ p_{41} + p_{42} + p_{43} \leq F_4 \end{array} \right. \\
 & \sum_{i=0}^m p_{ij} = D_j \quad \left\{ \begin{array}{l} p_{01} + p_{11} + p_{21} + p_{31} + p_{41} = D_1 \\ p_{02} + p_{12} + p_{22} + p_{32} + p_{42} = D_2 \\ p_{03} + p_{13} + p_{23} + p_{33} + p_{43} = D_3 \end{array} \right. \\
 & \sum_{i=1}^m c_i p_{ij} \leq D_j C_j \quad \left\{ \begin{array}{l} c_1 p_{11} + c_2 p_{21} + c_3 p_{31} + c_4 p_{41} \leq D_1 C_1 \\ c_1 p_{12} + c_2 p_{22} + c_3 p_{32} + c_4 p_{42} \leq D_2 C_2 \\ c_1 p_{13} + c_2 p_{23} + c_3 p_{33} + c_4 p_{43} \leq D_3 C_3 \end{array} \right. \\
 & \sum_{i=1}^m f_i p_{ij} \leq D_j F_j \quad \left\{ \begin{array}{l} c_1 p_{11} + c_2 p_{21} + c_3 p_{31} + c_4 p_{41} \leq D_1 C_1 \\ c_1 p_{12} + c_2 p_{22} + c_3 p_{32} + c_4 p_{42} \leq D_2 C_2 \\ c_1 p_{13} + c_2 p_{23} + c_3 p_{33} + c_4 p_{43} \leq D_3 C_3 \end{array} \right.
 \end{aligned}$$

Para complementar a análise do circuito, a recuperação de fibras para minimizar seu fluxo para o efluente pode ser feita. A função objetivo a ser minimizada será: $-\alpha_1 f_1(p_{11}+p_{12}+p_{13}) - \alpha_2 f_2(p_{22}+p_{22}+p_{23}) - \alpha_3 f_3(p_{33}+p_{32}+p_{33}) - \alpha_4 f_4(p_{44}+p_{42}+p_{43})$, ou seja :

$$f(x) = -\sum_{i=1}^m (\alpha_i f_i \sum_{j=1}^n p_{ij})$$

Onde α_i é o valor que determinará o potencial de recuperação em cada processo, ou seja, pode ser igual a 1 para maximizar o reciclo em cada etapa do processo ou 0 em caso de não reciclo.

Dependendo dos valores iniciais de p_{ij} e de α_i , diferentes resultados podem ser gerados. Na tabela 9 são demonstrados resultados com diferentes condições iniciais. O programa foi executado em *MatLab* através de um programa elaborado para esse fim.

Tabela 9 - Resultados obtidos após aplicar programação linear no exemplo 4

Sem reciclo de fibras e condições iniciais $p_{ij} = 0$				
$p_{ij}(L/min)$	D1	D2	D3	Efluente
FW	0,0000	0,0000	122,4490	0,0000
F1	195,9977	139,9333	0,0000	165,0690
F2	783,0074	420,3484	346,9388	449,7054
F3	157,7913	85,5597	0,0000	156,6490
F4	63,2036	154,1586	30,6122	52,0255
Total Efluente	822,449 L/min			
Total água fresca	122,449 L/min			
Fibras p/ efluente	1,985 kg/min			

Com reciclo de fibras ($\alpha = [0 \ 0 \ 1 \ 1]$) e condições iniciais p_{ij} = resultado sem reciclo				
$p_{ij}(L/min)$	D1	D2	D3	Efluente
FW	0,0000	0,0000	122,4490	0,0000
F1	190,1311	124,0233	0,0000	185,8456
F2	586,4622	429,9956	346,9388	636,6034
F3	272,9742	127,0258	0,0000	0,0000
F4	150,4324	118,9553	30,6122	0,0000
Total Efluente	822,449 L/min			
Total Água fresca	122,449 L/min			
Fibras p/ efluente	1,194 kg/min			

Com reciclo de fibras ($\alpha = [1 \ 1 \ 1 \ 1]$) e condições iniciais p_{ij} = resultado sem reciclo				
$p_{ij}(L/min)$	D1	D2	D3	Efluente
FW	0,0000	0,0000	122,4490	0,0000
F1	311,6406	188,3594	0,0000	0,0000
F2	454,2587	376,3535	346,9388	822,4490
F3	274,8416	125,1584	0,0000	0,0000
F4	159,2591	110,1286	30,6122	0,0000
Total Efluente	822,449 L/min			
Total Água fresca	122,449 L/min			
Fibras p/ efluente	0,822 kg/min			

O esquema do processo otimizado pode ser ilustrado na figura 4.17, onde o aumento do grau de reciclo pode ser observado.

Figura 4.17.- Representação esquemática do exemplo para circuito fechado ($\alpha=[0 \ 0 \ 1 \ 1]$) após a aplicação de programação linear

Aqui a vazão de água fresca passou de 1300 L/min para 122,5 L/min, ou seja, uma redução de 90,6%. Porém deve-se lembrar que as condições limites que foram impostas no exemplo permitem uma redução significativa de água fresca no processo.

Aqui ilustrou-se os principais métodos de integração de processos para rede de uso de água, que serão aplicados na máquina de papel e na fabricação TMP. Ambos os métodos, pinch e programação linear, podem ser utilizados para minimizar o consumo de água fresca em relação a restrição dada pelos contaminantes críticos. Tal como observado pelo Jacob *et al.* (2002), o método gráfico pinch pode ser parcialmente automatizado mas é aplicável apenas a um contaminante. Por outro lado, programação linear aqui aplicado a um contaminante adicionado de uma concentração de finos de fibras de celulose, é totalmente automatizado e é melhor adaptado a problemas maiores, desde que haja julgamento de engenharia para não aceitar soluções não realísticas.

5 ANÁLISE DAS ALTERNATIVAS PARA O CIRCUITO DE ÁGUAS DA FÁBRICA DE TMP E PAPEL IMPRENSA

Esse capítulo é dedicado à apresentação de resultados da aplicação de integração de processos para minimizar o uso de água fresca nos processos de máquina de papel e de fabricação TMP, assim como a descrição de vantagens e dificuldades encontradas durante o trabalho. O circuito de água do estudo de caso encontra-se em um bom grau de fechamento, onde a única possibilidade seria substituir a água fresca que é utilizada no sistema de lavagem dos rolos, feltro e telas da máquina. Portanto, é possível que não se encontre a configuração ótima do sistema.

5.1 Principais fontes e demandas

Para iniciar o tratamento de dados, é preciso definir primeiramente as correntes de água que formam o circuito do estudo de caso. A figura 5.1 mostra a simplificação do processo produtivo com os fluxos de água a serem analisados. Os valores de cada corrente estão mostrados na tabela 10. É possível observar que as fontes são basicamente originadas de processos de filtração e extração, e as demandas, oriundas principalmente de etapas de diluição e lavagem de polpa. No processo real, a máquina de papel da unidade fabril convive com um desperdício contínuo de água, comprovado pelo transbordo da torre de água clara. Sendo assim, houve uma motivação para simular o caso e tentar reduzir a vazão para o efluente. Mas infelizmente a vazão de desperdício não é medida durante o processo, sendo necessário aproximar seu valor através da simulação, sempre analisando sua influência em outros valores simulados. A vazão foi de aproximadamente 1400 L/min.

Para a aplicação dos métodos de otimização, algumas correntes citadas na tabela 10 não serão utilizadas, pois são consideradas intermediárias por não influenciar o balanço macroscópico de fontes e demandas. O circuito de água existente possui algumas correntes de reciclo como, por exemplo, a corrente 32 da figura 5.1. Essa corrente, descrita como o transbordo de água branca

da torre para o silo, permite uma leve diluição da água branca proveniente da seção de formação. A mistura dessa corrente com a água existente no silo será a responsável pelo ajuste da consistência da polpa em 1%, ou seja, pela maior demanda de água do circuito. Para evitar confusões e altos níveis de complexidade ao analisar o circuito de água, os fluxos intermediários e de reciclo não devem ser considerados. A corrente 32, por exemplo, pode ser ao mesmo tempo uma fonte da torre de água branca ou uma demanda do silo. Portanto, foram somente consideradas fontes as correntes realmente originadas do processo, como operações de filtração ou extração. E o mesmo se aplica a demandas, que são correntes responsáveis principalmente por processo de diluição ou lavagem de polpa.

O circuito de água em uma fábrica de papel pode operar de forma eficiente por haver fontes e demandas com vazões mássicas altas, ou seja, com grandes chances de aproveitamento em circuito. É preciso somente analisar os níveis de contaminantes para limitar seu grau de fechamento. Para exemplificar, as correntes 28 e 37 da tabela 10, ou seja, o filtrado claro da recuperação de fibras e a água branca da seção de formação úmida do papel, são fontes potenciais para suprir as demandas com a mesma ordem de grandeza. Essas demandas são principalmente as correntes 31 e 44, ou seja, a vazão de água para os filtros de recuperação de fibras, e a água utilizada para diluir a polpa antes da caixa de entrada. E o objetivo dos métodos é justamente adequar as fontes para as demandas através de técnicas gráficas e matemáticas.

Consumidores potenciais de água também estão presente no setor de TMP, onde o objetivo é diluir e lavar a polpa após refinação. As correntes 3 e 8 são as vazões necessárias para a operação e serão muito importantes para a análise do circuito. O filtrado do filtro a tambor, representado pela corrente 17, é uma fonte atualmente utilizada para a operação de diluição e lavagem. Porém através do presente estudo, essa e outras fontes podem ser combinadas com o objetivo de minimizar o consumo de água fresca, representados na tabela 10 pelas correntes 40 e 41.

Tabela 10 - Tabela com as correntes de água

Nº	Vazão (L/min)	[Fibras] (%)	[SD] (ppm)	Corrente
1	356,2	0,082	4066	Diluição e selagem do refinador primário (linha 2)
2	384,1	0,082	4066	Diluição e selagem do refinador secundário (linha 2)
3	8279,3	0,082	4066	Diluição do tanque de latência (linha 2)
4	39,8	0,082	4066	Diluição de rejeitos da depuração primária (linha 2)
5	54,7	0,082	4066	Diluição de rejeitos da depuração secundária (linha 2)
6	94,0	0,300	4747	Diluição do refinador primário (linha 1)
7	108,7	0,300	4747	Diluição dos refinadores de rejeito
8	4946,3	0,080	4066	Diluição do tanque de latência da linha 1
9	605,7	0,400	4747	Água da peneira inclinada pós depuração
10	202,7	0,300	4747	Diluição de refinadores da linha 1
11	1781,2	0,300	4747	Água da prensa de rejeitos
12	1087,2	0,050	4662	Filtrado turvo do filtro a disco
13	9114,1	0,082	4066	Água filtrada para a linha 2
14	1584,8	0,040	4662	Água para chuveiro do filtro a disco
15	2537,3	0,030	4662	Filtrado claro do filtro a disco
16	1840,8	0,030	4662	Água do filtro a disco
17	5544,1	0,050	4849	Filtrado do filtro a tambor
18	1483,6	0,082	2451	Diluição após o branqueamento
19	1254,9	0,082	2451	Diluição para o tanque 1 de TMP
20	1781,2	0,300	4747	Água da peneira inclinada pós prensa
21	4292,3	0,047	2487	Água clara para tanque de água filtrada
22	0,0	0,000	0	Água branca para tanque de água filtrada
23	18481,9	0,047	2487	Água do tanque para a torre de água clara

Nº	Vazão (L/min)	[Fibras] (%)	[SD] (ppm)	Corrente
24	12793,8	0,047	2487	Água da torre de água clara para torre de água branca
25	1395,9	0,047	2487	Transbordo da torre de água clara
26	997,4	0,050	2487	Água para chuveiro dos filtros Save-All
27	2316,2	0,025	2487	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All
28	17450,7	0,050	2487	Filtrado claro dos filtros Save-All
29	3477,6	0,300	2487	Filtrado turvo dos filtros Save-All
30	2486,8	0,300	2307	Água para torre de água branca
31	20965,7	0,300	2307	Água para recuperação de fibras
32	12952,1	0,245	2451	Transbordo de água branca para o silo
33	996,7	0,082	2451	Diluição do couch pit
34	1406,8	0,010	2380	Filtrado do Filtro de refugo
35	23452,5	0,300	2307	Água p/ recuperação de fibras e torre de água branca
36	909,3	0,460	2417	Efluente do sistema de baixa consistência
37	54323,2	0,351	2273	Água branca extraída da seção de formação
38	3420	0,000	0	Água fresca para máquina de papel
39	299,1	0,050	2487	Água para chuveiro do filtro de refugo
40	3420	0,000	0	ÁGUA FRESCA
41	786,8	0,000	0	ÁGUA FRESCA
42	1859,1	0,458	2273	Efluente da seção de prensas
43	3477,6	0,300	2487	Água turva para os filtros de recuperação de fibras
44	43822,8	0,300	2307	Água branca para bomba de mistura

Figura 5.1 - Esquema ilustrando as principais correntes de água do processo.

5.2 Resultados do método Pinch

Como já mencionado, a técnica de curva composta dupla para Fontes e Demandas, (Dhole *et al.*, 1996), será utilizada no estudo de caso. A metodologia foi aplicada para dois casos: (i) as correntes de águas residuais e frescas somente para a máquina de papel, e (ii) as correntes para o processo da máquina está integrada com a produção de TMP.

5.2.1 Análise somente para a máquina de papel aplicando pinch

As fontes e demandas para aplicação do método Pinch devem ser ordenadas na ordem decrescente dos valores de concentração limites da substância. As principais fontes e demandas identificadas na produção de papel estão ordenadas de acordo com a concentração de fibras nas tabelas 11 e 12:

Tabela 11 - Fontes de água ordenadas para fibras em de produção de papel

	Descrição	Vazão (L/min)	[fibras] (%)	[SD] ppm
F1	Água branca extraída da seção de formação	54323,2	0,351	2273
F2	Filtrado claro dos filtros Save-All	17450,7	0,050	2487
F3	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All	2316,2	0,025	2487
F4	Filtrado do Filtro de refugo	1406,8	0,010	2380

Tabela 12 - Demandas ordenadas para fibras em produção de papel

	Descrição	Vazão (L/min)	[fibras] (%)	limite [fibras] (%)	[SD] ppm	limite [SD] ppm
D1	Diluição após o branqueamento	1483,7	0,082	0,800	2451	3000
D2	Diluição para o tanque 1 de TMP	1255,0	0,082	0,800	2451	3000
D3	Água para chuveiro dos filtros Save-All	997,4	0,050	0,800	2487	3000
D4	Diluição do couch pit	996,7	0,082	0,800	2451	3000
D5	Água para chuveiro do filtro de refugo	299,0	0,050	0,800	2487	3000
D6	Água branca para recuperação de fibras	20966,0	0,300	0,300	2487	3000
D7	Água branca para bomba de mistura	43823,0	0,300	0,300	2307	3000
D8	Água da torre de água clara para linha de TMP	4292,0	0,047	0,100	2487	3000
D9	Água fresca para a máquina de papel	3420,0	0,000	0,018	0	2500

Como pode ser observado na figura 5.2, cada valor de concentração de sólidos dissolvidos (SD) é inferior a todos os valores limites para a mesma substância. Dessa maneira, a ordenação das correntes e o tratamento gráfico para sólidos dissolvidos não serão necessários.

