

DANIELLE GARCIA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE MARMORIZAÇÃO DE CARTÃO
REVESTIDO USANDO MODELAGEM MATEMÁTICA EM REDES NEURAIS.**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando de Lima
Luz Jr.

Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo Vieira

CURITIBA

2010

Garcia, Danielle

Análise do comportamento de marmorização de cartão revestido usando modelagem matemática em redes neurais / Danielle Garcia. Curitiba, 2010.

71 f. : il.; graf, tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Luiz Fernando de Lima Luz Junior

Co-orientador: Osvaldo Vieira

1. Papel – Marmorização. I. Luz Junior, Luiz Fernando de Lima. II. Vieira, Osvaldo. III. Título.

CDD 676.28



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - PPGEQ
Setor de Tecnologia

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos trinta e um dias do mês de agosto de 2010, no Auditório Buriti na KLABIN Monte Alegre em Telêmaco Borba/PR foi instalada pelo Prof. Dr. Luiz Fernando de Lima Luz Júnior, coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, a Banca Examinadora para a décima sexta defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos. Estiveram presentes no ato, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, foi constituída pelos professores doutores: Luiz Fernando de Lima Luz Junior (PPGEQ/UFPR); Osvaldo Vieira (KLABIN); Carlos Itsuo Yamamoto (PPGEQ/UFPR) e Ivo Neitzel (FATEB). Às 13:30 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **Danielle Garcia** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada "*Análise do Comportamento de Marmorização de Cartão Revestido Usando Modelagem Matemática em Redes Neurais*". Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de arguição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a arguição, a banca decidiu pela APROVAÇÃO da candidata, (de acordo com a determinação dos artigos 62 e 63 da resolução 62/03 de 22.07.2003).

Telêmaco Borba, 31 de agosto de 2010.

Prof. Dr. Luiz Fernando de Lima Luz Jr
(PPGEQ/UFPR) – Orientador

Prof. Dr. Osvaldo Vieira
(KLABIN) – Co-Orientador

Prof. Dr. Carlos Itsuo Yamamoto
(PPGEQ/UFPR) – Membro

Prof. Dr. Ivo Neitzel
(FATEB) – Membro

AGRADECIMENTOS

À Klabin S.A. pela possibilidade de execução desse trabalho e pelo suporte financeiro.

Ao Prof. Dr. Luiz Fernando de Lima Luz Júnior pela orientação e estímulos durante a realização desse trabalho.

Ao Prof. Dr. Osvaldo Vieira pela co-orientação, dedicação e compreensão para a concretização deste trabalho em paralelo às atividades profissionais.

Aos professores Doutores Marcelo Kaminski Lenzi e Carlos Itsuo Yamamoto pelo auxílio e boas dicas.

Ao Colega Alexandre Augusto de Andrade pela amizade e por todo suporte com o software Pavilion.

Ao Colega de mestrado Geraldo Sales da Silva pela parceria nas aulas aos finais de semana, pelos momentos de descontração e incentivo para a conclusão deste projeto.

Ao colega Vinicius Lobosco pela preciosa contribuição com a estrutura do trabalho.

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta dissertação.

RESUMO

A produção de papel cartão envolve a utilização de camadas de fibras na sua estrutura e eventualmente, camadas de revestimento. A produção de cartão pela empresa Klabin em Telêmaco Borba, especificamente na máquina MP-9 produz cartões com três camadas, a partir de fibras virgens obtidas pelo processo kraft e polpa de alto rendimento. Aplicam-se ainda, mais tripla camada de revestimento, que proporciona excelentes características de impressão para os processos de off-set, flexografia e rotogravura. Uma das propriedades utilizadas para avaliar a qualidade de impressão é a marmorização (mottling) que descreve o aspecto marmorizado da superfície do cartão. Esta propriedade, quando fora dos parâmetros determinados, afeta a qualidade final da embalagem impressa, dando aspecto desagradável de envelhecido ou de que fora armazenada em lugar inadequado. Sendo assim, cartões com este problema são transformados em produto não conforme, podendo ser refugados durante a produção ou classificados como produto de menor valor agregado ou rejeitados pelos clientes gerando reclamações à custa de indenização. A marmorização foi determinada utilizando o método Mottling STFI e é caracterizado pelo coeficiente de variação da reflectância ou simplesmente desvio padrão já definido pela metodologia do equipamento. O foco principal deste estudo tem como objetivo determinar através de modelagem matemática os parâmetros de processo que mais influenciam a propriedade marmorização. O conhecimento destes parâmetros proporciona condições aos operadores para, com maior segurança, atuar em máquina, reduzindo as variações desta propriedade e mantendo seus valores dentro dos limites especificados. O modelo de marmorização foi desenvolvido a partir de dados históricos de 6 meses de operação da máquina. Estes dados compreendem análises de laboratório de amostras do cartão produzido, bem como inúmeras variáveis de processo, tais como vazão de pigmento, composição da camada meio, temperatura das capotas de secagem e variáveis medidas pelos "frames" como gramatura. Os resultados indicaram que a marmorização é influenciada pela temperatura das capotas secadoras de revestimento.

Palavras-chave: Marmorização, modelagem matemática, papel cartão.

ABSTRACT

The production of paperboard covers the use of fiber in its structure and eventually coating layers. The production of paperboard by Klabin in Telêmaco Borba, specifically in the paper machine PM-9 produces boards with three layers from fiber obtained by kraft process pulp and high yield pulp, plus triple-layer coating that offers excellent printing characteristics for off- set, flexography and gravure. One of the properties used to evaluate the print quality is mottling that describes the appearance of the marbled surface of the board. This property is out of the parameters of quality affects the final quality of the printed packaging, giving unpleasant appearance of older or that it had been stored at inappropriate place. Boards with this problem must be declassified, losing production or value and can generate customer complaints at expensive compensation. The mottling in this study was determined by the method Mottling STFI and is given by the coefficient of variation of reflectance or simply standard deviation already defined by the equipment. The main focus of this study aims to determine by mathematical modeling process parameters that influence the property mottling. The knowledge of these parameters provides conditions for the operators, with better security, acting on the machine, reducing the variations of this property and keeping their values within the specified limits. The model of mottling was developed from historical data of 6 months of machine operation. These data include laboratory analysis of samples of board produced, as well as numerous process variables such as flow of pigment, composition of the middle layer, temperature of drying and variables measured by the "frames" such as weight. The results indicated that mottling is influenced by the temperature of the dryer after coating process.

Key words: Mottling, mathematical modeling, paper board.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 -	Conjunto de componentes da máquina de papel.....	14
FIGURA 1a -	Conjunto de componentes da máquina de papel.....	15
FIGURA 2 -	Papel com problema de marmorização.....	18
FIGURA 3 -	Seção transversal de papel.....	19
FIGURA 4 -	Estrutura de uma rede neural	30
FIGURA 5 -	Sistema de preparação de massa.....	34
FIGURA 6 -	Caixa de entrada.....	36
FIGURA 7 -	Seção de formação.....	36
FIGURA 8 -	Seção de prensas.....	37
FIGURA 9 -	Seção de secagem.....	38
FIGURA 10 -	Calandragem.....	39
FIGURA 11 -	Seção de revestimento.....	39
FIGURA 12 -	Imagem microscópica do papel sem revestimento.....	40
FIGURA 13 -	Imagem microscópica do papel com revestimento.....	40
FIGURA 14 -	Enroladeira.....	41
FIGURA 15 -	Rebobinadeira.....	41
FIGURA 16 -	Transporte de bobinas e Embaladeira.....	42
FIGURA 17 -	Estrutura do cartão da MP-9.....	43
FIGURA 18 -	Banco de dados das variáveis de entrada.....	54
FIGURA 19 -	Exemplo do tratamento das variáveis.....	56
GRÁFICO 1 -	Curva de sensibilidade.....	58
GRÁFICO 2 -	Resultados dos valores de marmorização preditos e reais.....	59
GRÁFICO 3 -	Comparação entre valores preditos e verdadeiros do modelo de marmorização.....	60
GRÁFICO 4 -	Comparativo entre a marmorização medida em laboratório e a marmorização do sensor on line.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 -	Características visuais do cartão.....	17
TABELA 2 -	Distribuição dos padrões de comportamento do modelo de marmorização.....	57
TABELA 3 -	Classificação das variáveis de entrada.....	62

LISTA DE SIGLAS

CTMP - Chemitemomechanical Pulp – Polpa produzida utilizando processo mecânico, com adição de produto químico e vapor.

ECF - Elementar Chlorine Free – Processo de branqueamento sem utilização de cloro elementar.

DTPA - Di-etileno-tri-amino-pentaacetato – Produto químico utilizado como sequestrante de metais.

MP-9 - Máquina de papel N° 9 – Klabin – Telêmaco Borba.

PI – Plant Information (Banco de dados operacionais).

SDCD – Sistema Distribuído de Controle Digital

LPB - Liquid Packaging Board – Cartão fabricado para envase de alimentos líquidos.

O - Oxigênio

D_{HT} – Dióxido de cloro a quente

OP – Oxigênio – peróxido

D₁ – Dióxido de cloro

FCC – *First critical concentration* (primeira zona de concentração crítica)

SCC - *Second critical concentration* (segunda zona de concentração crítica)

ESEM – *Environmental scanning electron microscope* (microscópio eletrônico de varredura)

LIPS – *Laser-induced plasma spectroscopy* (espectroscopia de plasma de laser induzido)

EDS – *Energy dispersive spectroscopy* (espectroscopia de dispersão de energia)

STFI – Antigo nome do instituto que desenvolveu a metodologia de marmorização

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 OBJETIVO GERAL.....	13
1.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	14
2.1 PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PAPEL.....	14
2.2 PROPRIEDADES DO CARTÃO.....	17
2.2.1 Fenômeno marmorização.....	18
2.2.2 Tipos de marmorização.....	20
2.2.3 Variáveis que influenciam a marmorização	20
2.2.4 Efeitos na qualidade do cartão e na impressão	26
2.3 MODELAGEM DE PROCESSOS.....	27
2.3.1 Modelagem matemática do processo de produção de papel.....	28
2.4 REDES NEURAIS.....	28
2.4.1 História e aplicações.....	30
2.4.2 Estrutura de uma rede neural.....	31
3 DESCRIÇÃO DO PROCESSO	33
3.1 INTRODUÇÃO.....	33
3.2 DESCRIÇÃO DA MÁQUINA DE PAPEL NO. 9.....	34
3.3 DESCRIÇÃO DO CARTÃO.....	42
3.3.1 Análise de laboratório.....	43
4 METODOLOGIA	45
5 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA E RESULTADOS DO MODELO	50
5.1 APLICAÇÃO DA FERRAMENTA EM MÁQUINA DE PRODUÇÃO DE CARTÃO.....	50
5.2 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA NEURAL.....	58
5.3 RESULTADOS.....	58
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65
REFERÊNCIAS	66
GLOSSÁRIO	69
ANEXO	70

INTRODUÇÃO

Nessas últimas décadas, os fabricantes de papel e celulose em todo o mundo estão enfrentando uma série de desafios para se manterem competitivos no mercado. A onda de modernização sugere uma nova geração de máquinas maiores, mais rápidas e de tecnologia de ponta, capazes de produzir papel de melhor qualidade em alto ritmo de produção. Esta nova capacidade causou pressão dos preços sobre os produtos acabados, resultando em muitos pequenos produtores fechando ou se deslocando para a produção de outras categorias de produto. Além disso, o aumento dos custos com energia e cumprimento com as exigências ambientais acarretam em maior pressão sobre as margens de lucro. Os fabricantes devem ser capazes de manter a máxima taxa de produção e minimizar os custos sem sacrificar a qualidade e também devem ser capazes de fazer pequenas tiragens de uma vasta gama de produtos de forma eficiente, e mudar rapidamente com o mínimo de perdas por qualidade.

Os produtores objetivam produzir com alta qualidade, maximizando a produtividade ou reduzindo o custo por tonelada de produção de papel, de acordo com os princípios econômicos dominantes, e que lhes sejam disponibilizados meios para o máximo benefício possível (HASECKER, 2007).

Dentre os aspectos importantes na caracterização do cartão, bem como no preço do produto final e na maior satisfação do cliente, a marmorização se mostra como uma propriedade que deve ser acompanhada com muito cuidado durante a produção.

Marmorização é uma propriedade dos cartões caracterizada por manchas irregulares na superfície e aparência não uniforme do produto impresso. É um problema complexo que tem diversas causas, envolvendo desde a fabricação das fibras à tinta de revestimento (FAHLCRANTZ, 2005).

Ainda hoje no processo de produção de cartões a causa da marmorização não é efetivamente compreendida. São comumente encontradas informações na literatura que focam em soluções para minimizar a marmorização através de correções no processo de impressão (BERNIE *et al.*, 2006; LOUMAN, 1991; LU e KUHN, 1999) e pouca informação com soluções para o processo de produção de cartões (WATANABE e LEPROUTRE, 1982). Este trabalho trata de um estudo inicial

para identificação das variáveis operacionais de uma máquina de cartão que influenciam a marmorização.

O controle de qualidade de uma máquina de papel cartão é executado tradicionalmente através de análises de laboratório, salvo controles em linha como gramatura, espessura e umidade. As análises de laboratório são realizadas em amostras retiradas do término do enrolamento do rolo da máquina, período que pode variar em diferentes máquinas de papel e características do produto de cada máquina. A partir desse período, para as análises realizadas em laboratório levam-se mais alguns minutos para que o resultado seja divulgado em boletins de controle de qualidade. Neste tipo de controle assume-se que os resultados obtidos representam o rolo inteiro e as alterações são realizadas com atraso do tempo final do enrolamento até a divulgação dos resultados nos boletins de qualidade. A ferramenta de modelagem matemática para processos não lineares pode ser utilizada para estimar resultados de qualidade do produto, como a marmorização, e reduzir os efeitos dos atrasos de correções devido às análises de laboratório e evitar correções feitas a partir de dados pontuais do rolo jumbo (VIEIRA, 2003).

O entendimento do processo, a busca por soluções de problemas e de oportunidades de melhoria é um desafio constante e tem como principal ferramenta a experiência adquirida nas plantas de produção. As máquinas de cartão apresentam comportamentos muito peculiares neste aspecto, o resultado no produto final provém principalmente da estrutura arquitetônica da máquina e da qualidade de matéria prima. Esses são dois fatores que dificilmente conseguem ser repetidos em diferentes sítios industriais.

Nas indústrias, para correlacionar as variáveis de processo com os parâmetros de qualidade do produto final, técnicas de controle avançado fazem uso da modelagem matemática computacional do processo (VIEIRA, 2003).

Na modelagem computacional os estudos tratam de elevado número de variáveis, propondo-se a adoção de métodos numéricos associados à ferramenta computacional, e às técnicas de programação avançadas, adequadas à otimização da busca das soluções dos problemas complexos.

A Modelagem Computacional aplica a computação a outras áreas do conhecimento, permitindo que se criem modelos computacionais para situações em que é impossível, ou muito caro, testar ou medir as diversas soluções possíveis para um fenômeno a partir de modelos experimentais ou por solução analítica. Viabiliza a

adoção de abordagem computacional, avançando além das limitações, completando e integrando-se a estas outras abordagens e muitas vezes sendo a única opção, à abordagem experimental e à analítica (SOUZA, 2010).

Mesmo sabendo-se que o ideal seria trabalhar com modelos fenomenológicos, na prática dificilmente se consegue construir um modelo dessa natureza com a qualidade necessária. Desta forma, em geral, os modelos não lineares são construídos a partir de dados de processo. Atualmente, as ferramentas digitais, largamente utilizadas nas indústrias, permitem o armazenamento de informações de processo por longos períodos de tempo. Logo os dados de operação referente ao comportamento estacionário do processo estão disponíveis para a construção de modelos matemáticos. (VIEIRA, 2002)

Para realização desta pesquisa foi utilizado modelagem matemática baseado em redes neurais, um conceito da computação que visa trabalhar no processamento de dados de maneira semelhante ao cérebro humano, tido como um processador altamente complexo e que realiza processamentos de maneira paralela. Desta forma, a modelagem baseada em redes neurais organiza sua estrutura, ou seja, os neurônios, de forma que eles realizem o processamento necessário.

O conceito das redes neurais é realizar o processamento de informações tendo como princípio a organização de neurônios do cérebro. Como o cérebro humano é capaz de aprender e tomar decisões baseadas na aprendizagem, as redes neurais são destinadas a fazerem o mesmo. Assim, uma rede neural pode ser interpretada como um esquema de processamento capaz de armazenar conhecimento baseado em aprendizagem (experiência) e disponibilizar este conhecimento para a aplicação em questão (VIEIRA e ROISENBERG, 2003).

Podem ser aplicadas para resolver uma grande quantidade de problemas. Um bom exemplo de aplicação são softwares de reconhecimento de voz, que precisam aprender a conhecer a voz de determinadas pessoas. Redes neurais também são usadas em robôs que desarmam bombas, programas de reconhecimento de textos de imagens, mas no geral as redes neurais são usadas principalmente em aplicações mais complexas, como em usinas, mercado financeiro, etc.

Na literatura são relatados poucos trabalhos sobre a marmorização e visando preencher esta lacuna foi realizado o presente trabalho.

OBJETIVOS

1.1 Objetivo Geral

Investigar a propriedade do cartão denominada de marmorização e quais as variáveis que influenciam nesta propriedade utilizando modelagem matemática através de redes neurais com múltiplas entradas.

1.2 Objetivos Específicos

1. Investigar as variáveis operacionais mais importantes na definição da propriedade de marmorização do cartão produzido na MP-9;
2. Apresentar um modelo matemático da propriedade de marmorização que pode ser utilizada como um sensor virtual;

A dissertação está organizada na seguinte forma: no Capítulo II apresenta a revisão bibliográfica onde são revisados os temas pesquisados tais como o processo de produção de papel, as propriedades do cartão, a propriedade de marmorização e como esta propriedade afeta a qualidade do produto final. Ainda neste capítulo há uma revisão sobre modelagem de processos, redes neurais e apresentação do software utilizado nesta investigação. A seguir, no Capítulo III é apresentada uma descrição do processo de produção de cartão na MP-9, os cartões produzidos nesta máquina e as análises de laboratório. Posteriormente, no Capítulo IV é apresentada a metodologia para realização da avaliação da propriedade de marmorização e os resultados obtidos através da modelagem matemática. Finalmente no Capítulo V são abordadas as principais conclusões e sugestões do trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DE PAPEL – MÁQUINA DE PAPEL

De acordo com informações históricas, a mais amplamente aceita é de que o papel foi inventado na China (LINDBERG, 2000).

