

GUINTER NEUTZLING SCHNEID

**UTILIZAÇÃO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA CONTROLE DE
VARIÁVEIS QUE CAUSAM ENCANOAMENTO DIAGONAL DE PAPÉIS, EM
MÁQUINA INDUSTRIAL DE PAPEL CARTÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência Florestal, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2013

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

S358u
2013
Schneid, Ginter Neutzling, 1987-
Utilização de rede neural artificial para controle de
variáveis que causam encanoamento diagonal de papéis, em
máquina industrial de papel cartão / Ginter Neutzling Schneid.
– Viçosa, MG, 2013.
xiv, 71 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Rubens Chaves de Oliveira.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Papel cartão - Indústria. 2. Papel cartão - Estabilidade.
3. Redes neurais (Computação). I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de
Pós-Graduação em Ciência Florestal. II. Título.

CDO adapt. CDD 634.98612

GUINTER NEUTZLING SCHNEID

**UTILIZAÇÃO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL PARA CONTROLE DE
VARIÁVEIS QUE CAUSAM ENCANOAMENTO DIAGONAL DE PAPÉIS, EM
MÁQUINA INDUSTRIAL DE PAPEL CARTÃO**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como parte
das exigências do Programa de Pós-
Graduação em Ciência Florestal, para
obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 19 de Novembro de 2013.

Prof. Osvaldo Vieira
(Co-orientador)

Vanessa Lopes Silva Santos

Prof. Rubens Chaves de Oliveira
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Florestal (DEF), pela oportunidade e qualidade de ensino.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro.

Ao Prof. Osvaldo Vieira, Eng^o. Luiz Renato Pesch e a Eng^a. Cybelle Akemi Suzuki Deganutti pela ajuda e esclarecimentos.

Ao professor Rubens Chaves de Oliveira, pela amizade, orientação e confiança depositada, meus sinceros agradecimentos.

Aos professores, estudantes e funcionários do Laboratório de Celulose e Papel (LCP), pelo conhecimento adquirido e amizades sinceras.

À empresa Klabin S/A, unidade Monte Alegre, pela oportunidade e apoio na realização do trabalho.

Aos amigos de Viçosa e de Telêmaco Borba, pelo convívio e amizade.

À minha família, pelo afeto e apoio. Aos meus pais, Lauro e Doris, e ao meu irmão, Igor, por sempre estarem ao meu lado independente da distância.

A todos que, de sua maneira, contribuíram para essa conquista.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE EQUAÇÕES	xii
LISTA DE TERMOS TÉCNICOS.....	xiii
1 INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 O processo de produção de papéis	3
2.1.1 Preparo da massa	3
2.1.2 Máquina de papel	4
2.2 Estabilidade dimensional.....	5
2.2.1 Higroexpansão.....	6
2.3 Encanoamento e encanoamento diagonal	7
2.4 Formação da rede de fibras no papel.....	12
2.4.1 Caixa de entrada	12
2.4.2 Orientação das fibras.....	14

2.4.3	Relação da velocidade do jato com a velocidade da tela (VJ/VT)	16
2.4.4	Tensile stiffness index e tensile stiffness orientation (TSO).....	17
2.5	Modelagem	20
2.5.1	Redes neurais artificiais (RNA).....	22
2.5.2	Multilayer Perceptron (MLP)	26
2.5.3	Análise de sensibilidade (AS).....	28
3	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
Capítulo 1: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, POR MEIO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA), DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O ENCANOAMENTO DIAGONAL EM UMA MÁQUINA INDUSTRIAL DE PAPEL CARTÃO		
		34
	Resumo.....	34
1.	Introdução.....	34
2.	Material e métodos	36
2.1	Descrição e escolha do material	36
2.2	Determinação encanoamento diagonal.....	37
2.3	Levantamento dos dados	38
2.4	Escolha das variáveis.....	38
2.5	Análise de sensibilidade (AS).....	39
3.	Resultados e discussão	40
3.1	Levantamento e escolha do material.....	40
3.2	Variáveis utilizadas, na análise de sensibilidade, para a quantificação da interação entre entrada e saída	41
3.3	Análise de Sensibilidade (AS) das variáveis de máquina.....	43
4.	Conclusão.....	49
5.	Referências bibliográficas.....	49

Capítulo 2: UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS, NO CONTROLE DO ENCANOAMENTO DIAGONAL, EM MÁQUINA INDUSTRIAL DE PAPEL CARTÃO	51
Resumo.....	51
1. Introdução.....	51
2. Material e métodos	53
2.1 Caracterização do material	53
2.2 Identificação das variáveis de entrada	53
2.3 Coleta dos dados históricos do processo de produção dos cartões ...	55
2.4 Software	56
2.5 Pré-processamento dos dados	57
2.5.1 Treinamento das redes neurais	57
2.5.2 Análise do modelo	57
3. Resultados e discussão	58
3.1 Caracterização do conjunto de dados	58
3.2 Pré-processamento dos dados	59
3.3 Treinamento da rede neural	60
3.4 Valores preditos confrontados com os reais	61
4. Conclusão.....	67
5. Referências bibliográficas.....	68
4 Conclusão geral.....	70

RESUMO

SCHNEID, Ginter Neutzling, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, Novembro de 2013. **Utilização de rede neural artificial para controle de variáveis que causam encanoamento diagonal de papéis, em máquina industrial de papel cartão.** Orientador: Rubens Chaves de Oliveira. Co-orientador: Osvaldo Vieira.

A estabilidade dimensional do papel pode sofrer alterações devido a troca de umidade do meio, liberando o *stress* latente adquirido no processo de fabricação. Um dos resultados dessa liberação de tensões é o encanoamento diagonal, ou também conhecido por *twist*. Na indústria de papel, as medições laboratoriais são importantes para garantir a qualidade final do material entregue ao cliente. Particularmente na medição do encanoamento diagonal, as amostragens são feitas no final de cada rolo jumbo, demandando tempo para eventuais correções, por parte da operação. Com essas pressuposições, este estudo tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade das diferentes variáveis de entrada de uma máquina industrial de papel, juntamente com algumas medições laboratoriais, relacionadas à propriedade do papel denominada de encanoamento diagonal e propor redes neurais artificiais para, no futuro, serem usadas como um sensor virtual no processo de produção industrial. Inicialmente foi feito um levantamento do histórico de produção para observar os produtos com as maiores perdas de qualidade. A partir disso, correlacionados com os pontos críticos do perfil de medição na direção CD, foram confeccionadas três redes neurais artificiais, do tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP), para predizer três setores do perfil da máquina de papel, sendo, o lado do comando (LC), meio de máquina (M) e lado do acionamento

(LA). Encontramos algumas alterações na ordem em que as variáveis correlacionavam com o encanoamento diagonal. A partir da análise de sensibilidade, foi revelado, que a variável mais importante e sensível, respectivamente para o lado comando, meio e acionamento da máquina, foram fluxo total da caixa de entrada da camada cobertura, pressão de vapor no 6º grupo e fluxo de massa lateral da camada base do papel cartão (Module Edge). Os coeficientes de correlação para as RNA's foram de 0,426; 0,557 e 0,597, respectivamente, nesta ordem, para os setores do LC, M e LA. Portanto, nos permitindo concluir que os resultados indicam que os modelos são aptos para representar o processo.