Figura 5.2 - Curva composta dupla para sólidos dissolvidos em máquina de papel

O valor limite de 5000 ppm para sólidos dissolvidos foi utilizado pelo trabalho de Jacob *et al* (2002) e é considerado um valor aceitável em uma unidade produtiva de papel imprensa. Porém como as demandas para produzir papel não ultrapassaram o valor de 3000 ppm durante a simulação, essa concentração foi adotada como valor limite, conforme mostra a figura 5.2 e a tabela 12. A exceção é a corrente de água fresca, onde foi adotada uma pureza maior.

Para a concentração de fibras, observa-se através da figura 5.3 que o comportamento não é similar ao ocorrido com os sólidos dissolvidos. Portanto, é possível manipular o ponto pinch para tentar reduzir o consumo de água fresca.

Figura 5.3 - Curva composta dupla para fibras em máquina de papel (passo 1)

Para atingir o ponto pinch, desloca-se a curva de demanda do gráfico anterior para a direita até eliminar o cruzamento entre as curvas. Após o deslocamento, o ponto pinch pode ser identificado conforme figura 5.4.

Com exceção da demanda D9 para os chuveiros da máquina de papel, um valor limite aceitável para concentração de fibras está na ordem de 1%. O valor é também utilizado por Jacob *et al* (2002). Porém no presente trabalho, diferentes valores limites foram utilizados, conforme mostra a tabela 12. Para correntes de altas vazões como D6, D7 e D8, a decisão foi adotar valores iguais ou próximos ao do resultado simulado. O motivo se baseia no fato de que as correntes são utilizadas para diluição (D7 e D8) ou recuperação de fibras (D6), ou seja, processos controlados pela concentração de fibras. Como o método Pinch focaliza somente a vazão das correntes, é importante atribuir valores limites iguais ou próximos ao original para evitar incoerências da simulação com o processo real. Para exemplificar, consideremos um limite para a demanda D7 de 0,351%, ou seja, igual a da fonte F1. Essa fonte é responsável pela principal diluição da polpa antes da caixa de entrada, uma etapa vital do processo de produção de papel. Se fosse utilizado o valor limite de 0,351% para D7, o consumo de água branca teria que ser

aproximadamente 25% maior para atingir a mesma consistência de polpa utilizando o valor de 0,3%. Porém o método Pinch atribuiria a mesma vazão para ambos os casos. Sendo assim, o valor limite de 0,3 % foi considerado.

Figura 5.4 - Curva composta dupla para fibras em máquina de papel (passo 2)

O objetivo da aplicação do método Pinch é, através das fontes e demandas consideradas, construir um novo circuito de água baseado na concentração limite de contaminantes. Portanto, o próximo passo do método é manipular a curva das fontes da figura 5.4. Deste gráfico, é fácil perceber a possibilidade de misturar a fonte F1 com parte de F2 para atingir a concentração limite de fibras de D6 e D7, como mostra a figura 5.5.

Observa-se pelos resultados que o consumo de água fresca na máquina de papel foi reduzido de 3420 L/min para 2036,1 L/min, ou seja, uma redução de 30%. Muitos trabalhos são finalizados nessa etapa de análise do circuito, ou seja, sem testar e comprovar os resultados através de sua simulação. Sendo assim, não é possível definir nesse momento, o ponto ótimo do método utilizado.

Com o resultado, novos tanques podem ser necessários assim como torres existentes podem ser removidas ou reaproveitadas para o novo circuito. Isso deve ser verificado através da inclusão dos valores da tabela 14 no simulador Cadsim antes de aceitar como solução do problema pelo seguinte motivo: o resultado da nova simulação após configuração otimizada por método Pinch pode ser observado no apêndice A. É importante observar que dificilmente os valores de fluxo das correntes de polpa se igualam aos da simulação original. Porém os valores são bastante semelhantes.

5.2.2 Análise para processo TMP integrada à máquina de papel aplicando pinch

Ao aplicar as ferramentas de otimização somente para máquina de papel, verificou-se que a análise pôde ser feita somente para um contaminante, ou seja, as fibras. Quando o processo integrado é analisado, é possível estabelecer duas condições de trabalho: considerar um valor limite para concentração de sólidos dissolvidos igual a 5000 ppm para todas as correntes, ou definir limites menores para concentração de sólidos dissolvidos para algumas correntes de demanda. Dependendo de como a segunda condição de trabalho for criada para análise, o critério de otimização por múltiplos contaminantes deve ser adotado.

As tabelas 15 e 16 mostram as fontes e demandas consideradas para a otimização do processo integrado. A partir dessas tabelas, é possível elaborar diferentes casos para melhorar o circuito de água.

Tabela 15 - Fontes de água consideradas em processo integrado

Ordem para fibras	Ordem para SD	Descrição	[fibras] (%)	[SD] ppm	Vazão (L/min)
F1	F3	Água da peneira inclinada pós-depuração	0,400	4747	605,7
F2	F9	Água branca extraída da seção de formação	0,351	2273	54323,0
F3	F2	Água da peneira inclinada pós prensa	0,300	4747	1781,2
F4	F7	Filtrado claro dos filtros Save-All	0,050	2487	17450,7
F5	F4	Filtrado turvo do filtro a disco	0,050	4662	1087,2
F6	F1	Filtrado do filtro a tambor	0,050	4849	5544,1
F7	F5	Filtrado claro do filtro a disco	0,030	4662	2537,3
F8	F6	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All	0,025	2487	2316,2
F9	F8	Filtrado do Filtro de refugo	0,010	2380	1406,8

Tabela 16 - Demandas ordenadas para fibras e SD em processo integrado

Ordem para fibras	Ordem para SD	Descrição	Vazão (L/min)	[fibras] (%)	[fibras] limite (%)	[SD] ppm	[SD] limite ppm
D1	D1	Diluição do refinador primário (linha 1)	94,0	0,300	0,800	4747	5000
D2	D2	Diluição dos refinadores de rejeito	108,7	0,300	0,800	4747	5000
D3	D14	Água do chuveiro do filtro de refugo	299,1	0,050	0,800	2487	3000
D4	D3	Água do chuveiro dos filtros da TMP	1585,0	0,040	0,800	4662	5000
D5	D4	Diluição do refinador primário (linha 2)	356,2	0,082	0,800	4066	5000
D6	D5	Diluição do refinador secundário (linha 2)	384,1	0,082	0,800	4066	5000
D7	D7	Diluição de rejeitos da depuração primária	39,8	0,082	0,800	4066	5000
D8	D8	Diluição de rejeitos da depuração secundária	54,7	0,082	0,800	4066	5000
D9	D10	Diluição após o branqueamento	1483,6	0,082	0,800	2451	3000
D10	D11	Diluição para o tanque 1 de TMP	1254,9	0,082	0,800	2451	3000
D11	D12	Diluição do couch pit	996,7	0,082	0,800	2451	3000

Ordem para fibras	Ordem para SD	Descrição	Vazão (L/min)	[fibras] (%)	[fibras] limite (%)	[SD] ppm	[SD] limite ppm
D12	D13	Água do chuveiro dos filtros Save-All	997,4	0,050	0,800	2487	3000
D13	D16	Água branca para recup. de fibras	20966	0,300	0,300	2307	3000
D14	D15	Água branca para bomba de mistura	43822,8	0,300	0,300	2307	3000
D15	D6	Diluição do tanque de latência linha 2	8279,3	0,082	0,100	4066	5000
D16	D9	Diluição do tanque de latência linha 1	4946,1	0,080	0,100	4066	5000
D17	D17	Água fresca para a linha de TMP	787,0	0,000	0,018	0	2500
D18	D18	Água fresca para a máquina de papel	3420,0	0,000	0,018	0	2500

5.2.2.1 Caso com contaminante simples aplicando pinch

Observando a tabela 15, é conveniente adotar o valor limite de 3000 ppm para demandas que possuem valores originais abaixo desse valor e manter 5000 ppm para as demandas com valores acima de 3000 ppm. Apesar de adotar esse critério, o problema ainda pode ser analisado por contaminante simples conforme figura 5.6, onde a curva de demanda não cruza a curva de fontes.

Figura 5.6 - Curvas de concentração de sólidos dissolvidos em processo integrado. Caso para um contaminante.

A curva composta dupla para concentração de fibras das fontes e demandas pode ser observada na figura 5.7:

Figura 5.7. Curvas de concentração de fibras em processo integrado

Com o balanço feito para atingir o limite de concentração de fibras, verifica-se que a fonte F4 pode ser manipulada para encontrar o ponto Pinch e gerar a figura 5.8.

Figura 5.8 - Curva para atingir limite de concentração de fibras em processo integrado

As novas fontes necessárias para esse processo otimizado estão mencionadas na tabela 17, onde houve uma divisão da fonte de água branca da seção de formação para poder atingir o limite de concentração de fibras nas demandas. Os valores finais das correntes otimizadas são mostradas na tabela 18.

Tabela 17. Subdivisão da fonte 4 após a aplicação do método Pinch

Fontes	Descrição	Vazão (L/min)
F4'	Filtrado claro dos filtros Save-All parte 1	11081,9
F4''	Filtrado claro dos filtros Save-All parte 2	6369,1

Tabela 18 - Distribuição das fontes para as demandas com método Pinch em processo integrado (valores de vazão de água em kg/min)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	Total
F1	94	108,7	299,1	104,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	606
F2+F3+F4'	0	0	0	1480,8	356,2	384,1	40	55	1484	1255	996,7	997,4	20966	39170,8	0	0	0	0	67186
F4''	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4652,2	1716,8	0	0	0	6369
F5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1087	0	0	0	1087
F6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5475,2	68,8	0	0	5544
F7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2537	0	0	2537
F8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2316	0	0	2316
F9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	24,2	787	595,8	1407
TOTAL	94	108,7	299,1	1585	356,2	384,1	40	55	1484	1255	996,7	997,4	20966	43823	8279	4946	787	595,8	87052
Água fresca	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2824	2824

5.2.2.2 Caso com múltiplo contaminante

Para gerar um problema com múltiplo contaminante, consideremos, por exemplo, um novo limite para concentração de sólidos dissolvidos em demandas onde ocorre a diluição da polpa nos tanques de latência. Com o objetivo de aumentar a pureza da polpa após a refinação, a alternativa é recomendada para fins operacionais.

Consideremos a tabela 16, porém com uma modificação na concentração limite de sólidos dissolvidos na diluição dos tanques de latência. Os valores limites de 5000 ppm para as duas demandas serão alterados para 3000 ppm. Nesse caso, a análise do processo integrado da produção de papel com pasta termomecânica exige uma análise mais elaborada. Diferentemente da aplicação do método para máquina de papel, é necessário ordenar as demandas de acordo com as concentrações de sólidos dissolvidos, pois ao considerarmos o processo integrado, observa-se a seguinte curva composta dupla:

Figura 5.9 - Curvas de concentração de sólidos dissolvidos em processo integrado. Caso para múltiplo contaminante.

Considerando as figuras 5.7 e 5.9, o problema deve ser analisado para dois contaminantes, sendo necessária uma análise conjunta das curvas para atingir um resultado global. Isso geraria um trabalho a mais, pois não há possibilidade de sobrepor as curvas de diferentes contaminantes para encontrar os resultados graficamente. Sendo assim, *o método Pinch não será utilizado para esse fim, uma vez que a programação matemática é preparada para enfrentar essa dificuldade.*

5.3 Resultados do método por programação linear

Os mesmos casos aplicados no método Pinch serão analisados através de programação matemática para comparar vantagens e dificuldades de cada ferramenta. As discussões do método Pinch envolvendo as definições de valores limites também se aplica à programação matemática. Porém nesse método não é necessário ordenar as demandas, pois os dados de entrada do programa são definidos em forma de vetores. A formulação do programa com as restrições apresentadas anteriormente pode ser observada no apêndice B:

5.3.1 Análise somente para máquina de papel aplicando programação linear

Após a execução do programa utilizando os dados de entrada da tabela 18, obtêm-se os valores otimizados da tabela 19.

Tabela 19 - Distribuição das fontes para as demandas com programação matemática

Valores após aplicação de Programação Matemática (L/min)										
	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	Total
F1	605	179	33	1	0	16693	36125	656	31	54323
F2	579	678	604	619	182	3965	7077	3207	540	17451
F3	270	383	355	370	117	13	27	201	581	2317
F4	29	15	5	6	0	159	196	223	773	1406
TOTAL	1483	1255	997	996	299	20830	43425	4287	1925	75497
Água fresca	1	0	0	0	0	136	398	6	1495	2036

De acordo com a tabela 19, verifica-se que as fontes são divididas para suprir parcialmente cada demanda, o que pode dificultar a implantação do projeto por questões de custo e viabilidade operacional.

Somando-se as frações de água fresca para cada demanda da tabela 19, encontramos uma vazão de 2036 L/min para a máquina de papel, ou seja, o mesmo valor encontrado utilizando a técnica gráfica Pinch.

5.3.2 Análise para processo TMP integrado à máquina de papel aplicando programação linear

A dificuldade observada na aplicação do método Pinch para processo integrado com dois contaminantes pode ser resolvida utilizando-se a programação matemática. Porém a quantidade de correntes a serem manipuladas aumenta de forma considerável como observado na tabela 20.

O resultado pode acarretar em alto custo de investimento para novas tubulações ou rearranjo de tanques e bombas.

Tabela 20. Distribuição das fontes utilizando programação matemática em processo integrado (valores de vazão de água em kg/min)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	Total
F1	0	0	17	44	33	34	0	0	47	46	43	43	90	84	57	59	1	7	606
F2	0	0	35	575	33	37	0	0	480	376	244	244	14431	35414	851	1596	1	5	54323
F3	0	0	22	84	44	46	0	0	93	86	71	71	661	270	126	194	2	11	1781
F4	0	0	19	60	39	40	0	0	66	63	63	63	196	165	105	113	165	74	1087
F5	0	0	33	332	35	40	0	0	259	207	164	164	1298	6554	6275	1951	31	106	17451
F6	94	109	48	101	71	73	40	55	132	104	104	104	3373	434	158	374	66	124	5544
F7	0	0	21	82	44	46	0	0	71	86	71	71	482	307	153	242	86	776	2537
F8	0	0	29	139	31	35	0	0	143	123	107	107	251	336	269	233	89	434	2316
F9	0	0	24	76	23	26	0	0	77	72	66	66	105	132	105	97	146	392	1407
TOTAL	94	108,7	299,1	1585	356,2	384,1	40	55	1484	1255	996,7	997,4	20966	43823	8279	4946	787	1929	86852
Água fresca	0	0	51	93	3	7	0	0	116	93	81	81	78	128	180	86	330	1488	2815

5.4 Discussão de resultados

Como observado na seção anterior, quatro diferentes resultados foram encontrados através de dois métodos de otimização. Porém, uma desvantagem é encontrada em ambos os métodos quando os resultados são transferidos para o simulador. Isso ocorre porque quando as fontes originais são manipuladas para satisfazer as demandas desejadas, as vazões das fontes otimizadas são alteradas. Como novas concentrações de fibras são impostas pelo usuário através de valores limites, a etapa do processo operando com válvulas de controle de consistência são afetadas, causando dessa maneira, alterações nos fluxos das fontes. Além disso, fontes provenientes de filtros possuem suas consistências fixas por ser um parâmetro de entrada do objeto de simulação, contribuindo dessa forma, para o desbalanceamento das correntes otimizadas em relação aos originais.