A invenção é atribuída a um membro da corte imperial chinesa, chamado Ts'ai Lun, em 105 a.C. Até 1798, ano em que a primeira máquina de papel foi construída, todo papel produzido no mundo foi feito manualmente. A máquina de papel foi inventada pelo francês Nicholas Louis Robert e aprimorada por Bryan Donkin e John Gamble, na Inglaterra sendo o trabalho financiado pelos irmãos Fourdrinier. (FARDIM, 2002).

Primeiramente apresenta-se a configuração de uma máquina de papel e a produção de papel propriamente dita. O conjunto de componentes que formam a máquina de papel consiste em caixa de entrada, seção de formação da folha, de prensagem, de secagem, de tratamento superficial e de enrolamento, conforme FIGURA 1 e FIGURA 1a, com totalidade do conjunto de secagem.

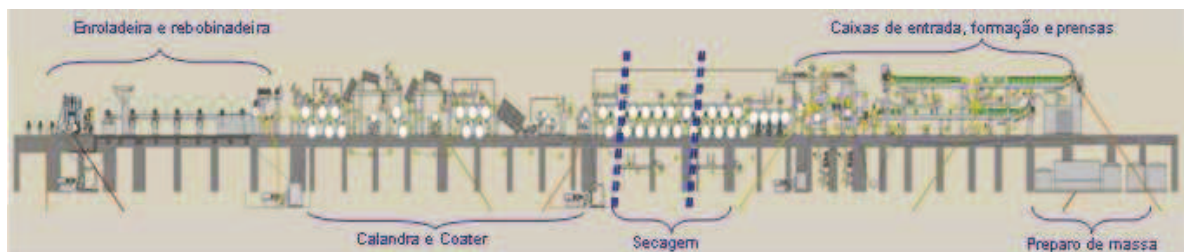
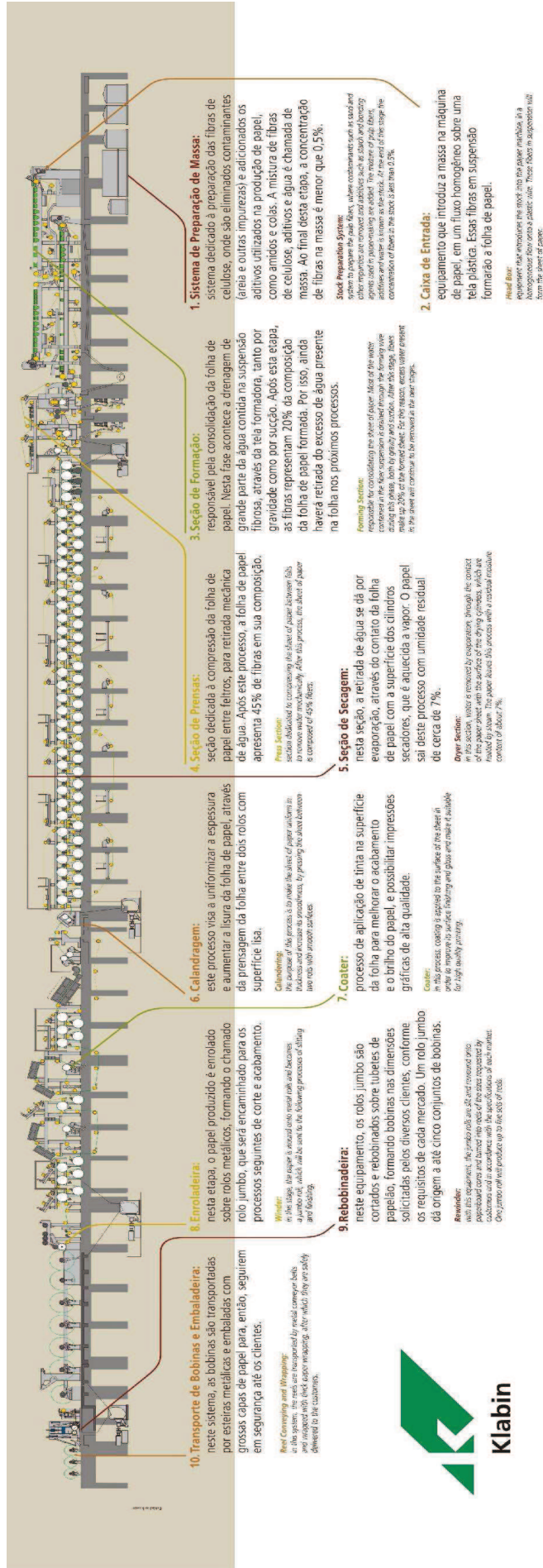


FIGURA 1 - CONJUNTO DE COMPONENTES DA MÁQUINA DE PAPEL
FONTE: MÁQUINA DE PAPEL Nº 9 – KLABIN – TELÊMACO BORBA



O conjunto formado pela caixa de entrada e as seções de formação de folha e prensagem é chamado de parte úmida da máquina, uma vez que grande quantidade de água é envolvida nestas etapas. O conjunto formado pelas seções de secagem é chamado de parte seca da máquina (FARDIM, 2002).

Há ainda, para determinados tipos de papéis, a etapa de revestimento. O revestimento melhora as propriedades de impressão do papel (LINDBERG, 2000).

Outros tipos de máquina de papel foram criados posteriormente, seguindo arranjos similares a Fourdrinier, com exceção para a seção de formação de folha que pode apresentar diferentes formas e estruturas. Máquinas de papel podem ter diferentes tamanhos e larguras, desde pilotos laboratoriais até unidades de alta produção industrial. A velocidade destas máquinas pode variar de alguns metros por minuto até milhares de metros por minuto.

O fluxo da produção do papel consiste inicialmente no refino da polpa celulósica e a posterior adição de componentes não fibrosos, como, por exemplo, cargas minerais, agentes de colagem interna, agentes de retenção, branqueadores óticos e outros, seguido pela diluição com água e a alimentação da massa na caixa de entrada. Nesta seqüência ocorre o processo de floculação, em que fibras celulósicas, minerais, partículas coloidais e substâncias dissolvidas são agregadas em flocos macroscópicos. O fluxo segue da caixa de entrada para a seção de formação da folha, onde grandes quantidades de água são removidas dos flocos e, posteriormente, para as seções de prensagem, secagem e enrolamento. Seções de tratamento superficial podem estar disponíveis em linha, no arranjo da máquina ou fora de linha, em área destinada exclusivamente para esta etapa. Colagem superficial, revestimento e calandragem constituem os principais tratamentos superficiais usualmente empregados. (FARDIM, 2002).

No revestimento de papel, uma suspensão aquosa chamada de revestimento é aplicada em um ou ambos os lados do papel. Após a aplicação o revestimento é seco e acabado. Para finalizar, o papel revestido atinge sua maciez e brilho potencial (LEHTINEN, 2000)

O revestimento é composto basicamente de pigmentos minerais inorgânicos e ligantes, que servem para aglomerar as partículas de pigmentos.

A etapa de revestimento do cartão é influenciada tanto pelo processo de aplicação quanto pelo processo de secagem para a consolidação do revestimento dentro da microestrutura do poro do cartão (TOIVAKKA, 2001).

2.2. Propriedades do cartão

As propriedades do cartão estão relacionadas a diversas variáveis, podendo ser consequência das características das fibras, da qualidade dos aditivos de desempenho e matérias-primas. Podem ser relacionadas à estrutura da máquina de papel ou ainda relacionadas à operação da máquina, sendo essas, variáveis manipuladas pelos operadores da máquina (VIEIRA, 2002).

As características visuais do cartão e qualidade de impressão estão muitas vezes vinculadas as suas propriedades óticas, como alvura, brancura, cor, luminosidade, brilho, opacidade, marmorização e características superficiais como rugosidade e maciez, definidas na Tabela 1:

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS VISUAIS DO CARTÃO

Propriedade	Característica
Alvura	Definida como a porcentagem de reflexão da luz azul apenas no comprimento de onda de 457 nm.
Brancura	Refere-se à medida que o papel reflete a luz difusa de todos os comprimentos de onda em todo o espectro visível, ou seja, a grandeza e uniformidade de refletância medida como a porcentagem de reflexão da luz para toda a gama de comprimento de onda.
Coordenadas L, a* e b*	A cor é relacionada à percepção e, portanto, medidas ou especificadas em termos de espaço de cores. É a qualidade da luz emitida pelo papel, descrita como aspectos de tonalidade, saturação ou força e luminosidade. Uma folha branca reflete quantidades iguais de luz vermelha, verde e azul - todo o espectro visual. Usualmente usa-se o sistema CIE L, a*, b*, baseado na idéia de opostos cor, sendo o L a medida de luminosidade e varia de 100 para o branco perfeito a 0 para o preto perfeito; o a* a variação entre o vermelho e o verde e o b* a variação entre o amarelo e o azul.
Brilho	Reflexão especular da luz pelo papel que é refletida em um ângulo igual e oposta. É importante para determinados tipos de impressão e o nível desejado é muito dependente do uso final do papel
Opacidade	É a medida de quanto de luz é capaz de atravessar o papel. Um papel perfeitamente opaco é aquele que é absolutamente impermeável à passagem de luz visível. É a relação de refletância difusa e de reflexão de folha apoiada por um corpo negro. A opacidade do papel é influenciada pela espessura, quantidade e tipo de pigmento, grau de branqueamento das polpas e composição da tinta couché.
Marmorização	É a distribuição aleatória e não uniforme, num determinado comprimento de onda, de densidade visual, cor ou brilho de uma área impressa, também conhecida como casca de laranja, <i>back-trap mottle</i> , <i>wet-trap mottle</i> e floculação de pigmentos.
Qualidade de impressão	É o grau em que a aparência e outras propriedades da impressão aproximam do resultado desejado. Parâmetros como rugosidade da superfície do papel, brilho, absorção de tinta, brancura, brilho e alvura afetam esta propriedade, que não é usualmente mensurável.

FONTE: www.paperonweb.com/grade.htm

2.2.1. Fenômeno marmorização

Marmorização pode ser definida como a variação indesejada na densidade de cor do cartão (ANTTILA e HAKKILA, 2009).

Os padrões de variação indesejada de reflexão fazem a interpretação da informação impressa mais difícil para o Sistema Visual Humano. O olho humano detecta a marmorização como a distribuição não uniforme de cores e tons. É considerado um dos fatores mais prejudiciais para a qualidade de impressão global e, portanto, fundamental para avaliar de forma adequada a qualidade do cartão. A FIGURA 2 mostra um exemplo dessa aparência de mármore do papel:



FIGURA 2 - PAPEL COM PROBLEMA DE MARMORIZAÇÃO
FONTE: www.breathingcolor.com/page/print-quality-evaluation-comparison

A marmorização pode ser desencadeada por uma formação irregular do papel base ou pela migração do ligante do revestimento pelo papel base. A Figura 3 apresenta uma secção transversal de papel com uma distribuição irregular do revestimento sobre o papel base, também irregular. As setas indicam a diferença de espessura do revestimento, resultado da espessura desuniforme do papel base.

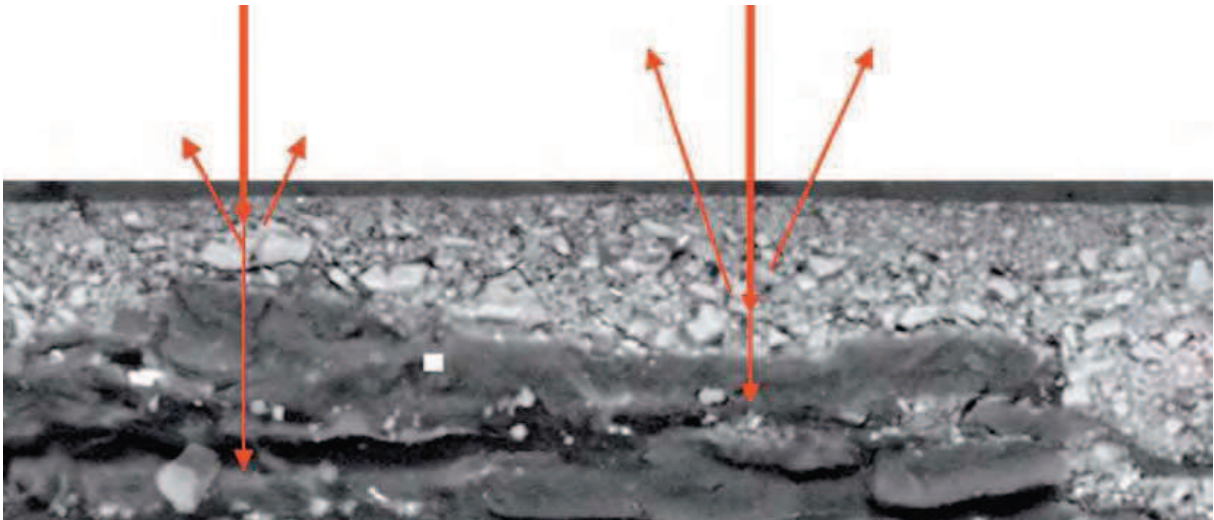


FIGURA 3 - SEÇÃO TRANSVERSAL DE PAPEL.

As setas indicam a diferença de espessura do filme devido irregularidades da espessura do papel base.

FONTE: "Mottling – Mottled impression".

A Marmorização depende de características do papel, da tinta de impressão e do processo gráfico (PYLKKÖ, 2000). Marmorização também depende de fatores como as propriedades de superfície, tamanho do poro e distribuição de tamanho do pigmento para carga. (BERNIE *et al*, 2006).

O resultado é muitas vezes reportado como o coeficiente de variação da refletância e essas variações são relatadas para uma escala espacial de comprimento de onda de 1-8 milímetros (JOHNSON, 2008), considerada a faixa de frequência de variação de refletância em que o sistema visual humano é mais sensível e, portanto, deve ser considerado (FAHLCRANTZ, 2005).

Fahlcrantz e Johansson (2004) sugerem em seu trabalho que três aspectos da marmorização de impressão monocromática devem ser considerados ao se avaliar um instrumento de medição da marmorização: a amplitude da variação, a dispersão e o nível de refletância da impressão. Segundo eles, vários equipamentos de avaliação de marmorização são desenvolvidos para a indústria gráfica como softwares de avaliação de imagem e muitos deles não são documentados em literatura (FAHLCRANTZ, 2005).

As técnicas mais populares de medição da marmorização incluem programas de varredura para medição de variabilidade de densidade através de análise de imagem digital. (WYGANT, 2000).

2.2.2. Tipos de Marmorização

A marmorização em cartões é caracterizada pela sua aparência manchada e que resulta na imagem impressa visualmente indesejável, manchada ou não uniforme.

Print mottle é um termo geral que descreve uma aparência não uniforme de densidade de cor ou brilho, em uma área de meio-tom ou de impressão chapada. É mais visível em áreas de cor uniforme, onde a superfície não consegue absorver a tinta de impressão uniformemente devido à formação do papel base ou variações de gramatura de revestimento. Os cartões revestidos por vezes apresentam marmorização por causa de sua superfície rugosa. A formação ruim da base do papel pode levar à marmorização de impressão através da compressão não uniforme durante calandragem, resultando em variação na densidade da camada de revestimento. Os papéis com migração de ligante, variação de peso de revestimento, perfil irregular de revestimento e mistura heterogênea de pigmentos podem causar a marmorização de impressão (LEHTINEN, 2000).

O resultado da imagem impressa visualmente parece excessivamente manchada, entremeada ou não-uniforme (www.sappi.com).

Back-trap Mottle (BTM) é outro termo para marmorização de impressão múltipla (KIM, *et al.* 1997).

2.2.3. Variáveis que influenciam a marmorização

Dentre as hipóteses sobre as causas da marmorização existe a sugestão de que a marmorização na impressão offset seja causada pela migração de ligante distribuído de forma irregular na superfície do papel. Também se considera o tempo entre a aplicação do revestimento e a secagem deste revestimento (HEIKKILÄ e RAJALA, 2000). Hagen (1985) considera que a taxa de evaporação é a razão mais significativa para a marmorização.

Marmorização é gerada por mais de um fator, então não é possível compreender sua causa por somente uma teoria. A formação e absorção do papel base são os principais fatores que causam marmorização. O revestimento do cartão, a base de pigmentos e ligantes, definem se a tinta de impressão é sensível à marmorização, uma vez que o tamanho e formato do pigmento e a solubilidade do ligante são fatores que afetam a estrutura do revestimento e, por conseqüência, a

sensibilidade da tinta de impressão à marmorização. Variações no peso do revestimento aplicado ou na superfície do papel base são indicativos para a ocorrência de marmorização (HEIKKILÄ e RAJALA, 2000).

ESTUDOS SOBRE O EFEITO DA FORMAÇÃO DO PAPEL.

Além das fibras, o papel consiste também de cargas minerais e aditivos químicos. No processo de formação do papel esses constituintes são distribuídos estocasticamente. A formação do papel se dá através da distribuição destas partículas. Desta forma, pode-se definir por formação a variabilidade, em pequena escala, da gramatura do papel. (NISKANEN et al., 2000).

Como resultado da formação irregular, há áreas que são mais densas e menos absorventes para o revestimento que outras áreas, e isto tem um efeito sobre a marmorização do papel revestido na impressão. O revestimento e a calandragem podem mudar totalmente o comportamento óptico do papel (NISKANEN *et al.*, 2000).

A formação da folha promove um importante efeito na qualidade de impressão. No estudo realizado por Bernié *et al.*(2006), diversas folhas foram impressas em preto e tiveram suas formações de folha e marmorização medidas e correlacionadas. A folha de papel contém estruturas, os flocos de fibras, de tamanhos que variam desde menos de 1 mm a até poucos centímetros, caracterizando a formação do papel. Nesta base, imaginou-se que os flocos, em uma específica faixa de tamanho, gerariam a marmorização durante a impressão. Se o floco dentro da folha cria a marmorização de impressão, o floco desta marmorização deve ter o mesmo tamanho que o floco da formação. A formação é conhecida por afetar várias propriedades do papel, esta foi a razão com que Bernié *et al.*(2006) supuseram que a marmorização de impressão seria afetada somente por uma específica escala de formação. Para testar esta hipótese, formação e marmorização de impressão foram determinadas em função de escala e então suas correlações determinadas em cada nível desta escala. Uma correlação com coeficiente R^2 de quase 0,5 foi encontrada para a escala de formação entre 5 a 8 mm, sugerindo que a formação estrutura o tamanho de marmorização de impressão. Outras escalas de formação tiveram pouco ou nenhum efeito em marmorização de impressão. (BERNIE *et al.*, 2006). Uma correlação com coeficiente de R^2 de 0,5 pode ser considerada pobre para análise do fenômeno de marmorização com pouca

aplicação para a indústria de fabricação de papel. O estudo realizado por Bernié *et al.* (2006) mostra-se limitado por utilizar somente a variável de formação do papel para entendimento desta propriedade.