ABSTRACT

SCHNEID, Ginter Neutzling, M.Sc. Universidade Federal de Viçosa, November, 2013. **Artificial neural Network to control diagonal curl, in industrial board machine.** Adviser: Rubens Chaves de Oliveira. Co-adviser: Osvaldo Vieira.

The dimensional stability of the paper may change due to exchange moisture middle, releasing the stress acquired in the manufacturing process. One result of this release of tension is the diagonal curl, or also known as twist. In the paper industry, laboratory measurements are important to ensure the final quality of the material delivered to the customer. Particularly in twist measurement, sampling are made at the end of each jumbo roll, demanding time for any corrections, by operation. With these assumptions, this study aims to do a sensitivity analysis of the different input variables of an industrial board machine, along with some laboratory measurements, related with the property of the paper called diagonal curl (twist) and propose artificial neural networks for, in the future, be used as a virtual sensor. Initially, a survey was made of the production history, to observe the product with the largest quality losses. From this, correlated with the critical points of measurement profile in the CD direction. Were made three artificial neural networks, Multi-Layer Perceptron (MLP) type to predict the three sectors of the profile of the paper machine. Being, the front side (FS), middle of profile (M) and drive side (DS). We found some changes in the order in which variables correlated with twist, from the sensitivity analysis, it was revealed that the most important variable and sensitive, respectively for the FS, MS and DS were total flow from the top layer headbox, vapor pressure in the 6th group and flow lateral mass of the

paperboard bottom layer (Module Edge). The correlation coefficients for RNA's were 0.426, 0.557 and 0.597, respectively, in this order, for the sectors of the FS, M and DS. In conclusion, the results allow us to indicate that the models are able to represent the process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desvio fora do plano	8
Figura 2 – Mecanismos de manifestação do encanoamento diagonal causado por altas gramaturas	11
Figura 3 – Circulação exagerada afetando no perfil de orientação das fibras	13
Figura 4 – Efeito da deficiência de fluxo nas laterais	14
Figura 5 – Distribuição polar das fibras.....	15
Figura 6 – Diagrama do vetor para diferença na velocidade do jato e tela	17
Figura 7 – Gráfico do ângulo polar.....	18
Figura 8 – Perfil típico da relação MD/CD, para valores de TSI	19
Figura 9 – Perfil típico de uma máquina Fourdrinier, para valores de TSO	20
Figura 10 – Linha guia para modelagem	21
Figura 11 – Função XOR	23
Figura 12 – RNA com duas entradas, uma saída e uma única camada <i>perceptron</i>	24
Figura 13 – Uma configuração MLP de três camadas	27
Figura 14 – Desvio fora do plano	35
Figura 15 – Estrutura do papel cartão na direção z	37
Figura 16 – Obtenção dos corpos de provas e medição laboratorial de encanoamento diagonal	38
Figura 17 – Distribuição da produção de cartões (CB e FBB) na MP9	40

Figura 18 – Medição laboratorial dos corpos de prova, em mm, nos setores amostrados no sentido CD da máquina para o produto CKF9227	41
Figura 19 – Análise de Sensibilidade (AS) para o lado comando da máquina.....	45
Figura 20 – Análise de Sensibilidade (AS) para a posição do meio da folha na direção CD da máquina.....	46
Figura 21 – Análise de Sensibilidade (AS) para o lado acionamento da máquina.....	47
Figura 22 – Distribuição da produção de cartões (CB e FBB) na MP9	59
Figura 23 – Remoção de <i>outliers</i>	59
Figura 24 – Predito x Real para a saída: Encanoamento diagonal LC	62
Figura 25 – Comparação entre o valor predito e o real (LC).....	63
Figura 26 – Predito x Real para a saída: Encanoamento diagonal M	64
Figura 27 – Comparação entre o valor predito e o real (M)	65
Figura 28 – Predito x Real para a saída: Encanoamento diagonal LA.....	66
Figura 29 – Comparação entre o valor predito e o real (LA).....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Redes para aprendizado supervisionados	25
Tabela 2 – Redes para aprendizado não supervisionados	25
Tabela 3 – Variáveis para classificação, da ordem mais importante, para atuar como controle do encanoamento diagonal.....	42
Tabela 4 – Variáveis de entrada mais influenciáveis no encanoamento diagonal.....	48
Tabela 5 – Variáveis do processo com influência no encanoamento diagonal dos cartões.	54
Tabela 6 – Mapeamento dos pontos de coleta das amostras.....	56

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Desvio fora do plano	8
Equação 2 – Direção do eixo do encanoamento	9
Equação 3 – Componentes do encanoamento diagonal	11
Equação 4 – Função sigmóide.....	26
Equação 5 – Média Absoluta para a Análise de Sensibilidade	39
Equação 6 – Média para a Análise de Sensibilidade	39
Equação 7 – Pico para a Análise de Sensibilidade.....	39
Equação 8 – Componentes do encanoamento diagonal	52
Equação 9 – Erro médio relativo.....	58
Equação 10 – Coeficiente de correlação linear.....	58

LISTA DE TERMOS TÉCNICOS

Backpropagation (BP): Método de treinamento de RNA. A partir de uma saída desejada, a rede aprende as variações por meio de inúmeras entradas.

Camada oculta: Etapa onde é feita a maior parte do processamento, através de conexões ponderadas.

Carrier Board (CB): Tipo de FBB revestido com ou sem adição de agente de resistência a úmido.

Dados de testes: dados novos para testar a capacidade do modelo de generalizar o que foi aprendido no treinamento.

Dados de treinamento: serão usados para o modelo aprender o processo, ajustando os pesos da rede.

Dados de validação: conjunto totalmente independente de dados para mostrar a capacidade de predição do modelo.

Dataset: Base de dados utilizada para o desenvolvimento das redes neurais artificiais.

Épocas: É contada a cada apresentação à rede neural de todos os exemplos do conjunto de treinamento.

Erro relativo: Diferença proporcional entre a diferença a saída desejada e a saída obtida.

Feed Forward (FF): São redes sem realimentação, o sinal percorre a rede em uma única direção (entrada para saída), os neurônios das mesmas camadas não são conectados.

Folding Boxboard (FBB): papel de uma ou múltiplas camadas, feito de fibras virgens ou recicladas, com ou sem revestimento usado para fazer embalagens de consumo.

Lado do Acionamento (LA): Lateral da máquina de papel onde estão localizados os motores responsáveis pelo torque nos cilindros e rolos.