Tabela 21 - Alterações observadas nas vazões das fontes pós otimizadas (em L/min)

	Descrição da fonte	Vazão Original	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
F1	Água da peneira inclinada pós-depuração	605,7	599,4	629,5	579,8	455,1
F2	Água branca extraída da seção de formação	54323,0	54322,0	53597,3	54640,5	53622,8
F3	Água da peneira inclinada pós prensa	1781,2	1789,7	1820,3	1782,4	1627,0
F4	Filtrado turvo do filtro a disco	1087,2	1084,3	1074,3	1071,6	1118,5
F5	Filtrado claro dos filtros Save-All	17450,7	17322,5	17467,6	17534,9	17297,1
F6	Filtrado do filtro a tambor	5544,1	5544,9	5535,1	5533,6	5714,9
F7	Filtrado claro do filtro a disco	2537,3	2530,6	2507,1	2500,8	2610,3
F8	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All	2316,2	2310,2	2326,6	2338,6	1757,0
F9	Filtrado do Filtro de refugo	1406,8	1537,2	1408,9	1276,3	1210,6

Portanto, não é correto utilizar diretamente os resultados encontrados a partir dos métodos de otimização. Para exemplificar, supõe-se que o método pede

para misturar duas fontes originais com vazões x e y com o intuito de satisfazer a demanda de uma diluição de polpa. Entretanto, após estabelecer no simulador que a demanda necessita de $(x+y)$, a vazão das fontes são alteradas para novos valores x' e y' , podendo dessa maneira, alterar o valor previamente estabelecido. A tabela 21 mostra as alterações nas vazões de fontes em cada caso estudado.

Tabela 22 - Alterações observadas nas consistências das fontes (em %)

	Descrição da fonte	[fibras] Original	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
F1	Água da peneira inclinada pós-depuração	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
F2	Água branca extraída da seção de formação	0,351	0,348	0,357	0,349	0,346
F3	Água da peneira inclinada pós prensa	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
F4	Filtrado turvo do filtro a disco	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
F5	Filtrado claro dos filtros Save-All	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
F6	Filtrado do filtro a tambor	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
F7	Filtrado claro do filtro a disco	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
F8	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
F9	Filtrado do Filtro de refugo	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010

Para fibras, é possível notar na tabela 22 que as consistências das fontes não foram alteradas, exceto pela água branca extraída da seção de formação da máquina de papel, que possui a consistência variável de acordo com a vazão de água e contaminantes da polpa na caixa de entrada.

A variação da concentração de sólidos dissolvidos (SD) já é mais acentuada, conforme mostra a tabela 23. É importante enfatizar que devido ao maior fechamento do circuito, as concentrações de sólidos dissolvidos dentro do circuito aumentam.

Tabela 23. Alterações observadas nas concentrações de SD das fontes (em ppm)

	Descrição da fonte	[SD] Original	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
F1	Água da peneira inclinada pós-depuração	4747	5817	5890	5295	4189
F2	Água branca extraída da seção de formação	2273	3322	3400	3196	3226
F3	Água da peneira inclinada pós prensa	4747	5817	5890	5294	4189
F4	Filtrado turvo do filtro a disco	4662	5695	5755	4197	3807
F5	Filtrado claro dos filtros Save-All	2487	3478	3559	3338	3399
F6	Filtrado do filtro a tambor	4849	5951	6031	6124	4494
F7	Filtrado claro do filtro a disco	4662	5695	5755	4197	3807
F8	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All	2487	3478	3558	3338	3399
F9	Filtrado do Filtro de refugo	2380	3338	3494	3285	3222

Sendo assim, é inconveniente considerar as demandas originais como entradas para encontrar um processo otimizado. O método gera valores teoricamente corretos, porém inconvenientes após simulação do sistema otimizado. Os dados simulados das vazões de água das demandas pós otimizadas podem ser verificadas na próxima tabela 24.

A vazão de 2823,0 L/min para os casos 1 e 2 da tabela 24 foi calculada considerando um consumo de água fresca igual a 787,0 L/min na unidade de produção de TMP, pois ambos os casos não contemplam a otimização do processo de fabricação de pasta termomecânica.

O consumo total de água fresca para o caso 4 engloba, além da demanda D17 e D18, a demanda D1 e parte de D2 e D6. Isso ocorre porque algumas fontes do processo otimizado não foram suficientes para satisfazer totalmente as demandas D1, D2 e D3. Como a vazão é controlada conforme consistência das correntes, parte da demanda deve ser suprida com água fresca.

Tabela 24- Alterações observadas nas vazões das demandas pós otimizadas(em L/min)

	Descrição da demanda	Vazão Original	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
D1	Diluição do refinador primário (linha 1)	94,0	94,0	94,0	94,0	94,3 ^(a)
D2	Diluição dos refinadores de rejeito	108,7	108,6	109,0	110,9	107,7 ^(b)
D3	Água do chuveiro do filtro de refugo	299,1	299,1	299,1	272,0	300
D4	Água do chuveiro dos filtros da TMP	1585,0	1581,4	1571,3	1585,0	1768,2
D5	Diluição do refinador primário (linha 2)	356,2	355,9	355,8	356,0	358,3
D6	Diluição do refinador secundário (linha 2)	384,1	383,7	383,6	381,3	370,6 ^(c)
D7	Diluição de rejeitos da depuração primária	40,0	39,8	39,8	40,0	39,8
D8	Diluição de rejeitos da depuração secundária	55,0	54,7	54,7	55,0	55,2
D9	Diluição após o branqueamento	1483,3	1484	1503,4	1552,7	1479,3
D10	Diluição para o tanque 1 de TMP	1254,9	1252,1	1309,0	1379,0	794,0
D11	Diluição do couch pit	996,7	996,7	998,1	990,8	812,0
D12	Água do chuveiro dos filtros Save-All	997,4	997,4	955,0	999,9	992,0
D13	Água branca para recup. de fibras	20966,0	20937	20965	20966,0	20936,7
D14	Água branca para bomba de mistura	43823,0	43823	43269	43824,0	43730,8
D15	Diluição do tanque de latência da linha 2	8279,0	8479,0	8600,5	8261,9	8158,8
D16	Diluição do tanque de latência linha 1	4946,0	4941,3	4900,2	4885,2	4991,6
D17	Água fresca na TMP	787,0	568,3	510,7	66,6	150,0
D18	Água fresca para a máquina de papel	3420,0	2036,0	2036,0	2824,0	2585,0
	Água fresca total	4207,0	2604,3	2546,7	2890,6	2878,5
	Antes da simulação dos resultados	4207,0	2823,0	2823,0	2824,0	2815,0

(a) valor teve de ser suprido por água fresca. (b) uma parte de corrente, 14,3 L/min do total da corrente de 107,7 L/min, teve de ser suprido por água fresca. (c) uma parte de corrente, 34,9 L/min do total da corrente de 370,6 L/min, teve de ser suprido por água fresca.

Na tabela 24, nota-se também a diferença entre os consumos “teóricos” e novamente simulados de água fresca, ressaltando dessa maneira, a

importância da simulação de resultados. Quanto às concentrações de contaminantes das demandas, os valores pós-otimizados podem ser verificados na tabela 25:

Tabela 25- Alterações observadas nas concentrações de SD das demandas (em ppm)

	Descrição da demanda	[SD] limite	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
D1	Diluição do refinador primário (linha 1)	5000	<i>5816</i>	<i>5890</i>	<i>5294</i>	0
D2	Diluição dos refinadores de rejeito	5000	<i>5816</i>	<i>5890</i>	<i>5294</i>	4456
D3	Água do chuveiro do filtro de refugo	3000	<i>3348</i>	<i>3558</i>	<i>5294</i>	<i>3117</i>
D4	Água do chuveiro dos filtros da TMP	5000	<i>5695</i>	<i>5755</i>	3408	3378
D5	Diluição do refinador primário (linha 2)	5000	<i>5092</i>	<i>5144</i>	3275	3953
D6	Diluição do refinador secundário (linha 2)	5000	<i>5092</i>	<i>5144</i>	3275	3953
D7	Diluição de rejeitos da depuração primária	5000	<i>5092</i>	<i>5144</i>	3275	4456
D8	Diluição de rejeitos da depuração secundária	5000	<i>5092</i>	<i>5144</i>	3275	4456
D9	Diluição após o branqueamento	3000	<i>3348</i>	<i>3524</i>	<i>3275</i>	<i>3238</i>
D10	Diluição para o tanque 1 de TMP	3000	<i>3348</i>	<i>3502</i>	<i>3275</i>	<i>3318</i>
D11	Diluição do couch pit	3000	<i>3343</i>	<i>3554</i>	<i>3275</i>	<i>3218</i>
D12	Água do chuveiro dos filtros Save-All	3000	<i>3348</i>	<i>3513</i>	<i>3275</i>	<i>3290</i>
D13	Água branca para recup. de fibras	3000	<i>3348</i>	<i>3426</i>	<i>3275</i>	<i>3478</i>
D14	Água branca para bomba de mistura	3000	<i>3361</i>	<i>3382</i>	<i>3282</i>	<i>3269</i>
D15	Diluição do tanque de latência da linha 2	5000	<i>5092</i>	<i>5144</i>	<i>5298</i>	3344
D16	Diluição do tanque de latência da linha 1	5000	<i>5092</i>	<i>5144</i>	3811	3486
D17	Água fresca na TMP	2500	0	0	<i>3011</i>	<i>2710</i>
D18	Água fresca para a máquina de papel	2500	1157	1833	574	1707

Na tabela 25, muitos valores ultrapassaram os limites de concentração impostos para sólidos dissolvidos. O caso mais simples de ser transferido para o simulador (caso 1) teve praticamente todas as suas correntes de

demanda acima do limite para sólidos dissolvidos. Alguns motivos contribuem para esse resultado. Primeiramente, o método Pinch não considerou a concentração do contaminante durante a otimização, pois originalmente todas as fontes continham as concentrações de sólidos abaixo do limite estabelecido. O segundo motivo, como explicado anteriormente e válido para todos os casos, refere-se aos dados de fontes originais que são alterados após a manipulação de suas correntes, podendo dessa maneira, ultrapassar os limites. O terceiro motivo é o fato de somente as correntes do setor de produção de papel serem consideradas, ocasionando dessa maneira alguns desvios significativos nas correntes do setor de TMP.

O caso 2, onde o setor de papel foi otimizado pelo método de programação linear, os motivos citados anteriormente também são válidos. Mas por haver um número maior de correntes manipuladas, os resultados diferem do caso 1.

No processo integrado otimizado através da técnica gráfica, ou seja, caso 3, algumas correntes respeitaram o limite estabelecido para sólidos dissolvidos. Mas como a curva de sólidos dissolvidos não foi novamente considerada, o método permitiu a distribuição de uma única fonte para várias demandas, como observado na tabela 25. Todas as concentrações de sólidos dissolvidos ultrapassaram os valores limites de forma proporcional ao original, ou seja, sem muitos desvios. A exceção foi a demanda para o chuveiro do filtro de refugo, que ultrapassou significativamente o limite. Mas deve-se lembrar que o método Pinch manipulou fontes somente para satisfazer a consistência limite.

Tabela 26 - Alterações observadas nas consistências das demandas (em %)

	Descrição da demanda	Consistência limite	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
D1	Diluição do refinador primário (linha 1)	0,800	0,300	0,300	0,400	0,000
D2	Diluição dos refinadores de rejeito	0,800	0,300	0,300	0,398	0,400
D3	Água do chuveiro do filtro de refugo	0,800	0,298	0,039	0,400	0,107
D4	Água do chuveiro dos filtros da TMP	0,800	0,042	0,042	0,305	0,177
D5	Diluição do refinador primário (linha 2)	0,800	0,079	0,097	0,298	0,077
D6	Diluição do refinador secundário (linha 2)	0,800	0,079	0,097	0,298	0,077
D7	Diluição de rejeitos da depuração primária	0,800	0,079	0,097	0,298	0,050
D8	Diluição de rejeitos da depuração secundária	0,800	0,079	0,097	0,298	0,050
D9	Diluição após o branqueamento	0,800	0,298	0,108	0,298	0,152
D10	Diluição para o tanque 1 de TMP	0,800	0,298	0,153	0,298	0,065
D11	Diluição do couch pit	0,800	0,308	0,046	0,298	0,148
D12	Água do chuveiro dos filtros Save-All	0,800	0,298	0,133	0,298	0,145
D13	Água branca para recup. de fibras	0,300	0,298	0,286	0,298	0,262
D14	Água branca para bomba de mistura	0,300	0,273	0,309	0,272	0,291
D15	Diluição do tanque de latência da linha 2	0,100	0,079	0,097	0,050	0,081
D16	Diluição do tanque de latência da linha 1	0,100	0,079	0,097	0,028	0,135
D17	Água fresca na TMP	0,018	0,000	0,000	0,009	0,021
D18	Água fresca para a máquina de papel	0,018	0,000	0,000	0,002	0,013

As concentrações de fibras indicadas na tabela 26, com exceção das demandas D16 e D17 do caso 4, não ultrapassaram os limites estabelecidos. Porém é muito importante que correntes otimizadas de altas vazões não tenham suas consistências desviadas de forma significativa em relação aos originais, pois como já explicado anteriormente, as vazões controladas por consistências se alteram de forma proporcional à concentração de fibras.

Os resultados da simulação do caso 4 foram os mais críticos. Mas devido à dificuldade para distribuir todas as fontes para cada demanda no simulador, os desvios eram esperados. Portanto, uma das grandes desvantagens do método por programação matemática é justamente a distribuição parcial de cada fonte em todas as demandas, o que pode gerar confusões no momento de distribuir ou corrigir os valores das correntes no simulador. Uma pequena fonte influencia todo o balanço integrado, sendo necessária grande atenção ao analisar o processo produtivo de papel integrado à TMP.

Como todos os casos ultrapassaram os limites estabelecidos, uma alternativa deve ser desenvolvida para finalizar o trabalho. Para solucionar o problema, o simulador dinâmico permite manipular vazões de água fresca ao mesmo tempo em que se analisa a redução das concentrações de contaminantes. Sendo assim, é possível aumentar a vazão de água em pontos estratégicos do processo até encontrar o valor limite inicialmente estabelecido.

Por ser um caso com poucas modificações físicas no processo, o método Pinch para o processo integrado será a base para encontrar a solução. O objetivo nesse momento é analisar a tabela 25 para o caso 3 e tentar reduzir as concentrações de sólidos dissolvidos até os valores limites permitidos, o que pode ser feito através da introdução de água fresca em pontos onde a concentração de sólidos está alta. Através da tabela 23, observa-se que a fonte do filtro a tambor contém uma quantidade relativamente alta de sólidos dissolvidos, podendo dessa maneira, incluir um ponto de entrada de água fresca para reduzir sua concentração.

