

UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE

DANIELLE CRISTINNE POLOWSKI

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE LAVAGEM DE POLPA MARROM UTILIZANDO
SIMULADOR DE BALANÇO DE MASSA

São Paulo

2012

DANIELLE CRISTINNE POLOWSKI

AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE LAVAGEM DE POLPA MARROM UTILIZANDO
SIMULADOR DE BALANÇO DE MASSA

Monografia de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Pós-graduação Lato Sensu da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, como requisito parcial para a obtenção do Título de Especialista em Tecnologia de Celulose e papel.

ORIENTADOR: Prof^ª. Dr^ª. ÉLIDA J NUNES

São Paulo

2012

Agradecimentos

Agradeço a minha família, pelo incentivo e compreensão durante a execução deste trabalho.

A Pöyry Tecnologia pela oportunidade de realizar o Curso de Pós-Graduação *lato sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel, em especial aos colegas Marcia Regina Mastrocola pelo incentivo e aos colegas Juan Pastrana Fraga e Persio Giordano Caldas pela amizade, paciência e pelas proveitosas discussões sobre o tema e os conceitos compreendidos neste, as quais foram de grande valia para a composição deste trabalho.

Agradeço ao professor Alfredo Mokfienski pelos ensinamentos ministrados e tempo despedido no decorrer deste trabalho.

A professora Elida pelas portas abertas e apoio na elaboração do trabalho.

Aos colegas de curso, professores e integrantes da ABTCP que fizeram parte do Curso de Pós-Graduação *lato sensu* em Tecnologia de Celulose e Papel pela amizade construída e por tornar nossas aulas agradáveis.

E aos meus amigos pela atenção, apoio e por compreender minha ausência em muitos momentos durante esta caminhada.

RESUMO

POLOWSKI, Danielle Cristinne. **Avaliação de sistemas de lavagem de polpa marrom utilizado simulador de balanço de massa**. setembro de 2012. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Programa de Pós-graduação *lato sensu* da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie – SP.

O presente trabalho tem seu foco na indústria de base florestal, mais especificamente no setor de celulose e papel com polpação pelo processo *Kraft*, o qual possui grande importância econômica no setor industrial Brasileiro. O trabalho apresenta e discute uma das mais importantes operações unitárias do ciclo de produção do processo *Kraft*, a operação de lavagem de polpa marrom. Durante a lavagem de polpa marrom é de suma importância que ocorra de forma eficiente a remoção do licor preto da polpa celulósica, uma alta eficiência de lavagem proporciona uma adequada recuperação dos compostos por orgânicos e inorgânicos durante o ciclo de recuperação, minimizando a reposição de insumos (sódio e enxofre), proporcionando um menor consumo de químicos e geração de efluentes no branqueamento, além de uma maior eficiência energética da fábrica. Primeiramente, faz-se uma revisão dos conceitos envolvidos no sistema da lavagem, os equipamentos mais utilizados nesta operação são apresentados e por fim ferramenta computacional de simulação de processo *WinGEMS* 5.3 (simulador matemático) é utilizada para simular o comportamento de um sistema de lavagem hipotético, avaliando a possibilidade de substituição de equipamentos de lavagem com tecnologia obsoleta por equipamentos com tecnologia mais avançada.

Palavras-chave: difusão, extração, filtração, lavagem em contra-corrente, eficiência de lavagem.

ABSTRACT

POLOWSKI, Danielle Cristinne. *Evaluation of brownstock washing systems using mass balance Simulator*. 2012, september de 2012. Monograph - Programa de Pós-graduação *lato sensu* da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie – SP.

The present work focuses on the forest-based industry, more specifically in the pulp and paper sector using *Kraft* pulping process, which has great economic importance in the Brazilian industrial sector. The present work presents and discusses the most important unit operations in the production cycle of kraft process, the operation of brownstock washing. During the brownstock washing its paramount importance to occur efficiently removing the the black liquor from the cellulose pulp, a high washing efficiency provides proper recovery of organic and inorganic compounds during the recovery cycle, minimizing the input make-up (sodium and sulfur), providing a lower chemical consumption and effluent generation in bleaching as well as greater energy efficiency of the plant. Primarily a review of the concepts involved in the washing system is made, the equipment most commonly used in this operation are shown and finally a computational tool for process simulation WinGEMS 5.3 (mathematical phantom) is used to simulate the behavior of a hypothetical washing system, evaluating the possibility of replacing washing equipment with obsolete technology with more advanced equipment technology.

Keywords: diffusion, extraction, filtration, counter-current washing, washing efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÃO

Figura 1 Fluxograma do processo de produção de celulose <i>Kraft</i>	2
Figura 2 Fluxograma representativo das operações unitárias simples envolvidas na operação de lavagem	12
Figura 3 Lavagem por diluição/filtração/extração.....	13
Figura 4 Lavagem por deslocamento	14
Figura 5 Princípio da lavagem contra-corrente	15
Figura 6 Modelo geral de um estágio de lavagem.....	16
Figura 7 Modelo de um sistema de lavagem contracorrente em serie contendo N estágios de lavagem.....	20
Figura 8 Lavagem Hi-Heat contracorrente no fundo de um digestor contínuo, a polpa se move na direção descendente e o licor na ascendente.	27
Figura 9 Lavagem radial - Distribuição de licor pelo tubo central, fluxo do licor do centro do digestor para as peneiras de extração.	28
Figura 10 Lavagem <i>Hi-Heat</i> contracorrente, diluição e descarga de polpa em um digestor contínuo.....	31
Figura 11 Filtro lavador a vácuo convencional – Zonas de lavagem	32
Figura 12 Filtro lavador a vácuo convencional – Detalhes de construção.....	34
Figura 13 Difusores atmosféricos com um estágio e com dois estágios instalados no topo de um tanque de descarga	37
Figura 14 Difusores atmosféricos com um estágio e com dois estágios instalados no topo de um tanque de descarga	38
Figura 15 Difusor atmosférico.....	39
Figura 16 Difusor atmosférico com um estágio instalado no topo de um tanque de descarga	41
Figura 17 Difusor pressurizado instalado após o cozimento.....	42
Figura 18 Difusor pressurizado instalado após o estágio de deslignificação.....	42
Figura 19 Difusor pressurizado Andritz (Ahlstrom)- fluxo de polpa e licores	43
Figura 20 Difusor pressurizado Andritz (Ahlstrom).....	44
Figura 21 Difusor pressurizado Metso (Kvaerner).....	45
Figura 22 Difusor pressurizado Metso (Kvaerner) – Detalhes do topo e do fundo.....	46
Figura 23 Difusor pressurizado Metso (Kvaerner)- Sistema de lavagem rápida da peneira de extração de licor.....	46
Figura 24 DDwasher – Zonas de lavagem	47

Figura 25 Modelos de DDwasher com diversos estágios de lavagem.....	49
Figura 26 Princípio de lavagem da prensa lavadora modelo Metso TRPA	50
Figura 27 Representação da prensa lavadora GL&V – GL&V Twin roll press	51
Figura 28 Modelos de prensas Metso	52
Figura 29 Representação de um modelos de prensa lavadora Metso	53
Figura 30 Caso base	55
Figura 31 Simulação I – Substituição dos filtros lavadores por prensas lavadoras.....	59
Figura 32 Simulação II – Substituição dos filtros lavadores por <i>DDwashers</i> , depuração antes da pré-lavagem.....	61
Figura 33 Simulação III – Substituição dos filtros lavadores por <i>Ddwashers</i> , depuração após a pré-lavagem	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Madeira de Folhosas (<i>Hardwood</i>) - Comparação de ciclo de rotação e produtividade em volume	7
Tabela 2 Madeira de Coníferas (<i>Softwood</i>) - Comparação de ciclo de rotação e produtividade em volume	8
Tabela 3 Requisitos de desaguamento em lavadores a diversas consistências	48
Tabela 4 Caso base - Dados de alimentação para as variáveis de processo.....	56
Tabela 5 Prensa lavadora - Dados de alimentação para as variáveis de processo.....	60
Tabela 6 DDwashers - Dados de alimentação para as variáveis de processo	62
Tabela 7 Caso base - Perdas na lavagem de polpa marrom	63
Tabela 8 Simulações - Perdas na lavagem de polpa marrom	64
Tabela 9 Simulações - Perdas na lavagem de polpa marrom x redução do consumo de químicos no branqueamento	67

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABTCP	Associação Brasileira de Celulose e Papel
ADtB/d	Tonelada de celulose branqueada seca ao ar produzida por dia; no ponto de equilíbrio com a umidade relativa do ambiente (90% de fibras e 10% de umidade).
ADt/d	Tonelada de celulose seca ao ar produzida por dia; no ponto de equilíbrio com a umidade relativa do ambiente (90% de fibras e 10% de umidade).
°C	Temperatura em graus Celsius
C_d	Consistência de alimentação
C_i	Consistência de descarga
COD	<i>Chemical oxygen demand</i> - Demanda química de oxigênio, mede a quantidade necessária de oxigênio para oxidar totalmente a matéria orgânica à dióxido de carbono.
DCF	Fator de correção da descarga
<i>DDwasher</i>	<i>Drum Displacement Washer</i>
DR	Relação de deslocamento ou taxa de deslocamento
E	Eficiência de básica de Norden
E_{st}	Número de Norden modificado
E10	Número de Norden modificado, a consistência de descarga padrão de 10%
FD	Fator de diluição, m^3/ADt
R	Taxa de licor de lavagem
kg COD/ADt	Demanda química de oxigênio por tonelada de celulose seca ao ar.
L_0	Polpa não lavada
L_1	Polpa lavada
V_1	Licor de lavagem
V_2	Filtrado
W	Taxa do peso de licor
x	Concentração de sólidos dissolvidos na corrente de polpa
y	Concentração de sólidos dissolvidos na corrente de licor
Y	Rendimento da lavagem

LISTA DE TERMINOLOGIA

<i>Licor branco</i>	Licor utilizado no processo de cozimento dos cavacos de madeira, constituído de soda (NaOH) e sulfeto de sódio (Na ₂ S). Este licor é responsável por separar as fibras de celulose da lignina, substância responsável por manter a rigidez da madeira Este licor recuperado durante o ciclo de recuperação, na etapa de caustificação.
<i>Licor negro</i>	Licor resultante do processo de cozimento madeira, compõem a fração líquida da solução polpa de celulose e licor de cozimento. É composto por materiais orgânicos e inorgânicos, provindos da solubilização da madeira e dos químicos utilizados durante o cozimento;
<i>Licor negro fraco</i>	Gerado durante a etapa de lavagem de polpa de celulose, possui baixa concentração de sólidos solúveis dissolvidos, em torno de 15%;
<i>Licor negro concentrado</i>	Licor obtido após a etapa de evaporação, onde a água é extraída da solução de licor preto fraco, sua concentração de sólidos solúveis dissolvidos fica entre 60-85%.
<i>Soluto</i>	Substâncias orgânicas e inorgânicas que se encontram dissolvidas na solução líquida, por exemplo, cloreto de sódio dissolvido na água, onde a água é o solvente e o cloreto de sódio é o soluto. No caso do processo de fabricação de celulose o soluto é composto pela matéria orgânica e inorgânica dissolvida na solução de licor preto.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS DO ESTUDO	6
1.2 JUSTIFICATIVA	6
1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	9
2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS	11
2.1 PRINCÍPIOS DA LAVAGEM.....	11
2.2 AVALIAÇÃO DA LAVAGEM.....	16
2.2.1 Licor de lavagem.....	17
2.2.2 Remoção de soluto	18
2.2.3 Eficiência de lavagem	19
2.3 VARIÁVEIS DE PROCESSO	23
2.3.1 Característica da polpa	23
2.3.2 pH.....	23
2.3.3 Temperatura de lavagem	23
2.3.4 Ar.....	24
2.3.5 Consistência de alimentação da polpa.....	24
2.3.5 Taxa de produção	25
3 EQUIPAMENTOS DE LAVAGEM	26
3.1 LAVAGEM <i>HI-HEAT</i> CONTRA CORRENTE	26
3.1.2 Diluição e descarga a frio	30
3.2 FILTROS LAVADORES À VÁCUO	31
3.3 FILTRO CB – <i>COMPACTION BAFFLE FILTER</i>	36
3.4.1 Difusor atmosférico.....	38
3.4.2 Difusor pressurizado	41
3.5 <i>DRUM DISPLACEMENT WASHER - DDWASHER</i>	47
3.6 PRENSA.....	50
4 ESTUDO DE UM SISTEMA DE LAVAGEM HIPOTÉTICO.....	54
4.1 CASO BASE	55
4.1.1 Dados de entrada para o caso base.....	56
4.2 SISTEMA DE LAVAGEM PROPOSTO - EQUIPAMENTOS ALTERNATIVOS.....	58
4.2.1 Prensa lavadora	59
4.2.2 DDwasher	60
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	63

5.2 DISCUSSÕES	65
LISTA DE REFERÊNCIAS	69
ANEXO I.....	73
Caso base.....	74
Simulação I.....	75
Simulação II	76
Simulação III	77

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação das indústrias de celulose de se adequarem ao conceito de desenvolvimento sustentável aliado à necessidade de redução dos custos operacionais, cria a necessidade de um gerenciamento efetivo nas diversas etapas do processo produtivo desde a floresta, captação e tratamento de água, passa por todas as etapas do processo até o descarte do efluente tratado.

Este estudo tem por objetivo analisar uma das etapas da produção de celulose, mais especificamente a lavagem de polpa marrom, onde ocorre a separação das fibras de celulose do licor preto. Uma lavagem marrom eficiente prima por reduzir o consumo de água sem deixar de atingir as características desejáveis de qualidade da polpa, como o de baixo teor de contaminantes orgânicos e inorgânicos, o que acarreta em fases posteriores à redução do consumo de químicos, redução do efluente gerado no branqueamento, além garantir uma maior eficiência energética na fábrica.

Para que esta análise seja feita, é importante fazer uma explanação do processo de produção de celulose com o intuito de contextualizar a operação de lavagem de polpa marrom.

O processo de produção de celulose tem como matéria prima fibras vegetais provenientes do tronco das árvores, porém, também podem vir das folhas (sisal) ou frutos (algodão), no Brasil são utilizadas como matéria prima fibrosas árvores do grupo das dicotiledôneas arbóreas (Angiospermas) e das coníferas (Gimnospermas), estas madeiras também são classificadas como folhosas (porosas, duras ou “*hardwood*”) e resinosas (não porosas, moles ou “*softwood*”); como exemplo de madeiras folhosas podemos citar o eucalipto e para as resinosas a madeira de pinus (PHILIPP *et al.*, 1988).

As principais espécies utilizadas para a produção de pasta celulósica são (CARVALHO, 2011):

- Folhosas – *Eucalyptus saligna*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus urophylla*;
- Coníferas – *Pinus elliotti*, *Pinus taeda*, *Pinus radiata*, *Araucárias angustifolia*.

A madeira é constituída por: polissacarídeos (celulose, hemicelulose e amido), lignina, extrativos e constituintes inorgânicos (CARVALHO, 2011).

Para produzir a celulose para a produção de papel, entre outros produtos é necessário separar a fibra celulose dos outros componentes da madeira (lignina, extrativos e os componentes inorgânicos) a este processo dá-se o nome de polpação. (MAGATON, 2011).

A função da lignina na estrutura da madeira é aumentar rigidez da parede celular, “cimentar” as células umas às outras, reduzir a permeabilidade da parede celular a água, proteger a madeira contra micro-organismos, aumentar a resistência da planta à compressão permitindo o seu crescimento vertical. Os extrativos exercem a principalmente a função de proteção contra fungos. Já os componentes inorgânicos, dentre os quais podemos citar o cálcio, magnésio, potássio, sódio, fósforo, silício, ferro, cobre, e manganês na forma de carbonatos, cloretos, oxalatos, fosfatos e silicatos são abundantes na casca. (MAGATON, 2011).

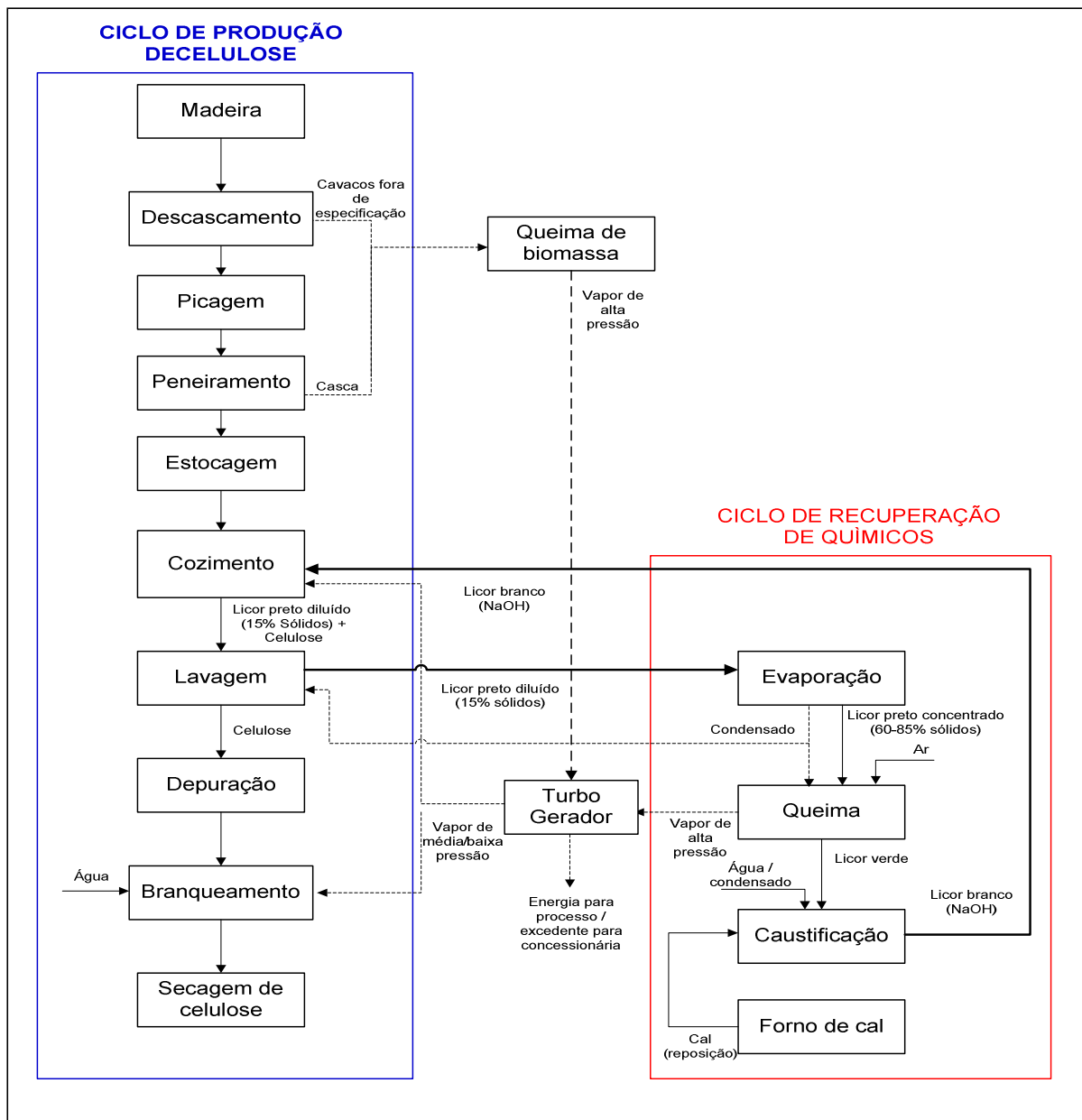


Figura 1 Fluxograma do processo de produção de celulose *Kraft*
Fonte: a Autora

O processo de produção industrial de celulose compreende diversas etapas desde a floresta até a obtenção da polpa de celulose, a Figura 1 apresenta esquematicamente as etapas de produção de celulose desde a floresta até a obtenção do produto final.

Na área florestal, estas etapas compreendem a produção das mudas, preparo do solo, plantio, proteção e cuidados com a floresta após o plantio, manejo, extração da madeira (corte) e o transporte da madeira da floresta para a fábrica. Durante o corte as toras são cortadas, desfolhadas e desgalhadas, as folhas e galhos são classificados como resíduos de exploração, que podem sofrer dois tipos de tratamento: *i*) podem ser incorporados ao solo auxiliando na produção de substrato; ou *ii*) galhos mais grossos podem ser transportados para a fábrica, processados (picados) seguindo para a estocagem de biomassa (CARVALHO, 2011).

A etapa de descascamento das toras pode ocorrer tanto no campo quanto na fábrica, quando o descascamento ocorre no campo à casca juntamente com a massa de galhos e as folhas são incorporados ao solo. Quando o descascamento ocorre na fábrica a casca é destinada para produção biomassa (CARVALHO, 2011).

Na fábrica ocorre processamento da madeira para obtenção da fibra celulósica, as toras descascadas são picadas para a obtenção de cavacos, que são classificados de acordo com dimensões pré-estabelecidas, os cavacos que possuem dimensões adequadas seguem para o cozimento, já as frações fora de especificação são destinadas à produção de biomassa. A biomassa produzida durante a classificação dos cavacos juntamente com as cascas e galhos processados anteriormente é utilizada como combustível em caldeiras auxiliares (caldeiras de força), para a geração de vapor e energia necessários ao processo (PHILIPP *et al.*, 1988).

O processo de polpação (cozimento) ocorre em vasos pressurizados onde os cavacos são tratados quimicamente produzindo a polpa celulósica, a polpação pode ocorrer utilizando soluções fortemente alcalinas (processo *Kraft*) a fortemente ácidas. Industrialmente no processo de polpação os cavacos são submergidos em solução aquosa, composta por solventes inorgânicos (reagentes), à altas temperaturas e pressões (PHILIPP *et al.*, 1988).

Segundo GOMIDE (2011), 95% da produção de celulose nacional ocorre por meio da polpação química, sendo 98% desta produção feita por meio do processo *Kraft*, neste processo o licor de cozimento dos cavacos é composto por soda e sulfeto de sódio.

O processo *Kraft* é eficiente na polpação de diversos materiais lignocelulósicos para uma ampla gama de aplicações, possui alta eficiência energética e de recuperação dos reagentes químicos utilizados, além de ser particularmente bom para a produção de fibras de *softwood* (pinus) com características de alta resistência e flexibilidade, o mesmo vale para a polpa de

hardwood (eucalipto), conseguindo ainda remover de maneira satisfatória os extrativos (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

Durante o processo de polpação ocorre a liberação das fibras celulósicas pela “dissolução” da lignina, neste processo ocorre também a degradação dos carboidratos e das hemiceluloses, ao final desta etapa todas estas frações encontram-se dissolvidas no licor resultante do processo de polpação.

O licor resultante da polpação é uma solução bifásica composta por fibras celulósicas e licor preto diluído; este licor é composto por materiais orgânicos (lignina, carboidratos e hemiceluloses), materiais inorgânicos provenientes madeira em si e do licor de cozimento (sódio, enxofre e etc), além de contaminantes (areia, pedras, sais).

Na lavagem de polpa marrom (objeto deste estudo), ocorre a separação da polpa celulósica do licor preto diluído, a lavagem tem como objetivo adequar as características da polpa para alimentar processo de branqueamento posterior à etapa de lavagem, ou a secagem da polpa caso o produto final não necessite de branqueamento, além de recuperar material orgânico e inorgânico contidos no licor os quais possuem valor agregado com o menor consumo de água possível (PHILIPP *et al.*, 1988).

A depuração da polpa é a etapa de “limpeza” (classificação) da polpa onde são removidos os contaminantes sólidos, ou seja, nesta etapa são separadas as fibras desejadas das partículas indesejadas (palitos, feixes de fibras e areia) e das partículas superdimensionadas (nós de madeira incozida e pedras). A etapa de depuração pode ocorrer antes ou depois da etapa de deslignificação, ou até mesmo logo na descarga do cozimento após a correção da consistência de descarga da polpa no tanque de descarga (PHILIPP *et al.*, 1988).

Esta classificação pode ser feita em diversos estágios, o número de estágios de depuração depende do quanto a classificação deve ser mais ou menos rigorosa em virtude do produto final; por exemplo, se o papel final for destinado para embalagem este produto não necessita de uma classificação tão rigorosa quanto um papel destinado à produção de papéis de imprimir e escrever os quais necessitam passar pela etapa de branqueamento.

A deslignificação é um “cozimento brando” onde são aplicadas soda cáustica, temperatura (vapor direto) e pressão na polpa celulósica que já passou por uma pré-lavagem, o objetivo é destruir os feixes de fibras não cozidos (palitos) e atacar a lignina residual na polpa de forma seletiva preservando os carboidratos, visando de reduzir o consumo de químicos do branqueamento os quais que seriam destinados a remoção destas partículas indesejáveis; após o reator de deslignificação a polpa é lavada novamente (pós-lavagem) e segue para o branqueamento (MOKFIENSKI, 2011).

A função do branqueamento é remover as estruturas cromóforas e leuco-cromóforas, por meio de processos de oxidação/extração com reagentes apropriados, estes reagentes devem possuir um baixo custo e serem altamente seletivos, ou seja, devem atacar rapidamente a lignina sem atacar os carboidratos (celulose) evitando a perda de rendimento e qualidade da fibra. Dentre os agentes oxidantes podemos citar o dióxido de cloro (ClO_2), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), ozônio (O_3), oxigênio (O_2); como agentes de extração temos a soda cáustica (NaOH), hipocloritos de sódio (NaClO) e de cálcio (CaClO_2) (COLODETTE, 2011).

O processo de branqueamento pode ser descrito como uma sequência de estágios nos quais ocorre a aplicação de reagentes de oxidação e extração, após a aplicação de cada reagente a polpa segue para um reator e deste para um estágio de lavagem, ao final da sequência de estágios de branqueamento a polpa atinge a alvura desejada e segue para a secagem, enfardamento, estoque e comercialização.

O licor preto diluído removido durante o estágio da lavagem de polpa deve ser tratado no ciclo de recuperação, o licor preto fraco segue para a evaporação (primeiro estágio do ciclo de recuperação), a função da evaporação é concentrar o licor preto diluído o qual possui concentração de aproximadamente 15% de sólidos solúveis dissolvidos para um teor de sólidos de 60 - 85% de sólidos solúveis dissolvidos, o que torna possível a sua queima como combustível na caldeira de recuperação química pois é rico em matéria orgânica. A remoção da água contida no licor diluído é feita em evaporadores de múltiplo efeito que são simplesmente trocadores de calor instalados em série (ALMEIDA, 2009).

A queima do licor preto concentrado na fornalha da caldeira de recuperação possibilita: *i*) recuperar os agentes inorgânicos como carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio (Na_2S) na forma de fundido através da redução dos compostos de oxidados de enxofre e sulfeto de sódio; *ii*) gerar de vapor de alta pressão com o calor gerado na fornalha, este vapor é destinado à produção de vapor para o processo (vapor de média e baixa pressão), além de produzir energia elétrica como subproduto e *iii*) reduzir ou eliminar os impactos ambientais tanto no ar como nas águas (POLOWSKI, 2004). As fábricas de celulose atuais são auto suficientes na produção de energia elétrica chegando muitas vezes a exportar seu excedente para a rede.