Lado do Comando (LC): Lateral da máquina de papel onde fica a sala de controle.

Limite Inferior de Controle (LIC): Faixa na qual os valores de determinadas propriedades, do produto final, deve estar acima.

Limite Superior de Controle (LSC): Faixa na qual os valores de determinadas propriedades, do produto final, deve estar abaixo.

Multi-Layer Perceptron (MLP): Modelo de RNA do tipo feedforward constituída por um conjunto de nós fonte, os quais formam a camada de entrada da rede, uma ou mais camadas escondidas e uma camada de saída.

Neurônios: No contexto de RNA, faz analogia ao neurônio humano e o processo eletrônico.

Outliers: ponto atípico comparado com o restante da série de dados.

Rede neural artificial (RNA): sistemas computacionais estruturados numa aproximação a computação baseada em ligações.

Tags: sequência de números e letras representando o histórico das medições armazenadas em um servidor.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A instabilidade dimensional representa a suscetibilidade do papel às mudanças de suas dimensões quando houver mudanças em seu conteúdo de umidade (GALLAY, 1973).

Encanoamento diagonal do papel é um problema recorrente para a indústria de papel cartão, quando o objetivo final é a impressão no papel vendido em folhas cortadas de acordo com a definição do cliente final (GOYAL, 2012). Acentuado encanoamento diagonal, ou twist, torna inviável o uso do lote no momento da alimentação das impressoras, dificultando o uso final do produto e limitando a produção nas gráficas. O agravante para esses problemas ocorre devido a repetitivas paradas para retirar folhas presas no sistema de alimentação.

Encanoamento diagonal está intrinsecamente ligado a fenômenos que regem o funcionamento da caixa de entrada, orientação das fibras resultantes da formação da folha e estabilidade do papel após formação (NISKANEN, 1998). Desta forma, o modelo matemático pode ser construído a partir de princípios fundamentais do processo de produção, configurando um modelo fenomenológico, ou pode ser obtido a partir de dados empíricos do próprio sistema a modelar, em um processo chamado de identificação (VIEIRA, 2003).

A análise de sensibilidade é uma etapa da criação da rede neural artificial, onde podemos identificar as variáveis que estão influenciando no *output* do modelo. Permite ainda identificar os parâmetros que causam maior perturbação na performance do modelo. Deste modo, a análise de sensibilidade é realizada com o objetivo de definir a influência de alguns parâmetros (*input*) nos resultados (*output*) do modelo (JAKHRANI, A.Q. et al., 2013).

Os modelos “caixa-branca” são perfeitamente conhecidos a partir dos aspectos fenomenológicos que ocorrem no processo (balanços de massa, energia, cinética de reações e termodinâmica). Para o tipo “caixa-cinza” os modelos são construídos utilizando os aspectos fenomenológicos conhecidos do processo, enquanto que os desconhecidos são descritos a partir de dados experimentais (modelos híbridos). Modelos “caixa-preta” são construídos apenas a partir dos dados empíricos, devido à não existência de qualquer

conhecimento dos aspectos fenomenológicos que ocorrem no processo (VIEIRA, 2003).

Neste trabalho, foi realizado um levantamento dos dados de produção e discutida a relação entre variáveis independentes e o encanoamento diagonal (variável dependente), por meio da análise de sensibilidade. Definindo assim, quais são as variáveis que mais influenciam nos modelos para otimizar o controle em máquina industrial. Também foram feitas redes neurais artificiais para a variável encanoamento diagonal. Onde os *outputs* da rede neural artificial (RNA) representam as medições laboratoriais, da propriedade encanoamento diagonal do papel, no total de 3 pontos do perfil transversal da máquina de papel. Sendo representados pelas duas laterais e o ponto central. Construindo RNA's capazes de prever o fenômeno do encanoamento diagonal do papel em uma máquina industrial de papel cartão sendo apta para rodar como um sensor virtual deste fenômeno.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O processo de produção de papéis

Basicamente pode ser dividido em duas etapas: preparo da massa e máquina de papel (OLIVEIRA, 2011).

2.1.1 Preparo da massa

O preparo de massa em geral envolve os procedimentos de desagregação, depuração, refino e adição de produtos aditivos ao processo. O início do processo de preparo de massa se dá normalmente pelo procedimento de desagregação.

A desagregação consiste na ação de um elemento mecânico sobre uma polpa sólida que, alocada em um recipiente, tal como um tanque, recebe água em volume variável, o suficiente para torná-la bombeável, com o mínimo de pastilhas e feixes de fibras, precavendo-se para que a estrutura dessas fibras seja preservada. A importância da operação de desagregação de matérias-primas fibrosas reside no fato de que as fibras devem estar bem individualizadas quando forem alimentadas à máquina de papel. Esta operação é feita quando a fábrica de papel não é integrada a produção de celulose, quando isso ocorre, a polpa é bombeada diretamente das torres de estocagem para o preparo de massa (ANDRIONI, 2006).

A qualidade de um papel depende fortemente do grau de limpeza da polpa. Para isso, a depuração visa remover materiais estranhos que poderiam comprometer a qualidade do papel produzido, mas também causar danos as máquinas, além do desgaste nos equipamentos. Para pasta química, as principais impurezas podem ser desde *shives* (fibras não individualizadas) a partículas de plásticos e areia (ANDRIONI, 2006).

O refino de polpas consiste em atritá-las em um dispositivo mecânico dotado de discos metálicos com diversas ranhuras. As fibras em suspensão aquosa são forçadas entre duas barras, sendo uma em movimento. Esse forte atrito altera a estrutura da fibra, causando fibrilação interna e externa, além de formação de finos e corte de fibras (ANDRIONI, 2006; OLIVEIRA, 2011). Essa

etapa é a fase mais crucial do processo, sendo necessária para formação de uma trama coesa auxiliando nas ligações entre fibras que resultará na formação da folha (PRINTWIKI, 2012).

(OLIVEIRA, 2011) cita fatores como: tipo de equipamento, força exercida pelas barras, consistências durante o refino, teor de hemicelulose, temperatura e pH como fatores relevantes que afetam o grau de refino. (GRUBER, 2008) ressalta que o maior efeito do refino é o drástico incremento de água captado pela fibra.

Cargas e aditivos podem ser incorporados à massa para melhora das propriedades. Existe uma gama de produtos para diversos fins. Na indústria de papel cartão os aditivos mais empregados são: amido, coagulante inorgânico, agente quelante, biocida, cola sintética de dímero de alquil ceteno (AKD) ou anidrido de ácido succínico (ASA) ou ainda cola a base de breu, floculante e antiespumante (NEIMO and YHDISTYS, 1999).

2.1.2 Máquina de papel

A máquina de papel é dividida em seções, sendo: caixa de entrada, sistema de formação, prensagem, secagem, calandra, revestimento, bobinamento e enrolamento.