A formação do papel pode ser medida usando métodos diferentes. As avaliações tradicionais de formação do papel baseiam-se em avaliar a luz que atravessa a amostra. Alguns medidores óticos são calibrados de forma a dar resultados que se correlacionam com o sistema visual humano. Esses medidores podem dar resultados enganosos no sentido de que a aparência visual não é equivalente à uniformidade estrutural do papel, pois esta propriedade depende do processo produtivo da máquina. Por exemplo, o processo de calandragem do papel reduz sua porosidade e assim pode alterar a opacidade e transmissão de luz. Medições da formação são muitas vezes indiretas através de medidores de massa por radiação (NISKANEN *et al.*, 2000).

Kajanto (1990) examinou a printabilidade em offset para papéis finos sem revestimento e, assim como Bernié *et al.* (2006), concluiu que a formação da folha pode ser correlacionada com a qualidade visual da impressão.

ESTUDOS SOBRE O EFEITO DA DOSAGEM DE FINOS

Lu e Kuhn (1999) avaliaram os efeitos dos finos e da formação de papeis com polpa mecânica na marmorização de impressão. O estudo realizado por eles foi conduzido com variações na dosagem de finos e de tempo de drenagem na formação de folhas de laboratório com polpa mecânica. É de conhecimento que o aumento de finos melhora as propriedades superficiais do papel, dentre elas a marmorização. O aumento do tempo de drenagem deteriora a formação do papel e aumenta a gramatura dos flocos de fibra. Já o aumento do teor de finos melhora propriedades superficiais, reduzindo a rugosidade e a porosidade do papel. Nestes ensaios a correlação entre marmorização de impressão e formação da folha não pode ser descrita como uma correlação linear com a dosagem de finos. Isto sugere que a formação da folha não é a única propriedade que afeta a marmorização. Nos resultados alcançados, ensaios sem a utilização de finos tiveram melhores resultados de marmorização, ao contrário do esperado. A possível explicação é que para 0 % de finos a estrutura total do papel é muito aberta, facilitando a uniformização da penetração da tinta de impressão. Por outro lado as amostras com

maior porcentagem de finos (até 40 %) têm uma estrutura muito fechada, reduzindo a transferência de tinta e causando a marmorização de impressão, apesar da baixa rugosidade. (LU e Kuhn, 1999)

ESTUDOS SOBRE O EFEITO DA CAMADA DE REVESTIMENTO E A SECAGEM

Para o processo de secagem do revestimento de papel, existem três métodos utilizados de forma geral: secagem por radiação infravermelha, secagem por ar quente e por cilindros de secagem, sendo esta também geralmente a ordem em que os revestimentos de papel são secos. Se áreas de revestimento são consolidadas em zonas de secagem sob diferentes taxas de evaporação, isto definitivamente formará uma estrutura de revestimento heterogênea e a ocorrência da aparência marmorizada (HEIKKILÄ e RAJALA, 2000).

A uniformidade da camada de revestimento é uma das propriedades mais importantes dos papéis em termos de qualidade de impressão. Se a camada não for uniforme, a qualidade da impressão será inferior e problemas como marmorização em impressões offset podem ocorrer. Esta uniformidade é afetada pelas propriedades de superfície do papel base, como rugosidade e porosidade e também pela penetração de revestimento no papel. A pré calandragem é utilizada para melhorar essas propriedades do papel base que levarão a melhor cobertura e uniformidade da camada de coating. (KOYAMOTO e OKOMORI, 2006)

A distribuição desigual de revestimento resulta em uma má distribuição de ligante na superfície do papel revestido durante a secagem. Quando esta camada no papel não for homogênea, a distribuição da tinta de impressão pode ter resultado não-uniforme, e o produto impresso aparece com marmorização. Este fenômeno é chamado de “back trap mottle”. (HAENEN e ESSERS, 2001)

No trabalho realizado por Xiang e Bousfield (2000), amostras com diferentes níveis de marmorização foram física e quimicamente analisadas, usando porosímetro de mercúrio, ESEM (microscópio eletrônico de varredura), LIPS (laser de espectroscopia de plasma induzido) e EDS (Espectroscopia de energia dispersiva). Tais amostras tinham o mesmo papel base, foram revestidas com composições de tinta idênticas e mesma gramatura, com a diferença de que foram secas em diferentes condições. Os resultados obtidos neste estudo questionam o

fato de que a migração do ligante para o interior do papel cause a marmorização. Os poros na estrutura da tinta de revestimento atuam como filtros para os solventes da tinta de impressão. Assim, a tinta de impressão pode ser mantida na superfície do papel para dar melhores resultados de densidade de impressão e brilho. Ao mesmo tempo, o solvente deve ser absorvido pelos poros suficientemente rápido para receber as tintas de impressão na próxima unidade de impressão. A estrutura do poro no papel revestido tem sido considerada o mais importante conceito de assentamento de tinta de impressão no papel revestido. Logo, variações locais na estrutura dos poros devem causar a marmorização em sistema de impressão multi cor. Com este trabalho verificou-se que a amostra que apresentou a pior marmorização apresentou também a maior porcentagem de áreas fechadas na superfície do cartão revestido em relação à amostra que apresentou o melhor resultado. Também se observa que a relação entre porcentagem de áreas fechadas e a marmorização deve servir para certos limites e que a não uniformidade na estrutura dos poros não é causada pela distribuição não uniforme do revestimento do papel. Nestes casos o responsável foram as condições de secagem do revestimento. (XIANG e BOUSFIELD, 2000)

Watanabe e Lepoutre (1982) propõem um mecanismo para consolidação de estrutura durante a secagem. Eles definiram dois parâmetros estruturais: a primeira concentração crítica (FCC) e a segunda concentração crítica (SCC). A FCC corresponde ao ponto onde a camada de revestimento é adensada, os sólidos são imobilizados e quando o alinhamento das partículas na superfície é máximo. Isso corresponde a uma diminuição do brilho e a estrutura do revestimento começa se formar na superfície. A consolidação e compactação do revestimento continuam desde a coalescência dos ligantes em presença de água, que ocorre entre a FCC e SCC. Isto resulta do desenvolvimento das forças capilares que desenham os componentes do revestimento, uma rede compacta de partículas suficientemente forte para resistir às forças de compressão no SCC. Este é o ponto de máxima de compactação e representa a concentração máxima de sólidos. Após a SSC, o ar substitui a água evaporada dos poros e isto corresponde a um aumento da opacidade e alvura. (WATANABE e LEPOUTRE, 1982)

Uma estratégia de secagem errada pode afetar a estrutura do revestimento e provocar o *backtrap mottle*. (XIANG e BOUSFIELD, 2000)

O estudo realizado por Kim *et al.*(1997) em um *coater* piloto sob diferentes condições de secagem e impressão em uma impressora de seis cores, identificou uma boa estratégia de secagem para as fábricas de papel e de látex para reduzir a marmorização. Um modelo computacional ajudou a compreender os parâmetros importantes do processo de secagem e transferir os resultados obtidos no *coater* piloto para o processo de secagem das fábricas. Os resultados mostram como a sensibilidade às condições de secagem, próximas à primeira zona de concentração crítica de secagem, influenciam a marmorização. (KIM *et al.*, 1997)

Não existe um entendimento detalhado dos fundamentos referentes ao comportamento do fluxo de revestimento durante o processo de imobilização. Toivakka (2001) apresenta um trabalho através de modelagem matemática para caracterizar os mecanismos microscópicos e parâmetros que controlam o desenvolvimento da microestrutura do fluxo de revestimento, resultado da ancoragem da tinta sobre o cartão, durante a etapa de consolidação. Após a aplicação do revestimento do cartão, uma estrutura porosa consolida-se. Durante a etapa de consolidação, a fase líquida é removida da camada de revestimento através da absorção de água pelo cartão base, etapa que inicia imediatamente após a aplicação do revestimento no cartão base, e também pela evaporação na interface entre revestimento e ar. Esta última etapa inicia após o cartão revestido entrar na primeira seção de secagem. A total consolidação determina as propriedades físicas e funcionais do cartão revestido. É desejável que o cartão, após ser revestido, apresente uma superfície com total cobertura do substrato. Segundo Toivakka (2001) a taxa entre os dois processos de desaguamento afeta o desenvolvimento da microestrutura nas camadas de revestimento. A mobilidade das partículas na camada de revestimento é determinada pela concentração de partículas no revestimento. Inicialmente todas as partículas têm mobilidade, mas a partir do momento em que se inicia a remoção da fase líquida, as partículas maiores e as mais próximas do cartão base são inicialmente imobilizadas, restando mobilidade para as partículas menores que se estabilizarão na rede formada pela parte já imobilizada, até que todas as partículas fiquem imobilizadas. Toivakka (2001) investigou a influência da absorção na superfície que recebe o revestimento e a taxa de evaporação da parte aquosa deste revestimento, assim como o teor de sólidos, a rugosidade do papel base e a estabilização eletrostática do revestimento. Em sua análise verificou que a maciez da superfície do cartão revestido é obtida em

aplicações com alto teor de sólidos. Também observou que durante o processo de evaporação é formada uma densa camada na interface entre o revestimento e o ar que reduz a mobilidade de partículas e a penetração para o substrato favorecendo a qualidade macia do produto final. Baixo peso de revestimento também é favorável, pois pode ser imobilizado mais rapidamente, enquanto que camadas de revestimento muito espessas formam uma camada de partículas não uniformes favorecendo a absorção pelo papel base prejudicando o perfil de absorção. Através de simulações, Toivakka (2001) confirma que a maciez da superfície do revestimento é maximizada quando a rugosidade do substrato é minimizada e o teor de sólidos do coating é maximizado pois a perda de partículas do revestimento para o substrato é indesejável, podendo causar efeitos de redução da maciez do revestimento, baixa qualidade de cobertura das fibras e redução de propriedades de resistência do coating devido a migração dos ligantes. (TOIVAKKA, 2001)

2.2.4. Efeitos na qualidade do cartão e na impressão

A ocorrência de marmorização na impressão dos cartões revestidos é um dos problemas mais difíceis de corrigir na área de impressão offset (LOUMAN, 1991).

Marmorização é freqüentemente o determinante principal da qualidade da impressão. Ocorre de forma aleatória, com variações indesejadas na refletância de cores das impressões subseqüentes (KIM *et al.*, 1997).

Atualmente sabe-se que a ancoragem da tinta de impressão ao papel revestido se dá pela evaporação do veículo da tinta de impressão (solvente) e penetração das moléculas de tinta de impressão de baixo peso molecular no revestimento do papel. Entretanto a micro porosidade e química da superfície do revestimento do papel são dois fatores que controlam essa ancoragem. Esses dois fatores podem ser influenciados pelo ligante. Assim a variação das propriedades físico-químicas do revestimento do papel afetam a tinta de impressão e afetam o *backtrap mottle* (XIANG e BOUSFIELD, 2000).

Em geral as partículas de tinta nos processos de impressão offset têm diâmetros entre 0,4 e 0,7 μm . As dimensões das partículas de tinta de impressão são geralmente maiores que o dos poros de um papel revestido (aproximadamente 0,2 μm). A distribuição desigual da gramatura de revestimento na superfície de papel é um dos fatores principais de desequilíbrio entre a transferência de tinta de

impressão para o papel, pois a imobilização acontece principalmente pela absorção do óleo da tinta de impressão em micro poros e pela permeabilidade da estrutura de revestimento. (HAENEN e ESSERS, 2001).

A ocorrência de marmorização em papéis revestidos é um dos problemas mais difíceis de corrigir na área de impressão offset. Marmorização não é diretamente correlacionada com nenhuma outra propriedade de qualidade mensurável e, portanto sua ocorrência não pode ser predita. Muito desta dificuldade é relacionada com marmorização de impressão devido a carência de métodos apropriados de avaliação em laboratório, principalmente em impressões de meio tom. (LOUMAN, 1991).

2.3. Modelagem de processos

Modelos matemáticos são assim chamadas as relações matemáticas que descrevem o comportamento das variáveis de processo (VIEIRA, 2003).

Os modelos matemáticos são considerados como a representação de fenômenos através de equações matemáticas. Possuem as variáveis de entrada, e a partir dessas são calculadas as variáveis de saída. Numa máquina de papel, as variáveis de entrada são as vazões de fibra e químicos, pressões de linhas e prensas e variáveis controladas por instrumentos como os medidores *on line* de gramatura, espessura e umidade, enquanto as variáveis de saída são as propriedades da folha, neste caso a marmorização. Normalmente existem relações bem definidas entre as variáveis de entrada e sua consequência nas variáveis de saída, porém, algumas destas relações nem sempre são bem conhecidas pelos engenheiros e cientistas (VIEIRA, 2002).

Modelos matemáticos fundamentados em dados são uma boa opção para confrontar esse tipo de problema. As redes neurais artificiais são uma ferramenta matemática bastante funcional para modelar processos complexos, considerando que elas possuem capacidade de aprendizagem (PATAN e PARISINI, 2005).

Para grande parte das aplicações, as redes neurais artificiais funcionam razoavelmente bem, o que as torna muito utilizadas em aplicações genéricas (HAYKIN, 1999).

2.3.1. Modelagem matemática do processo de produção de papel

O controle dos parâmetros de qualidade de uma máquina de papel pode ser obtido basicamente de duas formas: controle indireto e controles baseados em modelos. Controles indiretos baseiam-se nas medições realizadas em laboratório das amostras coletadas ao final de cada rolo jumbo. Essas amostras são porções pequenas em relação ao rolo jumbo e assume-se que o resultado da medição representa o rolo inteiro. Quando acontecem mudanças no controle regulatório, as variáveis manipuladas passam a ser as ferramentas para controlar os parâmetros de qualidade. Isto normalmente é determinado através da experiência da operação e consideração de hipóteses. Os controles baseados em modelos se dão através de princípios básicos e modelagem estatística. (SCHWEIGER e RUDD, 1994).

2.4. Redes Neurais

Rede neural é um processador paralelamente distribuído constituído de unidades de processamento, que tem capacidade para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Assemelha-se ao cérebro em dois aspectos:

- O conhecimento é adquirido pela rede neural a partir do seu ambiente através de um processo de aprendizagem.
- Pontos de conexão entre neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são utilizados para armazenar o conhecimento adquirido (HAYKIN, 1999).

Na sua forma mais geral, uma rede neural é um algoritmo projetado para modelar a forma como o cérebro realiza uma tarefa particular ou função de interesse. O procedimento utilizado para realizar o processo de aprendizagem é chamado de algoritmo de aprendizagem. No entanto, também é possível uma rede neural modificar sua própria topologia, assim como neurônios no cérebro humano podem morrer e novas conexões sinápticas podem crescer.

Nas modelagens com redes neurais, a rede é apresentada para um exemplo escolhido aleatoriamente do conjunto de dados, e os pesos sinápticos (parâmetros livres) da rede são modificados para minimizar a diferença entre a resposta desejada e a resposta produzida pela rede, através do sinal de entrada em conformidade com um critério adequado. A formação da rede é conseguida pela repetição para muitos

exemplos no conjunto até que se atinge um estado estacionário onde não há mais alterações significativas nos pesos sinápticos.

Redes neurais têm a capacidade de adaptar seus pesos sinápticos às mudanças no ambiente. Em particular, uma rede neural treinada para operar um determinado ambiente pode facilmente ser treinada novamente para lidar com pequenas alterações nas condições de operação do ambiente.

A propriedade que é de importância primordial para uma rede neural é a capacidade da rede para aprender sobre seu ambiente, e melhorar o seu desempenho através desta aprendizagem. A melhora no desempenho ocorre ao longo do tempo, de acordo com alguma medida imposta. Uma rede neural aprende sobre seu ambiente através de um processo iterativo de ajustes aplicados a seus pesos sinápticos e níveis de polarização. A rede se torna mais bem informada sobre o seu ambiente após cada interação do processo de aprendizagem (HAYKIN, 1999).

Podem-se considerar as redes neurais uma aplicação relativamente recente na matemática, e são aplicáveis a determinar as interligações que existem entre variáveis, sem ser necessário definir antecipadamente as equações que as correlacionam. É possível elaborar modelos sem fundamentação fenomenológica com os dados de operação de um processo (VIEIRA, 2002).

Para testar a eficiência de predição de modelos matemáticos, dados históricos de processo e de produto são utilizados no treinamento do modelo. Quando o modelo completa o aprendizado com os dados históricos inseridos, testes são realizados com outros dados para checar o desempenho do modelo. O sucesso do treinamento é avaliado através do erro relativo alcançado (SCHWEIGER e RUDD, 1994).

A disciplina das Redes Neurais Artificiais é muito aplicada para os pesquisadores de Inteligência Artificial e torna-se cada dia mais crescente nas pesquisas, servindo como instrumento para muitas aplicações. (VIEIRA e ROISENBERG, 2003)

A Figura 4 apresenta de forma simplificada a estrutura de uma rede neural. Os nós representam funções de transferência e são todos interligados. O grau de interligação é determinado por pesos, indicados na figura por P . Para a construção de modelos, a série de dados históricos é processada seqüencialmente pela rede. A cada conjunto de dados de entrada, é feita uma comparação entre os valores das saídas calculados pela rede e os valores reais (as análises de laboratório das

propriedades dos cartões), e um algoritmo ajusta os pesos da rede com o objetivo de minimizar a diferença entre os valores calculados e os reais. A rede neural é, portanto uma estrutura que se adapta aos dados. Este processo de adaptação é chamado de treinamento da rede neural. Após o treinamento, ficam estabelecidas as relações que as variáveis de entrada guardam com as de saída (VIEIRA, 2002).

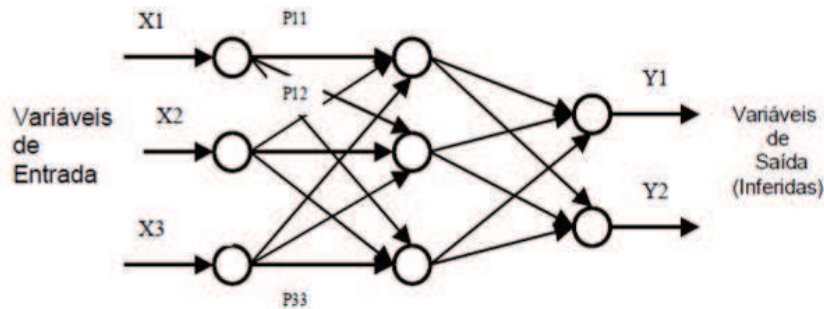


FIGURA 4 - ESTRUTURA DE UMA REDE NEURAL *FEEDFORWARD* SIMPLIFICADA

Quanto ao tempo de treinamento, vários fatores podem influenciar a sua duração, porém sempre será necessário utilizar algum critério de parada. Mas, devem ser considerada a taxa de erro médio por ciclo, e a capacidade de generalização da rede. Pode ocorrer que em um determinado instante do treinamento a generalização comece a degenerar, causando o problema de overtraining, ou seja a rede se especializa no conjunto de dados do treinamento e perde a capacidade de generalização. O treinamento deve ser interrompido quando a rede apresentar uma boa capacidade de generalização e quando a taxa de erro for suficientemente pequena, ou seja, menor que um erro admissível. Assim, deve-se encontrar um ponto ótimo de parada com erro mínimo e capacidade de generalização máxima. (Braga *et al.*, 2007)

2.4.1. História e aplicações

As redes neurais foram inspiradas nos complexos circuitos neurais do cérebro humano, constituídos de várias conexões entre seus neurônios (sinapses) que interagem entre si promovendo o comportamento inteligente. Assim surgiu o conceito em se conseguir modelar computacionalmente conexões neurais para gerar comportamentos inteligentes também em máquinas. Esta idéia de modelagem

cerebral forma a vertente da Inteligência Artificial chamada Inteligência Artificial Conexionista. (VIEIRA e ROISENBERG, 2003)

O projeto de uma rede neural é motivado por analogia com o cérebro, que é uma prova de que o processamento paralelo tolerante a falhas é possível não só fisicamente, mas também rápido e poderoso. Neurobiologistas olham para uma rede neural artificial como uma ferramenta de pesquisa para a interpretação dos fenômenos neurobiológicos. Por outro lado, os engenheiros olham para a neurobiologia como fonte de novas idéias para resolver problemas mais complexos do que os baseados em técnicas convencionais (HAYKIN, 1999).