O fundido da caldeira é dissolvido com licor branco fraco gerando o licor verde que segue para a caustificação, etapa final do ciclo de recuperação, onde ocorre a recuperação do licor branco de cozimento. De acordo com POLOWSKI (2004), é um processo complexo e heterogêneo que envolve a adição de óxido de cálcio (CaO) ao licor verde para converter o carbonato de sódio (Na_2CO_3) em hidróxido de sódio (NaOH) produzindo o licor branco. Esta etapa fecha o ciclo de

recuperação de químicos do processo *Kraft* que teve início na etapa de lavagem de polpa marrom, a existência do ciclo de recuperação torna o processo *Kraft* economicamente viável.

1.1 OBJETIVOS DO ESTUDO

Fazer uma revisão dos conceitos envolvidos no sistema da lavagem de polpa marrom, apresentar os equipamentos mais utilizados nesta operação e por fim utilizar ferramenta computacional de simulação de processo *WinGEMS 5.3* (simulador matemático) para simular o comportamento de um sistema de lavagem hipotético.

A ferramenta computacional *WinGEMS 5.3* utiliza “blocos” para simular as operações unitárias e o comportamento dos equipamentos utilizados na unidade fabril em questão, levando em conta as condições operacionais do processo, com o intuito de prever a eficiência de lavagem dos lavadores e do sistema com um todo.

Para tanto um estudo prático é proposto, sendo este uma situação hipotética baseada em uma situação real considerando valores factíveis de variáveis de processo. Após a construção do caso base, são sugeridas alterações no processo com o intuito de identificar oportunidades de melhoria do sistema, com o objetivo de alcançar uma maior eficiência de lavagem.

1.2 JUSTIFICATIVA

O Brasil ocupa 4º lugar dentre os maiores produtores mundiais de celulose, ficando atrás somente dos Estados Unidos, China e Canadá, sendo o líder na produção de celulose de eucalipto que utiliza majoritariamente o processo *Kraft*. A indústria de celulose no Brasil possui 222 empresas com atividade em 539 municípios, localizados em 18 Estados da Federação, possui 2,2 milhões de hectares de florestas plantadas para fins industriais, 2,9 milhões de hectares de florestas preservadas, 2,7 milhões de hectares de área florestal total certificada. As exportações em 2011 foram da ordem de US\$ 7,2 bilhões, sendo o saldo comercial de US\$ 5,1 bilhões e foram pagos ao governo R\$ 2,2 bilhões em impostos, nos últimos 10 anos o setor investiu US\$ 12 bilhões e gerando 115mil empregos diretos e 575 mil empregos indiretos (BRACELPA, 2011).

O Brasil figura entre um dos maiores produtores de celulose da cena mundial, conforme os dados apresentados nas Tabelas 1 e 2 que mostram que o país tem grandes vantagens sobre os

demais países por apresentar tanto para a madeira de folhosas quanto para a madeira de coníferas, um alto incremento médio anual de madeira (que pode ser compreendido como produtividade da floresta) e ciclos de crescimento muito curtos. devido ao fato de o Brasil gozar de condições geográficas e climáticas favoráveis.

Os avanços na silvicultura brasileira também proporcionam uma redução nos ciclos de rotação de cultura (ciclos mais curtos) e uma alta taxa de produtividade em volume, sendo assim, a posição do Brasil como um dos maiores produtores de celulose do mercado mundial tende a ser consolidar.

Tabela 1 Madeira de Folhosas (*Hardwood*) - Comparação de ciclo de rotação e produtividade em volume

Espécie	País	Ciclo de rotação (anos)	IMA cel (*) (m³s/ha.a)
Eucalyptus (clones)	Brasil	5 - 7	35-55
Eucalyptus grandis	Brasil	5 - 7	25-45
Eucalyptus grandis	África do Sul	8 - 10	20
Eucalyptus globulus	Chile	10 - 12	20
Eucalyptus globulus	Portugal	12-15	12
Eucalyptus globulus	Espanha	12-15	10
Bétula	Suécia	35-40	5,5
Bétula	Finlândia	35-40	4

(*) IMA- Incremento médio anual da madeira

Fonte: Pöyry Group

Tabela 2 Madeira de Coníferas (*Softwood*) - Comparação de ciclo de rotação e produtividade em volume

Espécie	País	Ciclo de rotação (anos)	IMA cel (*) (m³/ha.a)
Pinus spp	Brasil	15 - 25	25 - 40
Pinus radiata	Chile	25	22
Pinus radiata	Nova Zelândia	25	22
P. eliotti/P. taeda	Estados Unidos	25	10
Douglas Fir	Canadá (costa)	45	7
Picea abies	Suécia	70 - 80	4
Picea abies	Finlândia	70 - 80	3,6
Picea glauca	Canadá (interior)	55	2,5
Picea mariana	Canadá (leste)	90	2

(*) IMA- Incremento médio anual da madeira

Fonte: Pöyry Group

O Setor de Celulose possui grande relevância no panorama industrial Brasileiro, sendo considerado por muitos, um dos maiores consumidores de água bruta, apresentando elevada carga química e bioquímica além de sólidos suspensos em seus efluentes. A água é um ingrediente essencial na fabricação de celulose e papel, além de estar presente na própria matéria prima, a água é utilizada durante o processo principalmente para geração de vapor de processo e nas repetidas etapas de lavagem da polpa com o intuito de remover as impurezas, é de suma importância que a mesma seja empregada de forma consciente e de forma eficiente (AMARAL, K.J., 2008). As melhores práticas primam por um consumo médio de água por tonelada de celulose branqueada produzida de 29 m³/ADtB, o que representa a emissão de 26 m³/ADtB de efluentes líquidos tratados nos corpos d'água.

O processo *Kraft* objeto deste estudo, enfoca processo produtivo mais utilizado em fábricas de produção de celulose no Brasil e em todo mundo, o parque industrial Brasileiro de celulose começou a ser implantado em 1889 com Cia. Papel de Salto em Salto/SP, e vem se desenvolvendo desde então impulsionado pela crescente demanda internacional de celulose.

Nos últimos cinco anos foram implantadas fábricas de última geração como a Fibria - unidade Três Lagoas/MS (mar/2009) com produção 1,3milhão de toneladas de celulose por ano, que é a mais nova unidade do grupo sendo resultado de um investimento de US\$ 1,5 bilhões (site

Fibria). Já a fábrica Eldorado pertencente ao grupo Friboi – Três Lagoas/MS com produção 1,5 milhão de toneladas de celulose por ano, que está em construção é resultado de um investimento de US\$ 1,5 bilhões tendo partida prevista para final de 2012 (site Celulose online).

Não contente em expandir o parque industrial brasileiro, os empresários também vem se preocupando com manutenção das fábricas existentes, ou seja, reformar da unidades existentes para sua melhor conservação e/ou adequação as solicitações ambientais, ou mesmo com intuito de aumentar a produção.

Neste estudo será dada ênfase à operação de lavagem de polpa marrom, a água utilizada para realizar a lavagem é proveniente do condensado gerado na evaporação, ou seja, água evaporada e condensada que retorna ao processo, caso a qualidade do condensado de processo esteja comprometida pode ser utilizada água quente tratada para lavar a polpa, sendo assim faz-se necessário um controle efetivo do processo para minimizar o risco de contaminação do condensado.

Para tanto a ferramenta de simulação de balanço de massa apresentada neste estudo é de grande utilidade para as fábricas mais antigas, pois pode simular a operação atual da unidade, avaliar a eficiência dos lavadores existentes, e prever como a mesma se comportaria com a alteração de variáveis de processo e a substituição de equipamentos de lavagem de tecnologia mais antiga por equipamentos de tecnologia mais avançada, os quais podem proporcionar uma maior eficiência de lavagem.

1.3 METODOLOGIA E ESTRUTURA DO TRABALHO

Para o desenvolvimento deste estudo de conclusão de curso, o primeiro passo foi realizar a pesquisa bibliográfica sobre o tema em questão, lavagem de polpa marrom, posteriormente simular um caso base e sugerir melhorias para aumentar com o intuito de melhorar a eficiência de lavagem.

O estudo foi dividido em seções, conforme descrito a seguir:

Seção 2 apresenta o conceito e os princípios envolvidos na etapa de lavagem marrom, os fatores que mais afetam a eficiência de lavagem, os locais onde ocorre a operação de lavagem.

Seção 3 faz uma breve descrição dos diversos equipamentos de lavagem e seus princípios operacionais.

Seção 4 apresenta o caso base, sua modelagem utilizando a ferramenta computacional de simulação de processo *WinGEMS* 5.3. Após a simulação do caso base são simuladas alternativas de substituição de equipamentos de lavagem existentes de tecnologia obsoleta por equipamentos de tecnologia atual.

Seção 5 são analisados os resultados obtidos com nas simulações, com a conclusão do resultado do estudo e recomendações para trabalhos futuros.

2 PRESSUPOSTOS TEÓRICOS

A lavagem de polpa marrom possui grande interface com o ciclo de recuperação de químicos, pois é nesta etapa que ocorre a separação da solução bifásica composta pela polpa celulósica (fração sólida) do licor preto fraco (fração líquida), conforme descrito na Introdução.

No licor encontram-se diluídos materiais orgânicos (lignina, hemiceluloses), materiais inorgânicos provenientes do licor de cozimento (Na_2CO_3 , Na_2SO_4 , Na_2S , $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, NaOH e NaCl), da madeira em si (ferro, e etc...) e contaminantes (areia, pedras, sais).

O objetivo da lavagem é adequar as características da polpa para alimentar processo de branqueamento ou a secagem da polpa não branqueada, além de recuperar o material orgânico e inorgânico contido no licor os quais possuem valor agregado, além disso, caso o licor este fosse descartado diretamente no meio ambiente, ou seja, em rios, córregos, etc..., sua alta carga poluidora causaria um grande impacto ambiental (AMARAL, 2008).

Deve sempre existir um compromisso entre a qualidade da polpa e a quantidade de água/condensado usada para remover os contaminantes.

2.1 PRINCÍPIOS DA LAVAGEM

A operação de lavagem é a operação na qual uma solução heterogênea (fluido-licor/partículas sólidas - fibra) é separada por meio de um meio filtrante que permite a passagem do fluido e retém as partículas sólidas, ou seja, envolve o fluxo através de um meio poroso.

Usualmente a terminologia empregada quando se trata de lavagem de polpa marrom, define que o licor não tratado proveniente do processo de cozimento, contendo os compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos é chamado de licor original, este licor compõe a parte líquida da solução bifásica. O licor original pode estar livre no meio (solvente), sendo esta a parte facilmente lavável, mas também se encontra intrínseco à polpa, ou seja, na parte interna das fibras sendo esta fração de difícil remoção.

Os contaminantes que deixam o sistema de lavagem com a polpa são denominados perdas de lavagem, já a fração do licor contendo o material dissolvido recuperado (soluto), durante a lavagem o licor que passa de um estágio para o outro é chamado de licor de lavagem. A eficiência

da lavagem é definida em função da quantidade de soluto removida e da quantidade de água/condensado limpo usado para alcançar esta remoção (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

De acordo com MOKFIENSKI (2011), os mecanismos de lavagem podem ser divididos em dois níveis: micro mecanismos e macro mecanismos. A lavagem baseada em micro mecanismos ocorre na parte interna das fibras de celulose e envolve o fenômeno do transporte do licor de dentro para fora das fibras, pode ocorrer por difusão, compressão ou inchamento.

A difusão dos sólidos dissolvidos no interior da polpa depende de fatores como: diferença de concentração entre o licor que se encontra de dentro das fibras e do licor que está livre na solução, do tempo decorrido para que o sódio e a lignina permeiem de dentro para fora da fibra e da temperatura que influencia diretamente viscosidade do fluido. A compressão é obtida por meio uma força aplicada às fibras que força a saída do licor de seu interior. O inchamento das fibras ocorre devido a uma mudança de pH, que resulta em variações na espessura da parede da fibra, em valores de pH mais altos a parede da fibra torna-se mais espessa e mais porosa, a medida que o pH cai a parede da fibra se contrai, tornando mais difícil a remoção do licor de seu interior (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

Os macro mecanismos envolvem a remoção do licor original que está livre no meio, consistem na remoção do licor da solução, através de extração por vácuo (extração) ou pressão aplicada na manta que se forma sobre uma superfície porosa e também pode ocorrer a lavagem por deslocamento, que ocorre quando um fluxo de líquido é aspergido de forma homogênea sobre a manta de celulose, penetra na manta deslocando o licor original (mais “sujo” – com maior concentração de sólidos solúveis) sendo posteriormente removido, o ideal é que todo o licor contido na manta seja deslocado (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

As operações mais utilizadas na lavagem da polpa são: diluição, extração e deslocamento, a Figura 2 ilustra estas operações (CROTOGINO *et al.*, 1987).

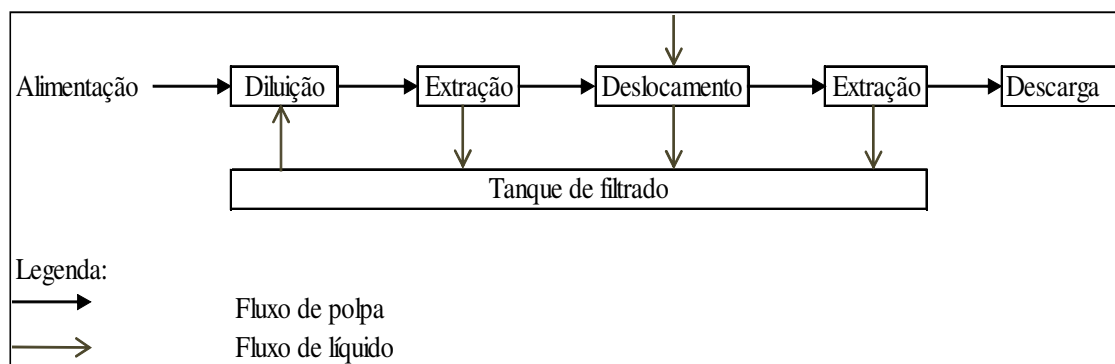


Figura 2 Fluxograma representativo das operações unitárias simples envolvidas na operação de lavagem
 Fonte: adaptado de GULLICHSEN *et al.*, 2000.

Diluição é a operação onde a polpa contendo o licor original (sujo) é diluída com líquido de lavagem (água quente tratada, condensado limpo ou licor fraco), obtendo-se uma solução fluidizada.

Na operação de extração (Figura 3) a solução fluidizada é distribuída sobre um meio filtrante, no caso uma superfície perfurada ou uma tela, a fase líquida da solução passa através da superfície perfurada, e as fibras ficam sobre o meio filtrante formando uma “manta” de celulose, ocorre assim o engrossamento da manta que pode ocorrer por filtração (extração) ou prensagem, neste caso, quando é aplicado um gradiente de pressão sobre a manta forçando a passagem do filtrado pela manta.

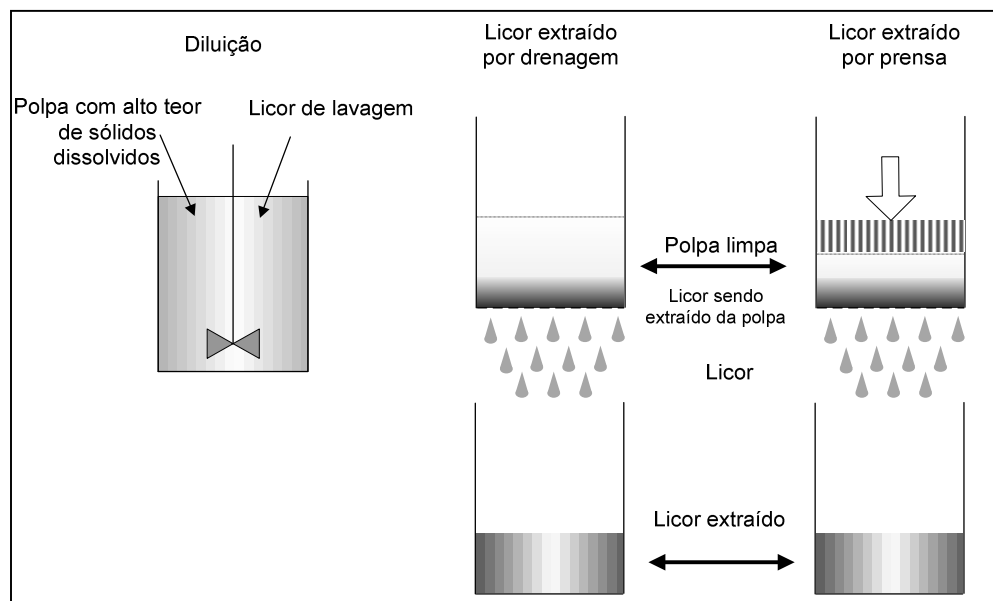


Figura 3 Lavagem por diluição/filtração/extração
Fonte: adaptado de CROTOGINO et al.,1987.

Segundo GULLICHSEN *et al.* (2000), na prensagem o gradiente de pressão aplicado sobre o meio filtrante e a resistência à filtração da suspensão de fibras determinam a taxa de formação de manta, a filtração continua e a consistência da manta aumenta, caso o gradiente de pressão seja mantido.

O processo de diluição e extração não consegue remover todo o soluto, a não ser que este processo seja repetido diversas vezes, usando água limpa. De acordo com CROTOGINO *et al.* (1987), a eficiência desta operação depende principalmente das consistências na qual a polpa é diluída e espessada. Depende também do quão dentro das fibras este soluto se encontra e do tempo

necessário para que ocorra o processo de difusão do soluto de dentro para fora da fibra a fim de que o soluto possa ser extraído.

Na lavagem por deslocamento, água de lavagem (licor de lavagem) deve ser pulverizada, ou distribuída de forma uniforme e homogênea sobre a superfície da manta com intuito de deslocar líquido livre que se encontra entre as fibras que compõe a manta de celulose, conforme mostrado na Figura 4.

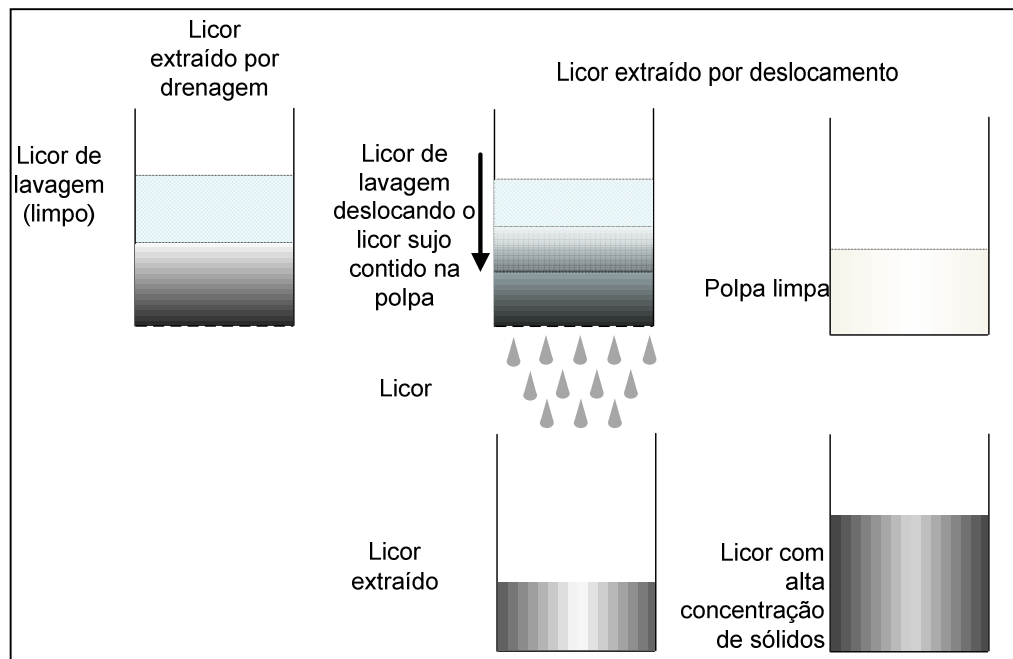


Figura 4 Lavagem por deslocamento
Fonte: adaptado de CROTOGINO et al.,1987.

O licor de lavagem possui concentração de sólidos solúveis inferior ao líquido que está disperso na manta e dentro das fibras (licor original). CROTOGINO *et al.* (1987) define que, durante a operação de deslocamento não é interessante que haja mistura na interface entre o licor de lavagem e o licor que está sendo deslocado, o ideal seria que esta mistura de licores com qualidades diferentes não ocorresse, na prática uma remoção completa do soluto não pode ser alcançada, pois ocorre certa mistura na interface e além de o soluto não possuir tempo suficiente para se difundir do interior para o exterior das fibras o que reduz a eficiência de lavagem.

Os mecanismos descritos acima são comumente usados em lavadores industriais e em diferentes combinações de lavadores industriais, porém nenhum equipamento é tão eficiente que possa lavar a polpa com a qualidade desejada em somente um estágio de lavagem, visto que a eficiência de lavagem (remoção de sólidos dissolvidos) deve ser a mais elevada possível.

O conceito atual, define que os equipamentos de lavagem sejam colocados em série (multi-estágios), e a lavagem ocorra em contra-corrente, ou seja, em fluxo cruzado onde a polpa que contém o licor original com uma concentração de sólidos mais alta segue em uma direção e o licor de lavagem mais limpo segue no sentido contrário. A polpa que deixa o sistema de lavagem (último estágio de lavagem) é lavada com a melhor qualidade de licor, ou seja, licor de lavagem que não contém sólidos dissolvidos; neste estágio utiliza-se preferencialmente condensado limpo disponível ou água quente tratada, já o filtrado deste estágio segue no sentido contrário para o estágio anterior. Ao final da etapa de lavagem o filtrado é destinado à evaporação e a polpa segue para o branqueamento ou secagem.

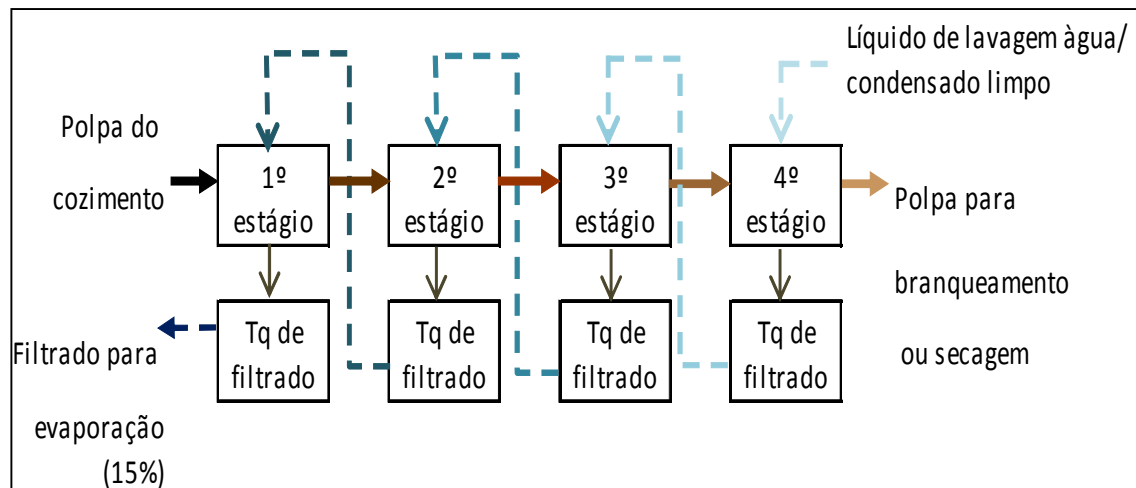


Figura 5 Princípio da lavagem contra-corrente
Fonte: a Autora.

Utilizando o sistema contracorrente pode-se minimizar o fator de diluição utilizado e ainda assim alcançar qualidade desejada para a polpa. A Figura 5 representa um sistema de lavagem em quatro estágios, cada um destes estágios é composto por um equipamento de lavagem que pode aplicar várias combinações de diluição, extração, deslocamento e prensagem da polpa.

A lavagem também pode ser considerada como um estágio de adequação da polpa às características necessárias ao processo ou tratamento posterior, pois durante a lavagem pode ocorrer transferência de calor e para a suspensão de fibras, visando ajustar suas características às outras condições do processo subsequente, por exemplo adequar a temperatura da polpa que segue para o próximo estágio do processo.

2.2 AVALIAÇÃO DA LAVAGEM

Segundo CROTOGINO *et al.*(1987), os parâmetros utilizados para descrever o desempenho dos equipamentos lavadores de celulose podem ser divididos em três categorias:

- A quantidade de licor de lavagem utilizado;
- A quantidade de soluto removido;
- A eficiência de um lavador de polpa operando sob consistências de alimentação e descarga padrão.

A Figura 6 descreve um modelo geral de um estágio de lavagem, este modelo mostra algumas das variáveis, estas notações são comumente utilizadas para definir os processos de lavagem.

Na operação de lavagem, o soluto é transferido da corrente de polpa não lavada que alimenta o sistema, para a corrente de filtrado que deixa o sistema, assim a concentração de soluto (sólidos solúveis) na polpa lavada é reduzida ($x_1 < x_0$), enquanto a concentração de soluto no licor filtrado aumenta ($y_1 > y_2$).

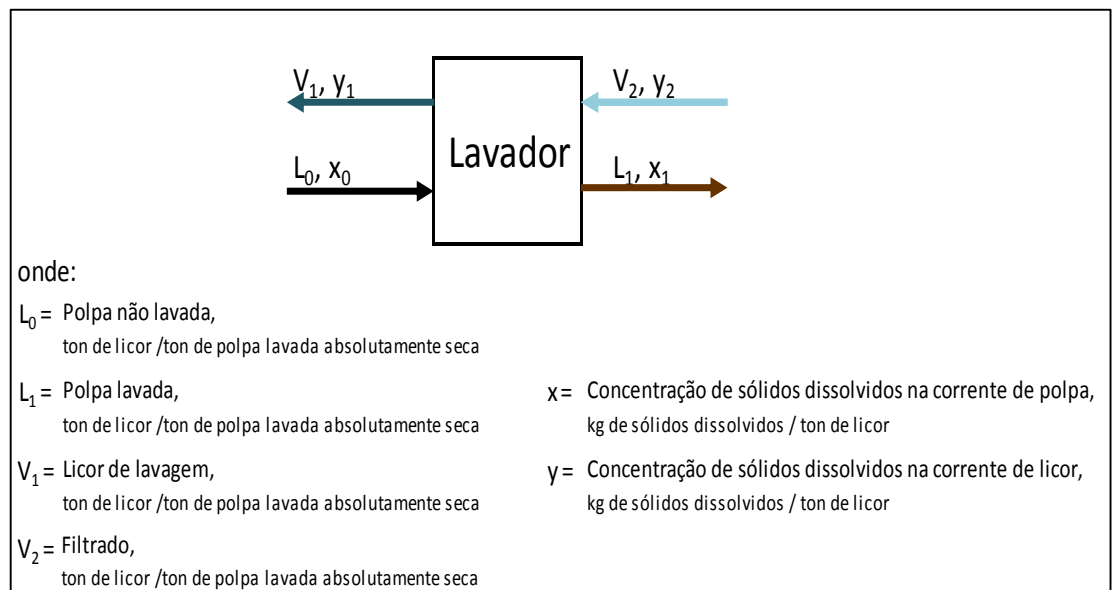


Figura 6 Modelo geral de um estágio de lavagem
Fonte: adaptado de CROTOGINO et al.,1987.