Essa etapa inicia com o bombeamento da polpa, com consistência de fibras variando de 0,5 a 1,5% de fibras, para a caixa de entrada da máquina de papel Fourdrinier (OLIVEIRA, 2011). A função primária é proporcionar um volume onde turbulência e o fluxo criado no distribuidor é equalizado e desigualdades na velocidade do fluxo são corrigidas e a massa é entregue as réguas ou lábios de saída da caixa de entrada e posteriormente a mesa formadora (MACDONALD and FRANKLIN, 1970).

A função da seção úmida da máquina é formar e drenar as fibras em suspensão de baixa consistência descarregada pelos lábios (réguas) da caixa de entrada. Mais de 90% da água é drenada através da tela formadora, e uma variedade de removedores de água e dispositivos de drenagem são usados, tais como: rolo desaguador, foils, caixas de vácuo e rolo bailarino (MACDONALD and FRANKLIN, 1970; ANDRIONI, 2006).

As funções primárias da seção de prensagem são de remover água, consolidar a folha, transmitir propriedades favoráveis para a folha e promover aumento das ligações entre fibras melhorando a operabilidade da seção de secagem (THORP and KOCUREK, 1991). Pode ser considerada uma extensão do processo de remoção de água iniciado na seção úmida, sendo economicamente mais viável remover água por meios mecânicos quando comparadas ao uso de vaporização (OLIVEIRA, 2011).

Na secaria da máquina de papel, a água que não foi removida pela ação das prensas é removida pelo contato com cilindros metálicos aquecidos pelo uso de vapor de baixa pressão (THORP and KOCUREK, 1991). Nesse setor o processo de retirada torna-se mais difícil, pois, a massa de água que se encontrava na superfície da folha já fora retirada por processo mecânico, restando somente à massa de água quimicamente ligada às fibras do papel (ANDRIONI, 2006).

Calandragem é a etapa final para modificar propriedades do papel. Nesse processo, o papel é pressionado entre dois ou mais rolos. O papel é moldado pelo trabalho mecânico e plastificação da trama de papel (JOKIO, 1999).

Papéis que necessitam boa qualidade superficial para impressão devem receber, na camada superior, uma aplicação de tinta de revestimento (ANDRIONI, 2006).

2.2 Estabilidade dimensional

A instabilidade dimensional representa a suscetibilidade do papel às mudanças de suas dimensões quando houver mudanças em seu conteúdo de umidade. Quando houver um aumento no conteúdo de umidade do papel ocorre expansão de suas dimensões e quando há uma redução deste conteúdo ocorre uma contração dessas dimensões. Portanto a estabilidade dimensional significa que a variação das dimensões do papel tende a ser a menor possível (GALLAY, 1973).

Além das inúmeras propriedades de resistências desejadas para papéis cartão, a estabilidade dimensional segue na contramão. Nenhum papel é totalmente estável, sendo assim o balanço ideal dessas propriedades é imprescindível (MENDES, 2006).

Favorecer a estabilidade de papéis pode ocasionar em perda de propriedades. Por exemplo, quanto menor o grau de refino e maior a porosidade do papel, menos compacto será e terá maior estabilidade dimensional, uma vez que a expansão de uma fibra individual terá menor influência nas fibras adjacentes. Um refino mais acentuado nas fibras propicia maior hidratação, resultando num decréscimo da estabilidade (WATTY, 19--).

Estabilidade dimensional do papel é diretamente proporcional com a diferença do ângulo da fibra e a relação de fibras entre os lados (CHEN et al., 2009).

A uniformidade da evaporação na direção transversal do papel, *cross direction* (CD), é o parâmetro mais crítico. Qualquer variação nas características da evaporação no sentido CD irá produzir uma variação indesejável no perfil de umidade do papel produzido. Outras propriedades que podem ser afetadas são as características da superfície do papel, como a rugosidade, encanoamento e propriedades de tração (THORP and KOCUREK, 1991). A rugosidade pode ser observada quando a direção do encanoamento muda ao longo de curtas distâncias tanto no sentido longitudinal da máquina, *machine direction* (MD), quanto no CD (SHAKESPEARE, 1998).

Apesar de passar pelos processos de prensagem, secagem, aplicação de revestimento e etapas de tratamento, a estrutura fundamental do papel é determinada na primeira operação: formação da folha (SHAKESPEARE, 1998).

2.2.1 Higroexpansão

A higroexpansibilidade é a propriedade que produz alterações dimensionais no papel em consequência de variações no seu teor de umidade e que se constitui, em geral, de uma função complexa da estrutura do papel e das propriedades higroelásticas das fibras celulósicas que o compõe, as quais se dilatam ou se contraem sob a influência da absorção ou dessorção de água. Vários fatores determinam a modificação do teor de umidade do papel. Esta variação pode ser causada por alterações da umidade relativa ou da temperatura do ambiente, com o qual o papel se encontra em equilíbrio (MENDES, 2006).

Segundo (GALLAY, 1973), a higroexpansão das fibras individuais é marcadamente anisotrópica. As micro-fibrilas, presentes na estrutura das paredes das fibras, encontram-se orientadas essencialmente na direção paralela à do eixo longitudinal das fibras e a maior parte da deformação dimensional se desenvolve na direção transversal, *i.e.*, perpendicularmente ao eixo da fibra.

A interação da água com as fibras celulósicas determina os mecanismos de expansão e contração do papel. As fibras se incham quando absorvem água e encolhem quando a água é removida. Um modelo para explicar os mecanismos de inchação (*swelling*) e de contração (*shrinkage*) das fibras foi desenvolvido por (NISKANEN and KAJANTO, 2008). As fibras se dilatam com o aumento de umidade, devido à penetração das moléculas de água nas interligações constituídas por ligações de hidrogênio entre as fibrilas.

2.3 Encanoamento e encanoamento diagonal

O encanoamento do papel pode ser definido como um desvio sistemático de uma folha a partir de sua forma plana. É resultado da liberação de tensões introduzidas na folha durante a fabricação e posterior utilização (GOYAL, 2012). A definição de encanoamento diagonal é aplicada quando a torção diagonal envolve a direção CD e MD (ANDRIONI, 2006). A Figura 1 exemplifica as deformações.