Uma estrutura em rede neural é similar ao cérebro humano em dois aspectos: o conhecimento é alcançado através de etapas de aprendizagem e pesos sinápticos são usados para armazenar o conhecimento. Chama-se sinapse as conexões entre os neurônios, nessas conexões valores são atribuídos, chamados de pesos sinápticos. Desta forma uma rede neural é composta de uma série de neurônios artificiais conectados entre si e que formam uma rede de elementos de processamento (ALECRIM, 2004).

2.4.2. Estrutura de uma rede neural

As redes são geradas a partir de procedimentos projetados para uma determinada aplicação. Não é possível criar esses procedimentos, ou algoritmo, sem conhecer os modelos matemáticos que simulem o método de aprendizado do cérebro humano. A partir da montagem de uma rede neural, o funcionamento se dá através de uma série de valores que podem ser aplicados sobre um neurônio que está conectado a outro pela rede. Esses valores, chamados de entradas são multiplicados no neurônio pelo valor de peso da sua sinapse e então os valores são somados. Tendo a soma passado por um sinal de ativação, um sinal é enviado pela saída do neurônio e esta etapa se repete com os demais neurônios da rede. Este processo é chamado de ativação e depende das variáveis entrada e dos pesos. A rede neural deve ser estruturada para atender seu objetivo, e será isto que vai determinar o número de camadas usadas, a quantidade de neurônios nas camadas e o tipo de sinapse (ALECRIM, 2004).

Redes neurais artificiais são poderosas técnicas matemáticas para modelagem, controle e melhora de desempenho que aprendem a dinâmica do processo diretamente a partir de dados históricos. Os recentes avanços na matemática e na compreensão dos mecanismos de aprendizagem juntamente com o poder dos modernos computadores permitem a construção de redes neurais artificiais para modelagem e controle adaptativo no processo de produção (SCHWEIGER e RUDD, 1994).

A construção de modelos em redes neurais é relativamente simples, porém é importante oferecer dados históricos de boa qualidade. Falhas de instrumentos, paradas do processo e outros problemas devem ser cuidadosamente limpos (VIEIRA, 2002).

A propriedade mais importante das redes neurais é sua habilidade de aprender através de treinamento com as informações inseridas e com isso melhorar seu desempenho. Restrições de ganho são inseridas como uma penalidade à função objetivo e treinamento usando gradientes descendentes. Procedimentos robustos são desejados para balancear as resistências relativas dos vários termos na função objetivo, que é essencial quando as restrições são inconsistentes com os dados. Esta aproximação tem a benefício de estender, através de extrapolação de treinamento, a validade do domínio do modelo (HARTMAN, 2000).

Variáveis com correlação linear acima de 0,8 podem determinar problemas para o treinamento da rede neural por conter basicamente as mesmas informações fazendo com que a rede não consiga assinalar corretamente a influência de cada variável, gerando ganhos errados do processo. O uso de técnicas como restrição de ganhos pode eliminar esse problema (VIEIRA, 2002).

3. DESCRIÇÃO DO PROCESSO

3.1. Introdução

O processo de fabricação de cartão, na Klabin, unidade de Monte Alegre utiliza como matéria-prima fibras virgens de celulose e de CTMP oriundas de árvores de Pinus e Eucalipto de diferentes espécies.

A Máquina de Papel 9, em Telêmaco Borba utiliza polpa de celulose e CTMP, ambas não branqueadas, para compor a camada base e meio e polpa de celulose branqueada para compor a camada cobertura. Para promover propriedades físicas e óticas ao produto final, faz-se necessária a adição de aditivos às polpas de celulose e de CTMP. A seguir são apresentadas as principais matérias primas e aditivos bem como suas funções:

Polpa não branqueada de pinus – polpa de celulose produzida no processo Kraft a partir de madeira de Pinus, espécie Taeda. É a polpa, juntamente com a polpa não branqueada de eucalipto responsável pela estrutura do cartão e compõe as camadas base e parte da camada meio.

Polpa não branqueada de eucalipto – polpa de celulose produzida no processo Kraft a partir de madeira de Eucalipto, de espécies diversas. É também a polpa responsável pela estrutura do cartão e compõe parte da camada meio.

Mistura de polpa branqueada de Pinus e Eucalipto – Polpa de celulose produzida no processo Kraft seguido com etapa de branqueamento no processo ECF, seqüência O-D_{HT}-OP-D₁, , a partir de madeira de Eucalipto e Pinus. É utilizada para promover características óticas e de impressão adequadas à demanda de mercado e compõem em sua totalidade a camada cobertura.

Polpa de CTMP – Polpa produzida a partir do processo químico termo mecânico da madeira de Eucalipto, de espécies diversas. Esse tipo de polpa é utilizada para promover características de corpo (volume e espessura) ao cartão e compõem parte da camada meio.

Caulim calcinado – Mineral de granulação fina, de composição aluminossilicatosa produzido a partir da calcinação de caulim em fornos com temperatura acima de 1000 °C. É utilizado somente na camada cobertura com a

finalidade de melhorar propriedades óticas como o aumento da alvura a opacidade e redução do efeito de marmorização do cartão.

Além das matérias-primas fibrosas e do pigmento inorgânico também são utilizados aditivos como amido cozido e fécula de mandioca para promover maior ligação entre as fibras e assim auxiliar nas propriedades de resistência do cartão. Aditivos à base de dímero de alquil-ceteno (AKD) e breu (ácidos resínicos) são usados para conferir ao cartão propriedades de resistência à penetração de ácido láctico e peróxido de hidrogênio. Também são utilizados aditivos funcionais como o Di-etileno triamino pentaaceto de sódio (DTPA), ácido sulfúrico, agentes de retenção e drenagem, coagulante orgânico e inorgânico e anti espumante.

3.2. Descrição da máquina de papel no. 9

A MP-9 divide-se nas seguintes seqüências de processo de produção. A descrição da máquina de papel é importante para entender a complexidade do processo de produção de papel e também a dificuldade de se representar matematicamente a marmorização.

Sistema de preparação de massa

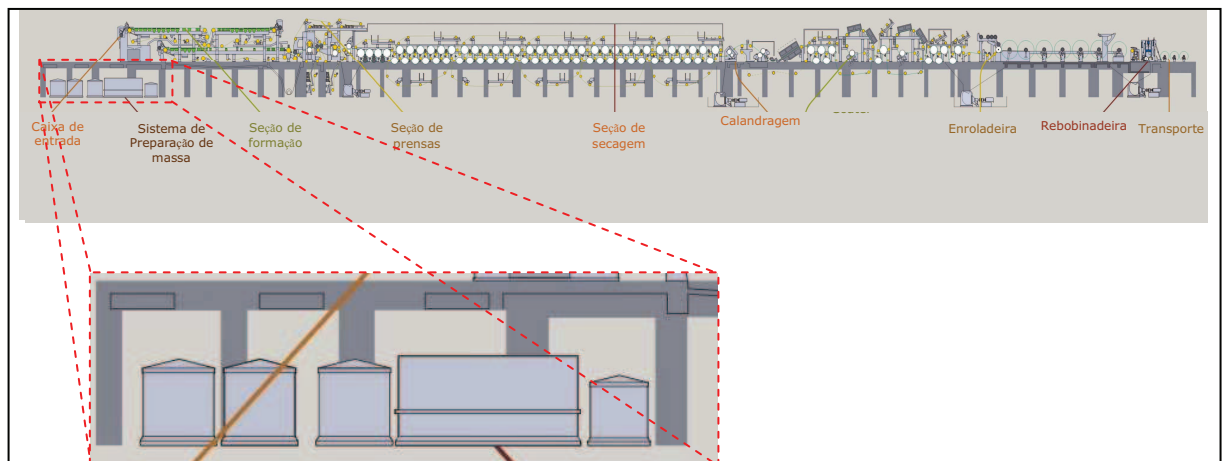


FIGURA 5 - SISTEMA DE PREPARAÇÃO DE MASSA.

O sistema de preparação de massa é dedicado à preparação das fibras de celulose e de CTMP de forma individual para cada camada. Esta etapa engloba a operação de refinação, depuração e aditivação da polpa, que serão descritas a seguir.

A operação de refinação é um tratamento mecânico dado às fibras através de refinadores, cujo funcionamento baseia-se na fricção das fibras com os discos dos refinadores e com as próprias fibras. A refinação tem como objetivo mudar a estrutura da fibra de forma a torná-la mais flexível, hidratada e com maior área de contato, resultado em um produto final com propriedades de espessura, resistência a flexão, tração e resistências internas. Usualmente o nível de refinação é expresso em grau *Schopper-Riegler* (°SR).

Na operação de depuração são eliminados contaminantes como areias, palitos, partículas metálicas e outras impurezas presentes na polpa e que comprometem a qualidade final do cartão. A depuração baseia-se em equipamentos como filtros ou ciclones que selecionam os materiais através de sua densidade, tamanhos e forma. A MP-9 possui depuradores tipo filtro, chamado de depuradores pressurizados e depuradores baseados no conceito de ciclone para realizar a chamada depuração centrífuga.

Na etapa de preparação de massa é feita a adição dos aditivos utilizados na produção de papel como cola, amido cozido, coagulante, agente de retenção, anti-espumante e outros. Esses aditivos são adicionados no tanque de massa ou na linha dessas polpas. Cada uma das camadas do cartão possui características distintas para as propriedades necessárias para o produto final, desta forma a MP-9 possui 3 tanques de massa, um para cada camada, onde as polpas e os aditivos são misturados em uma suspensão com consistência menor que 1 %.

A camada base é 100% constituída de polpa não branqueada de pinus. A camada meio é composta de polpa não branqueada de pinus, de eucalipto e também de CTMP. A composição da camada meio é ajustada de acordo com a gramatura e rigidez desejada. A camada cobertura é composta de 30 % de polpa branqueada de pinus e 70 % de polpa branqueada de eucalipto.

Caixa de entrada

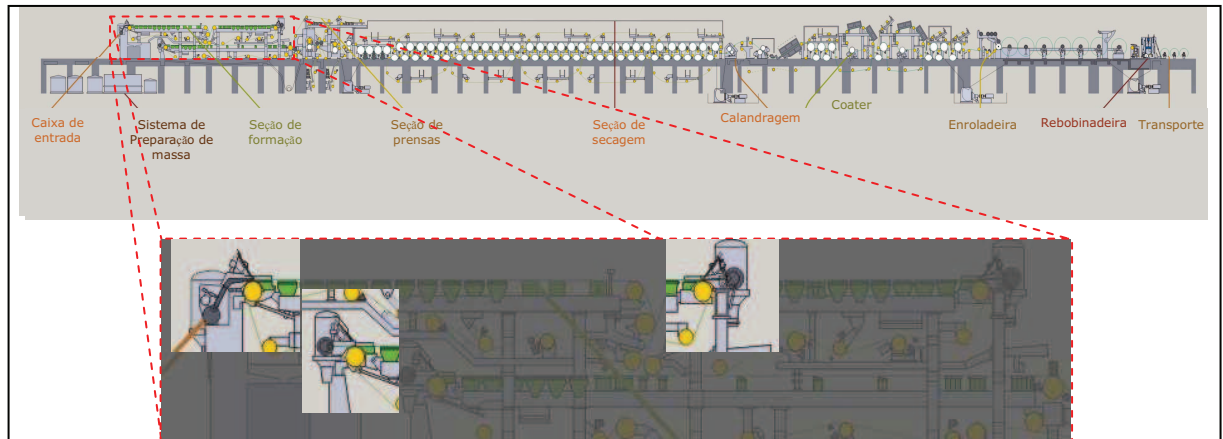


FIGURA 6 - CAIXA DE ENTRADA

Equipamento que transforma a suspensão de fibras em um jato fino de fibras e que controla e distribui continuamente esse fluxo de alimentação de massa diluída em toda a largura da mesa plana da máquina de papel. É constituída de um lábio, de abertura definida, mas não fixa, por onde é dada a passagem à suspensão de fibras para a seção de formação. A caixa de entrada tem efeito significativo sobre a formação, orientação das fibras, perfil de espessura, gramatura e umidade. Abertura de lábio, pressão de fluxo e velocidade do jato são ferramentas utilizadas na caixa de entrada para ajuste de qualidade do produto final.

A MP-9 possui 3 caixas de entrada, sendo uma para cada camada.

Seção de formação

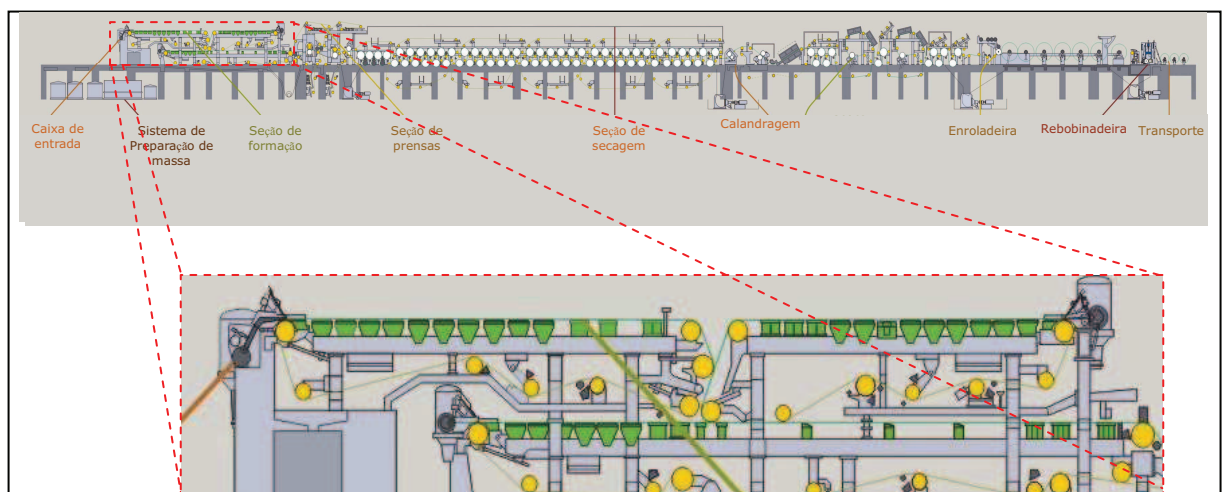


FIGURA 7 - SEÇÃO DE FORMAÇÃO

Após o fluxo passar pela caixa de entrada segue para a seção de formação, que é responsável pela consolidação da folha de papel e onde são definidas a maior parte das propriedades físicas do produto final e aparência do cartão. Consiste em uma tela formadora para sustentação das fibras e elementos desaguadores para auxiliar a drenagem. Nesta fase acontece a drenagem de grande parte da água contida na suspensão fibrosa, através da tela, tanto por gravidade como por sucção. Após esta etapa, as fibras representam 20 % da composição da folha de papel formada, havendo portanto outras etapas para retirada do excesso de água presente na folha.

As polpas são lançadas em mesas planas independentes para cada camada através de caixas de entrada. As camadas do cartão são unidas nas prensas com auxílio de amido cru para a realização da colagem entre as camadas.

Seção de prensas

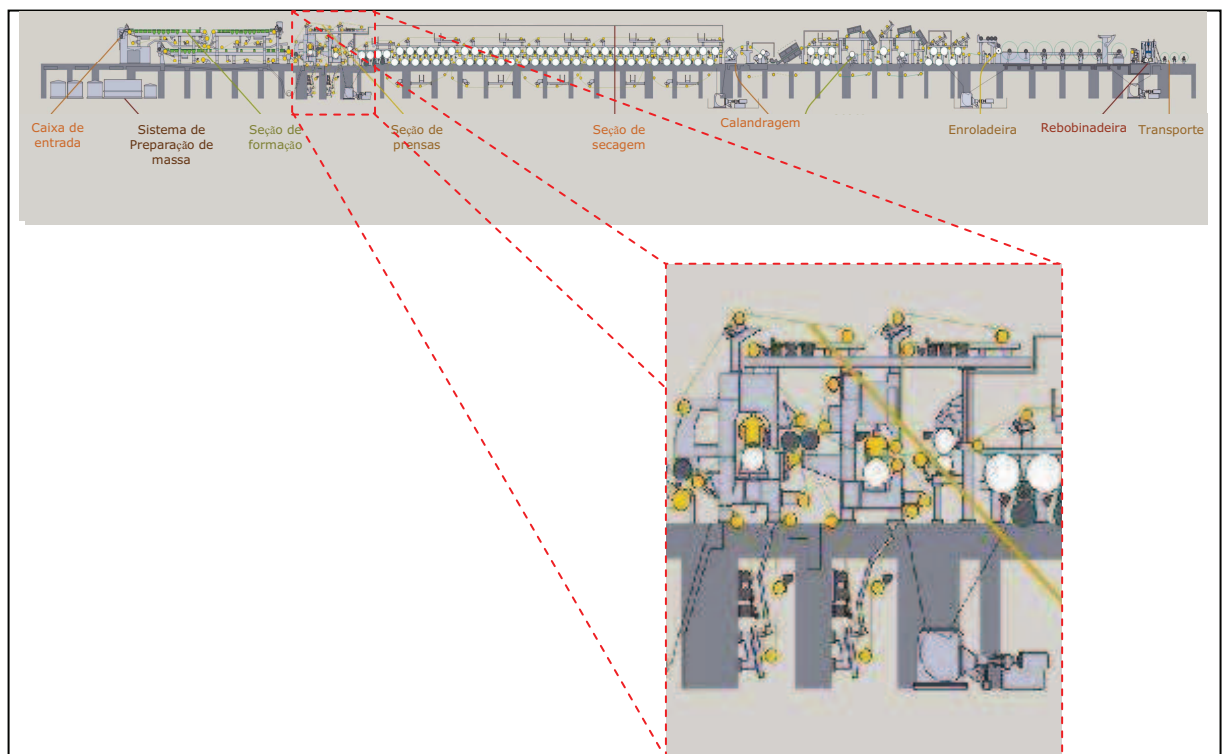


FIGURA 8 - SEÇÃO DE PRENSAS

Esta seção é uma extensão da seção de formação e é dedicada à compressão da folha de papel entre feltros, para retirada mecânica de água. A prensagem ocorre através do contato da folha com um ou dois feltros através de prensagem entre dois

rolos. Após este processo, a folha de papel apresenta 45 % de fibras em sua composição.