2.2.1 Licor de lavagem

Podemos citar três parâmetros comumente usados para descrever a quantidade de água de lavagem usada nas operações de lavagem de polpa.

O fator de diluição (FD) representa a quantidade de água de lavagem aplicada em excesso para lavar a polpa visando obter um deslocamento total do licor original. Um fator de diluição mais alto proporciona uma melhor lavagem, este valor indica a quantidade de água a ser evaporada sendo assim possui grande impacto na área de evaporação do licor preto.

Para a lavagem por deslocamento, $FD = 0$, significa que o licor contido na manta de celulose é deslocado por uma quantidade de licor igual aplicada sobre a manta. Porém quando a polpa é lavada com menos água do que a quantidade de licor que deixa o sistema, o fator de diluição é negativo, indicando uma lavagem ineficiente (CROTOGINO *et al.*,1987).

Usualmente o valor considerado para o fator de diluição é de $2,5\text{m}^3/\text{ADt}$.

Fórmula 1:

$$FD = V_2 - L_1$$

$$FD = \frac{\text{ton. de licor de lavagem alimentado} - \text{ton. de licor que deixa o sistema com a polpa lavada}}{\text{ton de polpa lavada absolutamente seca}}$$

Taxa de licor de lavagem (R), é definida levando-se em conta a quantidade de licor que deixa o sistema com a polpa, é a razão entre o fluxo de licor usado nos chuveiros de lavagem dividido pelo licor que deixa o lavador com a polpa lavada. Quando a consistência da polpa da descarga conhecida é possível relacionar R e FD ; para lavagens por deslocamento com $R = 1$ sugerem que o licor contido na manta é deslocado por uma quantidade igual à quantidade licor de lavagem alimentada (CROTOGINO *et al.*,1987).

Fórmula 2:

$$R = V_2/L_1$$

$$R = \frac{\text{Licor de lavagem alimentado}}{\text{Licor que deixa o sistema com a polpa lavada}}$$

Relação de licor em peso (W), relaciona a vazão de filtrado gerado na lavagem e o licor que deixa os lavadores com a polpalavada. Quando não ocorre alteração na consistência ao longo do lavador, R e W são praticamente iguais, desde que as alterações na densidade do licor sejam pequenas (CROTOGINO *et al.*, 1987).

Fórmula 3:

$$W = V_1/L_0$$

$$W = \frac{\text{Filtrado que deixa o sistema}}{\text{Licor que deixa o sistema com a polpa lavada}}$$

2.2.2 Remoção de soluto

O rendimento da lavagem (Y) e a relação de deslocamento (DR) definem a quantidade de soluto removido da polpa de celulose durante a etapa da lavagem.

O rendimento da lavagem (Y) representa a porcentagem de sólidos solúveis removidos da polpa, melhor rendimento na lavagem ocorre quando é considerada a situação ideal onde ocorre a máxima redução possível do soluto na polpa que deixa o lavador, pois o licor de lavagem (condensado) utilizado não possui sólidos dissolvidos (soluto).

Fórmula 4:

$$Y = 1 - \frac{L_1x_1}{L_0x_0} = \frac{V_1y_1}{L_0x_0} = \frac{V_1y_1 - V_2y_2}{L_0x_0} \times 100 = \%$$

$$Y = \frac{\text{Sólidos dissolvidos removidos}}{\text{Sólidos dissolvidos na corrente que alimenta o sistema}}$$

A relação deslocamento (DR), é o parâmetro usado para descrever a eficiência do deslocamento, leva-se em conta que o licor de lavagem contém soluto, em ambos os casos considera-se que existe fluxo laminar perfeito do licor através da manta (CROTOGINO *et al.*, 1987).

Fórmula 5:

$$DR = \frac{x_0 - x_1}{x_0 - y_2} \quad (6)$$

$$DR = \frac{\text{Redução de sólidos dissolvidos removidos}}{\text{Máxima redução de sólidos dissolvidos possível}}$$

Para estes cálculos definem-se como premissa que a polpa a ser lavada não pode deixar o sistema com uma quantidade de sólidos solúveis dissolvidos inferiores a quantidade de sólidos solúveis dissolvidos no licor de lavagem que alimenta o sistema, ou seja, a polpa não pode sair do sistema mais “limpa” do que o licor que está sendo usado para lava-la.

A remoção de soluto ainda pode ser medida como perda de soda na lavagem, que representa a quantidade de sódio que deixa o sistema com a polpa de celulose lavada, ou seja, representa a perda de produtos químicos utilizados no cozimento que não foram recuperados, pois estão “presos” á polpa, esta perda é compensada com a reposição de sulfato de sódio, sendo quantificada com quilos de sulfato de sódio por tonelada de polpa de celulose lavada completamente seca (kg Na₂SO₄/ODt), sendo seu custo incorporado ao custo de produção.

A perda na lavagem pode ainda ser medida pela demanda química de oxigênio (COD) que indica a quantidade de matéria orgânica existente na polpa que deixa o sistema de lavagem, ou ainda pela quantidade de sólidos dissolvidos.

Os parâmetros descritos acima podem ser usados para caracterizar o desempenho de lavadores, desde que estes estejam operando em condições de processo similares com consistência de alimentação e descarga iguais.

2.2.3 Eficiência de lavagem

Segundo ROGERS *et al.* (1995), a eficiência de um lavador depende de quatro variáveis básicas: consistência de alimentação e descarga, relação de deslocamento (DR) e o fator de diluição (FD), o que torna muito difícil a comparação de diferentes máquinas, ou seja, lavadores com diferentes desenhos como prensas, difusores, filtros a vácuos e lavadores pressurizados. Para tornar possível a comparação de desempenho (eficiência de lavagem) de lavadores com condições de processo diferentes sem a influência das consistências de alimentação e descarga, utiliza-se a relação de deslocamento equivalente (EDR) e a eficiência de básica de Norden (E).

A fator de eficiência básica de Norden, é o parâmetro de eficácia mais amplamente utilizado para avaliar o desempenho de um sistema de lavagem, advém da avaliação do desempenho de um sistema de lavagem hipotético, ou seja, um sistema de lavagem contracorrente ideal onde a polpa com uma concentração de sólidos dissolvidos mais alta (L_0) é perfeitamente homogeneizada com o licor de lavagem que alimenta o sistema (V_2), sendo que a corrente de

filtrado (V_j) e polpa lavada (L_j) que deixam este sistema possuem a mesma concentração de sólidos solúveis dissolvidos ($y_j = x_j$).

Assim, o fator de eficiência Norden foi definido como o número de estágios ideais necessários para atingir as mesmas concentrações ($x_n = y_1$) e fluxos de descarga ($L_n = V_1$) em um sistema de lavagem real ou lavador real (CROTOGINO *et al.*, 1987).

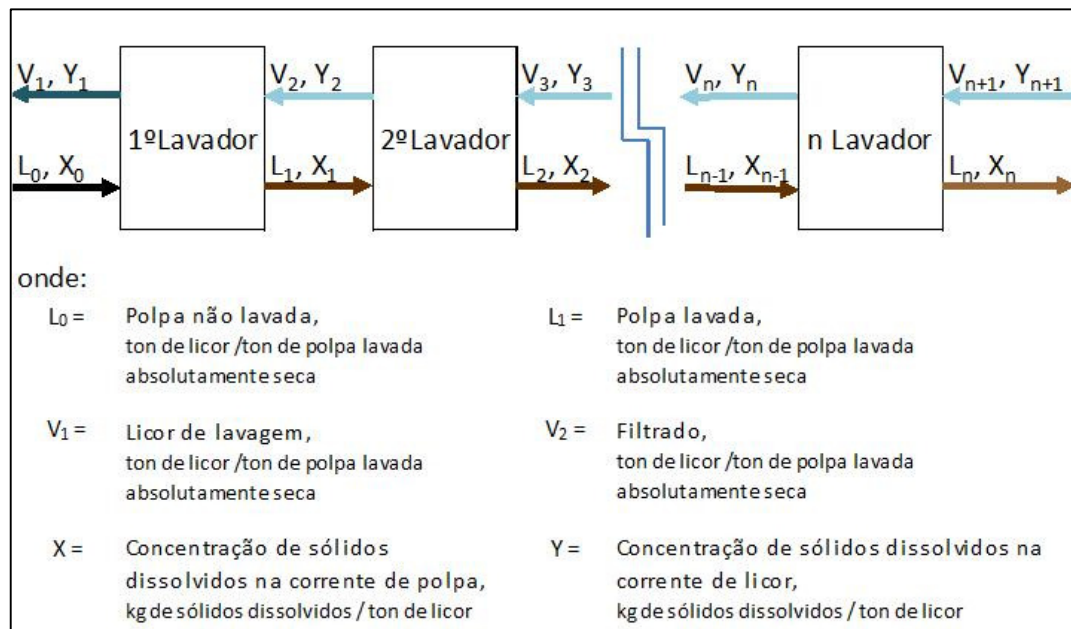


Figura 7 Modelo de um sistema de lavagem contracorrente em serie contendo N estágios de lavagem
Fonte: adaptado de CROTOGINO *et al.*, 1987.

O fator eficiência básica de Norden (E) para um sistema de lavagem geral é definida pela Fórmula 6, que não é função da consistência de alimentação da polpa e sim da consistência de descarga (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

Fórmula 6:

$$E = \frac{\log \frac{L_0}{L_1} \left(\frac{x_0 - y_1}{x_1 - y_2} \right)}{\log \left(\frac{V_2}{L_1} \right)}, V_2 \neq L_1$$

Fórmula 7:

$$E = \frac{L_1(y_1 - y_2)}{L_0(x_0 - y_1)}, V_2 = L_1$$

(R = 1. Condição pouco comum)

Segundo CROTOGINO *et al.* (1987), considerando um fluxo de descarga de polpa constante para todos os estágios, a consistência de descarga deve ser a mesma. Uma vez que este não é o caso, foi desenvolvido o fator de Norden modificado (E_{st}), o qual não depende da consistência de alimentação nem da consistência de descarga, visto que é definido à uma consistência de descarga padrão (10 ou 12% = E_{10} ou E_{12}).

Fórmula 8:

$$E_{st} = \frac{\log \frac{L_0}{L_1} \left(\frac{x_0 - y_1}{x_1 - y_2} \right)}{\log [1 + (FD/L_{st})]}, V_2 \neq L_1$$

Onde:

Fórmula 9:

$$L_{st} = \frac{(100 - C_{st})}{C_{st}}$$

e

$$C_{st} = \text{consistência padrão}$$

Conforme mencionado anteriormente, o fator de eficiência de um sistema de lavagem pode ser calculado somando-se os fatores de Norden modificado de cada estágio individual. Desta forma é possível comparar com base no fator de Norden modificado, equipamentos lavadores com diferentes desenhos ou lavadores operando com o mesmo fator de diluição (FD) e com consistências diferentes.

A taxa de deslocamento equivalente (EDR), e o fator de Norden modificado (E_{st}), são parâmetros de performance independentes das consistências de descarga e de alimentação do lavador. EDR expressa o desempenho de lavagem em termos de um lavador hipotético operando com consistência de entrada 1% e consistência de descarga 12%. O lavador hipotético possui um fator de diluição igual ao fator de diluição do lavador real e também possui a mesma perda do real. No caso do EDR define-se perda como a diferença entre a quantidade de sólidos que deixa o sistema com a polpa lavada (L_l) e a quantidade de sólidos que entra com o licor de lavagem (V_2) (CROTOGINO *et al.*,1987).

Fórmula 10:

$$Perdas = L_1x_1 - V_2y_2$$

Fórmula 11:

$$(1 - EDR) = (1 - DR)(DCF)(ICF)$$

Onde:

Fórmula 12:

$$DCF = (1/7.33)L_d$$

DCF = fator de correção da descarga

Fórmula 13:

$$L_d = (100 - C_d)/C_d$$

C_d = consistência de descarga

Fórmula 14:

ICF = fator de correção da alimentação.

$$ICF = \frac{99(L_i - FD)}{L_i(99 - FD) - L_d(99 - L_i)(1 - DR)}$$

Sendo:

Fórmula 15:

$$L_i = (100 - C_i)/C_i$$

C_i = consistência de alimentação

Quando a taxa de deslocamento equivalente (EDR) e o fator Norden modificado (Est) são calculados para a mesma consistência de descarga (por exemplo 12%), o deslocamento equivalente pode ser expresso por:

Fórmula 16:

$$EDR = 1 - \frac{(R * W - 1)}{(R * W^{Est-1})}$$

2.3 VARIÁVEIS DE PROCESSO

Algumas variáveis operacionais do processo afetam a eficiência de lavagem, dentre elas podemos citar:

2.3.1 Característica da polpa

As características da polpa dependem da espécie de madeira que está sendo utilizada, do processo de polpação aplicado e do grau de cozimento das fibras.

Por exemplo, um grau de cozimento mais alto, ou seja, um número *Kappa* mais baixo, as fibras da polpa cozida contém uma quantidade de lignina mais baixa e formam uma “rede” mais densa, com uma drenabilidade mais baixa e grande quantidade de sólidos orgânicos e inorgânicos dissolvidos no licor que compõe a polpa a ser lavada. Para alcançar um número *Kappa* mais baixo torna-se necessário utilizar uma maior quantidade de álcali, o que torna o pH mais alto ao final do cozimento que dificulta a lavagem pois diminui a drenabilidade da polpa.

2.3.2 pH

O pH da polpa é resultado do estágio anterior e da origem do licor de lavagem, não é usual utilizar o pH como um parâmetro de controle nos estágios de lavagem. Porém em alguns casos esta estratégia pode ser adotada, a exemplo da lavagem da polpa do estágio ácido (primeiro estágio do branqueamento), onde a polpa ácida é lavada com o filtrado proveniente do estágio de extração alcalina.

Um alto valor de pH diminui a drenabilidade da polpa devido ao inchamento das fibras, mas melhora a solubilidade da lignina a ser lavada o que facilita a extração.

2.3.3 Temperatura de lavagem

Segundo CROTOGINO *et al.* (1987), o efeito da temperatura é pouco notado quando existe um tempo de contato mais longo entre a polpa contendo maior quantidade de sódio dissolvido e o licor de lavagem, porém quando o tempo de contato é curto nota-se que uma

temperatura de lavagem mais elevada melhora a drenagem e a diluição dos sólidos, contribuindo para uma maior eficiência de lavagem.

Quando a polpa é submetida a uma temperatura de lavagem mais alta o sabão formado durante a etapa do cozimento permanece dissolvido, a polpa torna-se mais flexível tornando mais fácil a remoção de moléculas de impurezas maiores, em torno de 70°C torna-se mais fácil extrair as impurezas e a drenabilidade da manta também é maior (PHILIPP *et al.*, 1988).

2.3.4 Ar

A presença de ar na alimentação da polpa ou no licor de lavagem afeta negativamente a operação da planta, pois afeta a formação da manta e reduz a capacidade do lavador. Os altos índices de ar podem ocorrer em virtude do teor de sabão formado durante a etapa do cozimento, devido à dissolução dos extrativos da madeira que são solubilizados durante a etapa do cozimento, em condições alcalinas estes extrativos geram espuma. Na alimentação da lavagem, essa espuma está muitas vezes em estado sólido e não começa a se dissolver até que o teor de sólidos solúveis dissolvidos no licor diminua (concentração) (PHILIPP *et al.*, 1988).

Assim, uma grande parte do sabão passa através do primeiro estágio da lavagem e se dissolve em forma lavável somente no segundo estágio. As moléculas de sabão repelem a água e, portanto geram espuma facilmente. Recomendá-se remover a fração de espuma gerada nos tanques de filtrado da planta de lavagem, de afim de evitar que o sabão não se acumule nas circulações do licor. A composição dos extrativos de *hardwood* (folhosas) e *softwood* (coníferas), os extrativos de *hardwood* (folhosas) não são tão solúveis (PHILIPP *et al.*, 1988).

O ideal em sistemas de lavagem é que a planta opere da forma mais estável possível, sem variações nos níveis dos tanques de licor, sem perturbações nos fluxos de licor para os lavadores, sem grandes acúmulos de sabão nas correntes de licor, pois mesmo que estas perturbações ocorram por períodos curtos, seus efeitos podem afetar o processo por um longo período de tempo. As dosagens de antiespumante nos tanques de licor minimizam a formação de espuma devido ao acúmulo de sabão (PHILIPP *et al.*, 1988).

2.3.5 Consistência de alimentação da polpa

A consistência de alimentação da polpa em um lavador é fator muito importante, pois em consistências de alimentação muito baixas não ocorre uma boa formação da manta (buracos na manta no caso dos filtros), por onde ocorre passagem de ar pela manta auxiliando a formação de

espuma no licor extraído por filtração, já em consistência muito altas corre-se o risco de entupir o lavador. No início de operação dos lavadores, é interessante que a consistência inicial seja baixa para que a manta formada seja uniforme, porém no decorrer da lavagem torna-se interessante aumentarmos um pouco a consistência para aumentar a eficiência de lavagem, sendo assim cabe ao processo (operação) a tarefa de encontrar o equilíbrio entre a eficiência de lavagem e a consistência de alimentação da polpa (PHILIPP *et al.*, 1988).

2.3.5 Taxa de produção

Muitas fábricas mais antigas operam com uma taxa de produção maior do que a produção do projeto considerada originalmente, este fato acarreta uma sobrecarga no sistema de lavagem, pois os lavadores originais e o próprio sistema de lavagem como um todo não sofreu nenhuma alteração. Esta sobrecarga acarreta uma baixa eficiência de lavagem o que leva a um alto consumo de químicos nos sistemas posteriores.

3 EQUIPAMENTOS DE LAVAGEM

A lavagem da polpa de celulose é a operação mais comum em fábricas de celulose, a lavagem de polpa marrom pode ser dividida em pré-lavagem, quando esta ocorre antes do estágio de deslignificação e pós-lavagem quando esta ocorre logo após o estágio de deslignificação, também existe a lavagem da polpa entre os estágios de branqueamento. Os equipamentos apresentados a seguir podem ser utilizados nas diversas etapas de lavagem, com exceção da etapa de lavagem que ocorre no fundo do digestor contínuo.

Em plantas que operam na etapa de cozimento com digestores contínuos, a pré-lavagem ocorre também na parte inferior do vaso de cozimento (digestor), já em plantas que operam com digestores batelada a lavagem, na maior parte dos casos, ocorre fora do digestor

Conforme mencionado nos Pressupostos Teóricos, a lavagem da polpa é um processo que ocorre em contracorrente, os lavadores comerciais utilizam uma ou mais operações descritas anteriormente, sendo estas: diluição, agitação, extração e deslocamento.

A etapa de agitação da polpa durante a diluição da polpa com licor de lavagem é de suma importância a fim de garantir que haja a difusão do licor que entra com a polpa (licor original/maior teor de contaminantes) com o licor de lavagem (licor mais fraco/baixo teor de contaminantes), uma agitação efetiva acelera a etapa de difusão. Quando ocorre este contato íntimo entre as fibras e as diferentes qualidades de licor, é estabelecido um equilíbrio, que resulta em um licor a ser extraído com conteúdo de sólidos dissolvidos menor do que o que entrou no sistema com a polpa, porém mais alto do que o teor que entrou com o licor de lavagem.

O licor resultante é então extraído sob pressão pelo diferencial da gravidade, sob vácuo ou sob pressão física aplicada sobre a polpa. A combinação de diluição, agitação e extração pode ser efetuada a baixa ou a média consistência. Nesta seção serão descritos os equipamentos de lavagem mais utilizados.

3.1 LAVAGEM *HI-HEAT* CONTRA CORRENTE

Em digestores contínuos para cozimento de polpa *Kraft*, após a zona de cozimento, onde ocorrem as reações de degradação da lignina existente nos cavacos, por meio do ataque promovido pelo licor de cozimento que contém alto teor de álcali em condições controladas de temperatura, pressão e tempo.

Existem peneiras de extração que são responsáveis por extrair o licor de cozimento consumido, ou seja, licor com baixo residual de álcali e alto teor de sólidos solúveis dissolvidos (orgânico e inorgânico).

Este licor preto fraco é extraído pelo conjunto de peneiras perfuradas situadas na zona inferior do vaso de cozimento formando um anel de extração de licor, o licor extraído segue para o sistema de tratamento de licor e deste para a evaporação, (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

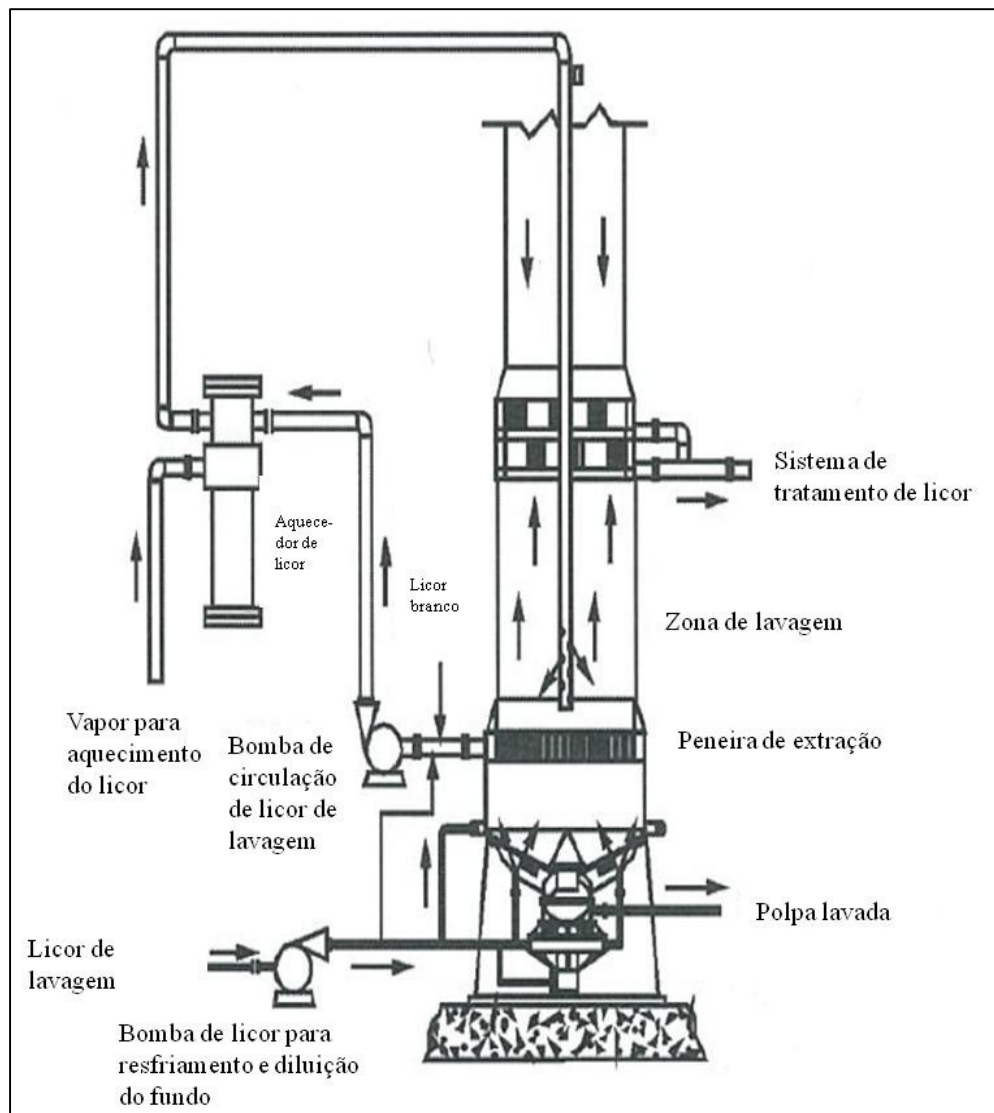


Figura 8 Lavagem Hi-Heat contracorrente no fundo de um digestor contínuo, a polpa se move na direção descendente e o licor na ascendente.
Fonte: adaptado – GULLICHSEN, *et al.*, 2000.

Para extrair o licor são utilizados conjuntos de peneiras; o primeiro conjunto de peneiras extratoras extrai o licor proveniente da zona de cozimento que segue junto com a polpa no sentido

descendente, já o licor de deslocamento proveniente da lavagem do fundo do digestor que por que flui no sentido ascendente é extraído pelo segundo conjunto de peneiras.

O licor extraído pelas peneiras de extração (Figura 9) é preferencialmente do licor livre existente na coluna de polpa de celulose que se move verticalmente no sentido descendente, o licor que está contido no interior dos cavacos não é extraído tão facilmente, e continua se movendo junto com o fluxo descendente da polpa (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Para remover este licor que se encontra retido na polpa, é necessário “lavar” a polpa, sendo esta uma coluna hidráulica, licor de lavagem com teor de sólidos dissolvidos mais baixo e fluxo ascendente é alimentado no fundo do vaso do cozimento, forçando um contato mais efetivo entre as fibras e o licor retido nelas com alto teor de sólidos dissolvidos com o licor de lavagem. Este licor aplica certa pressão sob o fluxo de polpa e licor descendente sempre que a vazão de licor ascendente for maior que o fluxo descendente, a esta etapa dá-se o nome de lavagem *hi-heat* (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Nesta etapa de lavagem *hi-heat* o licor de lavagem é bombeado para o fundo do digestor, parte deste licor segue na direção ascendente e parte é usado para diluir a polpa a ser descarregada, destinado a lavagem é distribuído transversalmente no fundo do vaso pelo sistema de circulação de licor de lavagem, que é constituído por uma seção de peneira de extração perfurada, bomba de circulação e tubo central de distribuição o licor de lavagem que distribui o licor axialmente, vide Figura 9, (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

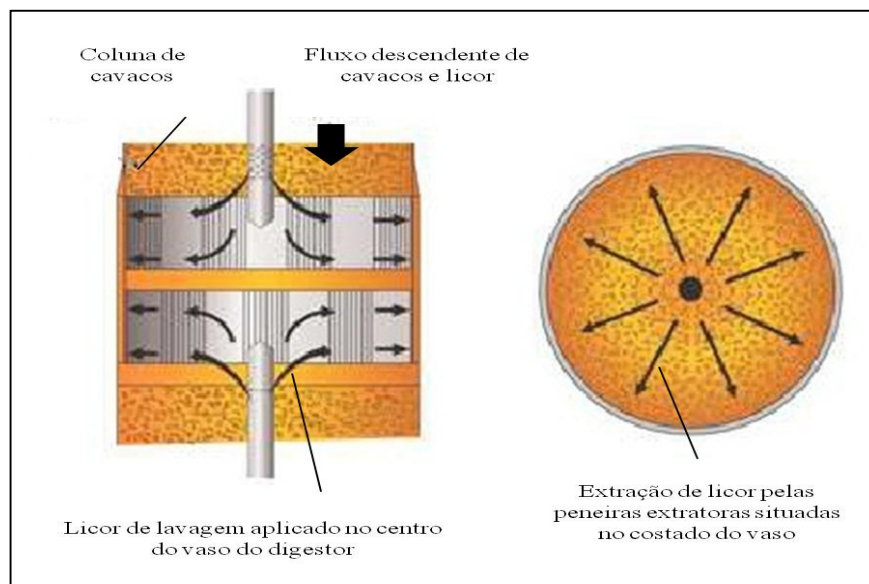


Figura 9 Lavagem radial - Distribuição de licor pelo tubo central, fluxo do licor do centro do digestor para as peneiras de extração.