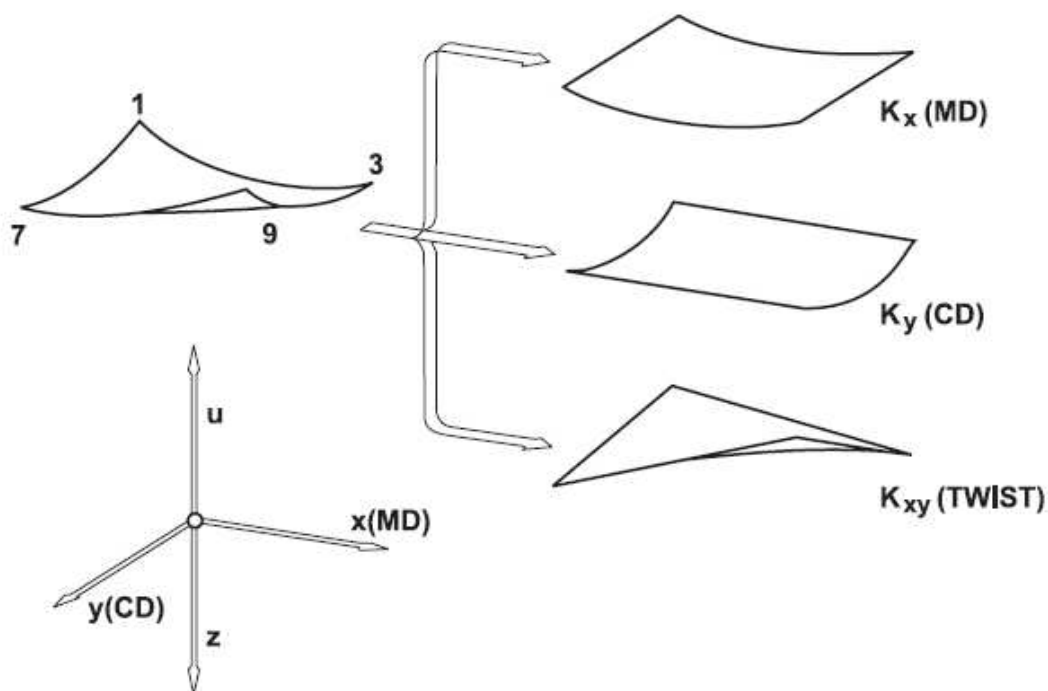


Figura 1 – Desvio fora do plano

Os três componentes especificados na Figura 1 definem o desvio fora do plano do papel, como mostrado na Equação 1 (NISKANEN and KAJANTO, 2008):

$$w(x, y) = \frac{1}{2}K_x \cdot x^2 + \frac{1}{2}K_y \cdot y^2 + \frac{1}{2}K_{xy} \cdot x \cdot y$$

Equação 1 – Desvio fora do plano

Nas quais x e y são as coordenadas MD e CD da amostra. Os componentes K são expressos em m^{-1} . O centro da amostra ($x = y = 0$) é considerado horizontal e plano para $w = 0$. Valores positivos são especificados para manifestações no lado de cima da folha, e valores negativos para o oposto (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

As três curvaturas são então definidas pelas seguintes equações:

$$K_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, K_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}, K_{xy} = -2 \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}$$

A Equação 1 determina a direção do encanoamento. O eixo do encanoamento (direção do eixo do cilindro) é representado pela Equação 2.

$$\theta = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{K_{xy}}{K_x - K_y} \right)$$

Equação 2 – Direção do eixo do encanoamento

Na qual θ é o ângulo do eixo do encanoamento relativo a MD. Um valor não nulo para o encanoamento diagonal implica que o eixo do encanoamento não está ao longo da MD ou CD (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

Existem três diferentes aspectos que podem causar encanoamento e/ou encanoamento diagonal em papéis (NISKANEN and KAJANTO, 2008):

- Encanoamento e/ou encanoamento diagonal num teor de umidade fixo, causado por processo de fabricação;
- Reações que mudam o teor de umidade;
- Torção causada pela impressão, ou operação de cópia em um lado do papel.

Uma descrição mais aprofundada foi feita por (GOYAL, 2012): Analisando o encanoamento pelos fatores mecânicos, estruturais e relacionados a umidade, pode afirmar que o encanoamento motivado por fatores mecânicos acontece quando um lado do papel é esticado além do seu limite elástico. Um exemplo disso é a manifestação de encanoamento próximo ao centro do rolo. Encanoamento estrutural é causado pela diferença entre os dois lados do papel, quanto ao teor de finos, carga, densidade de fibra por área, orientação das fibras varia ao longo da espessura. O Encanoamento relacionado a umidade pode desenvolver quando a folha de papel é utilizada para impressão offset. Um lado da folha pode receber mais umidade que o outro, o lado com maior teor de umidade libera as tensões adquiridas na secaria da máquina de papel, então o papel irá torcer quando seco novamente.

Diferença na composição do material entre os lados do papel geralmente causam encanoamento diagonal, incluindo o enrugamento do papel. Se o papel for composto do mesmo material e estruturalmente uniforme, encanoamento na MD e CD pode surgir como resultado de uma rápida secagem, causando diferença no encolhimento entre os dois lados. Neste caso, o eixo do encanoamento irá coincidir com o eixo principal da orientação das fibras (SHAKESPEARE, 1998).

Encanoamento diagonal está sempre relacionado com a orientação das fibras. Essa orientação combinado com mudança de umidade acarreta numa mudança do encanoamento diagonal. Porém não pode ser causado pelo fluxo de umidade em um lado do papel como seria o caso de encanoamento MD ou CD. A causa fundamental é sempre a estrutura do papel. Mudanças na umidade podem apenas agravar o fenômeno (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

A tendência de folhas apresentarem encanoamento diagonal e encanoamento é associada com as diferenças na orientação das fibras e na mudança de umidade no verso e anverso da folha (CHEN et al., 2009).

(GREEN, 2000) informa que orientações de fibras diferentes entre a camada superior e inferior do papel causam encanoamento da folha. Elevados ângulos de TSO são associados com a deformação causadora do encanoamento diagonal em papéis pra forro de embalagem. Normalmente causado pela diferença na orientação média da fibra, em uma ou duas camadas, quando submetida a mudanças de umidade (LOEWEN, S/D).

O encanoamento das folhas de papel é comumente atribuído a diferentes graus de higroexpansibilidade entre o verso e anverso da folha de papel, resultando em relaxação residual de tensão frente ao re-umedecimento. Este desvio de estabilidade dimensional ocorre tanto em papel cartão quanto em papel reprográfico (MENDES, 2006).

As diferenças nas propriedades mecânicas entre a parte úmida e seca da folha é modificado de forma semelhante através do uso de resinas especiais e colagem na seção úmida. Isso afeta o grau de encolhimento observado, tal como a anisotropia, por essa razão causará uma tendência a formação de encanoamento e encanoamento diagonal (SHAKESPEARE, 1998).

A estabilidade dimensional do papel que define o grau da manifestação do encanamento diagonal é afetada por um alto número de fatores inter-relacionados, incluindo diferentes gradientes de temperatura na secaria, variação da umidade relativa na folha e tensões mecânicas nas fibras, por isso as resultantes dessas variáveis ligadas torna difícil a análise e entendimento (BORTOLIN, 2002).