Seção de secagem

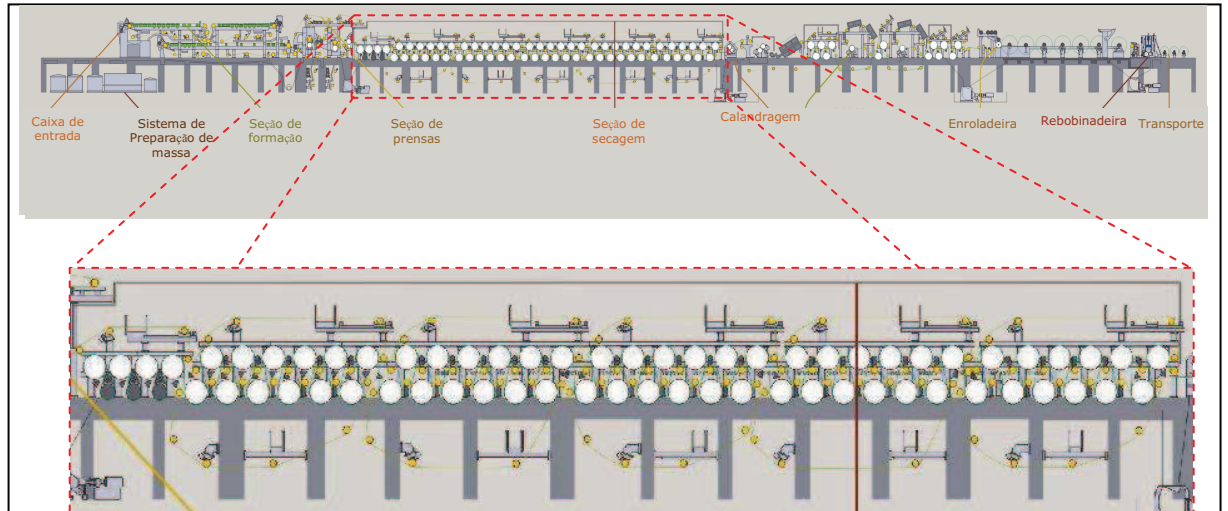


FIGURA 9 - SEÇÃO DE SECAGEM

Nesta seção, a retirada de água se dá por evaporação, através do contato da folha de papel com a superfície dos cilindros secadores, que é aquecida a vapor. A secagem define parte da qualidade do produto, pois existem propriedades físicas dependentes da umidade, como a resistência a flexão e tração. A MP-9 possui cilindros secadores, dispostos em grupos secadores. A remoção da água evaporada é feita através de sistemas de insuflamento e exaustão do ar

O papel sai deste processo com umidade residual de cerca de 7 %.

Calandragem

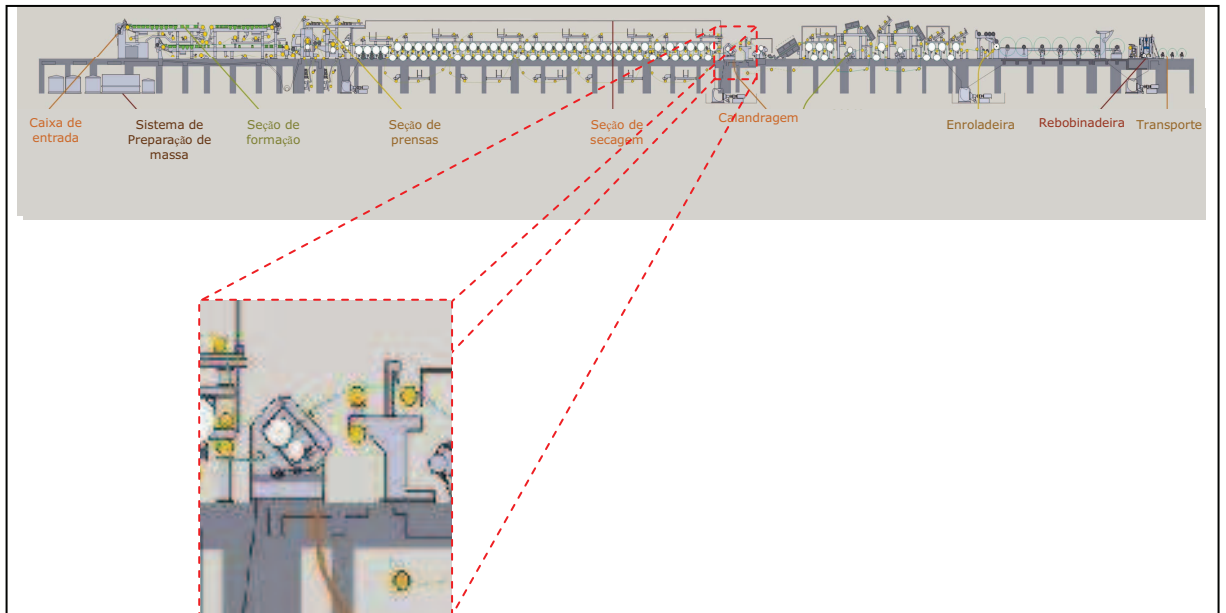


FIGURA 10 - CALANDRAGEM

É um processo mecânico que consiste na passagem da folha de papel entre dois rolos com superfície lisa, aquecidos e sob pressão. Este processo visa a uniformizar a espessura e aumentar a lisura da folha de papel, através da prensagem da folha entre os dois rolos.

Seção de revestimento

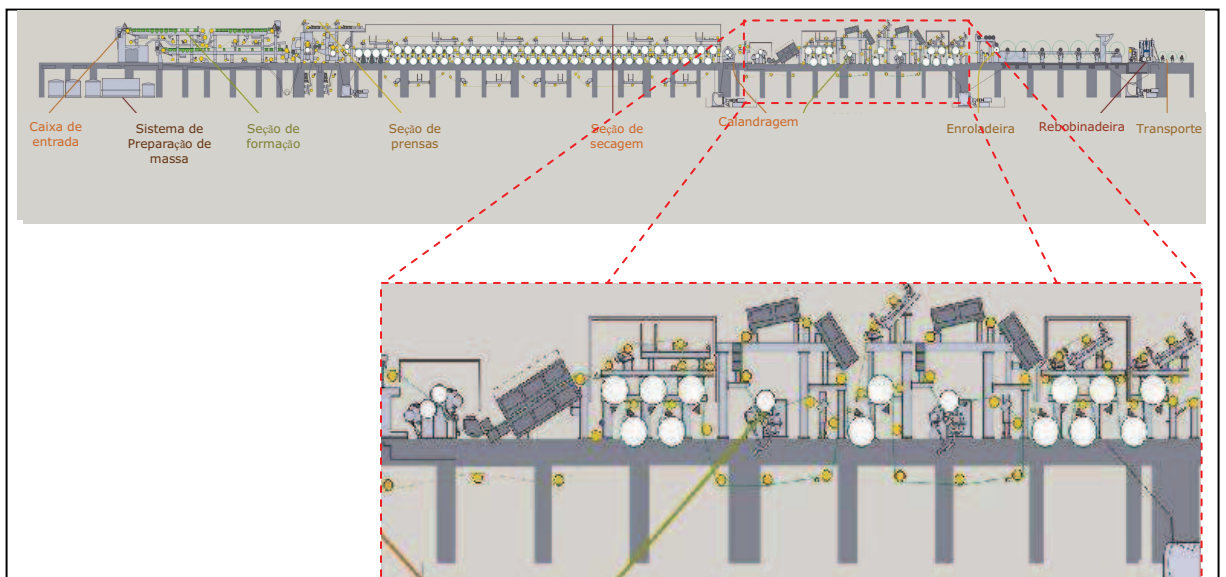


FIGURA 11 - SEÇÃO DE REVESTIMENTO

Esta seção da máquina, também chamada de Coater, é a parte onde é dado o acabamento com a tinta de revestimento e amido. O papel revestido, Figura 13, oferece melhores características de impressão em relação ao papel não revestido, Figura 12, devido ao recobrimento das fibras e melhor uniformidade da superfície, isso garante aumento de brilho e menor absorção de tinta.

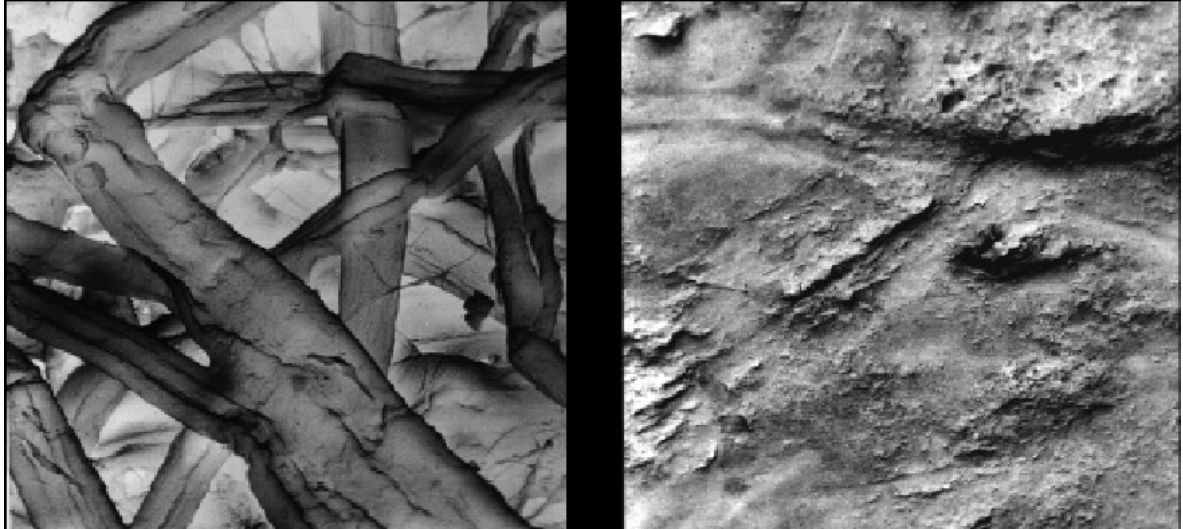


FIGURA 12 - IMAGEM MICROSCÓPICA DO PAPEL SEM REVESTIMENTO.

FIGURA 13 - IMAGEM MICROSCÓPICA DO PAPEL COM REVESTIMENTO.

O processo de revestimento na MP-9 consiste em 4 etapas, sendo a primeira a aplicação de amido de revestimento na *speed sizer* na base do cartão, seguido por uma aplicação de tinta também no *speed sizer*, porém na cobertura branca do cartão e mais duas aplicações de tinta couché na cobertura do cartão. Após cada uma das três etapas de revestimento ocorre a secagem através de secadores infravermelho e capotas secadoras.

Enroladeira

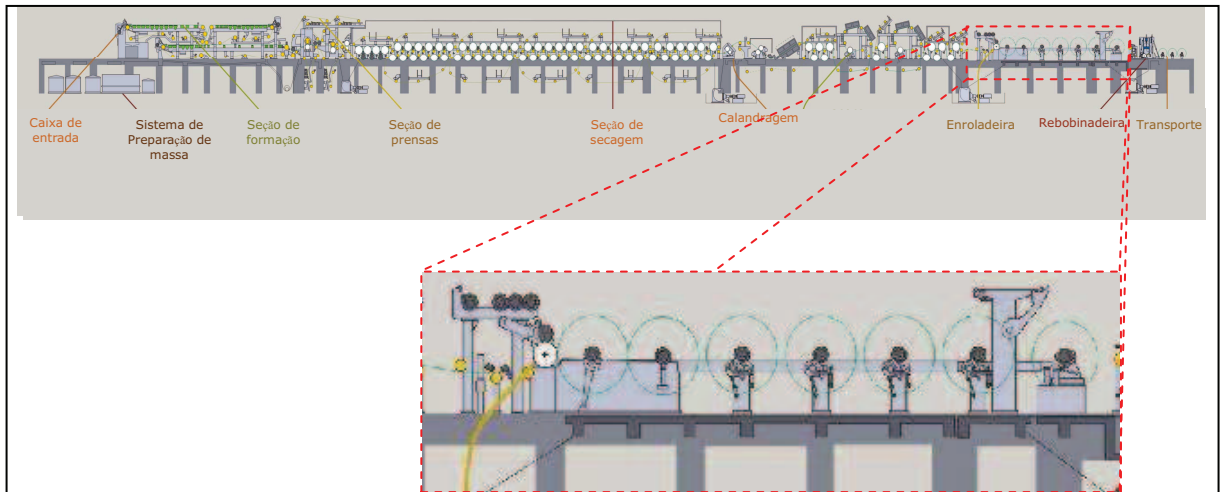


FIGURA 14 - ENROLADEIRA

Nesta etapa, o papel produzido é enrolado sobre rolos metálicos, formando o chamado rolo jumbo, que será encaminhado para os processos seguintes de corte e acabamento.

Rebobinadeira

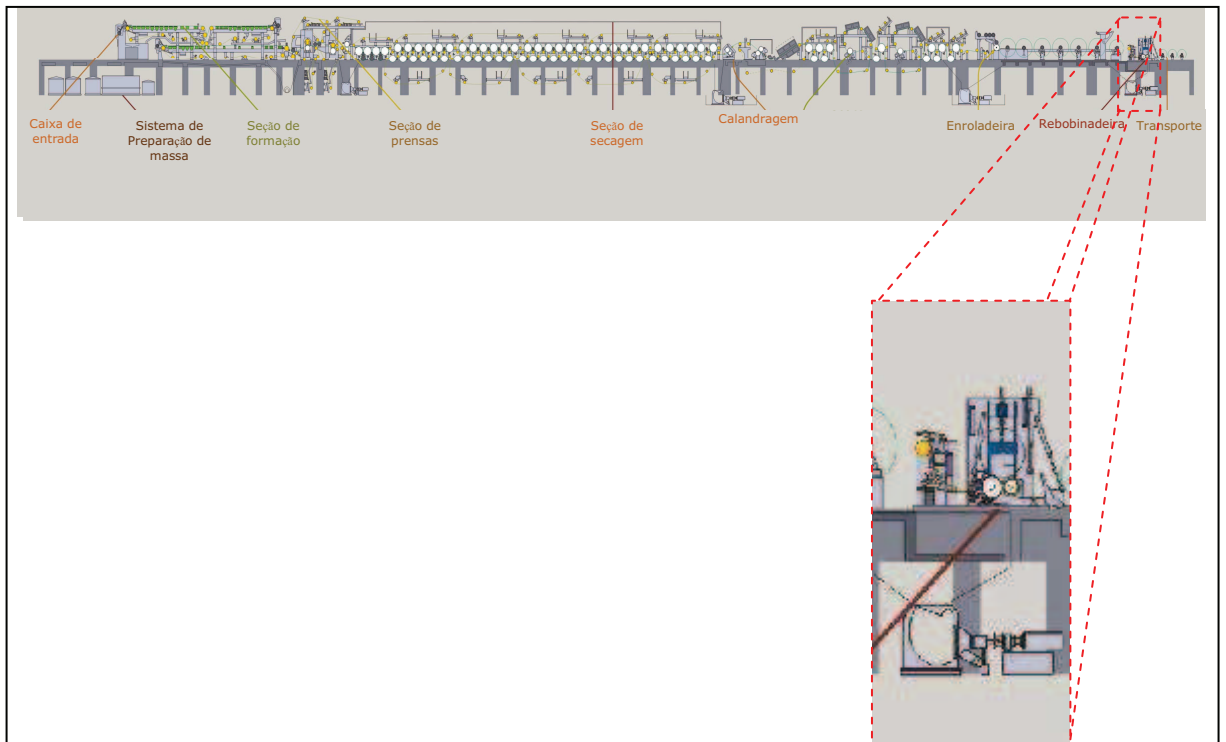


FIGURA 15 - REBOBINADEIRA

Esta é a última etapa da máquina de papel, nesta seção os rolos jumbo são cortados e rebobinados sobre tubetes de papelão, formando bobinas nas dimensões solicitadas pelos diversos clientes, conforme os requisitos de cada mercado. Um rolo jumbo dá origem a até cinco conjuntos de bobinas.

Transporte de bobinas e Embaladeira

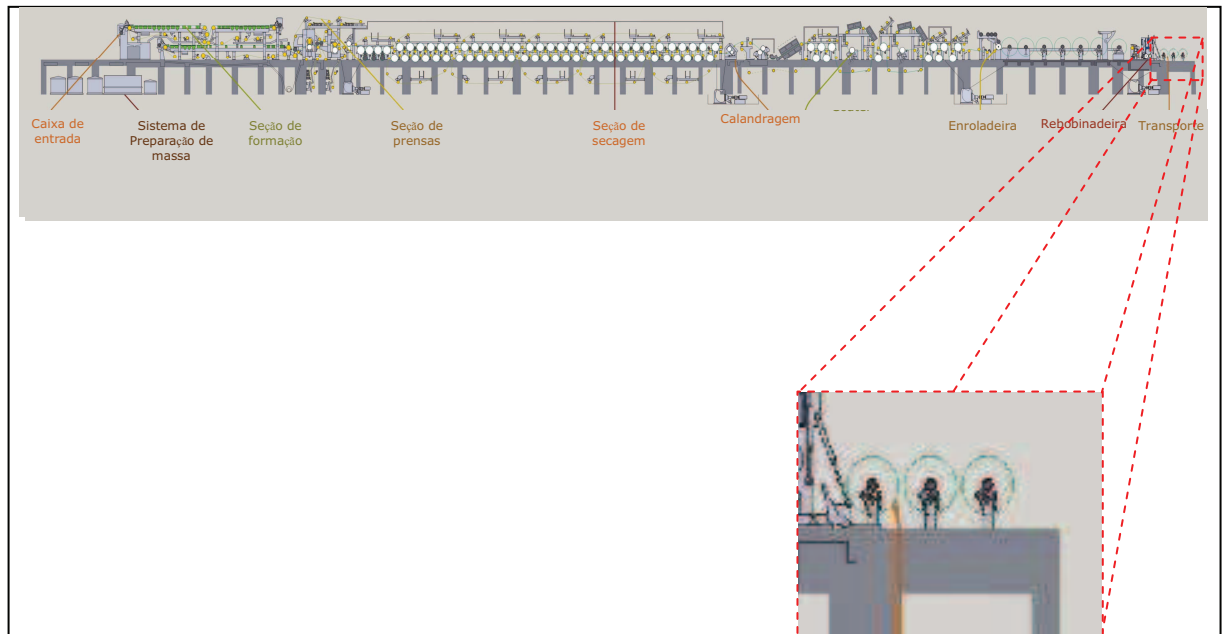


FIGURA 16 - TRANSPORTE DE BOBINAS E EMBALADEIRA

Neste sistema, as bobinas são transportadas por esteiras metálicas e embaladas com grossas capas de papel para seguirem em segurança até os clientes.