As tabelas 27 e 28 mostram os resultados das modificações feitas para atingir o objetivo mencionado acima. Apesar das consistências não se alterarem, é possível notar que as concentrações de sólidos dissolvidos passaram a respeitar os limites estabelecidos. Devido à alta praticidade para manipular correntes em um simulador dinâmico, o resultado pode ser encontrado de forma relativamente rápida. Isso ocorre porque diferentes correntes podem ser analisadas simultaneamente para cada alteração feita no circuito de água.

Tabela 27 - Demandas do caso 3: corrigido para atingir limite estabelecido

	Descrição da demanda	[SD] limite	[SD] sem correção	[SD] com correção	Consistência limite	Consistência sem correção	Consistência com correção	Vazão original	Vazão sem correção	Vazão com correção
		ppm	ppm	ppm	%	%	%	kg/min	kg/min	kg/min
D1	Diluição do refinador primário (linha 1)	5000	5294	4603	0,800	0,400	0,400	94,0	94,0	94,0
D2	Diluição dos refinadores de rejeito	5000	5294	4603	0,800	0,398	0,398	108,7	110,9	109,0
D3	Água do chuveiro do filtro de refugo	3000	5294	2749	0,800	0,400	0,400	299,1	271,6	272,3
D4	Água do chuveiro dos filtros da TMP	5000	3408	2930	0,800	0,305	0,305	1585,0	1585,0	1585,0
D5	Diluição do refinador primário (linha 2)	5000	3275	2812	0,800	0,298	0,299	356,2	356,0	356,0
D6	Diluição do refinador secundário (linha 2)	5000	3275	2812	0,800	0,298	0,299	384,1	381,3	373,8
D7	Diluição de rejeitos da depuração primária	5000	3275	2812	0,800	0,298	0,299	40,0	40,0	40,0
D8	Diluição de rejeitos da depuração secundária	5000	3275	2812	0,800	0,298	0,299	55,0	55,0	55,0
D9	Diluição após o branqueamento	3000	3275	2810	0,800	0,298	0,301	1483,3	1538,7	1549,8
D10	Diluição para o tanque 1 de TMP	3000	3275	2806	0,800	0,298	0,303	1254,9	1372,1	1372,5
D11	Diluição do couch pit	3000	3275	2812	0,800	0,298	0,299	996,7	990,8	991,2
D12	Água do chuveiro dos filtros Save-All	3000	3275	2812	0,800	0,298	0,299	997,4	999,9	1000,0
D13	Água branca para recuper. de fibras	3000	3275	2812	0,300	0,298	0,299	20966,0	20966,0	20966
D14	Água branca para bomba de mistura	3000	3282	2819	0,300	0,272	0,272	43823,0	43824,0	43824
D15	Diluição do tanque de latência (linha 2)	5000	5298	4457	0,100	0,050	0,049	8279,0	8262,0	8279,0
D16	Diluição do tanque de latência (linha 1)	5000	3811	3298	0,100	0,028	0,027	4946,0	4886,0	5076,6
D17	Água fresca na TMP	2500	3011	2500	0,018	0,009	0,009	787,0	62,1	99,3
D18	Água fresca para a máquina de papel	2500	574	505	0,018	0,002	0,002	3420,0	2824,0	2824,0
	ÁGUA FRESCA ADICIONAL							0	0	320,0
	ÁGUA FRESCA TOTAL							4207,0	2886,1	3243,3

Tabela 28 - Fontes do caso 3: corrigido para atingir limite estabelecido

	Descrição da fonte	[SD] sem correção	[SD] com correção	Consistência sem correção	Consistência com correção	Vazão sem correção	Vazão com correção
		ppm	ppm	%	%	kg/min	kg/min
F1	Água da peneira pós-depuração	5295	4603	0,400	0,400	579,8	579,3
F2	Água branca extraída da seção de formação	3196	2742	0,349	0,349	54640,5	54644,3
F3	Água da peneira inclinada pós prensa	5294	4603	0,300	0,300	1782,4	1771,9
F4	Filtrado turvo do filtro a disco	4197	3671	0,050	0,050	1071,6	1130,5
F5	Filtrado claro dos filtros Save-All	3338	2873	0,050	0,050	17534,9	17447,1
F6	Filtrado do filtro a tambor	6124	5108	0,050	0,048	5533,6	5532,1
F7	Filtrado claro do filtro a disco	4197	3671	0,030	0,030	2500,8	2638,4
F8	Filtrado Superclaro dos filtros Save-All	3338	2873	0,025	0,025	2338,6	2327,5
F9	Filtrado do Filtro de refugo	3285	2888	0,010	0,010	1276,3	1387,1

Para atender os limites de concentração de sólidos dissolvidos, foram introduzidos 110 kg/min de água fresca na demanda para o chuveiro do filtro de refugo. Porém antes da introdução de água, a mesma quantidade foi retirada de um ponto e desviada para o couch pit com o objetivo de manter o equilíbrio mássico. Paralelamente, foi necessário introduzir mais 210 kg/min de água fresca no filtrado dos filtros tambor. Observando a tabela 23, essa fonte foi escolhida por conter grande quantidade de sólidos dissolvidos e baixa consistência. Novamente, parte dessa fonte deve ser extraída para manter o equilíbrio mássico. Percebe-se que para esse caso, é aceitável enviar a parte extraída para o efluente pelo fato de não haver perdas significativas de fibras, pois a concentração da mesma é baixa.

A figura 5.10 esquematiza as modificações feitas no caso 3 para atingir o limite estabelecido para os sólidos dissolvidos.

Figura 5.10 - Modificações no caso 3 para atingir limites permitidos para concentração de sólidos dissolvidos

Para verificar a influência dos métodos aplicados na vazão de efluentes, as tabelas 29 e 30 mostram a quantidade de água e fibras enviadas para o tratamento de efluentes:

Tabela 29 - Vazão total de água nos efluentes para cada caso (em kg/min)

Descrição	Original	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	Caso 3 corrigido	LP Processo Integrado
		Caso 1	Caso 2	Caso 3		Caso 4
Transbordo da torre de água clara	1396,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Depuração na TMP	123,4	101,3	99,3	97,7	113,1	133,3
Filtrado turvo do filtro save-all	0,0	13,6	7,62	0,0	0,0	0,0
Saída dos filtros tambores	0,0	0,0	0,0	0,0	208,8	0,0
Saída do tanque de água filtrada	0,0	0,0	0,0	101,2	235,9	0,0
Saída dos cleaners do 4º estágio	907,5	915,1	896,4	914,9	914,6	903,2
Saída de água das prensas da MP	1855,7	1870,3	1838,8	1869,9	1868,4	1838,1
TOTAL Efluentes	4282,6	2900,3	2842,1	2983,7	3340,8	2874,6
Água fresca TOTAL	4207,0	2604,3	2546,7	2886,1	3243,3	2878,5

Tabela 30 - Vazão total de fibras nos efluentes para cada caso (em kg/min).

Descrição	Original	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	Caso 3 corrigido	LP Processo Integrado
fibras		Caso 1	Caso 2	Caso 3		Caso 4
Fibras no transbordo da torre de água clara	0,66	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Fibras na depuração na TMP	4,71	3,87	3,78	3,75	4,33	5,14
Fibras no filtrado turvo do filtro save-all	0,00	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00
Fibras dos filtros tambores	0,00	0,00	0,00	0,00	0,11	0,00
Fibras do tanque de água filtrada	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,00
Fibras na saída dos cleaners do estágio 4	4,20	4,21	4,55	4,22	4,21	4,42
Fibras na saída das prensas da MP	8,56	8,56	9,46	8,59	8,59	9,18
TOTAL	18,13	16,70	17,82	16,61	17,34	18,74

Conforme mostra a tabela 29, a grande diferença do caso original em relação aos processos otimizados, está na quantidade de água que transborda da torre de água clara. Evitar o transbordo dessa grande quantidade de efluentes significa aumentar a quantidade de fibras e sólidos e dissolvidos dentro do circuito. Portanto, mais um motivo que influenciou o desbalanceamento das correntes otimizadas em relação às originais pode ser considerado, pois após eliminar o transbordo, as quantidades de fibras diminuíram na maioria dos casos.

6 CONCLUSÃO

Um dos objetivos do trabalho foi utilizar os métodos pinch e programação linear para o circuito de água residual em máquina de papel e produção de pasta mecânica. Diferentemente de literatura prévia, onde um estudo de caso tratava do circuito de água praticamente aberto no sistema de vácuo da máquina de papel, o presente trabalho utiliza um sistema que opera com uma torre de resfriamento, além do caso industrial ser validado realisticamente apesar de toda a complexidade decorrente de tal abordagem.

Através dos resultados, demonstra-se que reduções de 38% são possíveis ao considerar os valores da otimização por método Pinch somente para a máquina de papel. Para o mesmo caso utilizando programação linear, a redução foi de 40%. Considerando o processo integrado da máquina de papel com fabricação de TMP, ou seja, um caso mais interessante para a unidade industrial, a redução por método Pinch e por programação linear atingiu 31%. Mas como muitas concentrações limites de finos e sólidos dissolvidos foram ultrapassadas após o teste por simulação, foi necessário escolher um caso para iniciar uma análise com correção do circuito de água. A partir do caso escolhido, ou seja, do processo integrado da máquina de papel com fabricação de TMP utilizando método Pinch, novos valores para as correntes foram encontrados para não ultrapassar os limites estabelecidos. A redução para esse caso foi de 23%, ou seja, um valor ainda significativo para a unidade industrial.

Minimizar o consumo de água utilizando métodos de otimização gráfica ou através de programação matemática pode se tornar uma ferramenta eficaz na medida em que dados são coletados de forma confiável. Porém dados de vazão, temperatura e consistência de cada corrente não são suficientes para obter resultados expressivos que conduzam à implementação do processo otimizado em escala real.

Para o método utilizado no presente trabalho, é muito importante definir valores limites para concentração de contaminantes de cada equipamento, assim como a concentração prejudicial para o processamento contínuo de pasta mecânica e papel imprensa. Infelizmente, esses valores não são de fácil acesso e devem ser cuidadosamente estudados e analisados antes de sua definição. Impor diferentes valores limites para o mesmo estudo de caso gera grandes impactos no resultado final, independente do método de otimização utilizado. Operacionalmente, o limite de concentração deve ser avaliado qualitativa e quantitativamente, pois tal valor pode ocasionar o mau funcionamento de um equipamento ou a contaminação do produto final.

Apesar de dados serem coletados de uma unidade fabril real, as incoerências dos primeiros resultados foram freqüentes, pois transportar um processo produtivo real para um simulador não foi uma tarefa simples. O que pôde ser feito foi uma aproximação, sob hipóteses, dos parâmetros de equipamentos e das correntes em questão. Além disso, lidar com uma corrente de polpa de madeira significa, por natureza, trabalhar com concentrações variáveis de contaminantes, fibras e outros compostos inorgânicos no decorrer do processo. Isso ocorre porque a matéria-prima é oriunda de diferentes tipos de árvores, que por sua vez é originada de diferentes climas e solos.

Sendo assim, o processo produtivo não foi reproduzido no modelo de forma detalhada, o que contribuiu com alguns desvios observados nos dados simulados. Outras divergências ocorreram pelo fato da unidade fabril não conter medidores de vazão e de concentração de contaminantes suficientes para analisar o processo de forma minuciosa, o que acarretou no uso de outras fontes de dados como referências bibliográficas, fluxogramas de projeto e dados de outras fábricas. A dificuldade em transferir os dados reais para o simulador causou desvios inevitáveis, decorrentes de variações imprevisíveis do processo real que não são reproduzidas na simulação.

Os desvios dos dados simulados também ocorreram devido à complexidade em fechar um balanço completamente integrado. A fábrica não foi simulada

de forma detalhada com controles de nível, de pressão ou de temperatura, principalmente por falta de informações e por se tratar somente de um balanço de massa. Porém todas as etapas mais importantes da fabricação de papel imprensa e pasta mecânica foram incorporadas na simulação. E quando correntes reais são manipuladas, é possível, apesar dos desvios, discutir a viabilidade dos resultados com mais confiança.

A utilização de um simulador é imprescindível para acompanhar e analisar os resultados do processo otimizado. O software Cadsim correspondeu com o objetivo do trabalho por se tratar de uma ferramenta desenvolvida para o setor de celulose e papel. Simular dados se torna bastante prático quando há possibilidade de analisar variáveis de forma dinâmica. O comportamento de determinada corrente pode ser acompanhado no momento em que uma variável em estudo é alterada, o que torna a análise mais visível.

Porém o tempo para atingir o processo em regime permanente foi relativamente alto, o que dificultou a execução do trabalho. Isso está relacionado principalmente com a complexidade do sistema em simulação, onde os ajustes dos parâmetros de controle não foram perfeitamente adequados. Alterações em algumas correntes foram feitas para estabilizar a simulação de forma mais rápida, porém cuidados foram tomados para que não houvesse divergências em outras correntes. Ajustar parâmetros de controladores e de equipamentos operacionais é um desafio que exige bons conhecimentos específicos e não foi contemplado de forma detalhada.

Quanto à praticidade dos métodos de otimização utilizados, vantagens e dificuldades foram encontradas durante o trabalho. Em todos os casos foi verificado um problema pelo fato das vazões e concentrações de fontes e demandas se alterarem a cada caso aplicado, conforme tabelas de 21 a 26 mostradas na seção anterior. Este resultado é justamente o que Hallale (2002) conclui em sua publicação. Sendo assim, há deficiências de aplicação dos métodos que, muitas vezes, não são consideradas por alguns autores justamente por não haver verificação dos resultados no simulador.

O método Pinch demonstrou uma praticidade maior, pois foi possível manipular poucas correntes para tentar reduzir o consumo de água fresca. Além disso, a facilidade em utilizar graficamente a ferramenta de otimização pode motivar a equipe de engenheiros e operadores da unidade fabril. Não é o que ocorre com a programação matemática, onde a falta de familiaridade com funções e restrições lineares ou não lineares pode ocasionar erros durante a interpretação de resultados. A única desvantagem do método Pinch é que como há correntes atingindo valores até 55000 kg/min e outros inferiores a 50 kg/min, ou seja, desprezível em relação à corrente de maior valor, a visualização no gráfico é dificultada.

Quando um objetivo é estabelecido, a preocupação com o custo de implantação e modificação no processo produtivo deve ser considerada. No presente trabalho, por exemplo, o objetivo principal foi a aplicação de técnicas gráficas e matemáticas como alternativas de auxílio aos engenheiros da unidade industrial. Não foi objeto de estudo a implantação de uma alternativa em que o consumo de água fresca seja reduzido ao mesmo tempo em que o custo de operação e implantação é minimizado. Ou seja, o custo para implantação de novas tubulações, válvulas, tanques ou bombas são desconsideradas. Porém, a inclusão de restrições de custos poderá futuramente ser incorporada em técnicas de programação matemática como complemento ao presente trabalho.