Fonte: adaptado – LAAKSO, S., 2008.

Sendo assim o fundo do digestor opera sempre em contra corrente, onde a polpa segue no sentido descendente sendo descarregada pelo fundo do vaso e o licor de lavagem segue no sentido ascendente passando pela coluna de polpa e sendo extraído nas peneiras de extração de licor (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

No caso da Metso (fornecedor de tecnologia) além da lavagem radial promovida pelo tubo central é sugerido ainda a instalação de bocais de distribuição de licor de lavagem no entorno do vaso logo abaixo da segunda secção da peneira de extração com o objetivo de reduzir a temperatura da polpa antes que esta seja descarregada, esta zona de lavagem aumenta a eficiência de lavagem do vaso, a esta lavagem dá-se o nome de *Dual WashTM*, neste caso o tubo central termina próximo a altura da lavagem radial.

Por definição, o fator de diluição da zona de lavagem (FD), é igual à quantidade de filtrado adicionado à parte inferior do digestor, este licor está em excesso à quantidade de licor que sai do sistema através da linha de descarga, ou seja, os digestores operam com fator de diluição em torno de 2 – 3. Caso o fator de diluição $FD = 0$, significa que o licor a quantidade de licor de lavagem utilizado é igual à quantidade de licor que desce com a polpa em fluxo descendente (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Quando o digestor opera sob condições de projeto, ou seja sem sobrecarga, o estágio de lavagem *hi-heat* pode ser considerado um dos sistemas de lavagem mais eficientes, com consistência de alimentação e descarga em torno de 10%, eficiências de lavagem $E_{10} = 6 - 9$ e taxa de deslocamento $DR = 0,96$ (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Esta excelente eficiência de lavagem se dá devido aos seguintes fatores (GULLICHSEN, *et al.*, 2000):

- Bom deslocamento do licor de cozimento com carga de álcali e grande quantidade de sólidos dissolvidos;
- Tempo de retenção adequado para proporcionar a difusão dos compostos dissolvidos no interior da madeira para o exterior da mesma;
- Lavagem em contra corrente maximiza os gradientes de concentração entre a fase sólida e a fase líquida, o que também aumenta as taxas de difusão dos compostos dissolvidos.

Portanto, a lavagem *hi-heat* envolve os mecanismos de lavagem por difusão e deslocamento, sendo assim, os parâmetros importantes que influenciam a performance da lavagem estão relacionados com a vazão de licor extraído, o fator de diluição da zona de lavagem, o tempo de retenção na zona de lavagem contra corrente e a temperatura nesta região (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Os digestores podem operar com capacidade acima da capacidade de projeto, porém esta condição não é desejável, pois reduz a eficiência de lavagem. Digestores operando com taxas de 15 – 50% da capacidade de projeto podem resultar em um decréscimo de 5 - 15% das taxas de deslocamento (*DR*) e um fator de diluição de 0 - 1%. Vários fatores podem limitar a capacidade de extração do digestor pode ocorrer o entupimento das peneiras de extração, com fibras ou incrustação por carbonato de cálcio (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

3.1.2 Diluição e descarga a frio

A Figura 10 ilustra a área de diluição e descarga de polpa no fundo do vaso do digestor. O filtrado usado para a diluição e lavagem da polpa pode ser alimentado em três locais: *i*) pelo tubo central, por bocais de alimentação de licor localizados no entorno do tubo, *ii*) através de uma série de 4 - 8 bicos uniformemente espaçados localizados na parte inferior do casco do digestor, *iii*) nos bocais de alimentação de licor dos braços do raspador de fundo que direciona a polpa para a descarga (PHILIPP *et al.*, 1988).

Além de fornecer licor de lavagem para a zona de lavagem *hi-heat*, filtrado ainda resfria e dilui a polpa antes da descarga interrompendo as reações de cozimento que por ventura ainda estejam em andamento. A consistência de descarga da polpa deve ser 9-11%, e a temperatura de descarga desejável fica em torno de 80 - 90°C (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Este resfriamento da polpa é importante para preservar as fibras e a resistência da polpa; além disso, o fato de resfriar a polpa antes de descarrega-la no tanque de descarga para uma temperatura inferior ao ponto flash do vapor minimiza a geração dos gases mal cheirosos gerados durante a descarga em tanques atmosféricos e no sistema de lavagem.

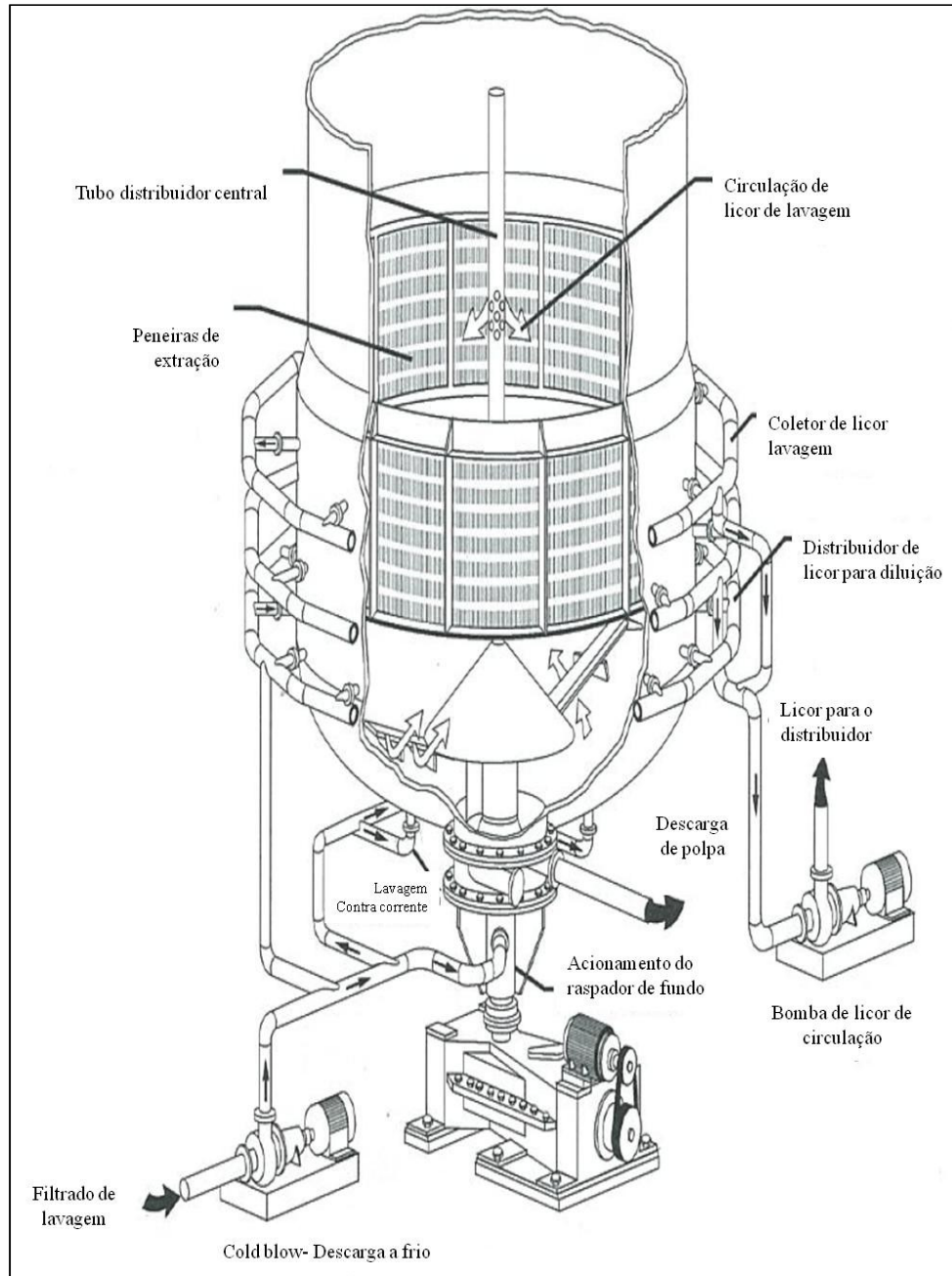


Figura 10 Lavagem *Hi-Heat* contracorrente, diluição e descarga de polpa em um digestor contínuo
 Fonte: adaptado – GULLICHSEN, *et al.*, 2000

3.2 FILTROS LAVADORES À VÁCUO

Os filtros lavadores à vácuo são os mais antigos equipamentos de lavagem, foram amplamente utilizadas até meados da década de 80, são compostos por um cilindro rotativo, denominado tambor rotativo, revestido com um tela metálica e tela de fio sintético, o tambor encontra-se parcialmente imerso em uma tina metálica que contém a polpa a ser lavada.

Este filtro pode ter várias seções de lavagem, sendo assim quanto maior for o número de lavagens por deslocamento, maior será a eficiência de lavagem. A lavagem realizada nestes equipamentos se dá em função das diluições sucessivas que ocorrem nas tinas de alimentação dos filtros entre um estágio e outro de lavagem e dos deslocamentos sucessivos do licor contido na polpa por meio a aspensão / distribuição homogênea de licor de lavagem sobre a manta (PHILIPP *et al.*, 1988).

A polpa proveniente do cozimento ou de um estágio de filtração anterior com consistência 10 - 12%, é diluída com licor de lavagem para 0,7 - 1,5 % de consistência a fim de alimentar a bacia do filtro rotativo de forma adequada. Consistências mais altas dificultam a distribuição uniforme da polpa na bacia prejudicando a formação da manta, o fator de diluição (FD) utilizado fica em torno de 2,5 e eficiência de lavagem (E_{10}) de somente 3,5 (PHILIPP *et al.*, 1988).

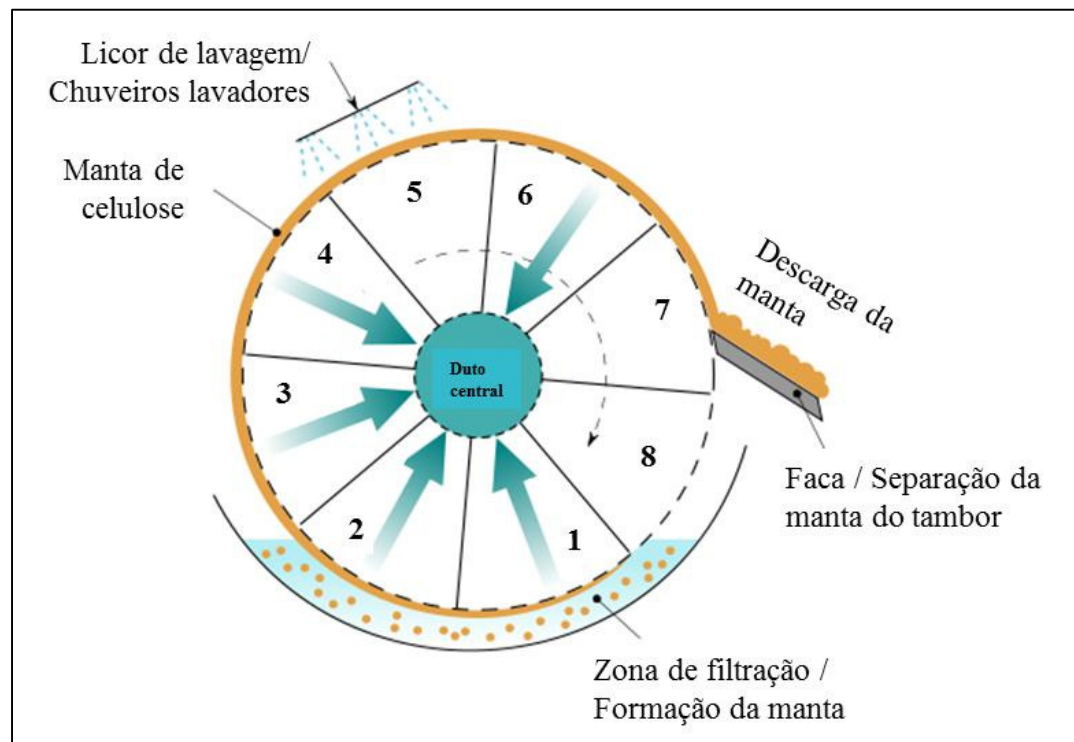


Figura 11 Filtro lavador a vácuo convencional – Zonas de lavagem
Fonte: a Autora

A Figura 11 mostra as diversas seções do filtro rotativo a vácuo e as operações que ocorrem em cada uma delas (PHILIPP, *et al.*, 1988):

Seção 1 e 2 – Formação da manta – o vácuo do interior do tambor rotativo força o licor da bacia do filtro à passar pela tela perfurada da superfície do cilindro rotativo (“suga” o licor com a polpa), o licor passa, mas a polpa de celulose não, a polpa fica retida sobre a superfície do tambor

formando a manta. Para que este equipamento opere de forma satisfatória temperatura de operação não deve estar acima de 85°C, pois a cima desta temperatura a formação do vácuo é prejudicada

Seção 3 e 4 – Extração do licor “sujo” – Nesta etapa ocorre a sucção do excesso de licor da manta (filtração), o licor original extraído segue para o interior do tambor e deste para o tanque de filtrado onde é acumulado para ser alimentado no estágio anterior.

Seção 5 – Lavagem da manta por difusão e extração – O licor de lavagem proveniente do estágio posterior é aspergido sobre a manta, ocorre o fenômeno de deslocamento forçado, licor de lavagem que está sendo aspergido desloca o licor contido na manta forçando sua passagem na direção do interior do tambor rotativo.

Seção 6 – Secagem da manta – Mais vácuo é aplicado para diminuir ao máximo o teor de licor na manta a ser descarregada, nesta etapa o engrossamento ocorre por meio da “drenagem” do filtrado contido na polpa.

Seção 7 – Descarga da manta – Não se aplica vácuo nesta seção, aplica-se ar ou vapor para destacar a manta do tambor, a fim de separar a manta do tambor para que esta possa ser descarregada em um repolpador com consistência entre 10 - 12%.

No repolpador ocorre a fragmentação da polpa, é muito comum que o estágio de lavagem posterior esteja logo após o repolpador, sendo assim a polpa segue para a etapa diluição e alimentação do próximo estágio de lavagem onde ocorrem as mesmas etapas anteriormente descritas, a polpa é diluída com licor preto fraco extraído do estágio de lavagem subsequente (PHILIPP *et al.*, 1988).

Os filtrados provenientes da filtração, da lavagem e da drenagem são misturados no tanque de filtrado, parte deste filtrado segue para a etapa de diluição no início da etapa de lavagem, e o restante segue para o estágio de lavagem anterior, pois conforme o conceito adotado a lavagem se dá em contracorrente, onde a polpa e o licor seguem em sentido contrário.

A Figura 12 mostra detalhes de um filtro lavador a vácuo, IMPCO® Coru-Dek™ II da GL&V.

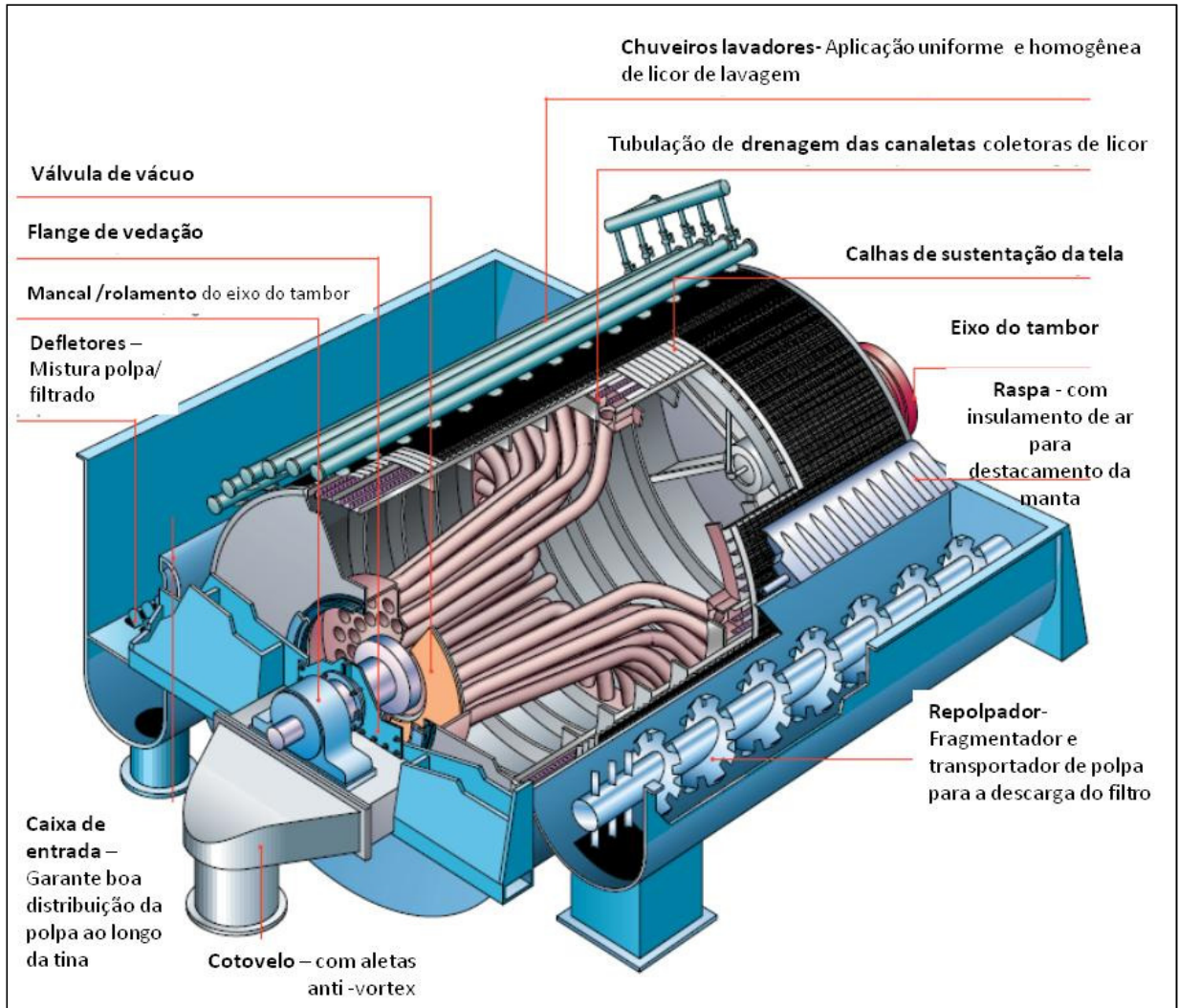


Figura 12 Filtro lavador a vácuo convencional – Detalhes de construção
 Fonte: adaptado – *GL&V Brochure*

Este equipamento de lavagem sofre influência de alguns fatores como (PHILIPP *et al.*, 1988):

- **Consistência de alimentação da massa** – É necessário que a polpa seja muito bem agitada durante a etapa de diluição anterior a alimentação da tina do filtro para evitar a formação de flocos e grumos. A polpa proveniente do digestor deve ser diluída de 10 - 12% para no máximo 1,5%, sendo assim é recomendável que a agitação vigorosa da massa durante a etapa de diluição quebre os flocos que poderiam influenciar negativamente na formação da manta.

A consistência de alimentação também deve ser o mais uniforme possível, para que a manta formada seja regular e homogênea, pois uma manta irregular, com partes mais espessas

pode acarretar uma lavagem ineficiente. Porém, a consistência da alimentação sempre é função do grau de escoamento de polpa e da taxa de produção.

– **Velocidade do tambor** – Os tambores são dotados de dispositivos que permitem variar sua velocidade, para obter uma película mais ou menos espessa ajustando a espessura da manta a uma taxa de produção maior ou menor. Visto que uma manta muito espessa é mais difícil de drenar, o que pode acarretar em uma maior de arraste de sólidos solúveis para o próximo estágio de lavagem reduzindo sua eficiência, por outro lado uma manta com espessura reduzida facilita a passagem do ar pela manta junto com o filtrado ocasionando a formação de espuma.

– **Ar** – A existência de ar na polpa forma bolhas que se encontram finamente dispersas entre as fibras, estas bolhas impedem a livre passagem do licor entre as fibras, dificultando a difusão, o ar forma caminhos preferenciais evitando que o licor de lavagem entre em contato com todas as fibras, quando ocorre a formação de bolhas na manta formada sobre o tambor caso estas bolhas venham a estourar elas facilitam a entrada de ar no interior do tambor reduzindo o vácuo.

Para evitar este problema os tanques de filtrado devem ser bem dimensionados para proporcionar tempo suficiente para que as bolhas de ar possam subir para a superfície do licor e se desprender. Para auxiliar neste processo pode-se dosar antiespumante, este químico abaixa a resistência da película que envolve a bolha de ar, permite a formação de bolhas maiores, que flutuam e se despendem mais rápido.

– **Chuveiros de lavagem** – São responsáveis pela distribuição uniforme do licor de lavagem sobre a manta, a disposição dos conjuntos de chuveiros deve ser feita de modo a assegurar uma distribuição igual de licor de lavagem sobre toda manta, os bicos devem pulverizar o licor e sua manutenção deve ser simples. A velocidade excessiva do licor de lavagem pode comprometer a manta formada, podendo ainda causar espuma, já uma velocidade insuficiente pode aplicar licor em somente algumas partes da manta, não obtendo uma boa distribuição e acarretando uma lavagem insuficiente.

Os filtros a vácuo possuem algumas limitações como que o penalizam no que diz respeito à instalação dos equipamentos na área (ROGERS et al., 1995):

– Sua baixa carga faz com que o conjunto lavador e tanque de filtrado resultem em uma grande unidade que requer um espaço considerável para ser instalado, além de necessitar de prédios altos que comportem a perna de vácuo (perna barométrica) requerida para a geração do vácuo necessário (altura $\approx 15\text{m}$);

- Devido as baixas consistências de alimentação (cst máxima $\approx 1,5\%$) os volumes de licor movimentados são altos, o que requer bombas e tanques de licor com grande capacidade;
- É difícil manter os chuveiros e seus bicos de aplicação de licor limpos, pois devido as fibras estes tem a tendência de entupir, o que torna a lavagem desigual influenciando negativamente a eficiência de lavagem;

O Filtro *GF* (*GFF – Gas Free Filter*) é um filtro a vácuo modificado, concebido com uma válvula rotativa que separa o ar do filtrado a ser descarregados. O ar é expelido de volta para a capota do filtro, assim, uma menor quantidade gases mal cheirosos é emitida para a atmosfera. Devido a este aperfeiçoamento a perna de vácuo do GFF opera de forma mais eficiente proporcionando maior consistência de saída de polpa, sendo sua consistência de alimentação 1,5 e consistência de descarga 12%, fator de diluição utilizado $FD = 2,5$ e eficiência de lavagem $E_{10} = 4$, (Gabov, K. 2009).

3.3 FILTRO CB – COMPACTION *BAFFLE FILTER*

Tendo em vista os problemas dos filtros a vácuo, o filtro *CB* (Figura 13), sugeriu como um novo conceito que prevê (ROGERS et al., 1995):

- A eliminação da perna de vácuo, pois este equipamento opera pressurizado, este fato torna a instalação mais compacta visto que não é mais necessário um prédio com 15m de altura para a instalação da perna de vácuo;
- O tambor não precisa ser revestido com uma tela sintética sobre a tela metálica do tambor, pois neste conceito a tela de aço inoxidável é finamente perfurada;
- A polpa pode alimentar o filtro com consistência de alimentação entre 3 – 4% reduzindo um pouco o volume circulante de licor na lavagem;
- Não são mais utilizados chuveiros para efetuar a lavagem da manta, a polpa é diretamente alimentada na tina do lavador para evitar que a polpa forme grumos existe uma lâmina de desfloculação, esta lâmina também ajuda na formação de uma manta uniforme sobre o tambor;
- A capota pressurizada (0,24 – 0,34 atm), produzida por meio de um compressor que pega o “ar” de alimentação o tanque de filtrado do lavador.

A polpa alimenta o filtro com consistência entre 3 – 4%, operando com velocidade de rotação do tambor maior que a velocidade dos filtros convencionais.

A massa passa através de uma lâmina de desfloculação que em combinação com a câmara de entrada cônica, produz uma manta de formação uniforme, proporcionando uma melhor eficiência de lavagem que o à vácuo convencional.

A manta é pressionada entre a chicana de compactação (*compaction baffle*) e o tambor rotativo, esta força faz com que ocorra a extração do licor original antes da aplicação do licor de lavagem, que ocorre na “piscina de lavagem”, o nível da piscina de lavagem mantido constante sendo controlado pela velocidade de rotação do tambor, a polpa lavada é redepositada sobre o tambor, a pressão interna da capota sobre a piscina de lavagem ajuda a retirar o licor da manta por deslocamento, a polpa é então compactada e descarregada (ROGERS et al., 1995).

A pressão interna da capota impede o ar entre em contato com a polpa e se misture ao filtrado. A polpa lavada é descarregada com consistência de até 12-16%, com fator de diluição $FD = 2,5$ e eficiência de lavagem $E_{10} = 3,5 - 4,5$ (ROGERS et al., 1995).