3.3. Descrição do cartão

No mercado existe uma grande variedade de cartões, todos, devido sua função comum de embalar, devem apresentar resistência mecânica suficiente para suportar dobras ao serem convertidos em embalagens e suportar manuseios quando chegam aos pontos de venda e aos consumidores finais

A competitividade e crescente demanda por qualidade exige cada dia mais cartões com características mecânicas e superficiais que atendam os processos de impressão e conversão, mantendo a estrutura do cartão e garantindo impressões de precisão.

O cartão da MP-9 é composto por 3 camadas fibrosas, sendo a camada da cobertura composta de celulose branqueada. Revestindo as camadas de fibra são aplicadas 3 camadas de revestimento. No lado oposto do cartão (base do cartão) é aplicada uma camada de amido de superfície, conforme Figura 17:

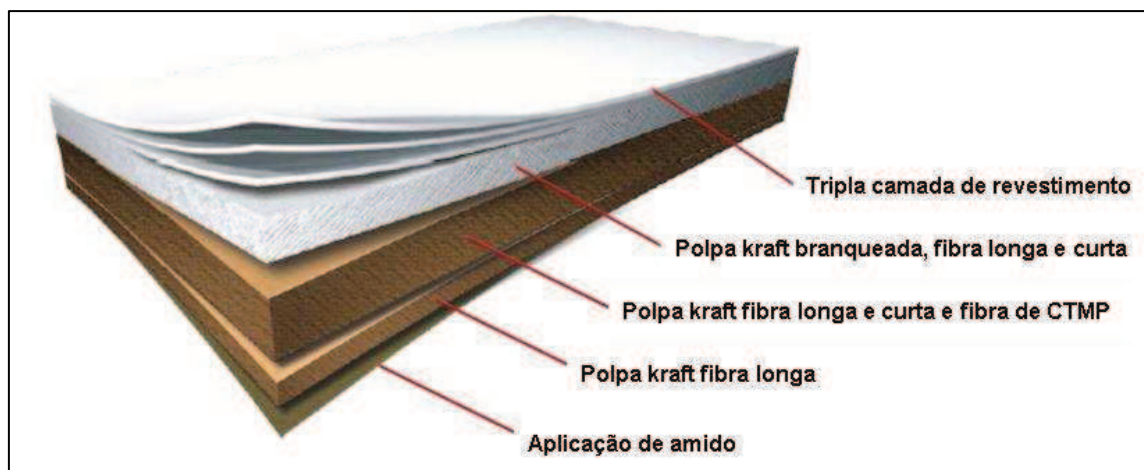


FIGURA 17 - ESTRUTURA DO CARTÃO DA MP-9

Tipos de cartões

A MP-9 possui capacidade nominal para produzir 350.000 toneladas de cartão por ano, os tipos de cartões produzidos são:

Folding Box Board: utilizado na fabricação de embalagens para alimentos, produtos de higiene e limpeza, eletrodomésticos, brinquedos, entre outros.

Carrier Board: Usado em embalagens *Multipack* para cervejas, refrigerantes, iogurtes, entre outros;

LPB (*Liquid Packaging Board*): Utilizado na fabricação de embalagens longa vida para alimentos líquidos e pastosos.

3.3.1. Análise de laboratório

O controle de qualidade da MP-9 é realizado através de análises de laboratório e controles em linha. As análises de laboratório são realizadas em amostras retiradas do término do enrolamento do rolo da máquina. Na MP-9 esse período se dá a cada 45 a 60 minutos, dependendo das características do cartão. A partir desse período leva-se mais aproximadamente 35 minutos para que o resultado de marmorização seja divulgado em boletins de controle de qualidade.

Neste tipo de controle assume-se que os resultados obtidos representam o rolo inteiro e as alterações são realizadas com atraso de, no mínimo, 35 minutos.

O ensaio de marmorização realizado em laboratório consiste em um scanner de mesa utilizado para coletar as imagens do cartão. Os dados são calibrados para reflectância determinada utilizando um conjunto de calibragem. Variações em pequenas e grandes escalas são removidas através da análise de frequência. Somente as variações no intervalo de 1-8 mm são consideradas, pois é o intervalo que causa desconforto na avaliação visual. As variações de reflectância são analisadas através de uma abordagem da análise espectral.

4. METODOLOGIA

A redes utilizadas neste trabalho foram construídas com a ferramenta Property Predictor da Pavilion Technology e são do tipo MLP retropropagação e com três camadas.

O Property Predictor é uma ferramenta utilizada para desenvolver e implementar analisadores virtuais em linha, que geram predições acuradas do processo. Pode-se fazer modelos de predição linear e não linear baseados em dados históricos do processo (PESCH, 2005).

O Property Predictor prove todas as ferramentas necessárias para se desenvolver e implementar sensores virtuais, como:

- Formatador de arquivo de dados
- Planilha de dados
- Plotador de dados
- Construção e treinamento de modelos de predição
- Ferramentas de análise de Modelos
- Preditor de Modelos de cenários O que - se
- Construção de aplicações em linha
- Servidor de tag de Sistema de Controle
- Lançamento/monitoração de aplicações em linha

A construção de modelos de redes neurais utilizando o *software* Pavilion é relativamente simples e a técnica bastante difundida. Entretanto, na prática existem alguns cuidados, os quais foram considerados neste trabalho, e estão apresentados nos passos a seguir:

Identificação da propriedade inferida

Dentre as razões para se desenvolver um modelo matemático para a propriedade de **marmorização**, estão a redução de produtos fora da especificação, redução de reclamação de clientes, de variabilidade de qualidade e de custo de produção.

Identificação das variáveis de entrada

Uma vez determinada a propriedade a ser inferida, todas as variáveis de entrada que a influenciam devem ser identificadas, o que pode ser feito através de contato com a operação de produção e engenheiros que tenham conhecimento do processo.

Coleta dos dados históricos do processo

Antes de iniciar o treinamento da rede neural os dados precisam ser examinados para identificar se espelham a real dinâmica do processo.

Devem ser coletados dados históricos de todas as variáveis operacionais, obtidas na etapa de identificação das variáveis de entrada e da propriedade ser estudada. É importante que esses dados representem toda a faixa de operação da máquina de papel. Recomenda-se a escolha de um período de amostragem e de tempo de coleta que garantam uma base de dados suficientemente rica em informações para conseguir o objetivo desejado. No caso da máquina de papel, sugere-se uma frequência de amostragem da ordem de minutos e um tempo de coleta entre 3 e 8 meses de operação (VIEIRA, 2003).

Pré-processamento dos dados

Esta etapa caracteriza o desenvolvimento de modelos confiáveis, consiste de:

- Eliminação de dados não confiáveis, tais como aqueles associados com baixa velocidade de máquina, medidas de sensores sem variação e pontos ilegítimos, como leituras errôneas dos instrumentos. Devem ser examinadas as faixas de variação de cada variável de entrada e verificado se as mesmas fazem sentido. Além disso, é necessário eliminar dados relacionados à transição entre os produtos da máquina e os intervalos em que foram realizados ensaios industriais em máquina.
- Filtragem da variável de saída – Quando os dados são coletados em uma frequência maior que a de amostragem de laboratório, os dados de laboratório devem ser mantidos constantes nos tempos de amostragem correspondentes a essa frequência. (VIEIRA, 2003).

- Remoção de variáveis de entrada correlacionadas – Em geral, o uso de variáveis de entrada correlacionadas é problemático no ajuste de modelos empíricos, pois cria problemas numéricos (VIEIRA, 2003). É importante a execução de análise de correlação para a identificação deste problema.

Formulação do modelo baseado em redes neurais

A formulação do modelo em redes neurais consiste de:

- Especificação das frações de dados separadas para treinamento e teste. Convencionalmente 15 % dos dados são aleatoriamente selecionados para testar o modelo quando este está treinado.
- Treinamento do modelo até que aos erros de treinamento e teste sejam próximos, de forma a evitar o problema de sobre ajuste, que é um fenômeno em que o modelo aprende, de maneira excessiva, o comportamento dos dados de treinamento em particular e não apresenta capacidade de generalização, ou seja, não apresentar a mesma desempenho com dados virgens.

Análise do modelo

A análise do modelo deve ser realizada examinando os seguintes fatores:

- Coeficiente de Correlação Linear (R^2) entre o valor predito para a propriedade e seu valor verdadeiro. Este coeficiente é definido na equação 1:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{pi} - \bar{x}_p) \cdot (x_{mi} - \bar{x}_m)}{(n-1) \cdot S_p \cdot S_m} \quad (1)$$

onde n é o número de valores considerados para a variável, x_p indica valor predito, x_m representa valor medido, \bar{x} representa valor médio e S_p e S_m representam os desvios padrão dos valores preditos e medidos, respectivamente. Para um modelo perfeito R^2 é igual a um.

- Inclinação da reta que ajusta os pontos representados num gráfico de valores preditos vs. valores verdadeiros – Para uma predição perfeita este valor é um.
- Desvio Padrão da Predição – Coeficiente definido na equação 2:

$$R^2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} \quad (2)$$

Se este valor se encontra dentro da faixa de precisão do ensaio, então a predição é aceitável.

- Gráfico com valores preditos e verdadeiros ao longo do tempo – Esta representação é útil para visualizar se os valores preditos concordam com os valores verdadeiros e para identificar se o modelo é particularmente ruim para um determinado produto ou em algum período de tempo particular.

Análise de sensibilidade

De forma a verificar se o modelo reproduz o conhecimento fornecido pelos operadores e engenheiros da planta, torna-se importante a realização de uma análise de sensibilidade para verificar qual a influência de cada variável de entrada sobre a propriedade de saída a ser inferida. Nesta análise as variáveis de entrada são classificadas de acordo com sua ordem de importância. Variáveis com baixa sensibilidade podem ser eliminadas e, neste caso, o modelo deve ser novamente treinado com as variáveis restantes.

Validação do modelo

O modelo precisa ser validado contra um conjunto de dados não utilizados no seu treinamento. Assim assegura-se que o modelo capturou os aspectos essenciais do processo e que não apresenta problemas de sobre ajuste.

Aperfeiçoamento do modelo

Se o modelo não está bom ou se é desejado um modelo mais preciso, ele pode ser melhorado através de:

- Utilização de dados provenientes de períodos mais longos.
- Utilização de dados obtidos com maior frequência.
- Adição de maior número de variáveis de entrada disponíveis.

- Identificação de outras variáveis de entrada não disponíveis, que poderia aperfeiçoar a predição, com a conseqüente instalação de sensores para sua medição.
- Verificação e eliminação de pontos não confiáveis.
- Elaboração de modelos baseado nos princípios fundamentais.

5. APLICAÇÃO DA FERRAMENTA E RESULTADOS DO MODELO

5.1. Aplicação da ferramenta na máquina de produção de cartão (MP-9)

O modelo de marmorização foi desenvolvido a partir de dados históricos do período de aproximadamente 6 meses de operação da MP-9. Esses dados abrangem análises de laboratório das amostras do final de cada rolo jumbo e variáveis de processo, como vazões de polpa, pressões das caixas de entrada, grau de refino das polpas, gramatura de revestimento, temperatura dos secadores e variáveis medidas pelos “frames” como a gramatura das camadas de fibra e revestimento do cartão.

A seleção das variáveis que influenciam a propriedade de marmorização foi feita através do conhecimento adquirido junto a produção e informações de literatura analisada neste estudo.

Identificação da propriedade

O critério para a escolha da propriedade a ser inferida, a marmorização, foi baseado na falta informações na literatura e também para atender a demanda do mercado, no que concerne a qualidade e custo do papel cartão especialmente para a confecção de embalagem de alimentos líquidos.

Identificação das variáveis de entrada

Nesta etapa foram identificadas 31 variáveis de entrada importantes para o processo. Estas variáveis de entrada compreendem informações sobre:

- Alvura da polpa branqueada

Termo usado na indústria para referir-se à refletividade de uma folha de papel ou celulose, a uma luz azulada no comprimento de onda de 457 nm, em condições padronizadas, no equipamento *Color Touch 2*, projetado e calibrado especificamente para esse fim.

- Gramatura das camadas de fibras

É a massa, em gramas, das camadas fibrosas na área de um metro quadrado de cartão. Para controle de processo a indicação de gramatura é realizada através de sensores *on-line*. Entretanto, para acompanhamento do desempenho desses sensores, retestes ou análises de produtos da concorrência, o ensaio laboratorial se aplica regularmente.

- Gramatura das camadas de revestimento

É a massa, em gramas, de tinta de revestimento aplicada sobre o papel base em uma área de um metro quadrado de cartão. A medição é realizada através de sensores *on line*.

- Grau de refinação das polpas

Determinado através de um ensaio de laboratório com uso do equipamento Schopper-Riegler pneumático, que quantifica a taxa em que a água drena de uma suspensão de polpa, também é referenciado como grau de moagem.

- Índice de formação do cartão

Indica as variações de distribuição de massa do cartão pelo aparelho *Ambertec Tester* e define as variações de gramatura no cartão..

- Número kappa da polpa branqueada

Ensaio de laboratório que expressa a fração de lignina remanescente na polpa após cozimento. É a quantidade de mililitros de uma solução de permanganato de potássio 0,1 N por grama de polpa seca.

- Orientação do cartão

É a maneira em que as fibras se arranjam na estrutura do papel, sendo avaliado pelo quociente da tração longitudinal e transversal do cartão.

- Porcentagem de polpas na camada meio do cartão

Indica a composição fibrosa (celulose fibra curta, fibra longa, polpa de CTMP e refugo) da camada meio do cartão base. O controle desta variável é realizado através dos medidores de fluxo de massa na máquina de papel.

- Pressão da calandra

Força exercida perpendicularmente sobre o papel através dos cilindros lisos da calandra, dada em kN/m.

- Pressão do ar das capotas secadoras de revestimento

Pressão do ar quente insuflado nas capotas secadoras de revestimento, dado em mbar.

- Temperatura da calandra

Temperatura dos cilindros lisos da calandra que atuam sobre o papel no processo de calandragem, dada em °C.

- Temperatura das capotas secadoras de revestimento

Temperatura do ar quente insuflado nas capotas secadoras de revestimento, dada em °C.

- Tempo de uso das lâminas dos aplicadores de tinta de revestimento.

Tempo, em horas, de utilização das lâminas para o controle da aplicação de gramatura e uniformização do perfil de revestimento.

- Teor de sólidos das tintas de revestimento

É a massa da fase sólida de uma amostra, quando seca até peso constante a uma temperatura de 100 a 130 °C. É expressa como porcentagem em massa seca da amostra.

- Valor de retenção de fibras no cartão

Quantidade de fibras que permanece no cartão, expressa como porcentagem do que foi adicionado à suspensão de polpa antes da formação do cartão.

- Vazão de caulim calcinado

Vazão do caulim calcinado adicionado na fase de preparo de massa na polpa fibrosa da camada cobertura.

- Viscosidade das polpas

Ensaio de laboratório que quantifica o grau de degradação da polpa, pela medida do grau de polimerização da celulose, causada pelos processos de cozimento e branqueamento.

Coleta dos dados históricos do processo

A atividade de coleta dos dados requer avaliação criteriosa sobre o problema para minimizar ambigüidades e erros nos dados antes de iniciar o treinamento. A coleta deve cobrir amplamente o problema, tanto no estado estacionário quanto em condições anormais.

O conjunto de dados utilizados neste trabalho foi obtido através do Sistema PI (Sistema de Gerenciamento de Informações de Processo) desenvolvido pela empresa americana OSI soft, Inc. Este sistema é capaz de armazenar dados de produção em tempo real. Os dados são em sua maioria coletados através de sistemas de automação da máquina de papel PLC/CLP (Controladores Lógicos Programáveis), SDCD (Sistemas Digitais de Controle Distribuído), dados de análise de laboratório, dentre outros. Dentre as funcionalidades complementares do Sistema PI estão a gestão e monitoramento de processos de batelada, reconciliação de dados, Controles Estatístico de Processos e interface com outros aplicativos.

Dentre os tipos e origens de dados de processo estão as variáveis de processo como temperaturas dos sistemas, pressões, velocidades de máquinas, dosagem de químicos, produção horária, produção diária, abertura de válvulas, condições de equipamentos, se ligados ou desligados. Algumas dessas variáveis foram utilizadas para auxiliar na etapa de tratamento de dados.

Devido à complexidade de informações da MP-9, inicialmente 75 variáveis foram selecionadas para a criação do modelo de marmorização, essas foram coletadas tendo como intervalo o período de 1 minuto, conforme banco de dados do *software* Pavilion da Figura 18. Estes dados constituem valores instantâneos das variáveis, sem filtragem de qualquer tipo ou médias. Adicionalmente, foram usados os dados das análises de laboratório, das amostras coletadas ao final de cada rolo.

The screenshot shows a spreadsheet titled 'Property Predictor (8) - Spreadsheet'. The dataset is named 'Marmorizacao_MP9'. The spreadsheet contains 12 columns and 27 rows of data. The columns are labeled with variables: #ROLADEIRA, #rotting_M, #CT_FBC_MV, #CT_FBP_MV, #50_09_1813, #entacao_C, #entacao_B, #VJT_BASE, #VJT_MEIO, #COBERTURA, #COBERTURA, #C. The rows represent time intervals from 00:00:00 to 00:26:00 on 04/01/09. The data includes numerical values and some error messages like 'Error'.