Os mecanismos de manifestação do encanoamento diagonal são causados por diferentes fatores quando examinados em papéis de alta e baixa

gramatura. Para gramaturas altas, encanoamento diagonal é causado pela diferença da orientação das fibras entre as duas faces do papel. No caso de papéis constituídos de várias camadas, as extremidades (base e cobertura) fazem analogia ao lado feltro e tela de papéis formados com apenas uma camada. A Figura 2 ilustra o mecanismo (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

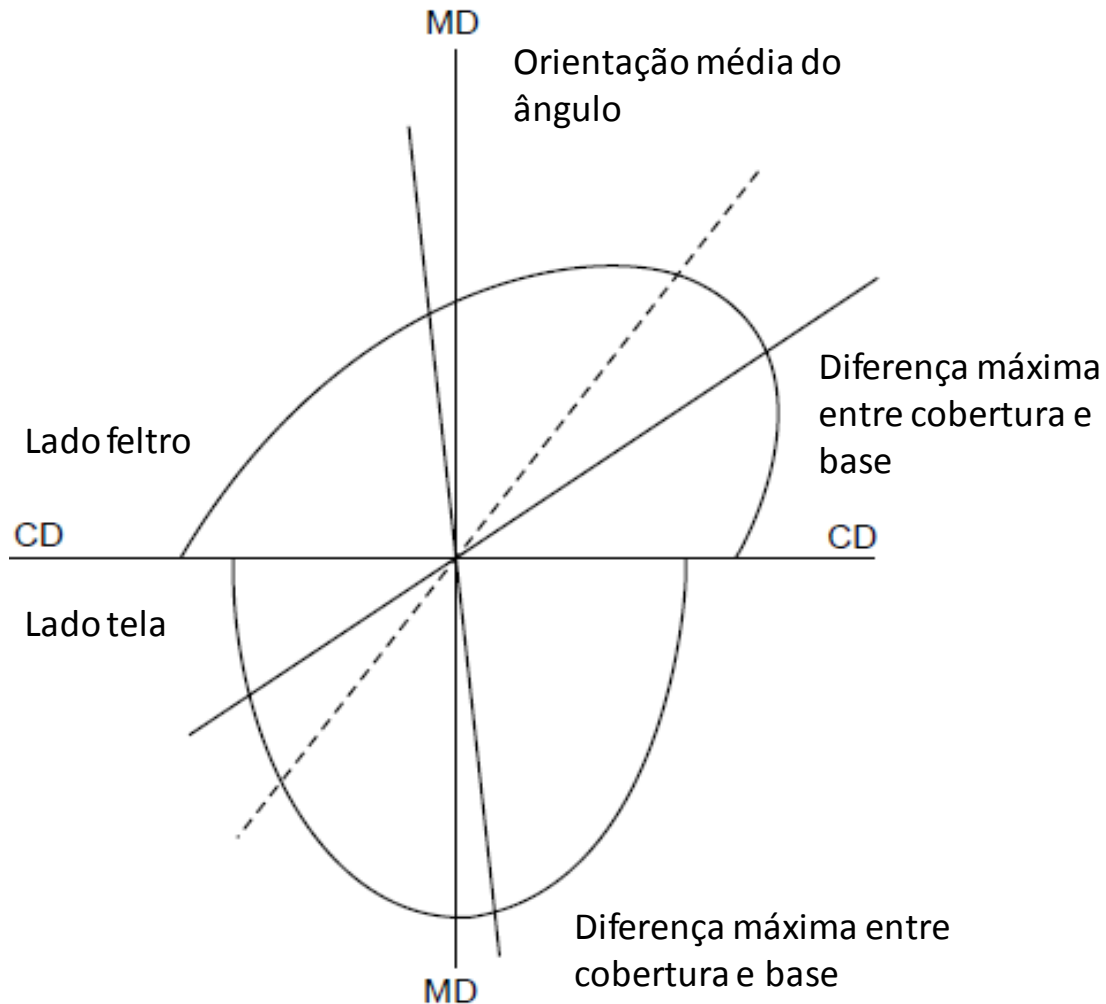


Figura 2 – Mecanismos de manifestação do encanoamento diagonal causado por altas gramaturas

A grande diferença na orientação entre as duas camadas ocorre ao longo da direção que desvia do ângulo de orientação médio da fibra nos dois lados. O encanoamento diagonal pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$K_{xy} = \frac{\Phi_C - \Phi_B}{d_K} (\varepsilon_{CD} - \varepsilon_{MD}) + (K_{MD} - K_{CD})(\Phi_C + \Phi_B)$$

Equação 3 – Componentes do encanoamento diagonal

Nas quais, ε_{CD} e ε_{MD} são as deformações médias de toda a folha na direção CD e MD. Φ_C e Φ_B são as orientações dos ângulos na cobertura e na base. d_K é a distância característica entre as camadas da cobertura e da base. Em muitos casos o segundo termo pode ser omitido (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

Em papéis com gramaturas baixas, outro mecanismo provavelmente controla o encanoamento diagonal. A diferença entre a orientação das camadas não pode ser notada. Ao invés, o ângulo fibrilar das fibras, da camada S2, parece ser suficiente para causar o encanoamento diagonal (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

2.4 Formação da rede de fibras no papel

2.4.1 Caixa de entrada

O balanço na caixa de entrada é um fator operacional muito poderoso, afetando o perfil de orientação das fibras. Um perfil de pressão uniforme na saída do lábio, sobre condições adequadas, é alcançado com válvulas de recirculação. Na Figura 3 notamos a diferença de pressão na entrada (Q_1) e saída (Q_2), se a válvula de recirculação estiver muito aberta, uma zona de baixa pressão influenciará na recirculação resultando em um fluxo cruzado de trás pra frente. Mudando a relação da velocidade do jato (V_{jato}) e tela (V_{tela}), causando influencia na orientação de fibras (LINDBLAD and FURST, 2001).