Apesar de resultados perfeitamente expressivos não serem encontrados, é possível dizer que todo o trabalho realizado contribuiu de forma positiva para a análise e aplicação de técnicas que minimizem o consumo de água e a geração de efluentes. Teoricamente, resultados mostraram que através de algumas modificações, o circuito de água pode ser otimizado. Porém sua aplicação em escala real ainda deve ser amplamente analisada por engenheiros da unidade fabril junto com pesquisadores.

Como mencionado anteriormente, o presente trabalho pode futuramente ser contemplado com estudos mais abrangentes envolvendo, por exemplo, a taxa

de retorno de investimento e custos operacionais relacionados a novas alternativas. Outro trabalho interessante a ser feito futuramente para fabricantes de pasta mecânica é estudar a integração de processos envolvendo consumo de energia e fluxos mássicos. Como a indústria de pastas mecânicas é consumidora intensiva de energia elétrica e água, é importante analisar pontos ótimos de operação através de suas correlações. Um caso a ser estudado, por exemplo, é o local ótimo para utilizar o vapor extraído durante a refinação de cavacos, o que pode afetar fluxos mássicos em determinadas partes do processo.

Pesquisas com o intuito de beneficiar o uso consciente de recursos naturais em indústrias devem ser difundidas, principalmente em uma época em que a indústria brasileira investe de forma intensiva para aumentar suas capacidades produtivas. Como o consumo específico de energia e água deve ser preferencialmente minimizado, trabalhos como esse se tornam úteis ao serem desenvolvidos com seriedade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Redhwan, S.A.; Crittenden, B.D.; Lababidi, H.M.S. Wastewater minimization under uncertain operational conditions. *Chemical Engineering Science* 29 (5) 1009-1021 2005.
- Aly, S.; Abeer, S.; Awad, M. A New Systematic Approach for Water Network Design. *Clean Technology and Environmental Policy* 7 (3) 154-161 2005.
- Alva-Argaéz, A.; Kokossis, A.C.; Smith, R. Wastewater Minimization of Industrial Systems Using an Integrated Approach. *Computers and Chemical Engineering*. 22 (Suppl) S741-S744. 1998.
- Andersen, M.; Kristensen, G.H.; Wenzel, H. Tools for evaluation of water reuse scenarios in industry. *in: 2nd International Conference on Industrial Wastewater Recovery and Reuse*. Cranfield University. 17 July 2002
- Bagajewicz, M. A Review of Recent Procedures for Water Network in Refineries and Process Plants. *Computer and Chemical Engineering* 24 (9-10) 2093-2113. 2000.
- Bagajewicz, M.; Savelski, M.; On the use of linear models for the design of water utilization systems in process plants with a single contaminant. *Chemical Engineering Research and Design* 79 (A5) 600-610. 2001.
- Björkqvist, J.; Roslöf, J.; Söderman, J.; Petterson, F.; Westerlund, T. Mathematical Programming Methods for Industrial Applications. *Proceedings of the International Conference on Process Integration, PI'99, Copenhagen, Denmark*. 3p. 1999.
- Cao, K.; Feng, X.; Ma, H. Pinch multi-agent genetic algorithm for optimizing water-using networks. *Computers and Chemical Engineering* (in press) 2007.
- Dabros, M ; Perrier, M ; Forbes, F ; Fairbanks, M ; Stuart, P. Model-based direct search optimization of the broke recirculation system in a newsprint mill. *Journal of Cleaner Production* 13 (12) 1416 –1423. 2005
- Dhole, V.R.; Ramchandani, N.; Tainsh, R. A.; Wasilewski, M. Make your process water pay for itself”, *Chemical Engineering*, 103 (1) 100-103.1996.
- Dunn, R.F.; Wenzel, H. Process Integration Design Methods for Water Conservation and Wastewater Reduction in Industry, Part 1: Design for Single Contaminants. *Clean Products and Processes* 3 (3) 307-318 2001.
- Dunn, R.F.; Wenzel, H.; Overcash, M.R. Process Integration Design Methods for Water Conservation and Wastewater Reduction in Industry, Part 2: Design for Multiple Contaminants. *Clean Products and Processes* 3 (3) 319-329 2001.

Dunn, R.F; Wenzel, H. Process Integration Design Methods for Water Conservation and Wastewater Reduction in Industry, Part 3: Experience of industrial application. *Clean Products and Processes* 4 (1) 16-25. 2002

Dunn, F.R.; El-Halwagi, M.M. Process Integration Technology Review: Background and Applications in the Chemical Process Industry. *J. Chemical Technology and Biotechnology* 78 (9) 1011-1021. 2003.

El-Halwagi, M.M. *Pollution prevention through process integration*. Academic Press; 1997.

El-Halwagi, M.M.; Manousiouthakis, V. Synthesis of mass exchange networks. *AIChE J.* 35 (8) 1233–1244. 1989.

Feng, X.; Wang, B.; Liu, Y. Bottleneck and debottleneck of water-use system. *APCChE2002_WCT 9th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering*. Christchurch, New Zealand, September 29–October 3, 2002.

Foo, C.Y.; Manan, Z.A.; Yunus, R.M.; Aziz, R.A. Maximising Water Recovery through Water Pinch Technology – The Use of Water Cascade Table. *Environment 2003*, Malaysia.

Hamad, A.; Aidan, A.; Douboni, M. Cost-effective wastewater treatment and recycling in mini-plants using mass integration. *Clean Technologies and Environmental Policy* 4 (4) 246-256. 2003

Hallalle, N. A new graphical targeting method for water minimisation. *Advances in Environment Research* 6 (3) 377-390. 2002.

Jacob, J.; Kaipé, H.; Couderc, F.; Paris, J. Water Network Analysis in Pulp and Paper Processes by Pinch and Linear Programming Techniques. *Chemical Engineering Communication* 189 (2) 184 – 206. 2002

Jödicke, G.; Fischer, U.; Hungerbühler, K. Wastewater reuse: a new approach to screen for designs with minimal total costs. *Computers and Chemical Engineering* 25 (2-3) 203-215. 2001

Jutila, L ; Leiviska, K. The Use of Computer Simulation in the Pulp and Paper Industry. *Mathematics and Computers in Simulation* 23 (1) 1-11. 1981

Kuo, J. A combined approach to water minimization and effluent treatment system design. PhD Thesis, Department of Process Integration, UMIST, Manchester, UK. 1996.

Lappalainen, T ; Mäkinen, M. Dynamic plant simulation of DCS on newsprint paper machine. *The 47th Conference on Simulation and Modelling Conference*, Helsinki, September 27-29, 2006

Majozi, T. An effective technique for wastewater minimisation in batch processes. *Journal of Cleaner Production* 13 (15) 1374 –1380. 2005.

Manan, Z.A.; Tan, Y.L.; Foo, D.C.Y. Targeting the minimum water flow rate using water cascade analysis technique *AIChE Journal* 50 (12) 3169-3183. 2004

Mann, J.G. and Y.A. Liu, *Industrial Water Reuse and Wastewater Management*. McGraw-Hill, 1999.

Mann, J. G. *Process Integration: Unifying Concepts, Industrial Applications and Software Implementation*. PhD Thesis, Blacksburg, VA.1999.

Mariano-Romero C.E.; Alcocer-Yamanaka, V.H.; Morales, E.F. Multi-objective optimization of water-using systems. *European Journal of Operational Research* 181 (3) 1691-1707. 2007.

Mierzwa, J.C; Hespanhol. I., *Água na Indústria – Uso racional e reuso*. São Paulo, Oficina de Textos, 2005.

Mutjé, P.; Pélach, M.A.; Turon, X.; Labidi, J. Analisis y optimizacion de redes de agua en fabricas de papel. *Ciadicy2002. II Congreso IberoAmericano en Celulosa y Papel*. 11p. Campinas, Oct 2002.

Oliveira, L.C. Estudo preliminar de balanços de consumo de água fresca na fabricação de papel imprensa. Monografia de Especialização em Papel e Celulose. Dep. Engenharia Química. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2004.

Papalexandri, K.P.; Pistikopoulos, E.N.; Floudas, C.A. Mass-exchange networks for waste minimization - a simultaneous approach. *Chemical Engineering Research and Design* 72 (A3): 279-294 May 1994.

PAPRICAN. *Water Use Reduction in the Pulp and Paper Industry*. Pulp and Paper Research Institute of Canada, 2nd ed, 2001

Prakash, R.; Shenoy V.U. Targeting and design of water networks for fixed flowrate and fixed contaminant load operations. *Chemical Engineering Science* 60 (1) 255-268. 2005.

Savulescu, L.; Poulin, B.; Hammache, A.; Bedard, S.; Gennaoui, S. Water and energy savings at a kraft paperboard mill using process integration. *Pulp and Paper - Canada* 106 (9): 29-31, 2005

Smith, R. State of the art in Process Integration. *Applied Thermal Engineering* 20 (15-16) 1337 – 1345. 2000.

Sundholm, J. (ed.) *Mechanical Pulping. Papermaking Science and Technology Series*. Published in cooperation with the Finnish Paper Engineers' Association and TAPPI. Helsinki, Finland. 1999

Syberg, O.; Wild, N.W.; Simons, H.A. (eds.) *Introduction to process Simulation*. 2nd edition. Tappi Press, Atlanta. 1992

Tan, Y.L.; Zainuddin, A.M.; Foo, Y.C. Water Minimization by Pinch Technology – Water Cascade for Minimum Water and Wastewater Targeting. *APCCHE2002_WCT 9th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering*. Christchurch, New Zealand, September 29–October 3, 2002.

Turon, X.; Labidi, J.; Paris, J. Simulation and optimisation of a high grade coated paper mill. *Journal of Cleaner Production* 13 (12) 1424–1433. 2005

Wang, Y.P.; Smith, R. Wastewater minimization with flowrate constraints. *Chemical Engineering Research and Design* 73 (A8) 889-904. 1995

Wang, Y.P.; Smith, R. Waste-water Minimization. *Chemical Engineering Science*. 49 (7) 981-1006. 1994.

Yang, Y.H.; Lou, H.H.; Huang, Y.L. Synthesis of an Optimal Wastewater Reuse Network”, *Waste Management* 38 (5) 311-319. 2000.

APÊNDICE A

Esse apêndice mostra a comparação de dados simulados para os quatro estudos de casos. Estão tabelados os dados de vazão mássica de água e de concentrações de fibras e sólidos dissolvidos.

Tabela A1 - Comparação de vazões de água dos casos pós otimizados (em kg/min)

Corrente	Vazão mássica de água	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Saída de cavaco do silo (linha 1)	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0
Entrada de polpa no refinador primário (linha 2)	260,0	260,0	260,0	260,0	260,0
Água de diluição no refinador primário (linha 2)	356,2	355,9	355,8	356,0	358,3
Saída de polpa do refinador primário (linha 2)	311,1	309,9	310,0	317,1	330,3
Entrada de polpa no refinador secundário (linha 2)	311,1	309,9	310,0	317,1	330,3
Água de diluição no refinador secundário (linha 2)	384,1	383,7	383,6	381,1	335,7 ^(a)
Saída de polpa do refinador secundário (linha 2)	328,4	327,3	327,8	335,1	317,1
Água de diluição do tanque de Latência linha 1	8279,3	8479,0	8600,5	8261,9	8158,8
Água fresca para TMP	786,8	568,3	510,7	66,6	150,1
Saída de polpa do tanque de latência	9394,3	9375,0	9438,9	9343,3	9078,9
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	4556,5	4542,2	4606,5	4511,5	4238,9
Saída da polpa do refinador baixa consistência	4556,5	4542,2	4606,5	4511,5	4238,9
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	4838,1	4832,7	4832,3	4831,8	4840,0
Saída de polpa do refinador baixa consistência	4838,1	4832,7	4832,7	4831,8	4840,0
Saída de polpa do tanque de latência linha 2	9394,6	9374,9	9438,9	9343,3	9079,0
Entrada de polpa na depuração primária (linha 2)	9394,6	9374,9	9438,9	9343,3	9079,0
Aceite da depuração primária (linha 2)	5800,0	5800,0	5800,0	5800,0	5800,0
Rejeito da depuração primária (linha 2)	3594,6	3574,6	3638,9	3543,3	3278,9

Corrente	Vazão mássica de água	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Diluição de rejeito (linha 2)	39,8	39,8	39,8	40,0	39,8
Entrada polpa na depuração secundária (linha 2)	3511,1	3514,4	3579,3	3485,8	3184,7
Aceite da depuração secundária (linha 2)	2100,0	2100,0	2100,0	2100,0	2100,0
Rejeito da depuração secundária (linha 2)	1411,0	1414,4	1479,6	1385,8	1084,7
Diluição rejeito da depuração secundária (linha 2)	54,7	54,7	54,7	55,0	55,2
Entrada de polpa no refinador primário (linha 1)	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
Água de diluição no refinador primário (linha 1)	94,0	93,9	93,4	94,0	94,3 ^(b)
Saída de polpa do refinador primário (linha 1)	114,3	113,7	113,2	113,3	113,1
Entrada de polpa no refinador primário (linha 1)	244,5	245,2	248,9	243,8	222,5
Água de diluição no refinador secundário (linha 1)	61,5	61,5	61,9	63,3	45,7 ^(c)
Saída de polpa do refinador secundário (linha 1)	275,4	276,2	280,3	282,7	253,9
Entrada de polpa no refinador de rejeitos	109,1	109,0	108,9	109,1	109,2
Água de diluição no refinador de rejeitos	47,2	47,1	47,1	47,1	47,3
Saída de polpa do refinador de rejeitos	153,9	153,9	153,1	154,0	153,3
Água de diluição do tanque de Latência	4946,3	4941,3	4900,2	4885,2	4991,6
Entrada de polpa na depuração primária (linha 1)	5375,6	5370,5	5373,6	5321,8	5398,7
Aceite da depuração primária (linha 1)	4225,6	4220,5	4223,6	4171,8	4248,7
Rejeito da depuração primária (linha 1)	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0	1150,0
Entrada de polpa na prensa 2	946,4	945,4	945,4	945,9	946,9
Saída da Polpa da Prensa 2	109,1	109,1	109,0	109,1	109,2
Filtrado da Prensa 2	847,3	846,4	846,4	846,9	847,8
Entrada de polpa na prensa 1	1129,6	1140,7	1177,0	1131,8	947,3
Saída da Polpa da Prensa 1	120,2	131,5	135,7	130,5	109,2