Tag Name	DateTime	#ROLADEIRA	#rotting_M	#CT_FBC_MV	#CT_FBP_MV	#50_09_1813	#entacao_C	#entacao_B	#VJT_BASE	#VJT_MEIO	#COBERTURA	#COBERTURA	#C
1	04/01/09 00:00:00	450,008	0,630	28,993	71,007	1,670	2,556	Cut	1,008	1,000	0,950	83,526	
2	04/01/09 00:01:00	450,008	0,630	30,137	69,863	1,670	2,556	Cut	1,010	1,000	0,950	83,523	
3	04/01/09 00:02:00	450,008	0,630	29,267	70,733	1,670	2,556	Cut	1,011	0,998	0,950	83,519	
4	04/01/09 00:03:00	450,008	0,650	28,511	71,489	1,670	2,635	Cut	1,008	0,999	0,949	83,516	
5	04/01/09 00:04:00	450,008	0,650	30,602	69,398	1,670	2,635	Cut	1,009	0,998	0,950	83,512	
6	04/01/09 00:05:00	450,008	0,650	30,161	69,839	1,670	2,635	Cut	1,010	1,000	0,950	83,509	
7	04/01/09 00:06:00	450,008	0,650	30,905	69,095	1,670	2,635	Cut	1,012	0,999	0,949	83,505	
8	04/01/09 00:07:00	450,008	0,650	30,381	69,619	1,670	2,635	Cut	1,010	1,000	0,950	83,502	
9	04/01/09 00:08:00	450,008	0,650	29,012	70,988	1,670	2,635	Cut	1,010	1,000	0,949	83,498	
10	04/01/09 00:09:00	450,008	0,650	30,215	69,785	1,670	2,635	Cut	1,009	1,002	0,949	83,501	
11	04/01/09 00:10:00	450,008	0,650	30,240	69,760	1,670	2,635	Cut	1,009	0,998	0,949	83,564	
12	04/01/09 00:11:00	450,008	0,650	29,928	70,072	1,670	2,635	Cut	1,009	1,000	0,949	83,626	
13	04/01/09 00:12:00	450,008	0,650	30,867	69,433	1,670	2,635	Cut	1,009	0,999	0,950	83,889	
14	04/01/09 00:13:00	450,008	0,650	29,485	70,515	1,670	2,635	Cut	1,009	1,000	0,949	83,752	
15	04/01/09 00:14:00	450,008	0,650	29,303	70,097	1,670	2,635	Cut	1,008	1,001	0,950	83,796	
16	04/01/09 00:15:00	450,008	0,650	29,263	70,737	1,670	2,635	Cut	1,010	1,000	0,950	83,668	
17	04/01/09 00:16:00	450,008	0,650	30,000	70,000	1,670	2,635	Cut	1,012	0,999	0,949	83,540	
18	04/01/09 00:17:00	450,008	Error	30,488	69,512	1,670	2,635	Cut	1,009	0,997	0,949	83,412	
19	04/01/09 00:18:00	450,008	Error	30,565	69,434	1,670	2,635	Cut	1,010	0,998	0,949	83,284	
20	04/01/09 00:19:00	450,008	Error	30,744	69,256	1,670	2,635	Cut	1,009	1,000	0,950	83,156	
21	04/01/09 00:20:00	450,008	Error	30,532	69,468	1,670	2,635	Cut	1,009	0,998	0,951	83,028	
22	04/01/09 00:21:00	450,008	Error	29,320	70,680	1,670	2,635	Cut	1,009	1,002	0,949	82,900	
23	04/01/09 00:22:00	450,008	Error	29,303	70,097	1,670	2,635	Cut	1,009	1,001	0,949	82,772	
24	04/01/09 00:23:00	450,008	Error	29,492	70,508	1,670	2,635	Cut	1,012	0,999	0,950	82,818	
25	04/01/09 00:24:00	450,008	Error	29,350	70,650	1,670	2,635	Cut	1,010	0,999	0,950	83,093	
26	04/01/09 00:25:00	450,008	Error	29,300	70,100	1,670	2,635	Cut	1,010	1,000	0,947	83,369	
27	04/01/09 00:26:00	450,008	Error	29,291	70,729	1,670	2,635	Cut	1,009	0,992	0,949	82,544	

FIGURA 18 - BANCO DE DADOS DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA
Variáveis coletadas no intervalo de 1 em 1 minuto.

De acordo com os resultados obtidos nos treinamentos da rede, as variáveis de menor impacto no resultado final foram removidas. Esta análise foi realizada sobre a análise de sensibilidade do modelo até restarem 32 variáveis de processo.

Para aperfeiçoar o uso do espaço da memória dos computadores foram desenvolvidas ferramentas de compressão do banco de dados PI de forma a armazenar os dados de processo de maneira que a memória fosse economizada tanto quanto possível, assim um novo dado passa a ser armazenado somente quando este muda para um valor que exceda uma faixa determinada. Nesse tipo de abordagem, a compressão de dados resulta em economia de memória e perda de

informações das características dinâmicas do processo. Para coleta dos dados do modelo de marmorização a compressão foi removida das variáveis.

Os dados foram coletados no período entre abril de 2009 até outubro de 2009, totalizando 6 meses de dados, correspondente à fabricação de 4205 rolos jumbo de cartão revestido e 3067 medições de marmorização.

Pré-processamento dos dados

Devido ao fato de que os dados coletados podem vir de diferentes sistemas, pode ser assumido que tais dados estão baseados em diferentes frequências de amostragem, podendo ser maior ou menor que um minuto. Em todos os casos os dados devem ser tratados de forma que o conjunto deles seja uniforme e consistente em termos de tempo e intervalo de amostragem.

Uma vez que os dados estão consolidados, estes precisam ser tratados de forma a filtrar os dados para remover pontos não confiáveis. Este tratamento constitui da análise da faixa de cada variável durante a operação estável da máquina e remoção dos valores considerados inconsistentes por estarem fora desta faixa, como períodos de parada, dados errados, etc. Neste trabalho o primeiro tratamento executado foi a aplicação de um filtro em todas as variáveis, baseado na informação de máquina em operação ou parada, indicada no banco de dados PI como 2 para máquina em operação e 1 para máquina parada ou fora de estabilidade. Foram efetuados tratamentos em outras variáveis de entrada, baseado na análise da faixa de operação de cada variável durante produção estável da máquina e remoção daqueles valores considerados errôneos através da análise do dado propriamente dito e cuja largura da faixa é definida pela operação estável da máquina. Na Figura 19 são apresentadas variáveis com os pontos correspondentes às informações tratadas em determinado período: os pontos vermelhos indicam cortes e remoção dos dados do modelo.

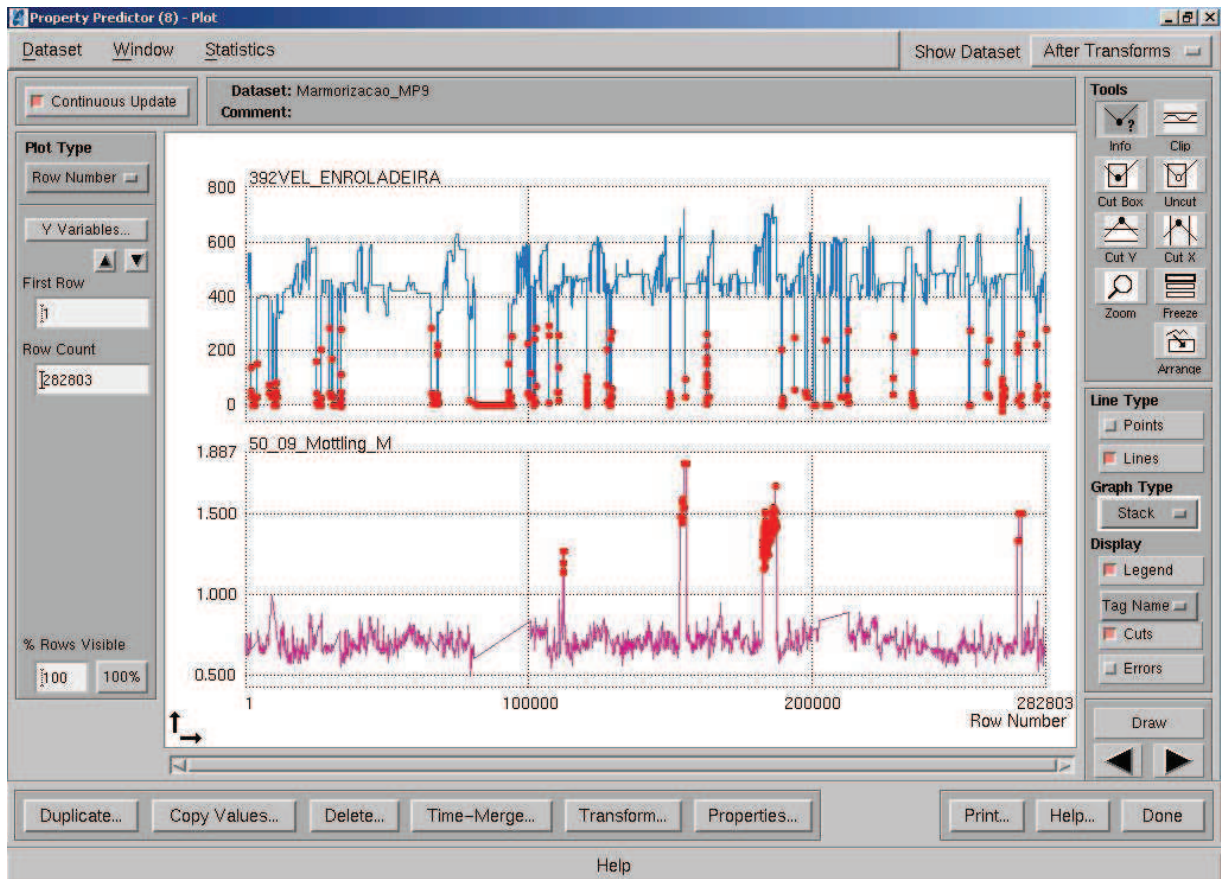


FIGURA 19 - EXEMPLO DE TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS.

Pontos em vermelho indicam que a informação foi removida do banco de dados por se tratar de dados irreais de processo.

As análises de laboratório aparecem na forma de patamares, pois o sistema de dados registra o valor que foi informado e o mantém até a próxima análise ser realizada. No modelo foram captados somente os pontos em que ocorreu a mudança no valor da variável de laboratório.

A exportação de dados de processo do banco de dados PI para o *software* Pavilion foi feita através da ferramenta de funcionalidade complementar do próprio *software*.

Formulação do modelo baseado em redes neurais

O modelo desenvolvido está separado em frações de dados para treinamento, validação e teste.

O processo de treinamento das redes neurais é realizado quando ocorrem modificações significativas nas sinapses dos neurônios. Neste modelo foram inseridos 26.065 padrões de comportamento, distribuído entre treinamento, teste e validação conforme Tabela 2:

TABELA 2 - DISTRIBUIÇÃO DOS PADRÕES DE COMPORTAMENTO DO MODELO DE MARMORIZAÇÃO.

Total	Treinamento	Teste	Validação
26065	22636	2473	956
100 %	87 %	9 %	4 %

Apesar da baixa porcentagem de testes para validação, existem no processo dados reais minuto a minuto.

Validação do modelo

De forma a assegurar que o modelo capturou os aspectos essenciais do processo, este é validado através de seu desempenho, com dados desconhecidos pelo modelo matemático. A seleção das variáveis, inicialmente 75, foi baseada nos resultados de sensibilidade, que representa o ganho do processo (derivada da propriedade de saída em relação a variável de entrada) maior que 0,2.

O Gráfico 1 ilustra a curva de sensibilidade das variáveis com o efeito de marmorização. Esta ferramenta que permite classificar, por ordem de importância, as variáveis de entrada, utilizando como critério de classificação o ganho médio das curvas de resposta do modelo.

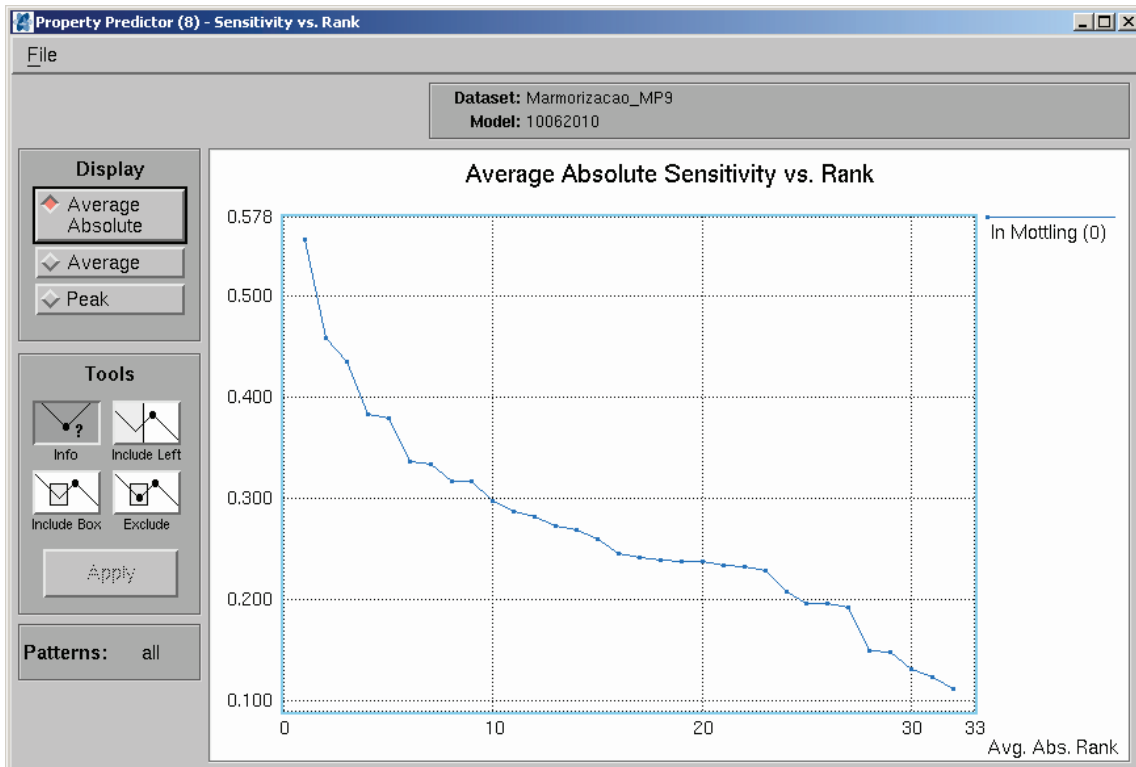


GRÁFICO 1 - CURVA DE SENSIBILIDADE DAS VARIÁVEIS NO MODELO DE MARMORIZAÇÃO.

5.2. Definição da estrutura neural

O modelo matemático da propriedade de marmorização da MP-9 é uma estrutura de rede do tipo preditiva, composta por 32 variáveis de entrada, 1 variável de saída e 14 neurônios na camada intermediária. O *software* Pavilion determina automaticamente qual o número ideal de camadas para obter o melhor desempenho.

5.3. Resultados

É importante ressaltar que nenhum modelo é perfeito, mesmo que seja utilizado um grande conjunto de variáveis de entrada na sua estrutura, sempre podem ocorrer perturbações que alteram as propriedades do cartão, como por exemplo, a variação da qualidade da matéria prima, problemas de instrumentos de medida das variáveis de processo.

No Gráfico 2 são apresentadas as curvas com os resultados de marmorização preditos e reais.

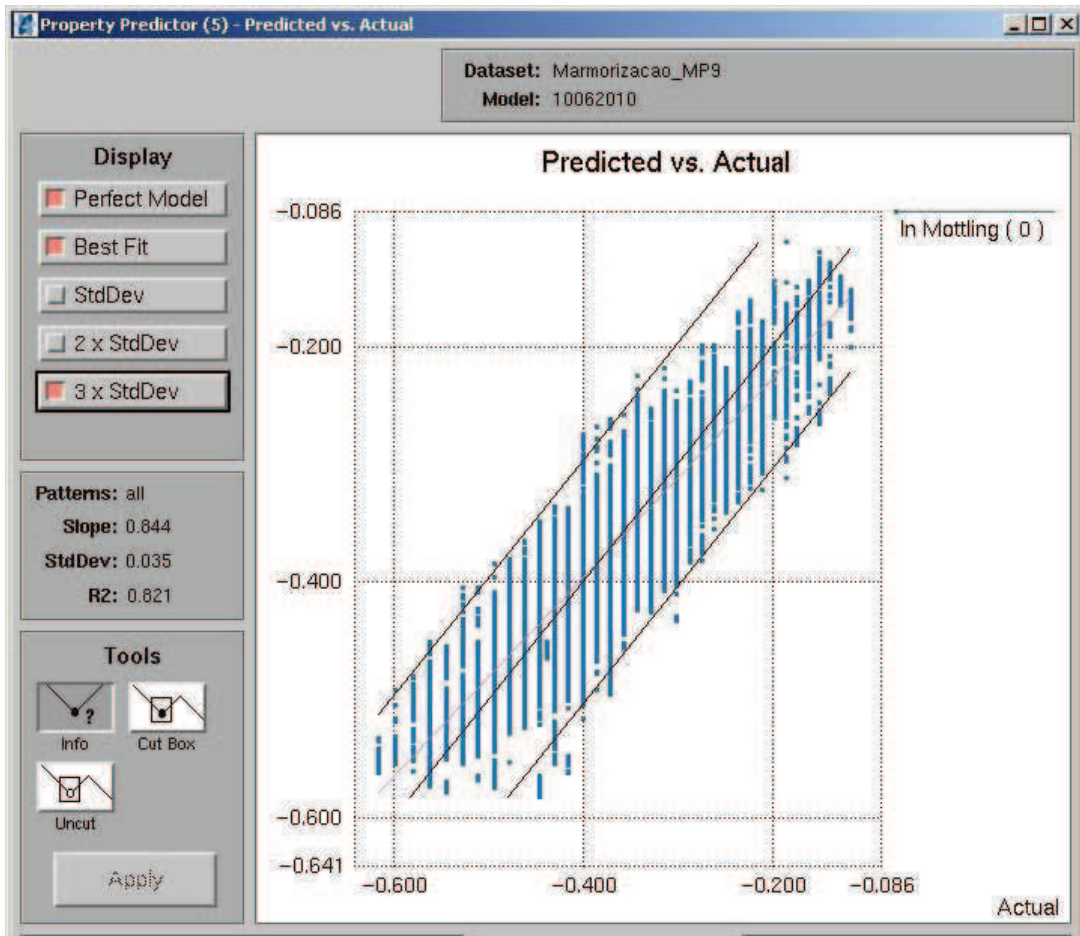


GRÁFICO 2 - RESULTADOS DOS VALORES DE MARMORIZAÇÃO PREDITOS E REAIS. Com uma variação de 3 desvios padrão.

Análise do modelo

O coeficiente de correlação linear (R^2), determinado através da equação apresentada anteriormente, foi de 0,821, valor considerado adequado e que demonstra boa correlação entre o valor da propriedade real e da propriedade predita. Conforme Gráfico 3 é possível visualizar que os valores preditos representam de forma adequada com os valores verdadeiros.