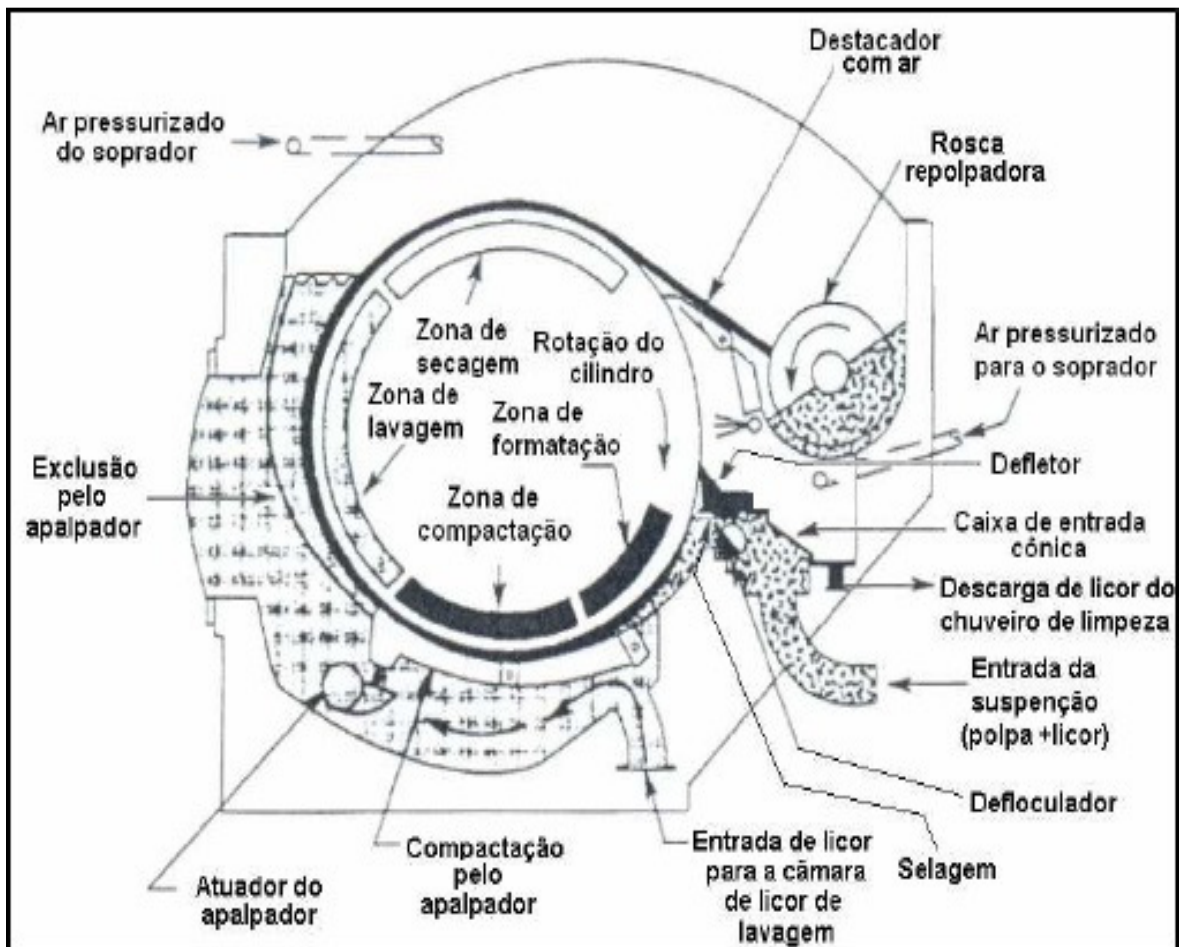


Figura 13 Difusores atmosféricos com um estágio e com dois estágios instalados no topo de um tanque de descarga

Fonte: adaptado – GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

3.4 DIFUSORES

3.4.1 Difusor atmosférico

Os difusores atmosféricos foram concebidos no início dos anos 60, operam a média consistência de alimentação e de descarga entre 10 - 12%, podendo operar com produções de até 3 000ADt/d, as características operacionais típicas dos difusores atmosféricos são baixo consumo de energia e operação simples.

O princípio de operação utilizado por este equipamento é o deslocamento, este equipamento opera à pressão atmosférica, e pode operar com um ou dois estágios (Figura 14). Quando operando em dois estágios o difusor possui um segundo conjunto de peneiras adicionais posicionadas logo abaixo do primeiro conjunto de peneiras e da mesma forma. As eficiências de lavagem medidas para difusores atmosféricos de um estágio ficam na faixa de $E_{10} = 4 - 6$ e para dois estágios $E_{10} = 7 - 8,5$ (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Esta alta eficiência de lavagem é obtida em devido à alta temperatura de lavagem, longo tempo de retenção, bom deslocamento e baixa quantidade de ar na polpa. Por não haver contato da polpa e do licor com o meio externo (ar), ou seja, a polpa fica contida em um ambiente fechado, este equipamento praticamente não emite odor sendo assim não torna-se necessária instalação de um quebrador de espuma no tanque que recebe o licor extraído (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

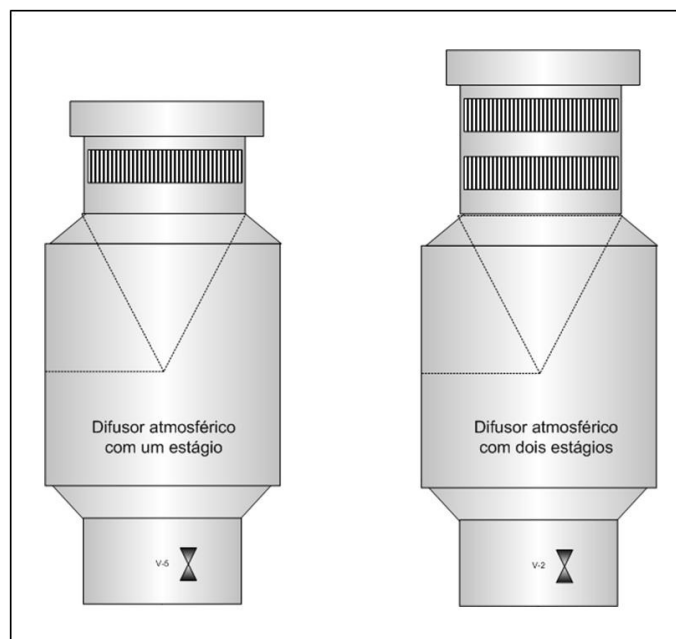


Figura 14 Difusores atmosféricos com um estágio e com dois estágios instalados no topo de um tanque de descarga
Fonte: adaptado – GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Este equipamento é usualmente instalado logo após o cozimento contínuo, sendo alimentado com a polpa proveniente da descarga do digestor com a mesma consistência (cst = 10 - 12%), neste caso pode ser instalado no topo da torre de estocagem de massa. Pode ainda ser instalado após o estágio de deslignificação no topo do reator de deslignificação, ou mesmo no topo das torres do branqueamento, porém este tipo de instalação não é tão comum, apesar de o espaço requerido no último caso ser pequeno e o consumo de energia necessário para a circulação de filtrado ser menor.

O projeto do equipamento prevê um cone de alimentação, casco com tampa, conjunto de peneiras duplas concêntricas (telas perfuradas de 4 - 10 conjuntos) que se movimentam verticalmente por meio de um sistema hidráulico, distribuidor de licor de lavagem e raspador de topo rotativo (montados como um conjunto), redutor de velocidade; a Figura 15 descreve os fluxos de massa e licor em difusor atmosférico instalado no topo do tanque de descarga de massa (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

A polpa alimenta o difusor com consistência de 10-12% pela parte inferior do cone em direção ao topo, o ângulo da parte cônica proporciona um ângulo adequado à melhor distribuição de polpa possível sobre a seção transversal entre os conjuntos de peneiras (anéis concêntricos) (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

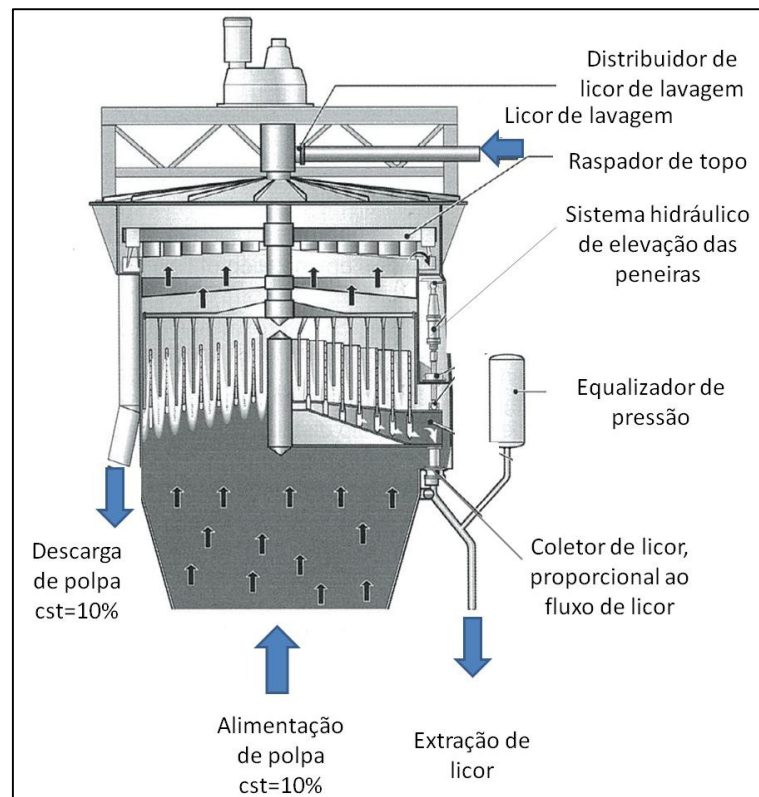


Figura 15 Difusor atmosférico
Fonte: adaptado - GULLICHSEN, *et al.*, 2000.

GULLICHSEN, *et al.* (2000), descreve que o sistema de hidráulico move as peneiras cerca de 15 cm para cima, com velocidade ligeiramente maior que a velocidade da polpa, ao final do percurso, a peneira para na posição superior, a extração de licor é interrompida por alguns segundos, e as peneiras se movem rapidamente para baixo afim de limpar os furos das telas por meio do efeito combinado de contra-lavagem e do movimento de descida.

Cada seção de peneiras tem um fornecimento de licor de lavagem independente, o licor de lavagem é alimentado através dos bicos distribuidores, que distribuem o licor nas diversas seções entre as peneiras onde se encontra a polpa, o licor é deslocado radialmente através da polpa, o licor extraído segue para o tanque de filtrado.

Os coletores e distribuidores de licor são dimensionados em função do fluxo de licor previsto; uma velocidade constante do fluido nos canais, evita o acúmulo de gás nos distribuidores e coletores de licor. O licor extraído através das peneiras é coletado e segue para o tanque de filtrado. Em sistemas de múltiplos estágios o licor extraído de uma unidade superior é alimentado no próximo estágio de lavagem que está logo abaixo na unidade inferior, o tempo de retenção por estágio é de 8 a 10 minutos (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Quando ocorre um aumento significativo de produção o difusor que anteriormente operava com dois estágios pode passar a operar com um estágio somente. A polpa lavada é retirada por meio do raspador de topo rotativo, e cai por gravidade na torre de estocagem ou em um vaso de diluição, a bomba de média consistência, extrai a polpa com consistência entre 10-12% enviando para o próximo estágio de lavagem.

A operação do difusor de topo atmosférico é muito simples: o sistema rotativo do raspador de topo e distribuidor de licor começa a funcionar, inicia-se a alimentação de licor de lavagem, tem início a extração do licor que flui por deslocamento por entre as telas das peneiras, inicia-se a alimentação da polpa, ajusta-se a taxa de produção, passa-se o sistema do modo de operação manual para automático. A Figura 16 representa um difusor atmosférico instalado no topo do tanque de descarga de massa (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

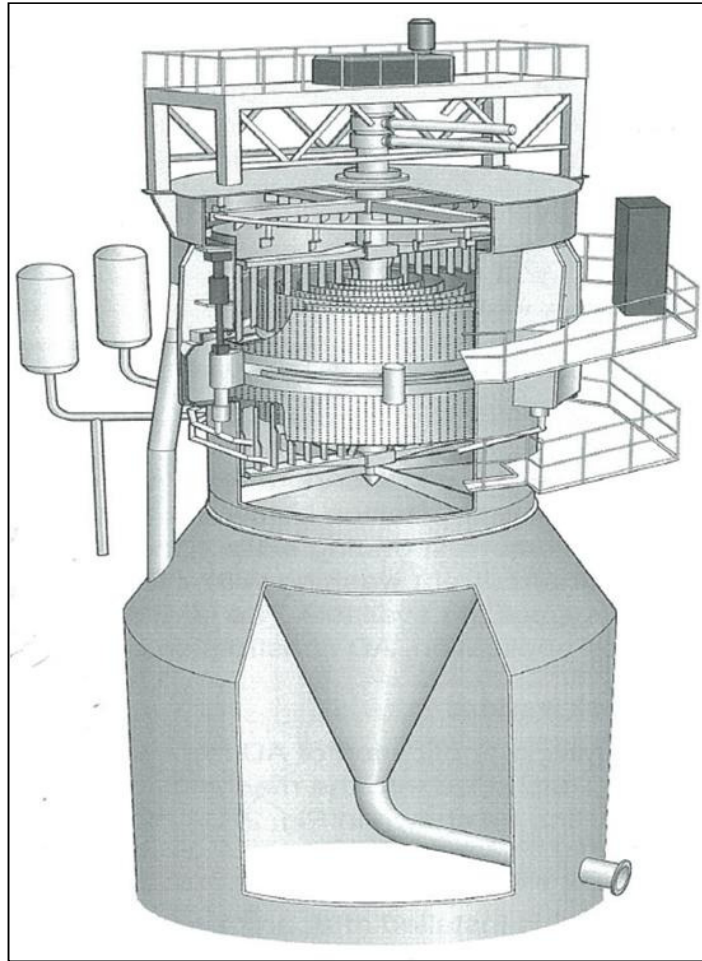


Figura 16 Difusor atmosférico com um estágio instalado no topo de um tanque de descarga

Fonte: adaptado - GULLICHSEN, *et al.*, 2000.

3.4.2 Difusor pressurizado

O difusor pressurizado é um equipamento desenvolvido em meados da década de 70, é um equipamento de lavagem totalmente fechado que opera sob pressão, o princípio de operação utilizado por este equipamento é o deslocamento, as eficiências de lavagem medidas para difusores pressurizados ficam na faixa de $E_{10} = 4,5 - 6,5$ (GULLICHSEN, *et al.*, 2000).

Esta eficiência de lavagem do difusor pressurizado é obtida devido a operação a alta temperatura de lavagem, bom deslocamento do licor, a não existência de ar na polpa, pois a polpa não entra em contato com o ar visto que o equipamento opera sob pressão, já o deslocamento do filtrado ocorre à baixa velocidade. Por operar sob pressão e não haver contato da polpa e do licor com o meio externo (ar), este equipamento praticamente não emite odor (GULLICHSEN, *et al.*,

2000). Normalmente este equipamento opera com polpa proveniente do cozimento contínuo, vide Figura 17.

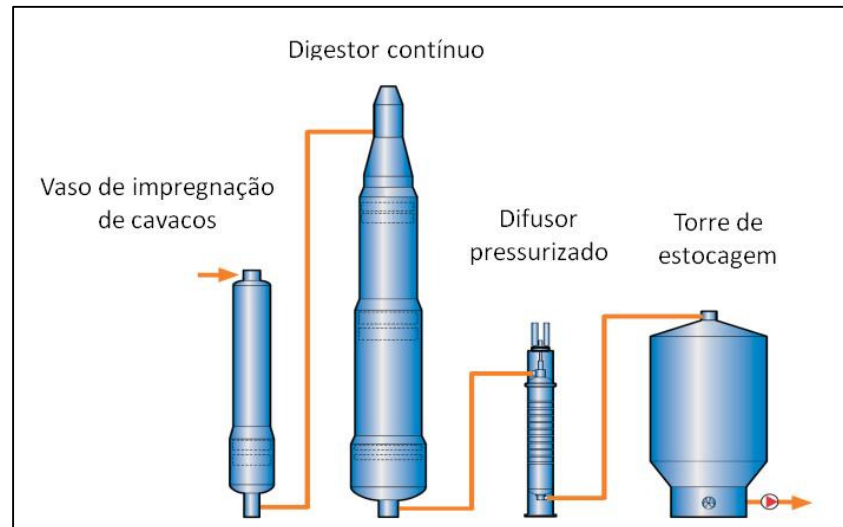


Figura 17 Difusor pressurizado instalado após o cozimento
Fonte: adaptado - *Metso Marketing Brochure*

À exemplo do difusor atmosférico, este equipamento também pode operar com polpa proveniente do estágio de deslignificação (Figura 18). Seu projeto compacto e sob pressão torna possível operar com temperatura em torno de 100°C, difusores pressurizados comerciais são capazes de operar com taxas de produção de 200 - 3 000 ADt/d, com grande disponibilidade operacional, operação simples e alta eficiência.

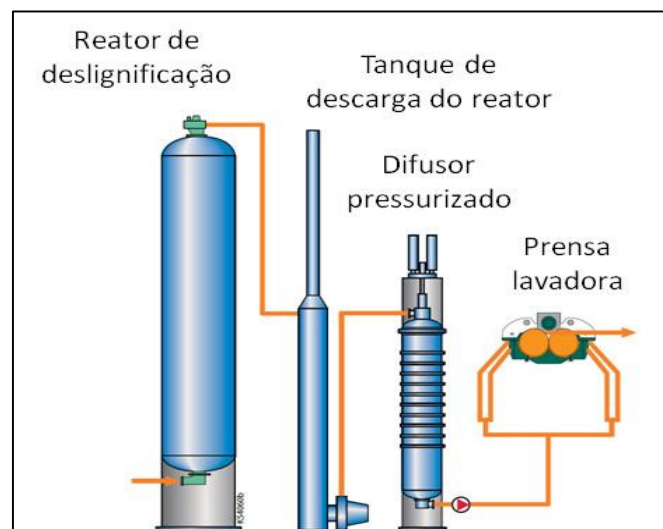


Figura 18 Difusor pressurizado instalado após o estágio de deslignificação
Fonte: adaptado - *Metso Marketing Brochure*

Existem dois modelos de difusores pressurizados, a principal característica de ambos é que a polpa flui através de apenas uma seção anelar que fica entre a zona de distribuição de licor de deslocamento e a zona de extração, onde é formada a manta de celulose. Em um dos modelos a polpa é deslocada de baixo para cima e no outro a polpa desloca-se de cima para baixo (GULLICHSEN, et al., 2000). Este equipamento requer um pequeno espaço para instalação, a qual é feita ao nível do solo, sua forma construtiva permite que a sua expedição e montagem sejam feitas como uma única unidade.

3.4.2.1 Difusor pressurizado – modelo Andritz (Ahlstrom)

No difusor pressurizado fornecido pela Andritz (vide Figura 20), a polpa é alimentada pela parte inferior do equipamento à média consistência (10 - 12%) e flui no sentido vertical pelo espaço entre a peneira extratora de licor (tela perfurada) e os diversos anéis de chicanas que distribuem o licor de lavagem; formando uma manta de polpa com 150 mm de espessura (GULLICHSEN, et al., 2000).

A Figura 19 mostra de que forma o licor de lavagem é distribuído uniformemente pelas chicanas localizadas na lateral do vaso, o licor força a sua passagem pela manta, o efeito da lavagem é obtido devido ao deslocamento radial do filtrado através da manta de polpa em direção ao centro do vaso. O licor passa pela tela perfurada da peneira sendo coletado por defletores da câmara interna do vaso, por onde é retirado pela parte inferior; já a polpa é extraída pelo topo do equipamento por um raspador de topo caindo em um vaso de diluição, onde ocorre a correção da consistência para a alimentação do próximo estágio (GULLICHSEN, et al., 2000).

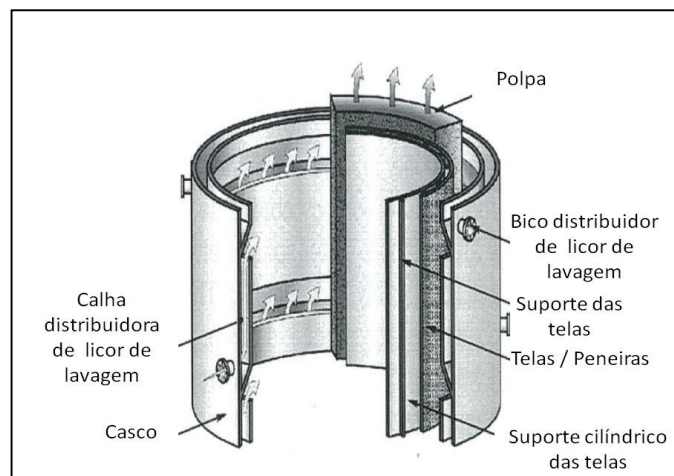


Figura 19 Difusor pressurizado Andritz (Ahlstrom)- fluxo de polpa e licores
Fonte: adaptado - GULLICHSEN, et al., 2000).

A bomba de média consistência que alimenta a polpa é capaz de vencer a perda de carga gerada pela polpa para percorrer o vaso, e descarregar a polpa lavada no próximo estágio de lavagem.

A peneira central por onde o licor é extraído, possui uma forma levemente cônica, que proporciona a lavagem da tela da peneira durante o movimento rápido das peneiras para baixo a fim de limpar os furos da tela por meio efeito combinado de contra-lavagem e do movimento de descida. O raspador de topo e a peneira de extração central são as únicas partes móveis do equipamento.

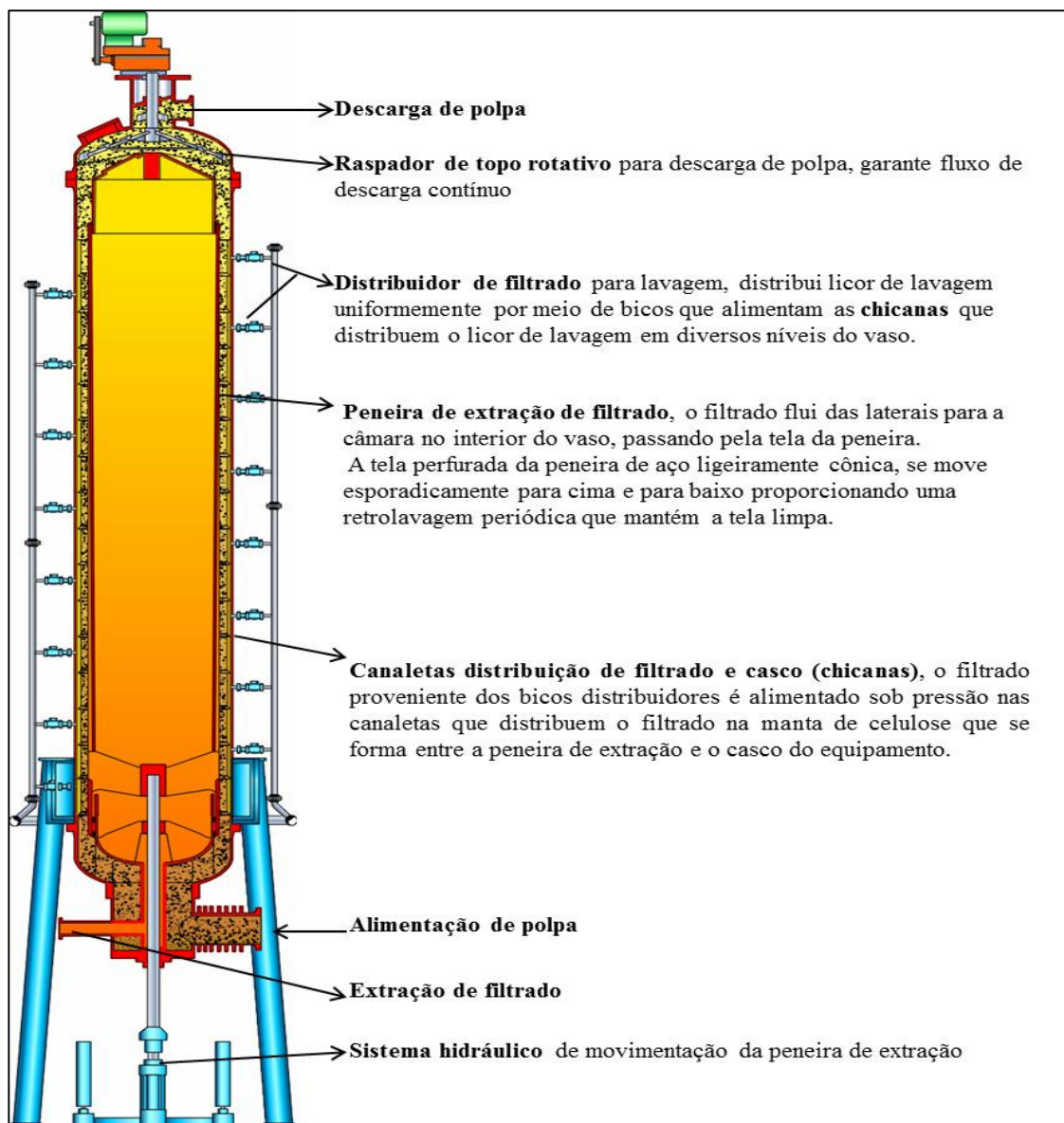


Figura 20 Difusor pressurizado Andritz (Ahlstrom)
Fonte: adaptado - *Andritz-Fiberline Presentation*

3.4.2.2 Difusor pressurizado – modelo Metso (Kvaerner)

O difusor pressurizado fornecido pela Metso (vide Figura 21), é composto por um vaso vertical com uma peneira interna suspensa pelo topo que se movimenta para cima e para baixo por meio de um sistema hidráulico, (vide Figura 20), muito similar ao modelo anteriormente discutido, porém neste caso a polpa ao invés de ser alimentada pelo fundo é alimentada pelo topo, desce pela seção anelar formada entre a peneira central e as chicanas distribuidoras de licor de lavagem, sendo descarregada pela parte inferior do vaso, o tempo de retenção é de somente alguns minutos. O licor é alimentado pela parte inferior e sobe pela câmara interna sendo extraído do vaso pelo topo.