Corrente	Vazão mássica de água	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Aceite da peneira inclinada (após depuração)	605,7	599,3	629,5	570,0	455,1
Rejeito da peneira inclinada (após depuração)	2000,6	2010,3	2045,3	2002,3	1825,4
Entrada na peneira inclinada (após prensa)	1856,7	1865,6	1897,7	1858,2	1695,9
Aceite da peneira inclinada (após prensa)	1781,2	1789,8	1820,6	1782,7	1627,0
Rejeito da peneira inclinada (após prensa)	75,4	75,8	77,1	75,5	68,9
Entrada de polpa no filtro a disco	4225,6	4220,5	4223,6	4171,8	4248,7
Saída da polpa do filtro a disco	1795,0	1798,3	1835,1	1793,7	1713,8
Filtrado claro do filtro a disco	2537,3	2530,6	2506,9	2499,4	2610,3
Filtrado turvo do filtro a disco	1087,2	1084,3	1074,2	1070,0	1118,5
Água do chuveiro do filtro a disco	1193,9	1192,7	1192,6	1192,2	1183,8
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 1	5957,3	5959,4	5959,5	5959,8	5956,5
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 1	2071,4	2069,3	2069,7	2078,2	2079,9
Filtrado do conjunto filtro tambor 1	4097,7	4099,4	4089,6	4095,4	4271,9
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 1	211,8	209,8	199,7	213,9	395,3
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 2	1942,7	1940,6	1940,5	1940,2	1943,5
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 2	675,4	673,9	673,8	680,9	679,6
Filtrado do filtro conjunto filtro tambor 2	1446,4	1445,6	1445,5	1438,1	1442,9
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 2	179,1	178,9	178,9	178,8	179,1
Entrada de polpa no filtro save-all 2	13626,2	13611,1	13613,2	13615,3	13611,7
Saída da polpa do filtro save-all 2	3500,5	3569,7	3464,9	3503,2	3563,7
Filtrado claro do filtro save-all 2	7933,5	7871,9	7919,6	7926,9	7872,2
Filtrado superclaro do filtro save-all 2	1058,1	1049,8	1056,2	1057,2	1049,9
Filtrado turvo do filtro save-all 2	1582,7	1570,4	1579,9	1581,4	1570,5

Corrente	Vazão mássica de água	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Água do chuveiro do filtro save-all 2	449,0	450,9	407,7	453,4	444,6
Entrada de polpa no filtro save-all 1	16186,7	16166,8	16191,1	16358,8	16131,1
Saída da polpa do filtro save-all 1	4053,7	4137,1	4017,2	4103,8	4120,2
Filtrado claro do filtro save-all 1	9517,2	9438,4	9547,1	9607,4	9424,8
Filtrado superclaro do filtro save-all 1	1058,1	1258,8	1273,3	1281,3	1257,1
Filtrado turvo do filtro save-all 1	1894,9	1879,2	1900,8	1912,8	1876,5
Água do chuveiro do filtro save-all 1	548,4	546,5	547,3	546,6	547,4
Saída de polpa do tanque 3 de TMP	4541,8	4542,0	4578,6	4552,9	4473,3
Saída de polpa do tanque 2 de TMP	3311,1	3306,0	3307,3	3309,5	3312,2
Saída de polpa do tanque 1 de TMP	3969,3	3972,6	4083,9	4175,1	3434,4
Água de diluição para tanque 1 de TMP	1254,9	1252,1	1309,0	1379,0	794,9
Água de diluição para tanque de branqueado	1483,3	1484	1503,4	1552,7	1479,3
Saída de polpa do tanque de celulose	980,0	980,0	980,0	980,0	980,0
Saída de polpa do tanque de mistura	11002,0	11383,9	11135,1	11463,4	10711,8
Saída do tanque de massa recuperada	7554,3	7487,1	7482,2	7607,0	7683,9
Saída do tanque de água da tela	26382,7	26328,6	26330,9	26479,8	26295,8
Entrada no cleaner 4º estágio (4 cleaners)	1516,5	1524,2	1495,8	1526,4	1508,9
Aceite do cleaner 4º estágio	607,2	610,3	599,4	611,2	604,6
Entrada no cleaner 3º estágio (31 cleaners)	3371,2	3388,5	3325,2	3393,4	3354,3
Aceite do cleaner 3º estágio	1854,8	1864,3	1829,4	1867,0	1845,4
Rejeito do cleaner 3º estágio	1516,5	1524,2	1495,8	1526,4	1508,9
Entrada no cleaner 2º estágio (49 cleaners)	11024,2	11080,6	10870,8	11096,8	10967,3
Aceite do cleaner 2º estágio	8260,1	8302,4	8145,0	8314,6	8217,6
Rejeito do cleaner 2º estágio	2764,1	2778,2	2725,7	2782,3	2749,13

Corrente	Vazão mássica de água	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Entrada no cleaner 1º estágio (157 cleaners)	54924,9	55206,7	54157,2	55287,4	54645,6
Aceite do cleaner 1º estágio	43900,7	44126,0	43286,4	44190,6	43678,2
Rejeito do cleaner 1º estágio	11024,2	11080,6	10870,8	11096,8	10967,3
Água branca na seção de formação 1	41310,4	41509,2	40752,6	41567,1	40777,8
Água branca na seção de formação 2	13012,8	13075,4	12837,1	13093,3	12845,0
Polpa após seção de formação	2283,9	2294,9	2253,1	2298,1	2254,5
Saída do couch Pit	1765,4	2031,1	1756,3	1764,1	1570,7
Água branca na seção de prensa	1859,1	1868,1	1838,5	1870,7	1839,6
Polpa após seção de prensa	424,8	426,9	414,6	427,4	414,8
Polpa após secador	31,3	30,7	30,8	31,0	29,9
Após silo: mistura para consistência 1%	54924,9	52206,7	54157,2	55287,4	54645,5
Saída do tanque de refugo	754,4	877,4	744,4	857,2	756,8
Entrada filtro de refugo	1862,1	2127,8	1852,9	1860,8	1667,4
Saída da polpa do filtro de refugo	754,4	877,4	744,4	857,2	756,8
Filtrado do filtro de refugo	1406,8	1549,4	1407,6	1275,6	1210,6
Água do chuveiro do filtro de refugo	299,1	299,1	299,1	272,0	300
Entrada na depuração antes da caixa de entrada	54015,6	54292,7	53260,9	54372,1	53741,2
Aceite da depuração	53955,6	54232,7	53200,9	54312,2	53681,2
Água fresca para Máquina de Papel	3420,0	2236,0	2240,0	2824,0	2585,0

(a) uma parte de corrente, 34,9 L/min do total da corrente de 370,6 L/min, teve de ser suprido por água fresca. (b) valor teve de ser suprido por água fresca. (c) uma parte de corrente, 14,7 L/min do total da corrente de 61,5 L/min, teve de ser suprido por água fresca

Tabela A2 - Comparação para consistências dos casos pós otimizados (em %)

Corrente	Consistência	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Saída de cavaco do silo (linha 1)	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
Entrada de polpa no refinador primário (linha 2)	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
Água de diluição no refinador primário (linha 2)	0,082	0,0790	0,097	0,299	0,077
Saída de polpa do refinador primário (linha 2)	45,000	45,000	45,000	44,565	45,000
Entrada polpa no refinador secundário (linha 2)	45,000	45,000	45,000	44,565	45,000
Água de diluição no refinador secundário (linha 2)	0,082	0,079	0,097	0,299	0,077
Saída de polpa do refinador secundário (linha 2)	44,000	44,000	44,000	43,700	44,000
Água de diluição do tanque de latência (linha 1)	0,082	0,079	0,097	0,050	0,081
Água fresca para TMP	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
Saída de polpa do tanque de latência	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800
Saída da polpa do refinador baixa consistência	2,770	2,770	2,770	2,766	2,766
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	2,800	2,800	2,800	2,800	2,800
Saída de polpa do refinador baixa consistência	2,770	2,760	2,766	2,766	2,766
Saída de polpa do tanque de latência (linha 2)	2,770	2,770	2,766	2,766	2,770
Entrada de polpa na depuração primária (linha 2)	2,770	2,770	2,766	2,766	2,770
Aceite da depuração primária (linha 2)	2,180	2,180	2,179	2,179	2,182
Rejeito da depuração primária (linha 2)	3,700	3,700	3,688	3,713	3,782
Diluição de rejeito na depuração primária (linha 2)	0,082	0,079	0,097	0,299	0,005
Entrada polpa na depuração secundária (linha 2)	3,660	3,665	3,650	3,676	3,739
Aceite da depuração secundária (linha 2)	2,970	2,962	2,962	2,962	2,967
Rejeito da depuração secundária (linha 2)	4,660	4,667	4,610	4,738	5,199
Diluição rejeito da depuração secundária (linha 2)	0,082	0,079	0,097	0,299	0,005

Corrente	Consistên cia	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Entrada de polpa no refinador primário (linha 1)	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
Água de diluição no refinador primário (linha 1)	0,300	0,300	0,300	0,400	0
Saída de polpa do refinador primário (linha 1)	34,800	34,860	34,950	34,980	35,000
Entrada de polpa no refinador secundário (linha 1)	31,800	31,800	31,844	31,920	32,200
Água de diluição no refinador secundário (linha 1)	0,300	0,300	0,300	0,398	0,050
Saída de polpa do refinador secundário (linha 1)	29,000	29,000	29,000	28,491	29,000
Entrada de polpa no refinador de rejeitos	29,000	29,000	29,000	29,000	29,000
Água de diluição no refinador de rejeitos	0,300	0,300	0,300	0,398	0,050
Saída de polpa do refinador de rejeitos	22,200	22,320	22,300	22,237	22,270
Água de diluição do tanque de latência	0,080	0,079	0,097	0,028	0,135
Entrada de polpa na depuração primária (linha 1)	2,930	2,940	2,981	2,903	2,795
Aceite da depuração primária (linha 1)	2,880	2,894	2,950	2,848	2,710
Rejeito da depuração primária (linha 1)	3,100	3,100	3,100	3,104	3,105
Entrada de polpa na prensa 2	4,900	4,900	4,900	4,904	4,904
Saída da Polpa da Prensa 2	29,000	29,000	29,000	29,000	29,000
Filtrado da Prensa 2	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Entrada de polpa na prensa 1	4,900	4,900	4,900	4,904	4,903
Saída da Polpa da Prensa 1	29,000	29,000	29,000	29,000	29,000
Aceite da peneira inclinada (após depuração)	0,400	0,400	0,400	0,400	0,400
Rejeito da peneira inclinada (após depuração)	4,900	4,900	4,900	4,900	4,900
Entrada na peneira inclinada (após prensa)	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Aceite da peneira inclinada (após prensa)	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Rejeito da peneira inclinada (após prensa)	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000

Corrente	Consistên cia	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Entrada de polpa no filtro a disco	2,900	2,897	2,949	2,845	2,710
Saída da polpa do filtro disco	6,500	6,500	6,500	6,500	6,500
Filtrado claro do filtro disco	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
Filtrado turvo do filtro disco	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Água do chuveiro do filtro disco	0,040	0,042	0,042	0,306	0,177
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 1	2,390	2,390	2,388	2,388	2,392
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 1	6,500	6,500	6,500	6,500	6,500
Filtrado do conjunto filtro tambor 1	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 1	0,040	0,042	0,042	0,306	0,177
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 2	2,390	2,390	2,388	2,388	2,392
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 2	6,500	6,500	6,500	6,500	6,500
Filtrado do filtro conjunto filtro tambor 2	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 2	0,040	0,042	0,042	0,306	0,177
Entrada de polpa no filtro save-all 2	1,010	1,024	1,002	1,007	1,028
Saída da polpa do filtro save-all 2	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600
Filtrado claro do filtro save-all 2	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Filtrado superclaro do filtro save-all 2	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
Filtrado turvo do filtro save-all 2	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
Água do chuveiro do filtro save-all 2	0,050	0,050	0,050	0,299	0,145
Entrada de polpa no filtro save-all 1	1,010	1,012	1,002	1,007	1,028
Saída da polpa do filtro save-all 1	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600
Filtrado claro do filtro save-all 1	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
Filtrado superclaro do filtro save-all 1	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025

Corrente	Consistên cia	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Filtrado turvo do filtro save-all 1	0,500	0,500	0,500	0,500	0,500
Água do chuveiro do filtro save-all 1	0,050	0,050	0,133	0,299	0,145
Saída de polpa do tanque 3 de TMP	6,500	6,500	6,500	6,500	6,500
Saída de polpa do tanque 2 de TMP	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
Saída de polpa do tanque 1 de TMP	3,500	3,600	3,500	3,500	3,900
Água de diluição para tanque 1 de TMP	0,082	0,290	0,152	0,304	0,065
Água de diluição para tanque de branqueado	0,082	0,290	0,108	0,301	0,152
Saída de polpa do tanque de celulose	3,540	3,540	3,543	3,540	3,540
Saída de polpa do tanque de mistura	3,720	3,729	3,722	3,715	3,752
Saída do tanque de massa recuperada	3,600	3,600	3,600	3,600	3,600
Saída do tanque de água da tela	1,091	1,074	1,080	1,109	1,108
Entrada no cleaner 4º estágio (4 cleaners)	0,390	0,390	0,378	0,393	0,364
Aceite do cleaner 4º estágio	0,300	0,300	0,189	0,295	0,182
Entrada no cleaner 3º estágio (31 cleaners)	0,350	0,353	0,341	0,354	0,328
Aceite do cleaner 3º estágio	0,320	0,321	0,309	0,321	0,298
Rejeito do cleaner 3º estágio	0,390	0,392	0,378	0,393	0,364
Entrada no cleaner 2º estágio (49 cleaners)	0,660	0,654	0,667	0,654	0,642
Aceite do cleaner 2º estágio	0,750	0,750	0,765	0,750	0,736
Rejeito do cleaner 2º estágio	0,370	0,366	0,374	0,366	0,359
Entrada no cleaner 1º estágio (157 cleaners)	1,000	1,000	1,027	1,007	0,988
Aceite do cleaner 1º estágio	1,100	1,090	1,117	1,095	1,074
Rejeito do cleaner 1º estágio	0,660	0,654	0,667	0,654	0,642
Água branca na seção de formação 1	0,386	0,383	0,392	0,384	0,380
Água branca na seção de formação 2	0,240	0,240	0,244	0,239	0,237

Corrente	Consistên cia	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Polpa após seção de formação	13,000	12,966	13,229	13,001	12,880
Saída do couch Pit	1,140	1,139	1,129	1,263	1,271
Água branca na seção de prensa	0,460	0,455	0,511	0,457	0,496
Polpa após seção de prensa	44,000	43,840	44,000	43,927	43,859
Polpa após secador	91,200	91,200	91,200	91,200	91,200
Após silo: mistura para consistência 1%	1,000	1,000	1,026	1,007	0,988
Saída do tanque de refugo	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Entrada filtro de refugo	1,240	1,225	1,228	1,355	1,373
Saída da polpa do filtro de refugo	3,000	3,000	3,000	3,000	3,000
Filtrado do filtro de refugo	0,010	0,29	0,010	0,010	0,010
Água do chuveiro do filtro de refugo	0,050	0,050	0,050	0,400	0,107
Entrada na depuração antes da caixa de entrada	1,000	1,000	1,036	1,016	0,996
Aceite da depuração	1,000	1,000	1,028	1,008	0,989
Água fresca para Máquina de Papel	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabela A3 - Comparação para concentração de sólidos dissolvidos (SD) dos casos pós otimizados (em ppm ou kg/min)