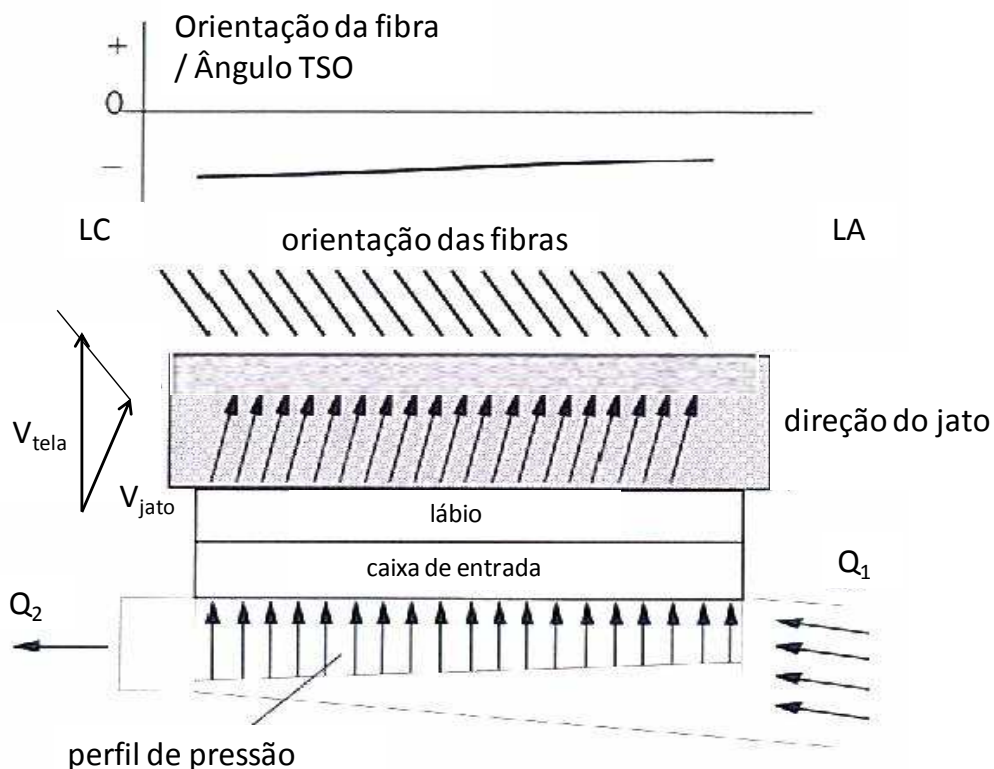


Figura 3 – Circulação exagerada afetando no perfil de orientação das fibras

O lábio é normalmente usado para correção local da gramatura e espessura no sentido CD. Fazendo deformações locais, a distribuição na direção CD pode ser alcançada. Uma redução pontual na abertura do lábio reduz a vazão da massa de fibras no segmento, porém gera velocidades transversais nos dois lados da caixa de entrada. Acarretando em desalinhamento na orientação de fibras ao longo da CD. A Figura 4 ilustra o efeito da deficiência de fluxo nas laterais (LINDBLAD and FURST, 2001).

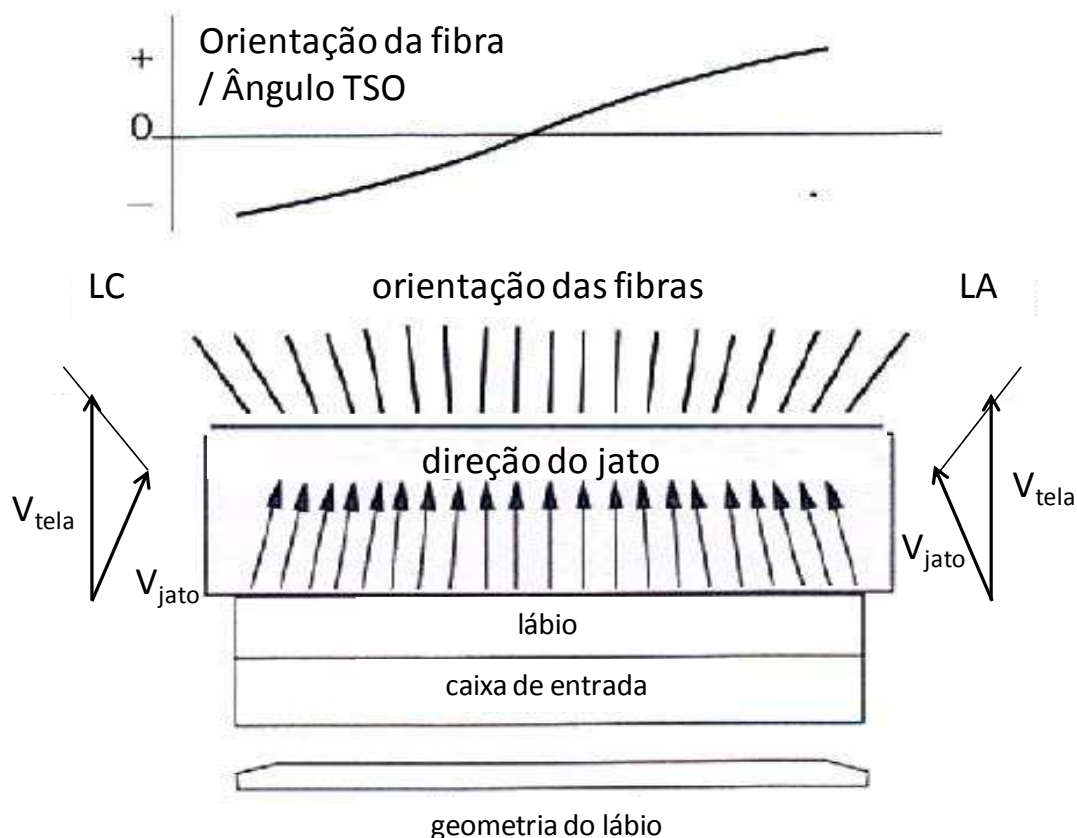


Figura 4 – Efeito da deficiência de fluxo nas laterais

2.4.2 Orientação das fibras

Se as fibras estiverem perfeitamente distribuídas na folha, a mesma terá propriedades iguais em todas as direções. Esse papel será chamado papel isotrópico. Se as fibras estão distribuídas não uniformemente, esse papel é chamado anisotrópico. Idealmente as fibras devem estar alinhadas ao longo da direção MD para melhorar as propriedades mecânicas. Mas na realidade, as fibras não são perfeitamente alinhadas devido à turbulência na caixa de entrada e tela formadora da máquina de papel (BORTOLIN, 2002).

O índice de orientação das fibras (R) e o ângulo de orientação das fibras (θ) são as variáveis que caracterizam a distribuição no plano do papel. O índice de orientação (*ratio*) é um número que mostra a anisotropia do papel. É igual a 1 quando o papel é isotrópico, e aumenta com a anisotropia. O ângulo de orientação indica o quanto o eixo simétrico da distribuição desvia da direção da máquina, representado na Figura 5 (BORTOLIN, 2002).