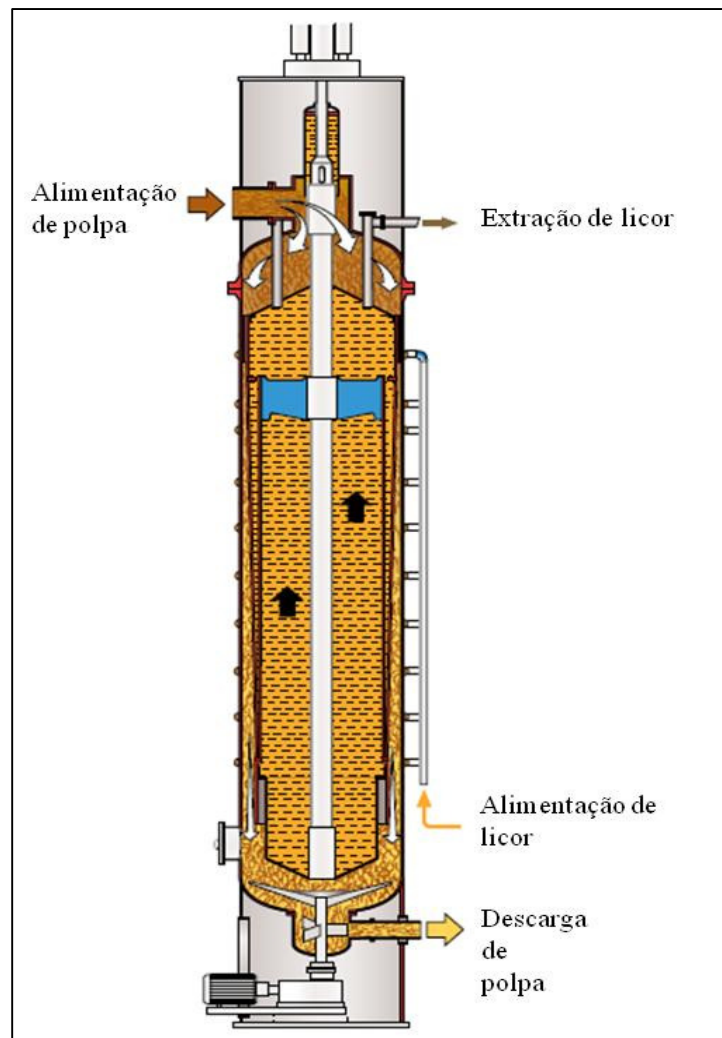


Figura 21 Difusor pressurizado Metso (Kvaerner)
 Fonte: adaptado - *Metso Marketing Brochure*

A Figura 22, mostra em detalhes a parte superior do vaso compreendendo o sistema de alimentação e distribuição de polpa sobre o topo da câmara central de coleta de licor, a formação

da manta que ocorre na seção anelar entre o casco e a peneira, uma distribuição e formação uniforme da polpa evita canais preferências que tornariam a lavagem da polpa deficiente, também pode-se ver o sistema de coleta de filtrado extraído por deslocamento. Na parte inferior é possível ver o raspador de fundo que auxilia em uma extração uniforme da polpa do interior do vaso, o eixo central da peneira que se movimenta para cima e para baixo, durante o ciclo de lavagem e limpeza, e a alimentação do licor de lavagem no distribuidor de licor.

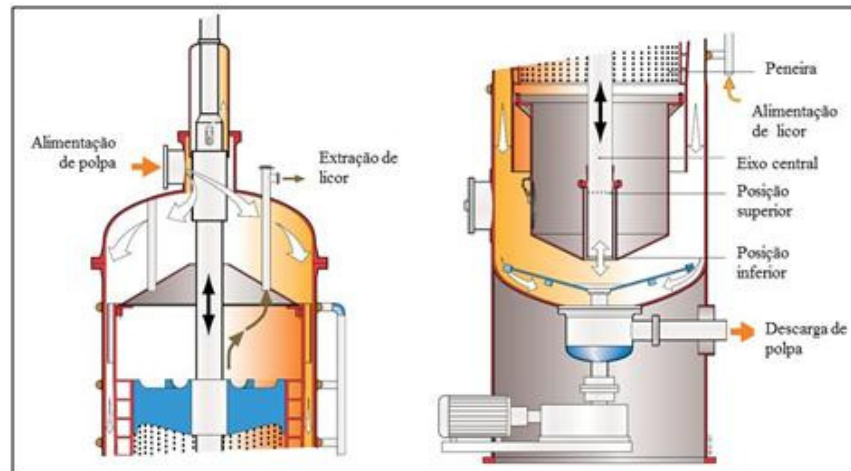


Figura 22 Difusor pressurizado Metso (Kvaerner) – Detalhes do topo e do fundo
Fonte: adaptado - *Metso Marketing Brochure*

A Figura 23, mostra a operação de lavagem e limpeza da tela da peneira e o conceito de alimentação contínua de polpa pela parte superior do vaso, o movimento descendente da polpa, a extração do filtrado por deslocamento e seu deslocamento para a parte interna do vaso, no sentido da câmara de coleta de filtrado.

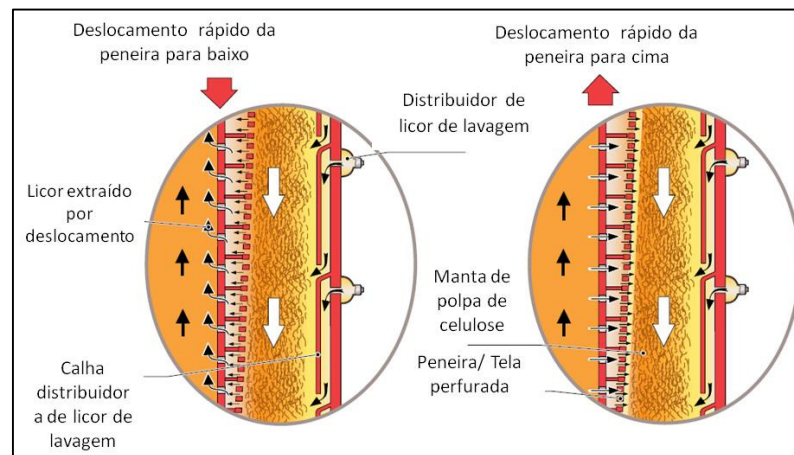


Figura 23 Difusor pressurizado Metso (Kvaerner)- Sistema de lavagem rápida da peneira de extração de licor
Fonte: adaptado - *Metso Marketing Brochure*

3.5 DRUM DISPLACEMENT WASHER - DDWASHER

Os *DDwashers* foram desenvolvidos nos anos 80, podem operar tanto a baixa consistência - *LCDD* (cst = 3 - 6%), quanto a média consistência - *MCDD* (cst = 8-11%) de alimentação com consistência de descarga entre 10 - 12%, os números de estágio de lavagem em um único lavador pode ir de 1 a 4 estágios, tendo como princípio operacional a lavagem por deslocamento.

A eficiência de lavagem destes equipamentos é alta e varia entre $E_{10} = 4 - 13$ em função do número de estágios de lavagem e da consistência de alimentação. Esta elevada eficiência de lavagem deve-se em parte, ao uso do princípio de lavagem fracionada e em contra corrente, já que um único equipamento gera diversas correntes de filtrado com características diferentes que são recirculados em diversos estágios de lavagem do próprio equipamento, reduzindo o espaço necessário para sua instalação conforme representado na Figura 24 (GULLICHSEN et al., 2000).

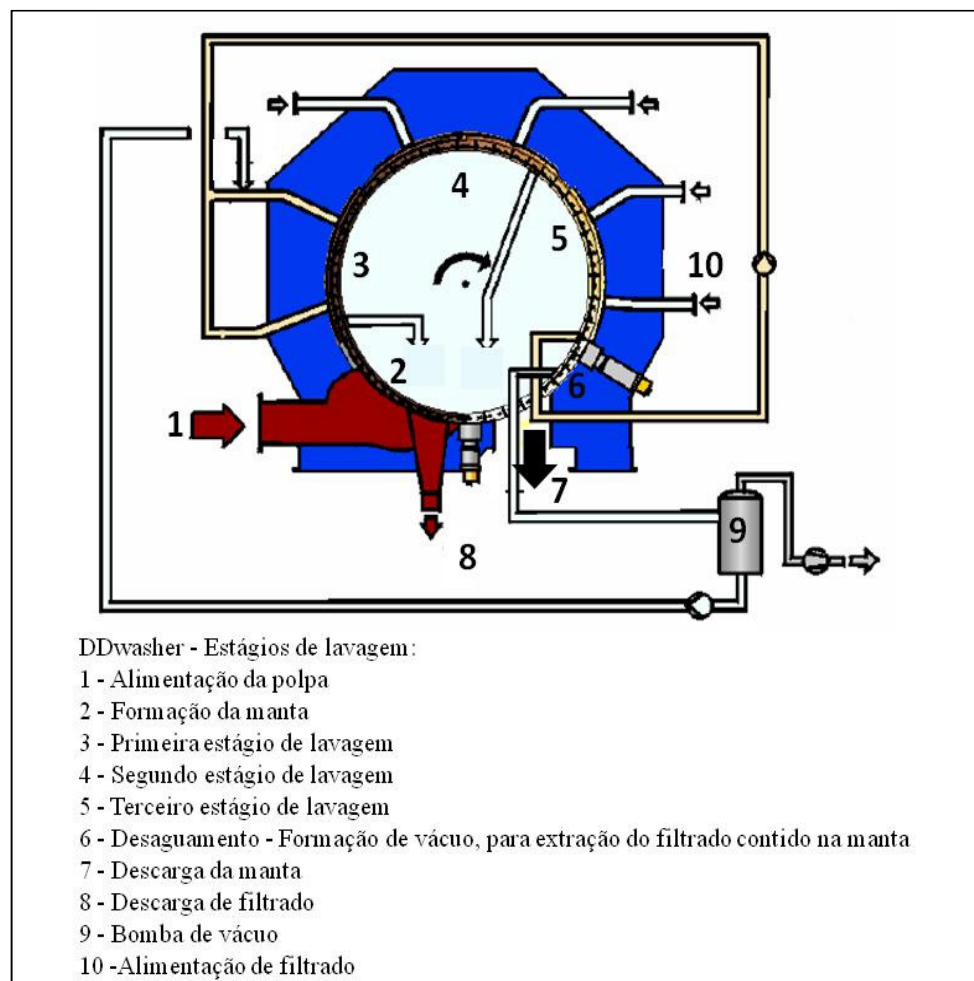


Figura 24 DDwasher – Zonas de lavagem

Fonte: adaptado - *Andritz Presentation*

Os lavadores que operam a baixa consistência (*LDCC*) são comumente instalados logo após a etapa da depuração, já os que operam à média consistência (*MCDD*) operam após o estágio de deslignificação e no branqueamento (GULLICHSEN et al., 2000).

A principal diferença entre os lavadores *LCDD* e os *MCDD* é a zona de formação de manta, a Tabela 3, mostra os requisitos de desaguamento necessários para diversos lavadores com consistências de alimentação diferentes.

Tabela 3 Requisitos de desaguamento em lavadores a diversas consistências

Equipamento	Consistência		Quantidade de licor a ser removido
	Alimentação	Descarga	
	%	%	t / Adt
Lavador a vácuo	1.5	11	52
DDwasher LCDD	4	11	14
DDwasher MCDD	10	11	0.82

Fonte: adaptado - GULLICHSEN, et al., 2000.

De acordo com GULLICHSEN *et al.* (2000), o coração do *DDwasher* é o tambor cilíndrico rotativo formado por compartimentos axiais unidos formando a superfície cilíndrica, a parte externa de cada compartimento de polpa é fechada por uma tela perfurada, neste equipamento não é necessário revestir o tambor com tela, por baixo da tela metálica perfurada existem compartimentos para a coleta do filtrado que estão conectados à câmara de coletora de filtrado, na Figura 25 estão representados diversos modelos de *DDwasher*.

A polpa é alimentada pressurizada na caixa de entrada do lavador (0,2 – 0,65 bar) sendo distribuída uniformemente nos compartimento de polpa do tambor, sendo engrossada formando uma manta uniforme. Barras de selagem separam a caixa de entrada da zona de lavagem e da descarga da polpa GULLICHSEN et al., 2000).

A caixa de alimentação da polpa é pressurizada com o intuito de manter a pressão de alimentação da polpa sobre a tela estável, produzindo uma manta uniforme o que assegura a espessura necessária para manter uma boa drenagem da manta, como pré-requisito para uma boa lavagem define-se uma consistência de 10 - 12%. O licor de lavagem é distribuído nas diversas zonas de lavagem do com pressão de 0,5 – 1,0 bar, durante a etapa de lavagem os compartimentos de polpa e filtrado estão hidraulicamente cheios, a velocidade de deslocamento de licor de lavagem através da manta é constante e por se tratar de um sistema pressurizado encontra-se livre de ar (GULLICHSEN et al., 2000).O filtrado após passar pela manta e ser coletado nas câmaras de filtrado é bombeado para o estágio de lavagem anterior no próprio lavador, cada estágio é dividido em duas ou três lavagens fracionadas, sendo assim uma pequena taxa de diluição é necessária.

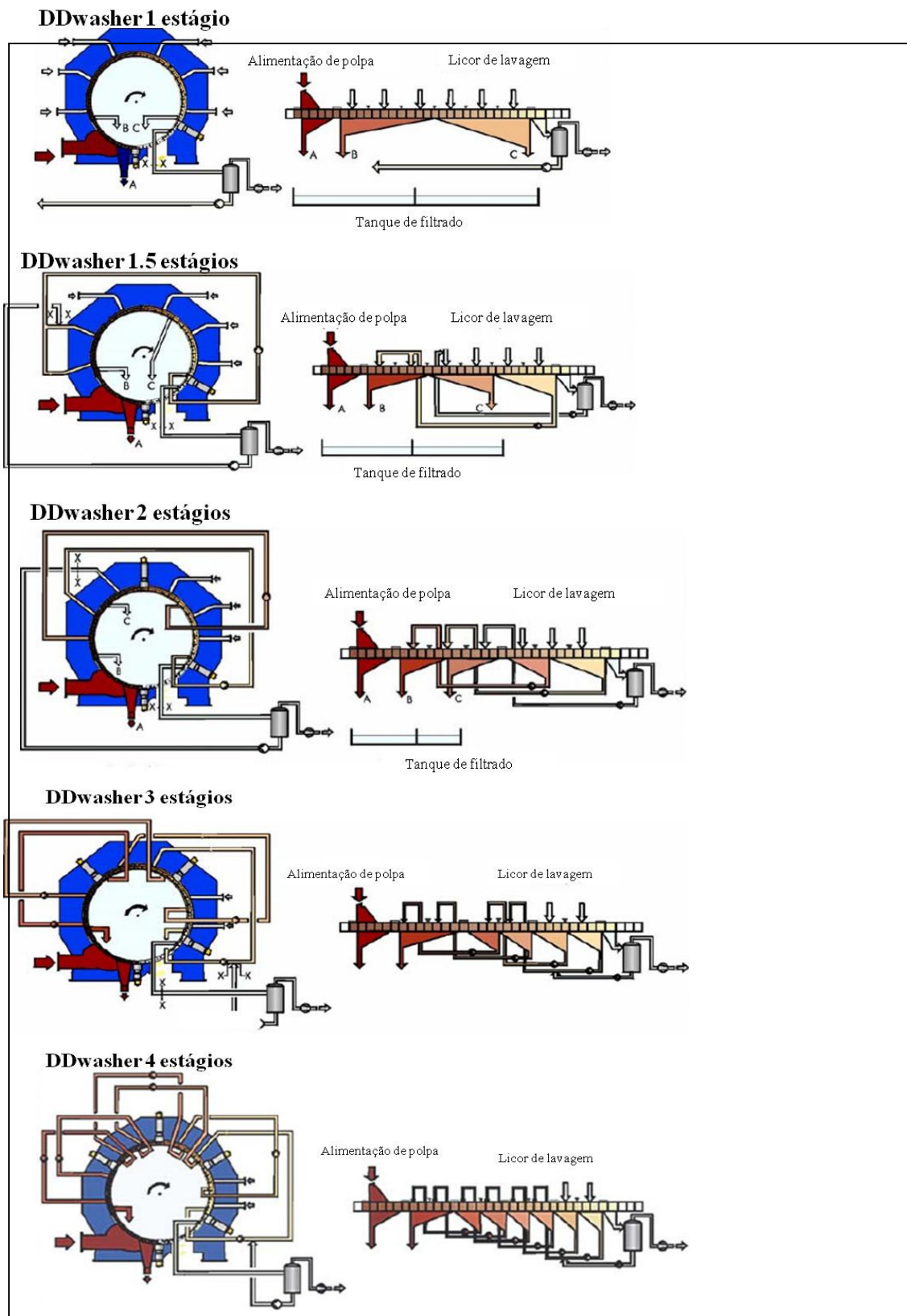


Figura 25 Modelos de DDwasher com diversos estágios de lavagem
 Fonte: adaptado - *Andritz Presentation*.

3.6 PRENSA

As prensas lavadoras surgiram em meados da década de 50 e vem evoluindo desde então, este equipamento pode ser alimentado com consistências que variam de 4 – 8%, a consistência de descarga pode alcançar 30%, operando com eficiência de lavagem (E_{10}) entre 4,5 e 9,4 com fator de diluição de 2,5 (FD) (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

As prensas podem ser tanto engrossadoras, onde somente o processo de desaguamento da polpa é efetuado, como prensas lavadoras onde ocorre o processo de diluição e desaguamento inicial (cst = 10%), lavagem por deslocamento, desaguamento e prensagem da manta com o intuito de atingir a consistência de descarga (cst \cong 28 – 30%). No processo de lavagem de polpa marrom o tipo de prensa mais utilizado é a prensa lavadora, vide Figura 26 (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

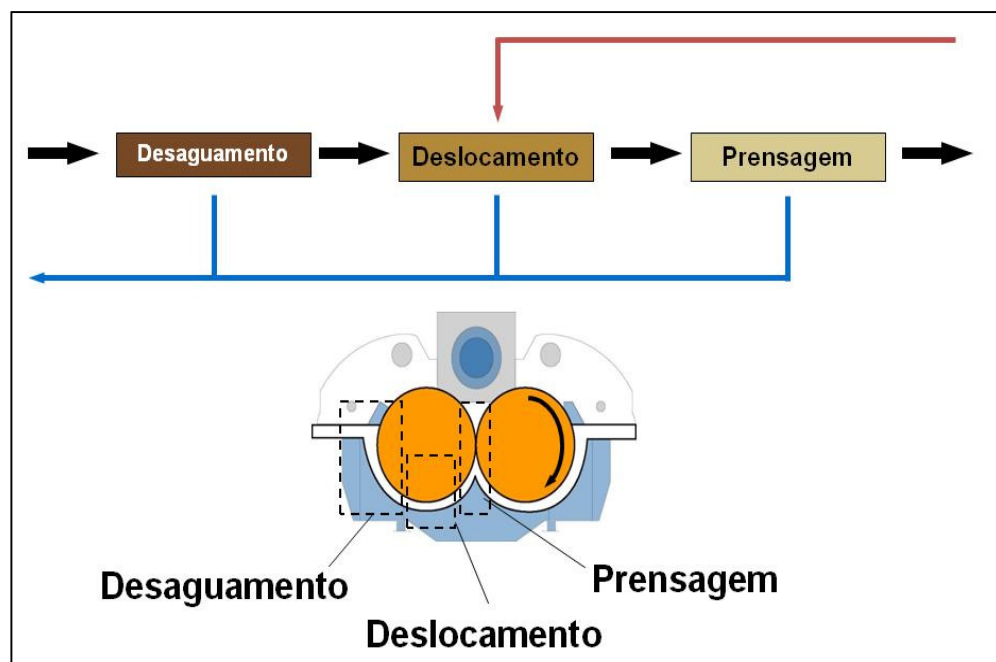


Figura 26 Princípio de lavagem da prensa lavadora modelo Metso TRPA
Fonte: adaptado - *Metso Presentation*

A prensa é constituída por: dois rolos prensa rotativos com acionamento hidráulico, distribuidores de polpa longitudinais, bacia onde estão acomodados os rolos rotativos, rosca extratora de polpa situada no topo do equipamento, bocais de alimentação de licor de lavagem (GULLICHSEN *et al.*, 2000).

A polpa é alimentada pressurizada na caixa de entrada do lavador, sendo distribuída uniformemente ao longo da bacia dos rolos por meio de distribuidores de polpa, os rolos são instalados um em cada lado da na bacia (BRÖTTGARDH, *et al.*, 2010).

Uma formação de manta uniforme garante uma alta eficiência de lavagem e grande disponibilidade do equipamento, para este equipamento de lavagem é primordial obter alta disponibilidade, custo mínimo de manutenção e alta eficiência de lavagem (BRÖTTGARDH, *et al.*, 2010).

A consistência da manta de polpa aumenta com a passagem desta entre o rolo prensa rotativo e a bacia, o licor a ser removido passa através de furos da tela perfurada para o interior do rolo. Após a zona de formação de manta e na zona de engrossamento, a manta de celulose entra na zona de lavagem por deslocamento onde o licor de lavagem “empurra” o licor original da manta para o interior do rolo. Na zona de prensagem, a polpa é pressionada contra os rolos prensa forçando seu desaguamento para alcançar a consistência de descarga, a descarga da polpa para fora da prensa é feita por uma rosca parafuso situada na parte superior do lavador (BRÖTTGARDH, *et al.*, 2010).

A Figura 27 ilustra esquematicamente uma prensa lavadora.

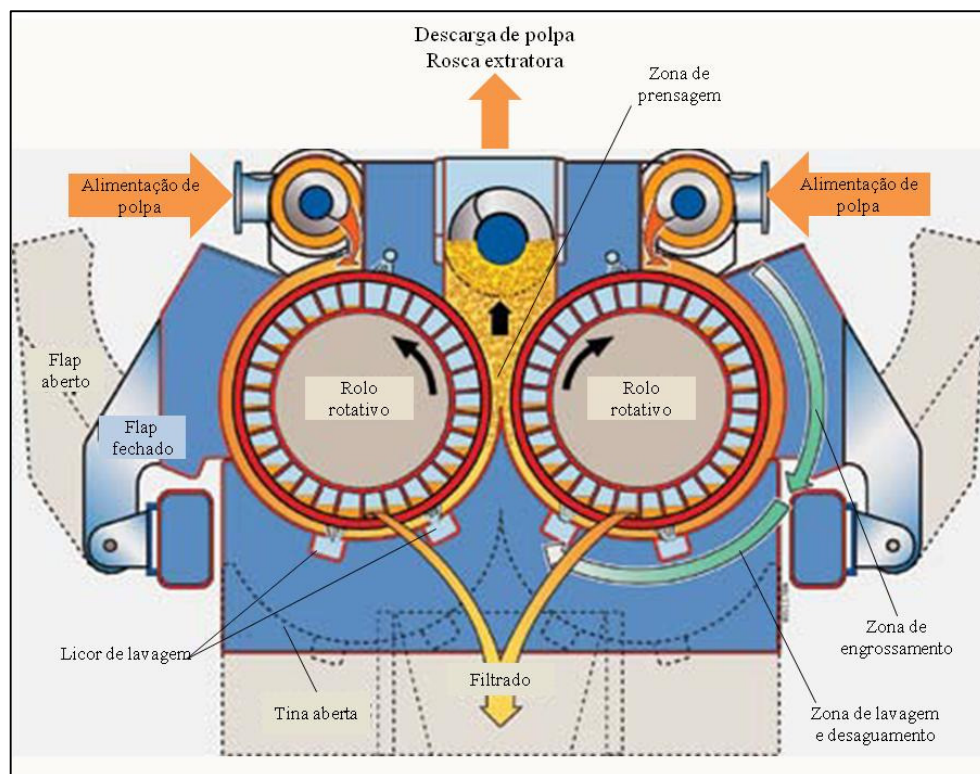


Figura 27 Representação da prensa lavadora GL&V – GL&V Twin roll press
Fonte: adaptado – *GL&V Brochure*

O rolo prensa rotativo é um cilindro rotativo formado por compartimentos axiais unidos formando a superfície cilíndrica, a parte externa de cada compartimento de polpa é fechada por uma tela perfurada que possui a capacidade de absorver as pressões extremamente altas durante a etapa de prensagem da polpa entre os dois rolos, por baixo da tela metálica perfurada existem compartimentos para a coleta do filtrado que estão conectados à câmara de coletora de filtrado.

Este equipamento de lavagem sofre influência de alguns fatores como (GULLICHSEN *et al.*, 2000):

- Consistência de alimentação da polpa;
- Pressão da tina;
- Velocidade dos rolos;
- Vazão do licor de lavagem;
- Propriedades de drenagem da polpa.

A vantagem da prensa lavadora em seus diversos modelos é a sua fácil manutenção, operação simples, alta disponibilidade do equipamento, pouca sensibilidade a entupimento por depósitos de carbonato de cálcio (GL&V brochure).

Na Figura 28, pode-se visualizar os diversos modelos de prensa da Metso:

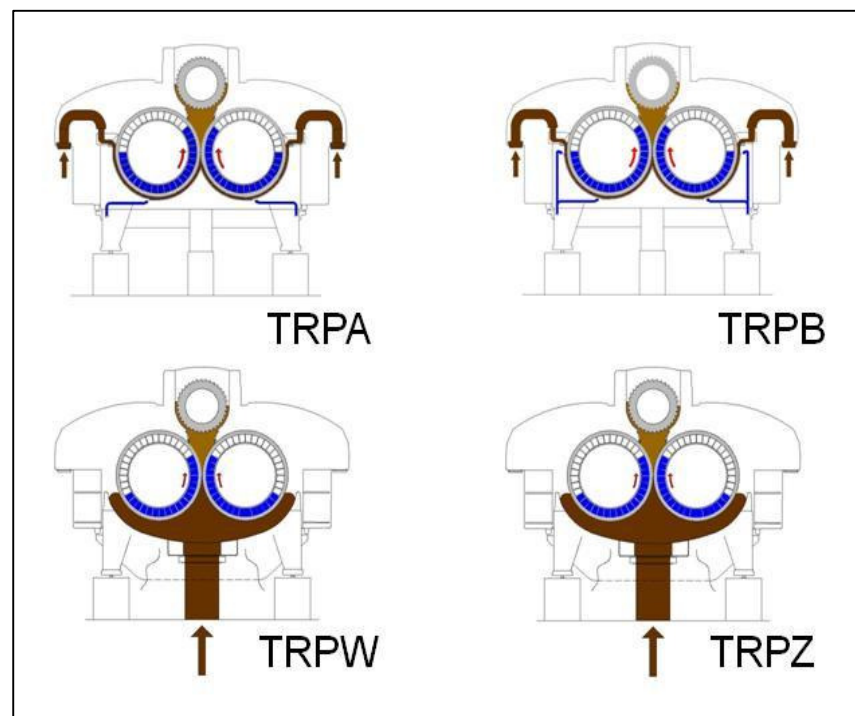


Figura 28 Modelos de prensas Metso
Fonte: adaptado – *Metso Brochure*

Os modelos *TRPA* e *TRPB* são prensas lavadoras, que utilizam o princípio do deslocamento do licor original, o modelo *TRPA* opera a baixa consistência (cst = 3 - 5%) de alimentação e *TRPB* opera a média consistência de alimentação (cst = 6 - 10%). Os modelos *TRPW* e *TRPZ* são prensas desaguadoras, o modelo *TRPZ* descarrega a polpa a alta consistência.

O mais novo modelo da Metso é *TRPE* muito similar ao modelo *GL&V Twin roll press*, o modelo Metso *TRPE* opera com consistência de alimentação entre 2.5 - 10%, em função das modificações da posição do sistema de alimentação e do controle de ajuste da posição dos rolos, este modelo possui capacidade 30% maior que os seus precursores, sendo que a consistência de descarga pode atingir 30 - 32%.

A Figura 29 representa uma prensa lavadora Metso.