Corrente	[SD]	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Descrição	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Saída de cavaco do silo (linha 1)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Entrada de polpa no refinador primário (linha 2)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Água de diluição no refinador primário (linha 2)	4066 ppm	5091 ppm	5144 ppm	3289 ppm	3953 ppm
Saída de polpa do refinador primário (linha 2)	4,32	4,69	4,70	4,05	4,29
Entrada polpa no refinador secundário (linha 2)	4,32	4,69	4,70	4,05	4,29
Água de diluição no refinador secundário (linha 2)	4066 ppm	5091 ppm	5144 ppm	3289 ppm	3953 ppm
Saída de polpa do refinador secundário (linha 2)	8,70	9,50	9,54	8,17	8,47
Água de diluição do tanque de latência (linha 1)	4066 ppm	5091 ppm	5144 ppm	5311 ppm	3344 ppm
Água fresca para TMP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Saída de polpa do tanque de latência	42,50	52,9	54,0	54,54	37,48
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	20,60	25,60	26,36	26,33	17,50
Saída da polpa do refinador baixa consistência	22,20	27,20	27,96	27,90	18,97
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	21,90	27,30	27,65	28,20	19,99
Saída de polpa do refinador baixa consistência	23,60	28,90	29,33	29,88	21,66
Saída de polpa do tanque de latência (linha 2)	45,80	56,15	57,29	57,78	40,63
Entrada de polpa na depuração primária (linha 2)	45,80	56,15	57,29	57,78	40,63
Aceite da depuração primária (linha 2)	28,30	34,7	35,20	35,87	25,96
Rejeito da depuração primária (linha 2)	17,50	21,40	22,09	21,91	14,67
Diluição de rejeito na depuração primária (linha 2)	4066 ppm	5091 ppm	5144 ppm	3289 ppm	4455 ppm
Entrada polpa na depuração secundária (linha 2)	17,10	21,01	21,69	21,44	14,25
Aceite da depuração secundária (linha 2)	10,20	12,56	12,73	12,92	9,40
Rejeito da depuração secundária (linha 2)	6,87	8,46	8,97	8,53	4,88

Descrição	[SD]	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Corrente	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Diluição rejeito da depuração secundária (linha 2)	4066 ppm	5091 ppm	5144 ppm	3289 ppm	4455 ppm
Entrada de polpa no refinador primário (linha 1)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Água de diluição no refinador primário (linha 1)	4747 ppm	5816 ppm	5890 ppm	5308 ppm	0 ppm
Saída de polpa do refinador primário (linha 1)	1,19	1,30	1,30	1,25	0,744
Entrada de polpa no refinador secundário (linha 1)	1,77	2,00	2,05	1,89	1,16
Água de diluição no refinador secundário (linha 1)	4747 ppm	5816 ppm	5890 ppm	5308 ppm	4455 ppm
Saída de polpa do refinador secundário (linha 1)	3,45	3,77	3,83	3,63	2,65
Entrada de polpa no refinador de rejeitos	0,47	0,58	0,59	0,53	0,42
Água de diluição no refinador de rejeitos	4747 ppm	5816 ppm	5890 ppm	3985 ppm	4455 ppm
Saída de polpa do refinador de rejeitos	1,25	1,40	1,41	1,33	1,18
Água de diluição do tanque de latência	4066 ppm	5091 ppm	5144 ppm	3826 ppm	3486 ppm
Entrada de polpa na depuração primária (linha 1)	25,20	30,76	31,10	23,72	21,29
Aceite da depuração primária (linha 1)	19,80	24,17	24,44	18,59	16,75
Rejeito da depuração primária (linha 1)	5,39	6,58	6,66	5,13	4,53
Entrada de polpa na prensa 2	4,51	5,53	5,60	5,05	3,98
Saída da Polpa da Prensa 2	0,47	0,58	0,59	0,53	0,42
Filtrado da Prensa 2	4747 ppm	5816 ppm	5890 ppm	5308 ppm	4189 ppm
Entrada de polpa na prensa 1	5,39	6,67	6,97	6,04	3,99
Saída da Polpa da Prensa 1	0,57	0,71	0,74	0,64	0,42
Aceite da peneira inclinada (após depuração)	4747 ppm	5816 ppm	5890 ppm	5308 ppm	4189 ppm
Rejeito da peneira inclinada (após depuração)	9,54	11,76	12,12	10,69	7,68
Entrada na peneira inclinada (após prensa)	8,86	10,91	11,24	9,92	7,13
Aceite da peneira inclinada (após prensa)	4747 ppm	5816 ppm	5890 ppm	5308 ppm	4189 ppm

Descrição	[SD]	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Corrente	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Rejeito da peneira inclinada (após prensa)	0,36	0,44	0,46	0,40	0,29
Entrada de polpa no filtro a disco	19,80	24,17	24,44	18,59	16,75
Saída da polpa do filtro disco	8,41	10,30	10,62	7,59	6,55
Filtrado claro do filtro disco	4662 ppm	5695 ppm	5755 ppm	4212 ppm	3807 ppm
Filtrado turvo do filtro disco	4662 ppm	5695 ppm	5755 ppm	4212 ppm	3807 ppm
Água do chuveiro do filtro disco	4662 ppm	5695 ppm	5755 ppm	3422 ppm	3378 ppm
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 1	29,03	35,68	36,16	36,81	26,66
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 1	10,05	12,34	12,50	12,25	8,88
Filtrado do conjunto filtro tambor 1	4849 ppm	5951 ppm	6031 ppm	6138 ppm	4455 ppm
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 1	4662 ppm	5695 ppm	5754 ppm	3422 ppm	3378 ppm
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 2	9,47	11,62	11,77	11,98	8,69
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 2	3,26	3,98	4,04	3,72	2,85
Filtrado do filtro conjunto filtro tambor 2	4849 ppm	5951 ppm	6031 ppm	6138 ppm	4455 ppm
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 2	4662 ppm	5695 ppm	5754 ppm	3422 ppm	3378 ppm
Entrada de polpa no filtro save-all 2	34,00	47,56	48,60	45,83	46,47
Saída da polpa do filtro save-all 2	8,73	12,45	12,37	11,78	12,15
Filtrado claro do filtro save-all 2	2487 ppm	3477 ppm	3559 ppm	3352 ppm	3399 ppm
Filtrado superclaro do filtro save-all 2	2487 ppm	3477 ppm	3559 ppm	3352 ppm	3399 ppm
Filtrado turvo do filtro save-all 2	2487 ppm	3477 ppm	3559 ppm	3352 ppm	3399 ppm
Água do chuveiro do filtro save-all 2	2487 ppm	3477 ppm	3559 ppm	3289 ppm	3289 ppm
Entrada de polpa no filtro save-all 1	40,40	56,49	57,84	55,06	55,07
Saída da polpa do filtro save-all 1	10,10	14,43	14,35	13,80	14,05
Filtrado claro do filtro save-all 1	2487 ppm	3477 ppm	3558 ppm	3352 ppm	3398 ppm

Descrição	[SD]	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Corrente	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Filtrado superclaro do filtro save-all 1	2487 ppm	3477 ppm	3558 ppm	3352 ppm	3398 ppm
Filtrado turvo do filtro save-all 1	2487 ppm	3477 ppm	3558 ppm	3352 ppm	3398 ppm
Água do chuveiro do filtro save-all 1	2487 ppm	3477 ppm	3558 ppm	3289 ppm	3398 ppm
Saída de polpa do tanque 3 de TMP	21,70	26,62	27,16	23,55	18,27
Saída de polpa do tanque 2 de TMP	13,90	17,34	17,66	15,54	12,84
Saída de polpa do tanque 1 de TMP	14,50	18,48	19,42	17,67	12,88
Água de diluição para Tanque 1 de TMP	2451 ppm	3348 ppm	3502 ppm	3282 ppm	3378 ppm
Água de diluição para tanque de branqueado	2451 ppm	3348 ppm	3524 ppm	3285 ppm	3238 ppm
Saída de polpa do tanque de celulose	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Saída de polpa do tanque de mistura	31,70	43,76	44,08	42,32	37,34
Saída do tanque de massa recuperada	18,80	26,89	26,72	25,59	26,20
Saída do tanque de água da tela	90,72	92,00	93,60	89,13	89,80
Entrada no cleaner 4º estágio (4 cleaners)	3,70	5,29	5,25	5,17	5,01
Aceite do cleaner 4º estágio	1,47	2,12	2,10	2,07	2,00
Entrada no cleaner 3º estágio (31 cleaners)	8,17	11,76	11,68	11,49	11,14
Aceite do cleaner 3º estágio	4,50	6,47	6,43	6,32	6,13
Rejeito do cleaner 3º estágio	3,67	5,28	5,25	5,17	5,01
Entrada no cleaner 2º estágio (49 cleaners)	26,70	38,45	38,18	37,58	36,42
Aceite do cleaner 2º estágio	20,00	28,80	28,61	28,16	27,29
Rejeito do cleaner 2º estágio	6,69	9,64	9,57	9,42	9,13
Entrada no cleaner 1º estágio (157 cleaners)	133,10	191,6	190,22	187,23	141,46
Aceite do cleaner 1º estágio	106,40	153,10	152,04	149,65	145,04
Rejeito do cleaner 1º estágio	26,70	38,45	38,18	37,58	36,42
Água branca na seção de formação 1	2273 ppm	3322 ppm	3400 ppm	3209 ppm	3226 ppm

Descrição	[SD]	Pinch Máquina de Papel	LP Máquina de Papel	Pinch Processo integrado	LP Processo Integrado
Corrente	Original	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
Água branca na seção de formação 2	2273 ppm	3322 ppm	3400 ppm	3209 ppm	3226 ppm
Polpa após seção de formação	5,20	7,64	7,68	7,40	7,29
Saída do couch Pit	4,20	6,80	6,15	5,76	5,08
Água branca na seção de prensa	2273 ppm	3321 ppm	3400 ppm	3209 ppm	3226 ppm
Polpa após seção de prensa	0,90	1,42	1,41	1,38	1,34
Polpa após secador	0,97	1,42	1,41	1,38	1,33
Após silo: mistura para consistência 1%	2417 ppm	3457 ppm	3500 ppm	3375 ppm	3309 ppm
Saída do tanque de refugo	1,83	2,94	2,63	3,38	2,42
Entrada filtro de refugo	4,44	7,13	6,49	6,15	5,39
Saída da polpa do filtro de refugo	1,83	2,94	2,63	3,38	2,42
Filtrado do filtro de refugo	2380 ppm	3338 ppm	3494 ppm	3299 ppm	3222 ppm
Água do chuveiro do filtro de refugo	2487 ppm	2487 ppm	3494 ppm	5308 ppm	3116 ppm
Entrada na depuração antes da caixa de entrada	130,90	188,40	180,07	184,13	178,45
Aceite da depuração	130,70	188,17	186,86	183,92	178,26
Água fresca para Máquina de Papel	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

APÊNDICE B

B1. Programa em Matlab para exemplo ilustrativo 4, “Aplicação de programação matemática para otimização de rede de água para lavagem de polpa celulósica” descrito no capítulo 4.

```

clear all
format short
n = 3;           % n: numero de demandas
m = 4;           % m: numero de fontes
FW = 1300;       % FW: agua fresca disponivel

alpha=[1 1 1 1]; % alpha: m coeficientes p/ reciclo de fibras
                % 1: maximizar o reciclo

% Vazao de Fontes e Demandas
F=[FW;500;2000;400;300];
D=[1200;800;500];

% Concentração de Fibras
Fdef=[0.3;0.1;0.5;0.5];
Ddef=[0.5;0.4;0.1];

% Concentração de Contaminantes
Fdec=[100;110;110;60];
Ddec=[120;105;80];

% Função objetivo para minimizar uso de agua fresca (y)
y=[ones(n,1);zeros(n*m,1)];

%----- Restrições para minimizar função -----
t=n; s=1;
for i=1:1:m+1
    for j=s:1:t
        A1(i,j)=1;
    end
    s=t+1;
    t=t+n;
end

%2)Cada demanda deve ser totalmente satisfeita;
s=1;
for i=1:1:n
    for j=s:n*(m+1)
        A2(i,j)=1;
    end
    s=s+1;
end
end

```

*%3)A quantidade de contaminante fornecida para as demandas nao
% deve ser superior ao valor maximo admitido para tais demandas;*

```
s=n+1;
k=1;
for i=1:1:n
    for j=s:n:n*(m+1)
        A3(i,j)=Fdec(k);
        k=k+1;
    end
    s=s+1;
    k=1;
end
```

*%4)A quantidade de fibras fornecida para as demandas nao deve
% ser superior ao valor maximo admitido para tais demandas;*

```
s=n+1;
k=1;
for i=1:1:n
    for j=s:n:n*(m+1)
        A4(i,j)=Fdef(k);
        k=k+1;
    end
    s=s+1;
    k=1;
end
```

%5)Todas as variaveis devem ser positivas

```
lb = zeros(n*(m+1),1);
```

```
%-----
```

% Englobando a Matriz de inequações A1, A3 e A4, constroi-se a matriz A
A=[A1;A3;A4];

```
for i=1:1:n
    DC(i)=D(i)*Ddec(i);
    DF(i)=D(i)*Ddef(i);
end
```

```
b=[F;DC';DF'];
```

% Matriz de igualdade Aeq e vetor beq

```
Aeq = [A2];
```

```
beq=[D];
```

%Aplicando otimização por LP da função objetivo x1

```
x1 = linprog(y,A,b,Aeq,beq,lb);
```

%Construindo a Matriz Pij da função x1

```
s=0;
for i=1:1:m+1
    for j=1:1:n
        P1(i,j)=x1(j+s);
    end
```

```

    s=s+n;
    SD1(i)=sum(P1(i,:));
end

WW1=F(2:m+1)-SD1(2:m+1)'; %Valores de efluente

fprintf('COM MINIMIZAÇÃO DE AGUA FRESCA\n')
fprintf('Consumo de agua fresca: %g l/min.\n', SD1(1))
fprintf('Vazao de efluente: %g l/min.', sum(WW1))
[P1 [0;WW1]]
fprintf('Vazão de fibras para efluente: %g mg/min.\n\n', WW1'*Fdef)
WW1=int8(sum(WW1));
if sum(WW1)<=0
    fprintf('Reciclo de fibras não necessário\n')
end

if sum(WW1)>0
    % Restricao de vazao minima de agua
    A=[A;A1(1,:);
    b=[b;SD1(1)];

    % Função objetivo para reciclo de fibras (z)
    t=zeros(1,n);
    for i=1:1:m
        alphaf(i)=-alpha(i)*Fdef(i);
        t=[t repmat(alphaf(i),1,n)];
    end
    z=t';

    %Aplicando otimização por LP da função objetivo x2
    x2 = linprog(z,A,b,Aeq,beq,lb);

    %Construindo a Matriz Pij da função x2
    s=0;
    for i=1:1:m+1
        for j=1:1:n
            P2(i,j)=x2(j+s);
        end
        s=s+n;
        SD2(i)=sum(P2(i,:));
    end
    WW2=F(2:m+1)-SD2(2:m+1)'; %Valores de efluente
    fprintf('INCLUINDO RECICLO DE FIBRAS\n');
    fprintf('Consumo de agua fresca: %g l/min.\n', SD2(1))
    fprintf('Vazao de efluente: %g l/min.', sum(WW2))
    [P2 [0;WW2]]
    fprintf('Vazão de fibras para efluente: %g mg/min.\n', WW2'*Fdef)
end