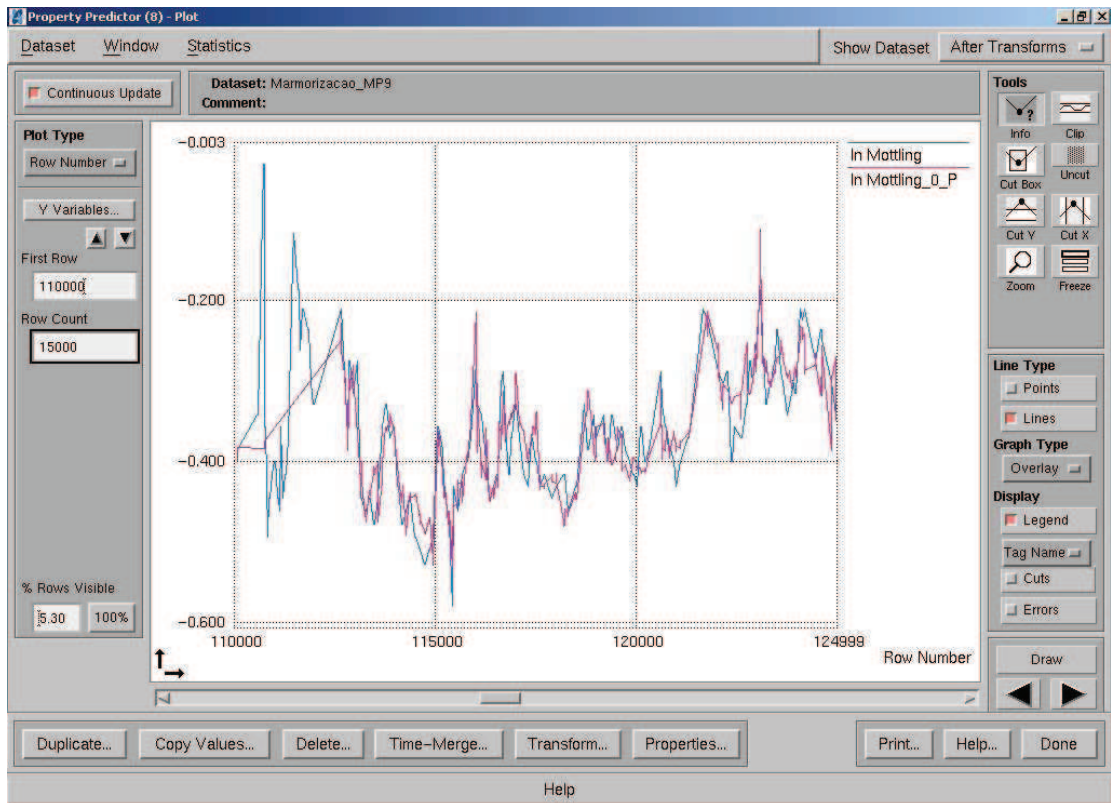


GRÁFICO 3 - COMPARAÇÃO ENTRE VALORES PREDITOS E VERDADEIROS DO MODELO. Valor predito representado pela linha rosa, valor real pela linha azul. A variação do valor predito no início do gráfico indica que uma ou mais variáveis de processo estava com instrumento fora de atuação.

Resultado da análise de sensibilidade

O Gráfico 4 apresenta resultados preditos comparados com resultados de laboratório nunca vistos pelo modelo, de forma a validar o modelo de marmorização.

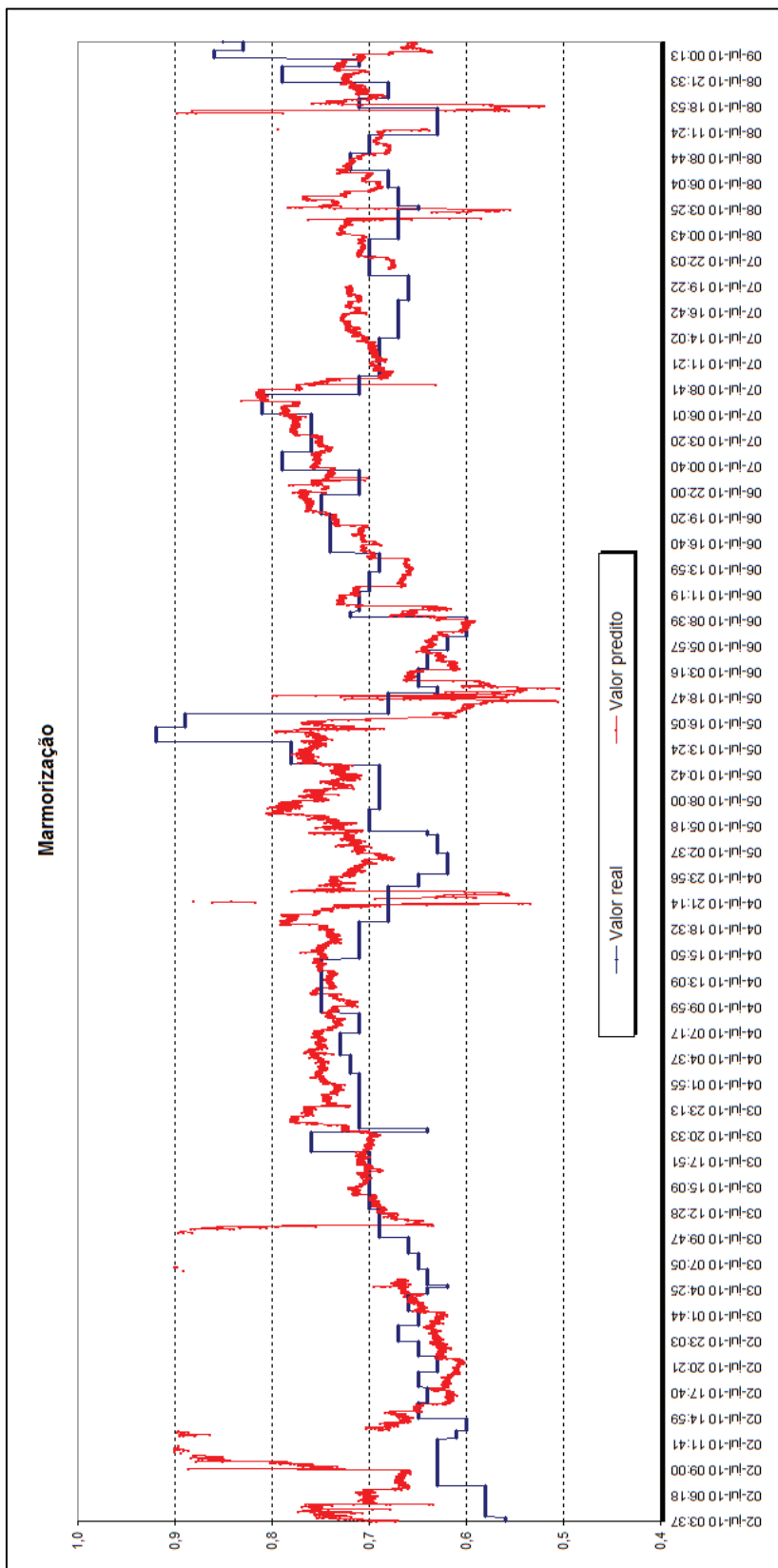


GRÁFICO 4 - COMPARATIVO ENTRE A MARMORIZAÇÃO MEDIDA EM LABORATÓRIO (LINHA AZUL) E MARMORIZAÇÃO DO SENSOR ON LINE (LINHA VERMELHA)

Analisando o resultado, pode-se observar que o modelo conseguiu aprender o comportamento da marmorização na MP-9. Os pontos fora da tendência são de períodos de instabilidade de máquina, início de operação ou instrumentos de medição em calibração.

As variáveis de entrada do modelo e seu impacto na variável de saída, marmorização, foram classificadas conforme Tabela 3:

TABELA 3 - CLASSIFICAÇÃO DAS VARIÁVEIS DE ENTRADA

Classificação	Variável de entrada
1	Temperatura Capota 4, no terceiro aplicador
2	Tempo de uso de lamina no terceiro aplicador
3	Gramatura da camada meio
4	Tempo de uso de lamina no segundo aplicador
5	Gramatura da camada cobertura
6	Gramatura da camada base
7	Índice de formação do cartão
8	Temperatura Capota 3, no terceiro aplicador
9	Porcentagem de fibra de <i>ply bond</i> na camada meio
10	Temperatura da calandra
11	Temperatura Capota 1, no segundo aplicador
12	Pressão Capota 1, no segundo aplicador
13	Pressão Capota 2, no segundo aplicador
14	Porcentagem de fibra branca comprada
15	Temperatura Capota 2, no segundo aplicador
16	Valor de retenção da camada meio
17	Pressão da calandra
18	Orientação do cartão
19	Número kappa da polpa branqueada
20	Alvura da polpa branqueada
21	Numero kappa da torre 14
22	Vazão de caulim calcinado
23	Gramatura de tinta couche no segundo aplicador
24	Teor de sólidos da tinta couche do segundo aplicador
25	Porcentagem de fibra de CTMP na linha meio
26	Shopper Riegler do tanque de maquina linha meio
27	Gramatura de tinta couche no primeiro aplicador
28	Gramatura de tinta couche no terceiro aplicador

29	Viscosidade da polpa da torre 16
30	Teor de sólidos da tinta couche do terceiro aplicador
31	Alvura Torre 08
32	Teor de sólidos da tinta couche do segundo aplicador

Ressalta-se a importância de variáveis como temperatura e pressão de capotas e de calandra. Uma observação importante é a de que a classificação das variáveis apresentadas é diferente daquela utilizada pelos operadores e engenheiros da máquina para realização de ajustes de processo quando buscam valores de marmorização dentro da especificação.

Analisando as principais variáveis que afetam a propriedade de marmorização, pode-se citar que tais variáveis afetam da seguinte forma:

- Temperatura das capotas secadoras de revestimento

O controle de temperatura do ar quente insuflado nas capotas secadoras de revestimento afeta a imobilização da tinta evitando a migração para o interior do cartão base. Manter a temperatura no limite superior proporciona rápida consolidação da tinta na superfície do cartão.

- Tempo de uso das lâminas dos aplicadores de tinta de revestimento

As lâminas sofrem desgastes durante a produção. O controle de troca de lâminas proporciona, entre outros benefícios, o perfil da camada de revestimento. O revestimento uniformemente distribuído sobre o cartão oferece homogeneidade da aparência visual do cartão.

- Gramatura das camadas de fibras

O aumento da gramatura de fibra das camadas do cartão favorece no resultado de marmorização devido ao seu efeito na opacidade do cartão.

- Índice de formação do cartão

Variações de formação do cartão, ressaltam pontos de opacidade e transparência do cartão. Quando há variação na camada cobertura, evidencia as

fibras não branqueadas das camadas meio e base. Variações de formação nas camadas meio e base proporcionam aparência transparente do cartão.

- Porcentagem de fibra de *ply bond* na camada meio do cartão

A fibra de *ply bond*, caracterizada por ser uma fibra com alto grau de refinação, tende a ter tonalidade escura desfavorecendo a propriedade de marmorização.

- Temperatura da calandra

A temperatura da calandra atua na uniformização do cartão base antes do recebimento das aplicações de revestimento. Entende-se que temperaturas mais altas auxiliam na uniformização da superfície do cartão.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o trabalho realizado no *software* Pavilion, foi possível obter mais informações sobre o comportamento da marmorização na máquina de papel nº 9 da Klabin. Nesta avaliação verifica-se que a marmorização é fortemente influenciada tanto pela temperatura das capotas secadoras de revestimento, favorecendo a antecipação da imobilização do revestimento quanto pelo tempo de uso das lâminas de revestimento, que proporcionam distribuição uniforme no perfil do revestimento.

Existe mais de um fator responsável pela ocorrência da marmorização. Dentre essas, há a migração de ligante para o interior do papel, a distribuição irregular do revestimento na superfície do papel e o sistema de aplicação e secagem deste revestimento. A estrutura do papel base é um fator de grande relevância no resultado final desta propriedade.

O modelo matemático desenvolvido para este trabalho constitui uma ferramenta de sensor virtual para a propriedade de marmorização.

Neste trabalho foi modelada a propriedade de marmorização para os cartões produzidos na Máquina de Papel no. 9 da Klabin, unidade Monte Alegre. Utilizando a mesma tratativa e o *software* Pavilion, sugerem-se como trabalhos futuros a serem executados:

- Diminuir o conjunto de variáveis removendo as que não oferecem controle automático, como tempo de uso das lâminas.
- Aplicar o modelo na Máquina de Papel no. 7 da Klabin, unidade Monte Alegre.
- Verificar outro conjunto de variáveis que melhore o resultado.

REFERÊNCIAS

- ALECRIM, E. **Redes Neurais Artificiais**. Disponível em: <http://www.infowester.com/redesneurais.php>
- ALESSANDRI, A. **Fault diagnosis for nonlinear systems using a bank of neural estimators**. Computers in Industry. 2003.
- ANTTILA, M.; HAKKILA, O. **Mottling in offset printing**. PaperCon'09. 2009.
- Artigos técnicos SAPPI. **Mottling – Mottled impression**. Disponível em: www.sappi.com
- Artigos técnicos SAPPI. **Print Mottle**. Disponível em: <http://www.sappi.com>
- BERNIÉ, J-P; PANDE, H; GRATTON, R. **An instrumental determination of the effect of sheet formation on the printability of uncoated fine paper**. TAPPI JOURNAL. 2006.
- Board Properties**. Disponível em: <http://www.paperonweb.com/grade.htm>
- BRAGA, A. P.; CARVALHO A.P.; LUDEMIR, T.B.. **Redes Neurais Artificiais - Teoria e Aplicações**. 2ª. ed. São Paulo. 2007.
- FAHLCRANTZ, C. **On the evaluation of print mottle**. Tese (Doutorado) KTH Computer Science and Communication, Suécia. 2005.
- FAHLCRANTZ, C; JOHANSSON, P. **A comparison of different print mottle evaluation models**, Suécia. 2004.
- FAHLCRANTZ, C; JOHANSSON, P. **Print mottle evaluation of flexographic prints – using a scanner-based measurement system**, Suécia. 2004.
- FARDIM, P. **Papel e Química de Superfície – Parte I – A Superfície da Fibra e a Química da parte Úmida**. Revista O Papel. 2002.
- HAENEN, J.; ESSERS, M. **Method for reducing back trap mottle and paper with reduced sensitivity for back trap mottle**. SAPPI. 2001.
- HAGEN, K.G. **A fundamental assessment of the effect of drying on coating quality**. TAPPI PRESS. 1985.
- HARTAMAN, E. **Training Feed-forward neural networks with gain constraints**. Pavilion Technologies, Inc; Austin, Texas. 2000.
- HASECKER, L. **The balancing act between economic and emotional customer demands – a wholesaler's experiences in the stress field between papermaker and customer**. PTS Coating Symposium. 2007.

- HAYKIN, S. **Neural Networks, a comprehensive foundation**; 2 ed. 1999.
- HEIKKILÄ, P.; RAJALA, P. **Pigment Coating and Surface Sizing of Paper**. Papermaking Science and Technology. Finlândia. 2000.
- JOHNSON, J. **Aspects of Flexographic Print Quality and Relationship to some Printing Parameters**. Tese (Doutorado) Karlstad University Studies, Karlstad, 2008.
- KAJANTO, I. M. **The effect of formation on absolute print unevenness in offset Paperi ja Puu**. 1990.
- KIM, L.; POLLOCK, M.; WITTBRODT, E. **Reduction of back-trap mottle through optimization of the drying process for paper coatings**. TAPPI Coatings Conference. 1997
- KOYAMOTO, H.; OKOMORI, K. **Effect of Surface Properties of Base Paper on Print Quality**. Nippon Paper Industries. Japan. 2006.
- LEHTINEN, Esa. **Pigment Coating and Surface Sizing of Paper**. Papermaking Science and Technology. Finlândia. 2000.
- LINDBERG, N. J. **Papermaking Part 1, Stock Preparation and Wet End**. Papermaking Science and Technology. Finlândia. 2000.
- LOUMAN, H. **Mottling and wettability**. Associate Scientist Dow Europe, R&D Division, Suíça. 1991.
- LU, X.; KUHN, D.; **Print mottle of wood-containing paper: the effect of fines and formation**. The Pulp & Paper Centre and Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry; University of Toronto. 1999.
- NISKANEN, K.; KAJANTO, I.; PAKARINEN, P. **Paper Physics**. Papermaking Science and Technology. Finlândia. 2000.
- PATAN, K.; PARISINI, T. **Identification of a neural dynamical models for fault detection and isolation: the case of a real sugar evaporation process**. Journal of Process Control. 2005.
- PESCH, L. R. **Uma Estrutura para Controle de Umidade na Fabricação de Papel**. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual de Maringá. 2005.
- PYLKKÖ, J. **Pigment Coating and Surface Sizing of Paper**. Papermaking Science and Technology. Finlândia. 2000.
- Relatório Técnico. UFSC, **Laboratório de Conexão e Ciências Cognitivas**. 2003.
- SCHWEIGER, C.; RUDD, J. **Prediction and control of paper machine parameters using adaptive technologies in process modeling**. Tappi Journal. 1994.

SOUZA, E. F. **Física para Simulação de Movimentos Realísticos em Jogos**. 2010. Disponível em: www.followscience.com

TOIVAKKA, M. **A simulation model to predict coating coverage**. Paperi ja Puu – Paper and Timber Vol. 83, n1. 2001.

VIEIRA, O. **Construção de modelos empíricos e projeto da operação de uma máquina de produção de cartão embalagem**. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2003

VIEIRA, O. **Inferência de propriedades de cartão**. Congresso ABTCP. São Paulo. 2002

VIEIRA, R. C. & ROISENBERG, M. **Redes neurais artificiais: Um breve tutorial**. Relatório Técnico. Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.

WATANABE, J.; LEPOUTRE, P. **Method for reducing back trap mottle and paper with reduced sensitivity for back trap mottle**. Journal of Applied Science. 1982.

WYGANT, R. W. **Pigment Coating and Surface Sizing of Paper**. Papermaking Science and Technology. Finlândia. 2000.

XIANG Y.; BOUSFIELD D. W.; **The cause of backtrap mottle: chemical or physical?**. Paper Surface Science Program; Department of Chemical Engineering; University of Maine. 2000.

GLOSSÁRIO

COATER: Máquina de revestimento de papel.

BACK TRAP MOTTLE: Outra denominação usada para o fenômeno de marmorização.

MEDIDORES *ON LINE*: Equipamentos que medem as propriedades do cartão durante o processo de produção.

ROLO JUMBO: Forma como o cartão é disposto na saída das máquinas de papel.

GRAU *SCHOPPER- RIEGLER* (°SR): grau de desaguamento das polpas.

SPEED SIZER: Aplicador de filme de revestimento.

SOFTWARE: Programa de computador composto por seqüência de instruções.

REFUGO: Papel separado ou rejeitado em qualquer fase do processo de fabricação.

COLOR TOUCH: Fabricante do equipamento de medição de alvura.

FIBRA DE *PLY BOND*: Fibra com alto grau de refinação que confere propriedades de resistência interna ao cartão.