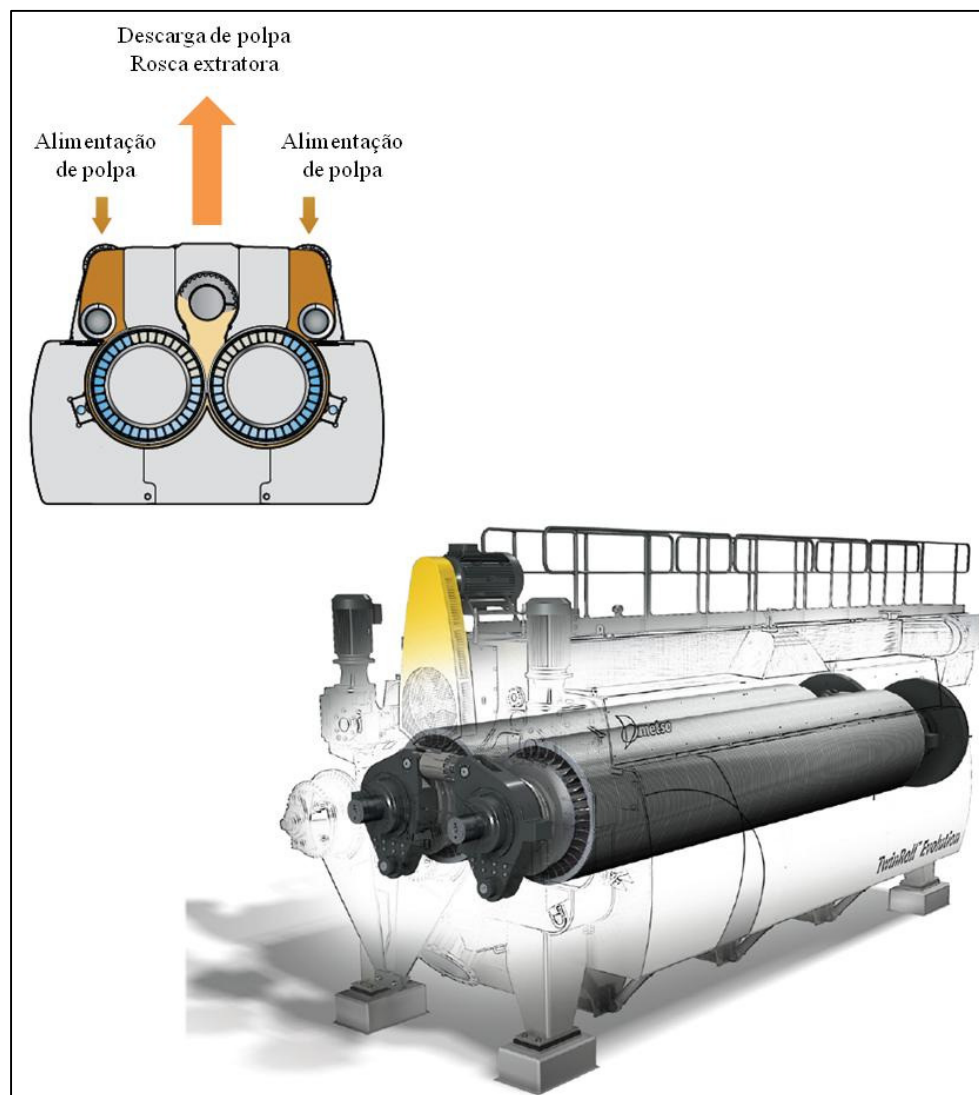


Figura 29 Representação de um modelos de prensa lavadora Metso
Fonte: adaptado – *Metso Brochure*

4 ESTUDO DE UM SISTEMA DE LAVAGEM HIPOTÉTICO

Muitas fábricas do parque industrial brasileiro foram instaladas no fim da década e 70 e início dos anos 80, sendo assim após 30 - 35 anos de operação a tecnologia utilizada em seus sistemas de lavagem de polpa marrom tornou-se obsoleta, fora isso, essas plantas já passaram por vários aumentos de produção o que sobrecarrega os lavadores diminuindo sua eficiência de lavagem, agrega-se ainda o fato de o tempo de vida útil destes equipamentos também estar chegando ao fim. Todos estes fatores fazem com que essas plantas antigas apresentem um elevado custo de manutenção e deficiência na recuperação de químicos, o que aumenta o custo de produção das plantas, sendo assim torna-se necessário analisar quais modificações podem ser implementadas na planta para melhorar a recuperação de químicos aumentando a eficiência de lavagem do sistema.

Neste estudo é retratado um sistema de lavagem de celulose hipotético (caso base), que leva em conta a filosofia utilizada nos projetos das fábricas da década de 70 – 80. Através da ferramenta computacional de simulação de processo *WinGEMS 5,3* foram realizados balanços de massa do sistema de lavagem de polpa marrom com o objetivo de avaliar a eficiência de dos lavadores existentes, o parâmetro de comparação utilizado foi a demanda química de oxigênio (*COD*).

A Demanda química de oxigênio (*COD*), mede a quantidade de oxigênio necessária para oxidar totalmente a matéria orgânica a dióxido de carbono, o que ilustra a quantidade de matéria orgânica que deixa o sistema com a polpa.

Atualmente as preocupações ambientais e a necessidade de reduzir os custos de produção, criam a necessidade das fábricas fecharem seus circuitos de água e reduzirem a quantidade de químicos no branqueamento, para tanto, deve-se e recuperar os sólidos orgânicos e inorgânicos dissolvidos na polpa.

Para obter este resultado, é importante minimizar ao máximo o arraste do licor negro fraco para o estágio do branqueamento, quando arrastado para fora do sistema de lavagem o licor leva consigo não só os compostos orgânicos (lignina majoritariamente), pois no estágio de branqueamento os químicos primeiro atacam a lignina para posteriormente atacar os compostos cromóforos, o licor preto fraco leva também, os compostos inorgânicos (sódio e enxofre), sendo assim reduzindo o arraste de licor minimizamos também a perda de sódio e enxofre do sistema,

reduzindo o consumo de químicos de make-up do sistema de cozimento ao final do ciclo de recuperação.

4.1 CASO BASE

O sistema de lavagem hipotético considerado na simulação (caso base), representado na Figura 30, considera a utilização de um digestor contínuo para o cozimento dos cavacos, sendo assim o sistema de pré-lavagem se inicia no fundo do digestor por meio da lavagem *hi-heat*.

A descarga do digestor é direcionada para a pré-lavagem composta por um difusor atmosférico simples, sistema de depuração de polpa marrom, a polpa já depurada segue para dois estágios de lavagem em série com filtros lavadores a vácuo convencionais, estágio de deslignificação com oxigênio e alimenta a pós-lavagem que compreende mais dois estágios de lavagem em série com filtros lavadores a vácuo convencionais.

Após o estágio da pós-lavagem a polpa segue para a estocagem na torre de estocagem de polpa marrom antes de seguir para o estágio de branqueamento.

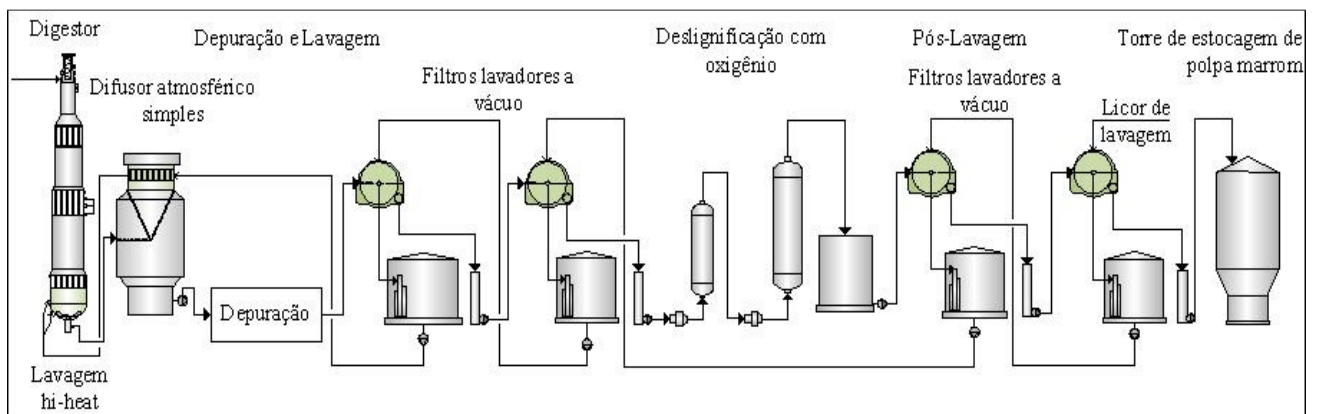


Figura 30 Caso base

Fonte: a Autora

Os dados de entrada como produção, consistência de alimentação e de descarga são baseados em informações usuais de fábricas de celulose, procurou-se alcançar valores de *COD* o mais próximo possível dos valores reais encontrados em fábricas de celulose que operam com este tipo de sistema de lavagem.

O sistema estudado no caso base considera uma fábrica hipotética que havia sido projetada para operar com produção média de 750 ADTB/d, na situação considerada para o caso base esta

fábrica hipotética está operando com uma sobre capacidade em torno de 13% o que representa uma produção diária de 850 ADTB/d.

Com o intuito de alcançar o valor de *COD* desejado para cada estágio, as seguintes variáveis foram ajustadas: eficiência de lavagem (E_{10} – Fator Nórden), taxa de deslocamento (*DR*), para as consistências de alimentação e descarga dos lavadores foram adotados valores médio usuais, procurando representar da melhor forma possível a realidade.

4.1.1 Dados de entrada para o caso base

Os dados utilizados para a elaboração dos balanços no WinGEMS 5.3 são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4 Caso base - Dados de alimentação para as variáveis de processo

	unidade	
Produção		
- Produção anual	ADTB/a	300 900
- Dias operacionais	d/a	354
- Capacidade média	ADTB/a	850
Condições de operação		
- Fator de diluição do sistema de lavagem		2,0
Cozimento		
Licor branco		
- Álcali ativo, NaOH	%	21,5
- Álcali ativo, concentração	g NaOH/l	135
- Sulfidez	%	37
- Eficiência de redução	%	90
- Causticidade	%	82
- Rendimento da madeira	%	53,5
- Temperatura do licor branco	°C	90
- Temperatura de saída	°C	85
- Capacidade média	ADt/d	941
Lavagem hi-heat		
- DR		0,8

- Consistência de descarga	%	11,0
Difusor atmosférico		
- DR		0,5
- Consistência de alimentação	%	11
- Consistência de descarga	%	10
Filtros lavadores da pré-lavagem		
- DR		0,75
- Consistência de alimentação	%	1,5
- Consistência de descarga	%	10,0
Depuração		
- Consistência de alimentação	%	3,5
- Consistência de descarga	%	3,5
- Rejeitos totais	%	0,5
- Capacidade média	ADt/d	908
Deslignificação com oxigênio		
- Perda de fibras	%	3,0
- Carga de oxigênio	Kg/ADt	22
- Carga de álcali, NaOH	Kg/ADt	21
- Temperatura	°C	90
- Capacidade média	ADt/d	881
Licor branco oxidado		
- NaOH	g/l	108,78
- Na ₂ CO ₃	g/l	24,73
- Na ₂ SO ₄	g/l	6,11
- Na ₂ S ₂ O ₃	g/l	50,18
Filtros lavadores da pós-lavagem		
- DR		0,75
- Consistência de alimentação	%	1,5
- Consistência de descarga	%	10,0
- Volume de condensado alimentado no último lavador para efetuar a lavagem	m ³ /h	370

O sistema em questão foi montado na ferramenta computacional de simulação de processo *WinGEMS 5,3* utilizando “blocos”. Estes blocos simulam as operações de processo nas diferentes etapas da lavagem, vide simulação do caso base no Anexo I.

Com base nos dados de alimentação, foram realizados balanços de massa do sistema de lavagem de polpa marrom com o objetivo de avaliar a eficiência dos lavadores, o parâmetro de comparação utilizado foi a demanda química de oxigênio (COD). Os pontos mais importantes para a avaliação do sistema de lavagem de polpa marrom são a alimentação do estágio de deslignificação com oxigênio e a alimentação do branqueamento.

4.2 SISTEMA DE LAVAGEM PROPOSTO - EQUIPAMENTOS ALTERNATIVOS

Após a simulação do caso base, foram simuladas algumas alternativas considerando a substituição dos equipamentos de lavagem considerados no caso base por equipamentos de lavagem mais modernos como *DDwasher's* e prensas lavadoras, visando alcançar uma eficiência de lavagem mais alta. Não foi considerada a otimização dos equipamentos de lavagem existentes em virtude do tempo de vida útil dos mesmos estar chegando ao fim e sua tecnologia ser obsoleta.

Isto posto, serão consideradas as seguintes premissas nas três simulações realizadas:

- Produção em celulose branqueada de 850 ADtB/d;
- Foram considerados os mesmos dados de alimentação para o cozimento, depuração e deslignificação com oxigênio;
- Desativação do difusor atmosférico;
- Desativação dos filtros lavadores a vácuo convencionais;

No caso da prensa lavadora por limitações do equipamento, não é aconselhável instalar prensas logo após a descarga do digestor, pois a polpa ainda não foi tratada no sistema de depuração, onde ocorre a separação dos nós e dos rejeitos da polpa. Em instalações onde são utilizadas prensas lavadoras, a descarga do digestor alimenta diretamente o tanque de descarga, a fim de corrigir a consistência para que esta possa alimentar o sistema de depuração, a polpa depurada segue então para a lavagem, conforme representado na Simulação I (Figura 30).

Para o *DDwasher* esta restrição não existe, este equipamento pode receber a descarga do digestor diretamente desde que esta esteja com a consistência de alimentação correta, sendo assim foram simuladas duas situações: i) Simulação II - respeitando a configuração existente, com a

depuração antes dos equipamentos de pré-lavagem (Figura 31); ii) Simulação III - instalando a depuração após a pré-lavagem e o estágio de deslignificação com oxigênio (Figura 32).

As simulações estão representadas no Anexo I.

4.2.1 Prensa lavadora

Com a desativação do difusor atmosférico a polpa alimenta diretamente o tanque de descarga a fim de corrigir a consistência para que a polpa possa alimentar o sistema de depuração, sendo assim, a polpa é diluída de 10 - 12% de consistência para 3,0 - 4,5%.

A polpa com a consistência correta (cst = 3,5%) alimenta a depuração, onde ocorre a separação dos nós e dos rejeitos da polpa, os nós retornam para o cozimento e os rejeitos são descartados, a polpa depurada segue então para as prensas da pré-lavagem que operam a baixa consistência (cst = 4,5 %). Após a pré-lavagem a polpa segue para os reatores do estágio de deslignificação com oxigênio e pós-lavagem onde as prensas operam a média consistência (cst = 9%).

A polpa lavada segue para a torre de estocagem de massa marrom antes de alimentar o branqueamento, conforme representado na Figura 31.

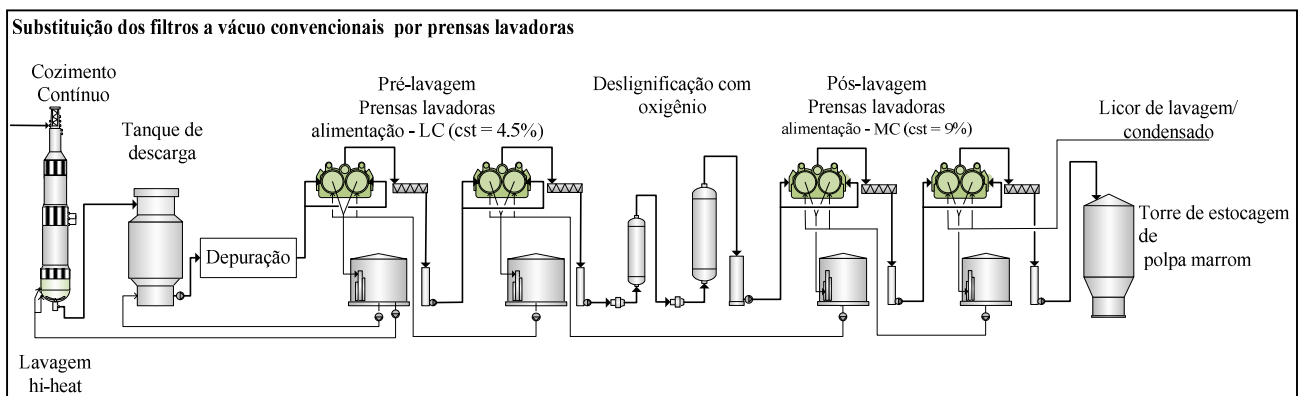


Figura 31 Simulação I – Substituição dos filtros lavadores por prensas lavadoras

Fonte: a Autora

A simulação I utiliza os mesmos dados de alimentação listados na Tabela 4 para o cozimento, lavagem do fundo do digestor, depuração e deslignificação com oxigênio, já os dados de alimentação das variáveis de processo utilizados nas prensas lavadoras estão listados na Tabela 5:

Tabela 5 Prensa lavadora - Dados de alimentação para as variáveis de processo

	unidade	
Condições de operação		
- Fator de diluição do sistema de lavagem		2,5
Prensas lavadoras da pré-lavagem		
- Consistência de alimentação	%	4,5
- Consistência de descarga	%	26,0
Prensas lavadoras da pós-lavagem		
- Consistência de alimentação	%	9,0
- Consistência de descarga	%	26,0
- Volume de condensado alimentado no último lavador para efetuar a lavagem	m ³ /h	190

4.2.2 DDwasher

Para o *DDwasher* não existe restrição com relação ao local de instalação do equipamento, este equipamento pode ser instado antes ou depois da depuração; sendo assim, duas configurações do sistema serão avaliadas com o intuito de verificar se existe algum prejuízo para o sistema relacionado a posição de instalação deste equipamento.

Nas simulações II e III, com a desativação do difusor atmosférico a polpa alimenta diretamente o tanque de descarga a fim de corrigir a consistência para alimentar o estágio de pré-lavagem onde serão utilizados *DDwasher* com dois estágios de lavagem.

Na simulação II a configuração existente é respeitada (Figura 32), ou seja, a depuração permanece na posição original antes da pré-lavagem. A polpa proveniente do cozimento tem sua consistência corrigida no tanque de descarga para alimentar o sistema de depuração, sendo assim, a polpa é diluída de 10 - 12% de consistência para 3,5%.

A polpa depurada é passa por um engrossador, onde sua consistência passa de 3,5% para 4,5%, e segue então para o lavador *DDwasher* 2 estágios *LC* da pré-lavagem que opera a baixa consistência (cst = 4,5%). Do estágio da pré-lavagem a polpa segue para a alimentação dos reatores de deslignificação com oxigênio (cst = 10%) e pós-lavagem a ser realizada pelo lavador *DDwasher* 2 estágios *MC* que opera a média consistência (cst= 9%), os nós retornam para o cozimento e os rejeitos são descartados.

A polpa lavada segue para a torre de estocagem de massa marrom antes de alimentar o branqueamento, conforme representado na Figura 32.

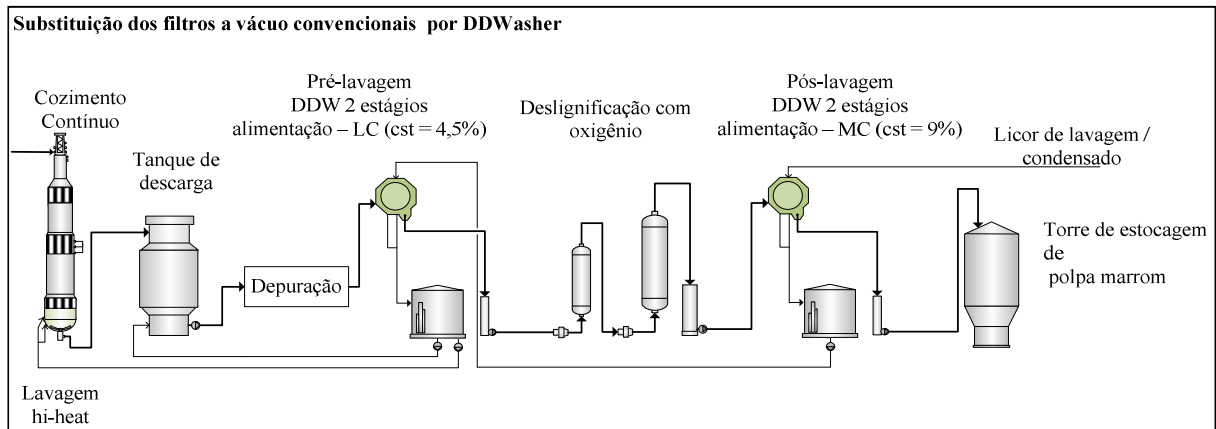


Figura 32 Simulação II – Substituição dos filtros lavadores por *DDwashers*, depuração antes da pré-lavagem

Fonte: a Autora

Na simulação III a configuração existente do sistema de lavagem é modificada (Figura 33), ou seja, a posição da depuração é alterada para depois do estágio de deslignificação, este conceito é adotado atualmente pelo fabricante do equipamento. Em instalações existentes esta modificação pode ser efetuada por meio do rearranjo das tubulações de alimentação e descarga da depuração ou relocação dos depuradores.

A polpa proveniente do cozimento é descarregada no tanque de descarga, sua consistência é corrigida para alimentar a pré-lavagem que opera a média consistência (cst = 9%), *DDwasher 2MC*.

Após a pré-lavagem a polpa segue para o estágio de deslignificação com oxigênio (cst = 10%), ao final da etapa de deslignificação a polpa é diluída de 10 % de consistência para 3,5% a fim de para alimentar a depuração, a polpa depurada é engrossada para 4,5% de consistência e alimentar o *DDwasher 2LC* da pós-lavagem,

A descarga do lavador da pós-lavagem segue para a torre de estocagem de massa marrom antes de alimentar o estágio de branqueamento, conforme representado na Figura 33.

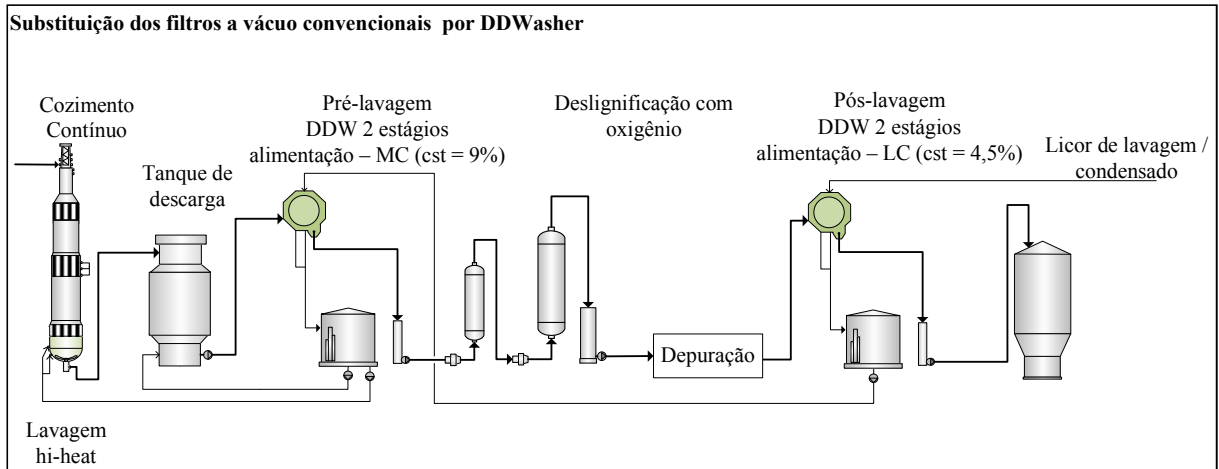


Figura 33 Simulação III – Substituição dos filtros lavadores por Ddwashers, depuração após a pré-lavagem

Fonte: a Autora

As simulações II e III utilizam os mesmos dados de alimentação listados na Tabela 4 para o cozimento, lavagem do fundo do digestor, depuração e deslignificação com oxigênio, já os dados de alimentação utilizados nos *DDwashers* estão listados na Tabela 6:

Tabela 6 DDwashers - Dados de alimentação para as variáveis de processo

	unidade	
Condições de operação		
- Fator de diluição do sistema de lavagem		2,5
2 LC DDWasher (2 estágios / baixa consistência)		
- Consistência de alimentação	%	4,5
- Consistência de descarga	%	12,0
2 MC DDWasher (2 estágios / média consistência)		
- Consistência de alimentação	%	9
- Consistência de descarga	%	12,0
- Volume de condensado alimentado no último lavador para efetuar a lavagem	m ³ /h	345

Fonte: a Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

No caso base, foram considerados filtros lavadores a vácuo operando com fator de diluição (FD) para o sistema de lavagem de $2\text{m}^3/\text{ADt}$ em virtude da sobrecarga do sistema, valores de eficiência de lavagem igual a 3 (E_{10}) e taxa de deslocamento (DR) de 75%. Os valores da quantidade de matéria orgânica que segue junto com a polpa (perda na lavagem) podem ser observados na Tabela 7, antes do estágio de deslignificação com oxigênio ficou em aproximadamente $250\text{ kg COD}/\text{ADt}$, já antes do branqueamento (ao final da lavagem de polpa marrom) a perda ficou em $18,61\text{ kg COD}/\text{ADt}$.

A Tabela 7 informa as perdas de lavagem obtidas em cada estágio do sistema de lavagem e suas respectivas eficiências de lavagem. Estes valores estão próximos aos valores obtidos em fábricas que operam com filtros lavadores a vácuo.

Para o difusor atmosférico foi obtido um valor de eficiência de lavagem nulo, o que representa que este equipamento não está operando de maneira adequada e a lavagem da polpa não está ocorrendo.

Tabela 7 Caso base - Perdas na lavagem de polpa marrom

	unidade	Caso base
Condições de operação		
- Fator de diluição do sistema de lavagem	m^3/ADt	2,0
Perda na lavagem de polpa marrom		
Lavagem Hi-heat – fundo do digestor	$\text{kg COD}/\text{ADt}$	1.016,54
- E_{10}		2,08
Difusor atmosférico		
- E_{10}	$\text{kg COD}/\text{ADt}$	1.098,03
		0
Pré-lavagem (antes da deslignificação com oxigênio)		
- Filtro 1	$\text{kg COD}/\text{ADt}$	522,21
- E_{10}		3
- Filtro 2	$\text{kg COD}/\text{ADt}$	249,29

- E_{10}		3
Pós-lavagem (antes do branqueamento)		
- Filtro 3	kg COD/ADt	265,67
- E_{10}		3
- Filtro 4	Kg COD/ADt	18,61
- E_{10}		3

Fonte: a Autora

Para fábricas novas recomenda-se que os valores de perda na lavagem devem ser menores que 90 kg COD/ADt antes da deslignificação e menores que 6 kg COD/ADt antes do estágio de branqueamento; tendo em vista estes valores constata-se que é imprescindível de uma intervenção na planta hipotética simulada no caso base, com o intuito de reduzir as perdas na lavagem e por fim reduzir a reposição de soda e enxofre do sistema e o custo de químicos no branqueamento.