```

B2. Programa desenvolvido em Matlab para minimizar o consumo de água por programação matemática linear, utilizado no capítulo 5.

```

clear all
format short
n = 9;           % n: numero de demandas
m = 4;           % m: numero de fontes
FWtmp=0;         % agua fresca consumida na TMP em L/min
FWmp=3420;       % agua fresca consumida na MP em L/min
FW = FWtmp+FWmp; % FW: agua fresca disponivel em L/min
alpha=[0 0 0 0]; % alpha: m coeficientes p/ reciclo de fibras

% Vazao de Fontes e Demandas
D=[1484;4292;1255;997.4;996.7;20966;299;3420;43823];
F=[FW;2316;17451;1407;54323];

% Concentração de Fibras (valores limites para demandas)
Fdef=[0.025;0.05;0.01;0.351];
%Ddef=[0.5;0.1;0.5;0.5;0.5;0.3;0.5;0.018;0.3];
Ddef=[0.8;0.1;0.8;0.8;0.8;0.3;0.8;0.018;0.3008];
%Ddefs=[0.082;0.047;0.082;0.05;0.082;0.3;0.05;10e-10;0.3];

% Concentração de Contaminantes (valores limites para demandas)
Fdec=[2487;2487;2380;2273];
Ddec=[5000;5000;5000;5000;5000;5000;5000;5000;5000;2500];

% Função objetivo para minimizar uso de agua fresca (y)
y=[ones(n,1);zeros(n*m,1)];

%----- Restrições para minimizar função -----

%1)A vazao total da demanda satisfeita por uma fonte nao
% deve ser superior a vazao disponivel dessa fonte;
t=n; s=1;
for i=1:1:m+1
    for j=s:1:t
        A1(i,j)=1;
    end
    s=t+1;
    t=t+n;
end

%2)Cada demanda deve ser totalmente satisfeita;
s=1;
for i=1:1:n
    for j=s:n*(m+1)
        A2(i,j)=1;
    end
    s=s+1;
end

%3)A quantidade de contaminante fornecida para as demandas nao

```

```

% deve ser superior ao valor maximo admitido para tais demandas;
s=n+1;
k=1;
for i=1:1:n
    for j=s:n:n*(m+1)
        A3(i,j)=Fdec(k);
        k=k+1;
    end
    s=s+1;
    k=1;
end

```

```

%4)A quantidade de fibras fornecida para as demandas nao deve
% ser superior ao valor maximo admitido para tais demandas;
s=n+1;
k=1;
for i=1:1:n
    for j=s:n:n*(m+1)
        A4(i,j)=Fdef(k);
        k=k+1;
    end
    s=s+1;
    k=1;
end

```

```

%5)Todas as variaveis devem ser positivas
lb = zeros(n*(m+1),1);
%-----

```

```

% Englobando a Matriz de inequações A1, A3 e A4, constroi-se a matriz A
A=[A1;A3;A4];

```

```

for i=1:1:n
    DC(i)=D(i)*Ddec(i);
    DF(i)=D(i)*Ddef(i);
end

```

```

b=[F;DC';DF'];

```

```

% Matriz de igualdade Aeq e vetor beq
Aeq = [A2;%;A4];
beq=[D];% DFsim'];

```

```

%Aplicando otimização por LP da função objetivo x1
x1 = linprog(y,A,b,Aeq,beq,lb);

```

```

%Construindo a Matriz Pij da função x1
s=0;
for i=1:1:m+1
    for j=1:1:n
        P1(i,j)=x1(j+s);
    end
    s=s+n;
end

```

```

SD1(i)=sum(P1(i,:));
end

WW1=F(2:m+1)-SD1(2:m+1)'; %Valores de efluente

fprintf('COM MINIMIZAÇÃO DE AGUA FRESCA\n')
fprintf('Consumo de agua fresca: %g L/min.\n', SD1(1))
fprintf('Vazao de efluente: %g L/min.', sum(WW1))
[P1 [0;WW1]]
fprintf('Vazão de fibras para efluente: %g mg/min.\n', WW1'*Fdef)
WW1=int8(sum(WW1));
if sum(WW1)<=0
    fprintf('Reciclo de fibras não necessário\n')
end

if sum(WW1)>0
    % Restricao de vazao minima de agua
    A=[A;A1(1,:)];
    b=[b;SD1(1)];

    % Função objetivo para reciclo de fibras (z)
    t=zeros(1,n);
    for i=1:1:m
        alphaf(i)=-alpha(i)*Fdef(i);
        t=[t repmat(alphaf(i),1,n)];
    end
    z=t';

    %Aplicando otimização por LP da função objetivo x2
    x2 = linprog(z,A,b,Aeq,beq,lb);

    %Construindo a Matriz Pij da função x2
    s=0;
    for i=1:1:m+1
        for j=1:1:n
            P2(i,j)=x2(j+s);
        end
        s=s+n;
        SD2(i)=sum(P2(i,:));
    end
    WW2=F(2:m+1)-SD2(2:m+1)'; %Valores de efluente
    fprintf('INCLUINDO RECICLO DE FIBRAS\n');
    fprintf('Consumo de agua fresca: %g L/min.\n', SD2(1))
    fprintf('Vazao de efluente: %g L/min.', sum(WW2))
    [P2 [0;WW2]]
    fprintf('Vazão de fibras para efluente: %g mg/min.\n', WW2'*Fdef)
end

```

Para o processo integrado, as entradas do programa são:

[illegible]

APÊNDICE C

Esse apêndice mostra a simulação detalhada do caso 3 após modificações. O sistema foi modificado em pontos estratégicos para respeitar os limites estabelecidos para contaminantes.

Tabela C1 – Resultado da simulação do caso 3 após modificações

Corrente Pinch integrado Caso 3 corrigido	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consist.
Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
Saída de cavaco do silo (linha 1)	260,0	0,00	260,00	50,000
Entrada de polpa no refinador primário (linha 2)	260,0	0,00	260,00	50,000
Água de diluição no refinador primário (linha 2)	356,0	2812 ppm	1,07	0,299
Saída de polpa do refinador primário (linha 2)	317,6	3,88	258,20	44,543
Entrada polpa no refinador secundário (linha 2)	317,6	3,88	258,20	44,543
Água de diluição no refinador secundário (linha 2)	373,8	2812 ppm	1,12	0,299
Saída de polpa do refinador secundário (linha 2)	331,3	7,80	266,47	44,000
Água de diluição do tanque de latência (linha 1)	8279,0	4457 ppm	4,06	0,049
Água fresca para TMP	99,3	0,00	0,00	0,000
Saída de polpa do tanque de latência	9346,3	46,71	270,59	2,800
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	4510,8	22,54	130,59	2,800
Saída da polpa do refinador baixa consistência	4510,8	24,11	129,02	2,766
Entrada de polpa no refinador baixa consistência	4835,8	24,17	140,00	2,800
Saída de polpa do refinador baixa consistência	4835,8	25,85	138,32	2,766
Saída de polpa do tanque de latência (linha 2)	9346,3	49,96	267,34	2,766
Entrada de polpa na depuração primária (linha 2)	9346,3	49,96	267,34	2,766
Aceite da depuração primária (linha 2)	5800,0	30,99	130,00	2,181
Rejeito da depuração primária (linha 2)	3546,6	18,96	137,34	3,709

Corrente Pinch integrado Caso 3 corrigido	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consist.
Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
Diluição de rejeito primária (linha 2)	40,0	2988 ppm	0,12	0,299
Entrada de polpa na depuração secundária (linha 2)	3473,8	18,47	133,14	3,672
Aceite da depuração secundária (linha 2)	2100,0	11,16	64,50	2,965
Rejeito da depuração secundária (linha 2)	1373,8	7,30	68,64	4,735
Diluição rejeito da depuração secundária (linha 2)	55,0	2812 ppm	0,165	0,299
Entrada de polpa no refinador primário (linha 1)	62,0	0,00	62,00	50,000
Água de diluição no refinador primário (linha 1)	94,0	4603 ppm	0,38	0,400
Saída de polpa do refinador primário (linha 1)	113,4	1,18	61,63	34,980
Entrada de polpa no refinador secundário (linha 1)	242,3	1,73	114,52	31,937
Água de diluição no refinador secundário (linha 1)	61,9	4603 ppm	0,25	0,400
Saída de polpa do refinador secundário (linha 1)	279,5	3,41	113,40	28,610
Entrada de polpa no refinador de rejeitos	109,1	0,46	44,76	29,000
Água de diluição no refinador de rejeitos	47,1	4603 ppm	0,19	0,400
Saída de polpa do refinador de rejeitos	154,2	1,23	44,41	22,219
Água de diluição do tanque de latência	5076,6	3298 ppm	1,39	0,027
Entrada de polpa na depuração primária (linha 1)	5510,4	21,43	159,84	2,797
Aceite da depuração primária (linha 1)	4360,4	16,96	122,20	2,716
Rejeito da depuração primária (linha 1)	1150,0	4,47	37,00	3,105
Entrada de polpa na prensa 2	946,6	4,38	49,04	4,904
Saída da Polpa da Prensa 2	109,1	0,46	44,76	29,000
Filtrado da Prensa 2	847,5	4603 ppm	4,28	0,500
Entrada de polpa na prensa 1	1118,5	5,17	57,94	4,904
Saída da Polpa da Prensa 1	128,9	0,55	52,89	29,000

Corrente Pinch integrado Caso 3 corrigido	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consist.
Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
Aceite da peneira inclinada (após depuração)	579,3	4603 ppm	2,34	0,400
Rejeito da peneira inclinada (após depuração)	1990,0	9,20	103,01	4,900
Entrada na peneira inclinada (após prensa)	1847,0	8,54	9,33	0,500
Aceite da peneira inclinada (após prensa)	1771,9	4603 ppm	5,36	0,300
Rejeito da peneira inclinada (após prensa)	75,0	0,35	3,97	5,000
Entrada de polpa no filtro a disco	4360,4	16,96	122,20	2,716
Saída da polpa do filtro disco	1784,4	6,58	124,50	6,500
Filtrado claro do filtro disco	2638,4	3671 ppm	0,79	0,030
Filtrado turvo do filtro disco	1130,5	3671 ppm	0,57	0,050
Água do chuveiro do filtro disco	1192,8	2930 ppm	3,67	0,306
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 1	5958,2	31,80	146,69	2,390
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 1	2079,3	10,58	145,29	6,500
Filtrado do conjunto filtro tambor 1	4092,1	5309 ppm	2,06	0,050
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 1	213,2	2930 ppm	0,66	0,305
Entrada de polpa no conjunto filtro tambor 2	1941,8	10,36	47,81	2,390
Saída da polpa do conjunto filtro tambor 2	682,0	3,21	47,63	6,500
Filtrado do filtro conjunto filtro tambor 2	1438,8	5309 ppm	0,72	0,050
Água do chuveiro do conjunto filtro tambor 2	178,9	2930 ppm	0,55	0,305
Entrada de polpa no filtro save-all 2	13621,7	39,27	138,98	1,007
Saída da polpa do filtro save-all 2	3506,6	10,10	131,33	3,600
Filtrado claro do filtro save-all 2	7929,0	2873 ppm	3,98	0,050
Filtrado superclaro do filtro save-all 2	1057,5	2873 ppm	0,27	0,025
Filtrado turvo do filtro save-all 2	1581,8	2873 ppm	4,77	0,300

Corrente Pinch integrado Caso 3 corrigido	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consist.
Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
Água do chuveiro do filtro save all 2	453,2	2812 ppm	1,36	0,299
Entrada de polpa no filtro save all 1	16346,6	47,13	166,78	1,007
Saída da polpa do filtro save all 1	4102,8	11,82	153,66	3,600
Filtrado claro do filtro save all 1	9599,2	2873 ppm	4,82	0,050
Filtrado superclaro do filtro save all 1	1280,2	2873 ppm	0,32	0,025
Filtrado turvo do filtro save all 1	1911,2	2873 ppm	9,63	0,500
Água do chuveiro do filtro save all 1	546,8	2812 ppm	1,64	0,299
Saída de polpa do tanque 3 de TMP	4545,7	20,37	317,42	6,500
Saída de polpa do tanque 2 de TMP	3311,6	13,44	175,00	5,000
Saída de polpa do tanque 1 de TMP	4156,5	15,16	151,30	3,500
Água de diluição para tanque 1 de TMP	1372,5	2806 ppm	4,18	0,303
Água de diluição para tanque BQ	1549,8	2809 ppm	4,69	0,301
Saída de polpa do tanque de celulose	980,0	0,01	36,00	3,540
Saída de polpa do tanque de mistura	11445,7	35,87	442,98	3,715
Saída do tanque de massa recuperada	7609,4	21,92	284,99	3,600
Saída do tanque de água da tela	26475,3	76,34	291,36	1,109
Entrada no cleaner 4º estágio (4 cleaners)	1525,9	4,41	6,03	0,392
Aceite do cleaner 4º estágio	611,0	1,77	1,81	0,294
Entrada no cleaner 3º estágio (31 cleaners)	3392,3	9,81	12,06	0,353
Aceite do cleaner 3º estágio	1866,4	5,9	6,03	0,321
Rejeito do cleaner 3º estágio	1525,9	4,41	6,03	0,392
Entrada no cleaner 2º estágio (49 cleaners)	11093,2	32,06	73,19	0,654
Aceite do cleaner 2º estágio	8311,9	24,03	62,95	0,749

Corrente Pinch integrado Caso 3 corrigido	Vazão mássica de água	Vazão mássica de Sólidos dissolvidos	Vazão mássica de fibras	Consist.
Descrição	kg/min	kg/min ou ppm	kg/min	%
Rejeito do cleaner 2º estágio	2781,3	8,04	10,25	0,366
Entrada no cleaner 1º estágio (157 cleaners)	55269,7	159,76	563,03	1,006
Aceite do cleaner 1º estágio	44117,4	127,69	489,83	1,094
Rejeito do cleaner 1º estágio	11093,2	32,06	73,19	0,654
Água branca na seção de formação 1	41554,6	2742 ppm	160,62	0,384
Água branca na seção de formação 2	13089,7	2742 ppm	31,46	0,239
Polpa após seção de formação	2297,4	6,32	343,84	12,987
Saída do couch Pit	1874,4	5,44	23,04	1,211
Água branca na seção de prensa	1870,1	2742 ppm	8,59	0,456
Polpa após seção de prensa	427,3	1,17	335,25	43,895
Polpa após secador	31,0	1,17	333,57	91,200
Após o silo: mistura para 1% de consistência	55269,7	2882 ppm	563,03	1,006
Saída do tanque de refugo	856,3	2,44	26,56	3,000
Entrada filtro de refugo	1971,1	5,71	26,04	1,300
Saída da polpa do filtro de refugo	856,3	2,44	26,56	3,000
Filtrado do filtro de refugo	1387,1	2889 ppm	0,14	0,010
Água do chuveiro do filtro de refugo	272,3	2749 ppm	0,65	0,239
Entrada na depuração antes da caixa de entrada	54354,7	157,11	558,81	1,015
Aceite da depuração	54294,7	156,94	553,80	1,007
Água fresca para Máquina de Papel	2824,0	0,00	0,00	0,000