Considerando a configuração existente nas simulações I e II, e a alteração da posição da depuração na simulação III os seguintes resultados foram obtidos:

Tabela 8 Simulações - Perdas na lavagem de polpa marrom

	unidade	Simulação I Prensa lavadora (*)	Simulação II <i>DDwasher</i> 2 estágios (*)	Simulação III <i>DDwasher</i> 2 estágios (**)
Condições de operação				
- Fator de diluição do sistema de lavagem	m ³ /ADt	2,5	2,5	2,5
Perda na lavagem de polpa marrom				
Lavagem Hi-heat – fundo do digestor	kg COD/ADt	976,33	956,88	942,27
- E_{10}		1,88	1,86	1,83
Pré-lavagem (antes da deslignificação com oxigênio)				
- Lavador 1	kg COD/ADt	185,84	129,88	136,63
- E_{10}		4,03	10,3	9,98

- Lavador 2	kg COD/ADt	77,52	-	-
- E_{10}		4,36	-	-
Pós-lavagem (antes do branqueamento)				
- Lavador 1	kg COD/ADt	34,04	-	-
- E_{10}		4,33	-	-
- Lavador 2	kg COD/ADt	6,94	6,15	5,81
- E_{10}		4,31	9,36	9,05
Redução de COD – antes do branqueamento	%	62,7	66,9	68,8

(*) Simulação I e II – depuração logo após o tanque de descarga

(**) Simulação III – depuração após a deslignificação.

Fonte: a Autora

A Tabela 8 resume os resultados obtidos nas simulações (Anexo I), conforme podemos observar a substituição dos lavadores atmosféricos tornou possível a redução o licor preto fraco independente da configuração do sistema e do equipamento utilizado.

5.2 DISCUSSÕES

O sistema estudado no caso base considera uma fábrica hipotética com produção de projeto de 750 ADtB/d, considerando uma sobre capacidade de 13%, ou seja, este sistema opera com produção em torno de 850 ADtB/d; como consequência existe uma sobrecarga em todo o sistema fabril; no que diz respeito ao sistema de lavagem marrom mais especificamente, esta sobrecarga reduz a eficiência de lavagem em virtude do arraste de licor preto fraco para a etapa posterior acarretando um elevado custo de produção.

Na etapa de lavagem de polpa marrom, existe muitas vezes na instalação fabril o estágio de deslignificação com oxigênio (estágio de pré-branqueamento), sendo assim uma lavagem mais eficiente antes do estágio da deslignificação (pré-lavagem) faz com que a seletividade do estágio de deslignificação com oxigênio seja mais alta, pois os químicos utilizados neste estágio (oxigênio e álcali – NaOH) conseguem atacar mais efetivamente a lignina remanescente na fibra. Este ataque mais efetivo reduz a carga de químicos a ser utilizada no estágio do branqueamento, além disso,

uma carga menor de químicos é utilizada para atacar a lignina que encontra-se livre no licor durante o estágio de deslignificação .

As vantagens do estágio de pré-branqueamento são tanto econômicas quanto ambientais, pois o efluente do estágio de pré-branqueamento é livre de íons de cloro o que torna possível a sua recuperação no ciclo recuperação. A instalação do estágio de pré-branqueamento antes do branqueamento em si reduz a emissão de efluentes com alto teor de demanda química de oxigênio (COD) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), ligninas cloradas além de reduzir a cor do efluente final do branqueamento da planta. Já o oxigênio utilizado no estágio de pré-branqueamento possui um custo menor que o custo dos outros agentes de oxidação utilizados no branqueamento.

As desvantagens da instalação do estágio de deslignificação com oxigênio são o seu custo de instalação e a baixa reatividade e seletividade do oxigênio se comparado ao estágio de branqueamento que utiliza dióxido de cloro, mas ainda assim a instalação do estágio de deslignificação vem sendo utilizada em larga escala no Brasil em virtude dos ganhos obtidos com a redução do custo de produção do branqueamento.

Conforme mencionado na Introdução é de suma importância que ocorra uma alta eficiência de lavagem de polpa marrom, a fim de minimizar ao máximo o arraste do licor negro fraco para o branqueamento, esta redução do arraste de licor proporciona uma redução do consumo de químicos utilizados como agentes de branqueamento como dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, etc..., na simulação I onde são utilizadas prensas lavadoras a redução do arraste de licor foi de aproximadamente 63%, nas simulações II e III esta redução foi de aproximadamente 67 % e 69% respectivamente, estes valores representam uma economia considerável de químicos no branqueamento.

Assumindo que o custo de produção do dióxido de cloro fica em torno de 1800 US\$/ tClO₂, com a substituição dos equipamentos existentes no caso base seria possível obter uma redução de custo anual de químicos do branqueamento da ordem de 1 500 000 US\$/a conforme indicado na Tabela 9:

Tabela 9 Simulações - Perdas na lavagem de polpa marrom x redução do consumo de químicos no branqueamento

	unidade	Caso base	Simulação I Prensa lavadora (*)	Simulação II DDwasher 2 estágios (*)	Simulação III DDwasher 2 estágios (**)
Pós-lavagem (antes do branqueamento)	kg COD/ADt	18,61	6,94	6,15	5,81
Redução de COD – antes do branqueamento	kg COD/ADt	-	11,67	12,46	12,8
Redução de COD – antes do branqueamento	%	-	62,7	66,9	68,8
Redução em consumo de químicos no branqueamento em cloro ativo	kg Cl ₂ ativo/ADt	-	7,0	7,5	7,7
Redução em consumo de químicos no branqueamento em dióxido de cloro	kg ClO ₂ /ADt	-	2,7	2,9	3,0
Redução de custo por tonelada	US\$/ ADt	-	4,9	5,2	5,4
Redução de custo anual nos químicos do branqueamento(***)	US\$/ ano	-	1 474 000	1 564 000	1 624 000

(*) Simulação I e II – depuração logo após o tanque de descarga

(**) Simulação III – depuração após a deslignificação.

(***) Produção – na alimentação do branqueamento = 850ADtB/d

Com as simulações é possível mostrar que existe um ganho significativo com a redução do consumo de químicos do branqueamento, pois independente da configuração adotada para o sistema houve um aumento significativo na eficiência de lavagem como um todo, o que representou em média uma redução de 60% no arraste de COD para o branqueamento. Sendo que uma adequada recuperação dos compostos por orgânicos e inorgânicos no sistema de lavagem, minimiza a reposição de insumos (sódio e enxofre) durante o ciclo de recuperação, proporciona um menor consumo de químicos e geração de efluentes no branqueamento, além de uma maior eficiência energética da fábrica.

A substituição de equipamentos que possuem tecnologia obsoleta, os quais podem apresentar problemas de manutenção e desgaste devido ao fim de sua vida útil, deve ser analisada

caso a caso, pois dependem de uma análise econômica e de um estudo de viabilidade que representem a realidade da fábrica em questão, pois esta decisão depende não só do custo de aquisição e instalação dos equipamentos depende também do custo das modificações necessárias para a adequação da instalação bem como do custo de produção da fábrica.

Com relação ao consumo de condensado no sistema de lavagem como água de lavagem depende da qualidade do mesmo, a unidade fabril deve primar pela qualidade do mesmo tornando possível fechar cada vez mais o circuito de águas das fábricas. Utilizar o condensado no sistema de lavagem de polpa marrom reduz o consumo de água quente tratada, a captação de água bruta da fábrica e por fim a geração de efluentes, pois caso a qualidade do condensado não seja adequada este acaba sendo descartado para o sistema de tratamento de efluentes e para suprir a falta do condensado destinado para a lavagem da polpa as fábricas acabam tendo que gerar água quente para esta função.

A ferramenta de simulação de balanço de massa apresentada neste estudo WinGEMS 5.3, pode simular diversos sistemas que se encontram em operação não só o sistema de lavagem de polpa marrom. Com esta ferramenta é possível avaliar a operação da unidade fabril no momento atual, e prever como a mesma se comportaria com alterações em suas variáveis de processo, esta ferramenta pode ainda ser utilizada para sugerir melhorias no sistema como a substituição de equipamentos existentes por outros de tecnologia mais avançada, visando proporcionar uma maior eficiência da unidade.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Richard; ÖHMAN, Lars-Olof Umeå. *Practical pulp washing implications of Donnan equilibria in the fiber line*. Nordic Pulp and Paper Research Journal, Estocolmo, Suécia, v. 21 p.264-271, fev/2006. DOI: 103183/NPPRJ-2006-21-02-P267-271
- AMARAL, Karen Juliana do. *Uso de Água em Indústria de Papel e Celulose sob a Ótica da Gestão de Recursos Hídricos*. 2008. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ.
- ALMEIDA, Alexandre Marques de. *Modelagem, Simulação e Controle de um Sistema de Evaporação Múltiplo Efeito de Licor Negro*. 2009. 1-3p. Monografia (TCC) – Faculdade de Telêmaco Borba. Telêmaco Borba, PR
- BRÖTTGARDH, Gorän; PIKKA, Olavi. TERVOLA, Pekka *Recent development of wash press and mill experiences*. In: 43º CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP-TAPPI 2010. Anais. São Paulo: Transamérica Expo Center, 04-06 de outubro de 2010.
- COLODETTE, J.L. *Curso de pós-graduação Lato Sensu em celulose e papel: Química E Tecnologia do branqueamento de celulose, Módulo I – Parte I*. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, Junho de 2011.
- CROTOGINO, R.H.; POIRIER, N.A., TRINH, D.T. *The principles of pulp washin*. Tappi Journal, June/1987. Atlanta, USA, p.95-103.
- CARVALHO, Ana Márcia M. L. *Curso de pós-graduação Lato Sensu em celulose e papel: Estrutura química e anatômica da madeira, Módulo I – Parte I*. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, abril de 2011.
- GOMIDE, J.L. *Curso de pós-graduação Lato Sensu em celulose e papel: Química da madeira, Módulo I – Parte III*. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, abril de 2011.
- GABOV, Konstantin. *The effect of pulp washing on bleaching efficiency*. 2009. Master's thesis – Lappeeranta University of Technology _ Faculty of Technology – Degree Program of Chemical Technology, Lappeeranta2009

GULLICHSEN, Johan; PAULAPURO, Hannu. Papermaking Science and Technology: Chemical Pulping, Book 6A. 1999 ed. Helsinki, Finland: Fapet Oy, 2000. Cap.I p.19-243, Cap.II p. 245-327, Cap.VII p. 573-601. ISBN 952-5216-00-4(the series). ISBN 952-5216-06-3(book6)

KOPRA, Riku; KARI, Erkki; HARINEN, Marko; TIRRI, Tapio; DAHL, Olli. *Optimization of wash water usage in brown stock washing*. TAPPI Journal, v.10 no. 9, Sep/2011 <http://tappi.micronexx.com/JOURNALS/PDF/11SEP27.9424.pdf>

KOPRA, Riku; KARI, Erkki; HARINEN, Marko; TIRRI, Tapio; DAHL, Olli. *Improving brown stock washing by on-line mesurament – mill investigations*. Technical Article/Peer-reviewed Article – Revista O papel – vol. 73, num.1, p.79-85, Jan/2012 [acesso em 18 jul 2012].

Disponível em:

<http://www.revistaopapel.org.br/noticiaanexos/1326480118d9b7a54d004321ef1a8b6d72319efbf470205892.pdf>

KUMAR, Deepak; KUMAR, Vivek; SINGH, V.P. *Mathematical modeling of brown stock washing problems and their numerical solution using MATLAB*. ELSEVIER-Computer & Chemical Engineering-An International Journal of Computer Applications in Chemical Engineering, v. 34, Issue1,11 p.9-16, Jan/2010

LAAKSO, Sampsa. *Modeling of chip bed packing in a continous Kraft cooking digester*. 2008. 30-36p. Doctoral dissertation – Helsinki University of Technology _ Faculty of Chemistry and Material Sciences – Department of Forest Products Technology, Helsinki, Fi ISBN (printed 978-951-22-9677-4), ISBN (pdf 978-951-22-9678-1). [acesso em 5 jul 2012]. Disponível em: <http://lib.tkk.fi/Diss/2008/isbn9789512296781/isbn9789512296781.pdf>

LINDAU, Jenny; SEDIN, Peter; THELIANDER, Hans. *Investigating the influence of pulp types on washing using a new measurement technique* Nordic Pulp and Paper Research Journal, Estocolmo, Suécia, v. 22 p.80-86, Jan/2007. DOI: 103183/NPPRJ-2007-22-01-p080-086

MAGATON, Andréia. *Curso de pós-graduação Latu Sensu em celulose e papel: Química da madeira, Módulo I – Parte III*. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, abril de 2011.

MARQUES, Ademir Azevedo; NARIYOSHI, Acácio Hiroto; MENDES, Valeria Cristine *Antiespumantes para lavagem de celulose*. In: 35º CONGRESSO E EXPOSIÇÃO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP 2002. Anais. São Paulo: Transamérica Expo Center, 14-17 de outubro de 2002.

MOKFIENSKI, Alfredo. *Curso de pós-graduação Latu Sensu em celulose e papel: Ciclo de recuperação química do proceso Kraft*, Módulo II – Parte II. São Paulo: Universidade Presbiteriana Mackenzie, Agosto de 2011.

PACHECO, C.R.F; de PAIVA, J.L. REYNOL Jr., A.S. *Diagnóstico da lavagem de polpa marrom através de parâmetros de filtração*. In: 38º CONGRESSO INTERNACIONAL DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP-PI 2005. Anais. São Paulo: Transamérica Expo Center, 17-20 de outubro de 2005.

PHILIPP, Paul; D'ALMEIDA, Maria Luisa Otero. *Celulose e Papel: Tecnologia de fabricação de pasta celulósica*, Volume I. 2º ed., São Paulo, Brasil: IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A, 1988. Cap. VIII p. 405-413. ISBN 85-09-00039-5(obra completa). ISBN 85-09-00040-9(Volume I)

POLOWSKI, Natascha Vigdis. *Modelagem e Análise de Digestores Kraft Descontínuos*. 2004. 126p. Tese (Mestrado) – Unicamp, Universidade Estadual de Campinas _ Faculdades de Engenharia Química. Campinas, SP.

PÖYRY GROUP *Enviroment presentation 2008.-Tampere Polytechnic University*, Finland, 2008

ROGERS. J. FUNO; P. NERY,J. *A lavagem da polpa*. . In: 28º CONGRESSO ANUAL DE CELULOSE E PAPEL - ABTCP 1995. Anais. São Paulo: Transamérica Expo Center, 06-11 de novembro de 1995.

WASIK, Larry S.; MITTET, Gerald. R.; NELSON, Doug J.; *Controlling brownstock washing during production rate changes*. [documento na internet] [acesso em 20 jul 2012]. Disponível em: <http://www.tappi.org/Downloads/unsorted/UNTITLED---eng98315pdf.aspx>

Andritz. Fiberline Presentation.Presentation In: Southeastern and VA-Carolina – TAPPI Conference Feb 17th, 2005. [acesso em 20 jul 2012]. Disponível em: <http://www.tappi.org/Groups/Local-Sections/SE/Announcements/Feb-17-2005-Andritz-Fiberline-Presentation.aspx>

Andritz – Catálogos de equipamentos [acesso em 10 jul 2012]. Disponível em: http://cur.g.andritz.com/c/com2011/00/01/24/12464/1/1/0/-876262724/pp-kk-dd-brochure_en .pdf

http://cur.g.andritz.com/c/com2011/00/01/24/12461/1/1/0/-364076619/pp-kk-awp-brochure_en_.pdf

GL&V – Catálogos de equipamentos [acesso em 15 jul 2012]. Disponível em:

http://www.glv.com/Pulp_Paper/Pulp_Technologies/Chemical/Wash_Presses/Compact_Press/ProductDescription.aspx

Metso – Catálogos de equipamentos [acesso em 20 jun 2012]. Disponível em:

[http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-080411-2256E-D1462/\\$File/CPDU_R_2075_168-02.pdf?openElement](http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-080411-2256E-D1462/$File/CPDU_R_2075_168-02.pdf?openElement)
<http://www.metso.com/Automation/valve.nsf/PrintView/B25CFBFC964E2537C22575B50029DBC4?OpenDocument>

Revista O papel - Informações sobre a unidade fabril Eldorado – Grupo Friboi em Três Lagoas/MS site: [acesso em 15 jun 2012]. Disponível em:

<http://www.celuloseonline.com.br/noticias/Fbrica+da+Eldorado+j+tem+data+marcada>

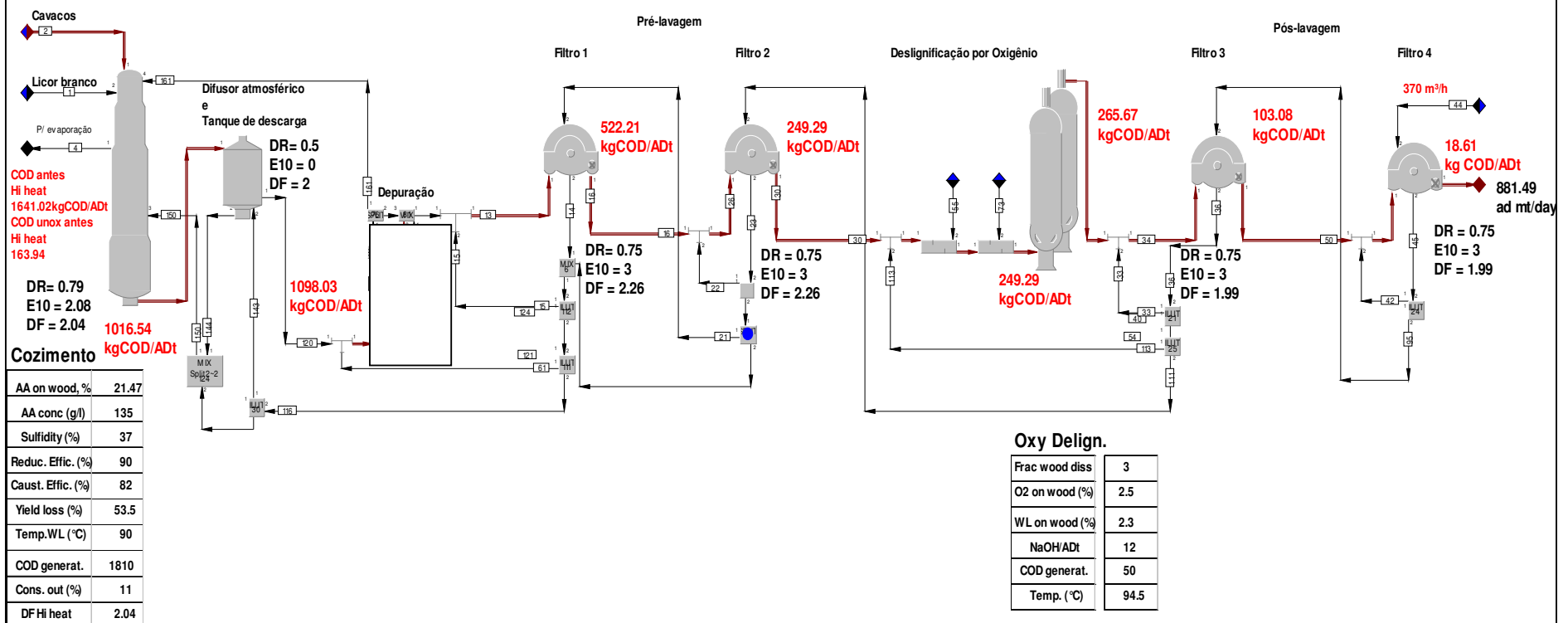
Fibria – Informações sobre a unidade da Fibria em Três Lagoas/MS. [acesso em 20 jun 2012].

Disponível em: <http://www.fibria.com.br/web/pt/negocios/celulose/tres.htm>

ANEXO I

Caso base - Lavagem de Polpa Marrom- 850 ADtB/d

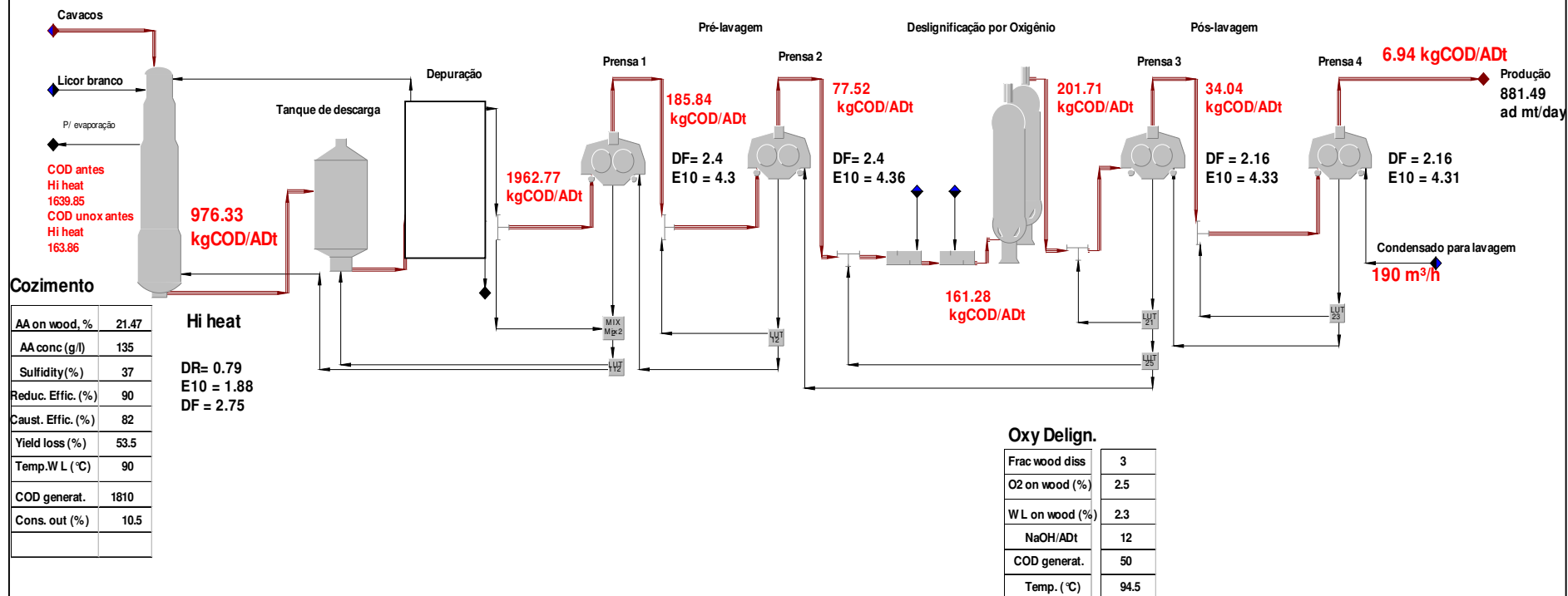
Difusor atmosférico operando com somente 01 estágio e filtros lavadores a vácuo convencional operando na pré e na pós-lavagem



Simulação I - Lavagem de Polpa Marrom- 850 ADtB/d

Substituição dos filtros lavadores a vácuo convencional por prensas lavadoras, de purificação instalada antes da pré-lavagem:

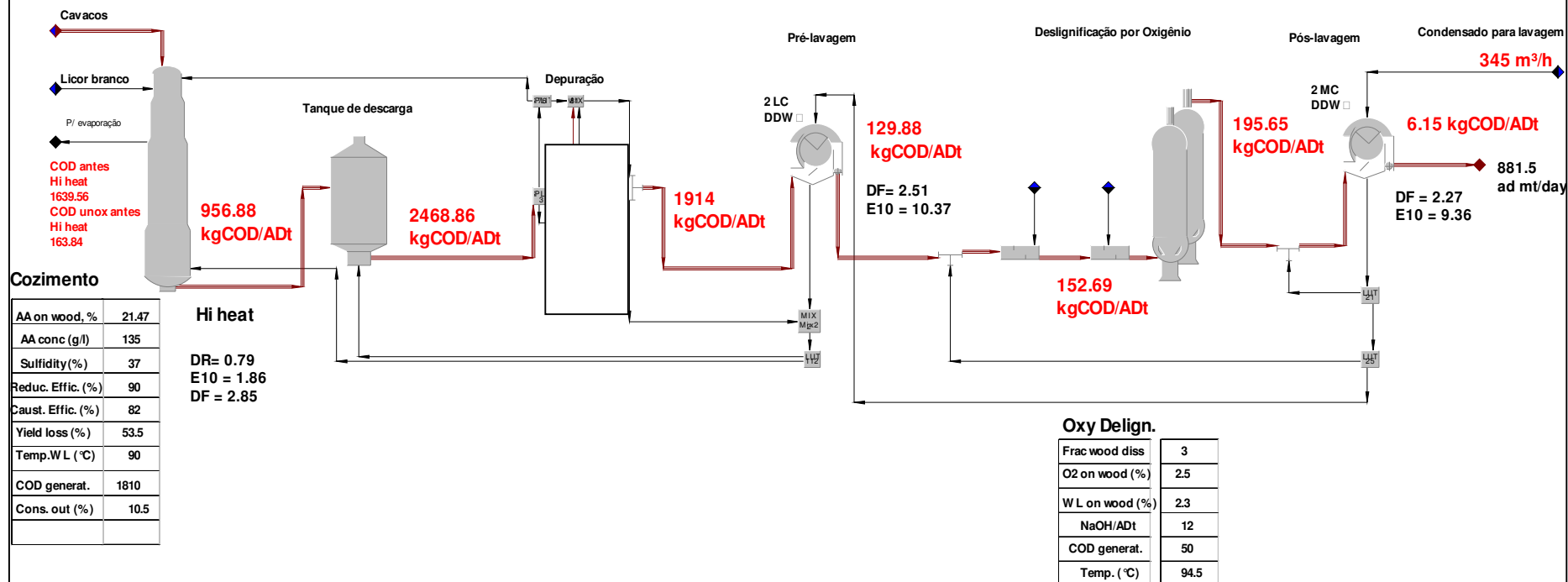
- pré-lavagem - 2 prensas operando a baixa consistência (alimentação - cst = 4,5%);
- pós-lavagem - 2 prensas operando a média consistência (alimentação - cst = 9%);



Simulação II - Lavagem de Polpa Marrom- 850 ADtB/d

Substituição dos filtros lavadores a vácuo convencional por DDW, depuração instalada antes da pré-lavagem:

- pré-lavagem - DDW 2 estágios operando a baixa consistência (alimentação - cst = 4,5%)
- pós-lavagem - DDW 2 estágios operando a média consistência (alimentação - cst = 9%)



Simulação III - Lavagem de Polpa Marrom - 850 ADtB/d

Substituição dos filtros lavadores a vácuo convencional por DDW, instalação da depuração após a pré-lavagem e deslignificação :

- pré-lavagem - DDW 2 estágios operando a média consistência (alimentação - cst = 9%)
- pós-lavagem - DDW 2 estágios operando a baixa consistência (alimentação - cst = 4,5%)