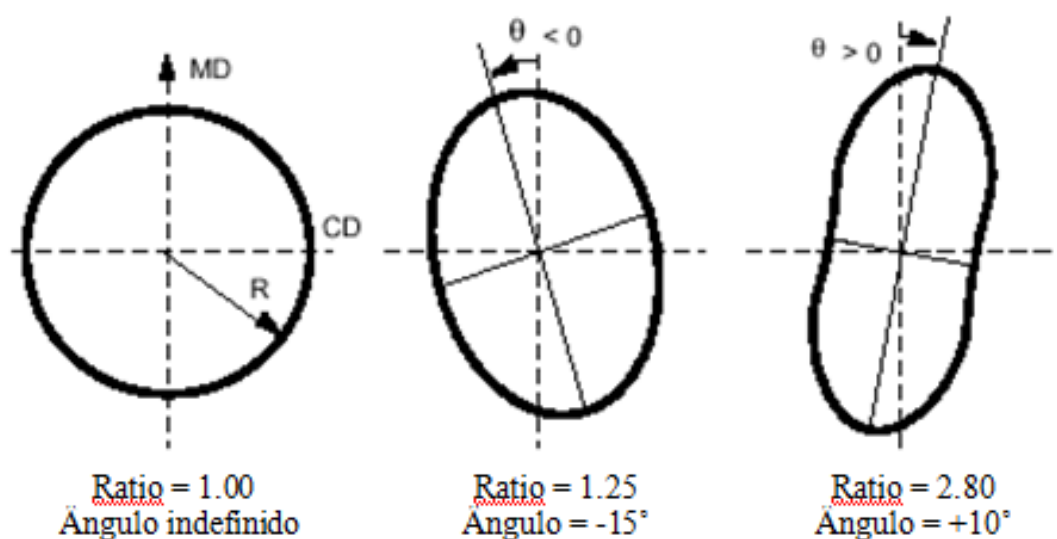


Figura 5 – Distribuição polar das fibras

Sendo as fibras menores e mais finas, mais flexíveis elas serão, e maior será sua quantidade por unidade de massa, com isso as ligações e as interações entre elas se tornam mais intensas e as tensões que causam o encanoamento se distribuirão mais igualmente. Por outro lado, fibras com alto coarseness para um mesmo gênero ou espécie florestal fazem ligações mais fracas e menores, e as folhas formadas ficaram mais suscetíveis a ação de tensões, apesar de apresentar alta resistência ao rasgo e alto volume específico (SETH and PAGE, 1998).

Controle do processo para que haja consistência da massa adequada, desfloculada e bem distribuída na mesa, com bom controle de gramatura no sentido transversal e longitudinal. Elementos da mesa plana adequados para uma correta deposição e drenagem da massa, garantindo boa distribuição das fibras e finos da folha. Atenção especial ao primeiro elemento desaguador, a mesa formadora (*forming board*), o qual recebe o jato de massa da caixa de entrada. Ao receber a massa, dependendo da posição, mais ou menos avançado em relação ao jato, pode-se alterar substancialmente a orientação de fibra e conseqüentemente a formação da folha (RODRIGUES, 2006).

Orientação de fibras é a propriedade da folha que determina a força e a estabilidade dimensional (fortemente associado ao encanoamento e encanoamento diagonal) (CHEN et al., 2009).

Em particular, o perfil do lábio da caixa de entrada influencia tanto o perfil de orientação do ângulo e o perfil de peso da base. O campo de velocidade do jato e a diferença entre as velocidades do jato e da tela também são parâmetros críticos. A distribuição vertical de ângulos de orientação das fibras depende, além do tipo da máquina formadora, dos padrões de desaguamento unidirecionais e bidirecionais que possuem diferentes efeitos sobre a anisotropia estrutural nas camadas da folha. Prensagem e secagem tem os menores efeitos sobre a orientação das fibras, mas modifica as relações entre a orientação das fibras e propriedades, tais como a tensão, força, encanoamento e encanoamento diagonal (SHAKESPEARE, 1998).

2.4.3 Relação da velocidade do jato com a velocidade da tela (VJ/VT)

A relação expressa pela velocidade do jato (VJ) juntamente com a velocidade da tela (VT) é definida como a relação entre a velocidade do jato de massa saindo através da abertura do lábio da caixa de entrada e a velocidade da tela formadora. Existe uma variável equivalente denominada de relação de deposição/arraste (*rush/drag*) definida como sendo a diferença entre a velocidade do jato e a velocidade da tela, expressa em unidades de pressão total ou de velocidade (SOUZA, 2007).

Quando uma máquina de papel esta trabalhando com as velocidades iguais, ou seja, relação VJ/VT igual a 1, se diz que a mesma está trabalhando no teórico. Tendendo assim a produzir um papel isotrópico sem orientação definida de fibras, com as mesmas propriedades em diferentes direções. Conhecido no chão de fábrica como papel quadrado (SOUZA, 2007).

A diferença da velocidade entre o jato e a tela afeta o perfil de TSO. O diagrama dos vetores, ilustrado na Figura 6, exemplifica essa influência na orientação das fibras. Para uma mesma velocidade da tela, podemos mudar a orientação das fibras alterando a velocidade que o jato de massa incide sobre a tela. Com isso, podemos obter diferentes velocidades relativas (V_{rel}) alterando entre a situação de arraste (*drag*) ou deposição (*rush*), de fibras, na tela formadora.

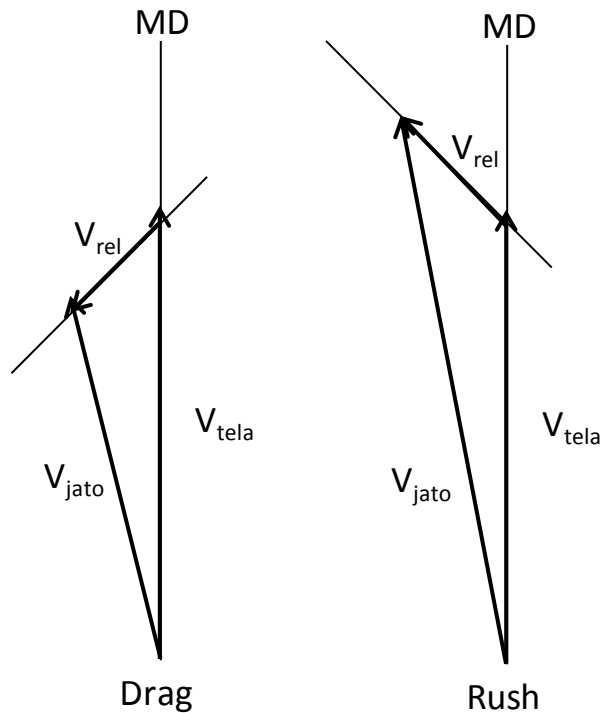


Figura 6 – Diagrama do vetor para diferença na velocidade do jato e tela

Se a razão das velocidades for próximo à 1, um pequeno fluxo de fibras na transversal irá levar a um grande desalinhamento na direção da máquina. Se a máquina estiver produzindo, com a razão diferente de 1, o fluxo transversal irá posicionar as fibras no sentido da máquina (LINDBLAD and FURST, 2001).

2.4.4 *Tensile stiffness index e tensile stiffness orientation (TSO)*

O ângulo de orientação da fibra é dado pelo desvio do maior eixo da curva a partir da direção MD. Índices são normalmente calculados pela razão MD/CD e pela razão entre máximo e mínimo. Essas razões de rigidez a tração correlacionam bem com índices de orientação de fibras. TSI é normalmente calculado pela razão MD/CD, embora a verdadeira anisotropia é indicada pela relação entre máximo e mínimo. Já TSO se correlaciona bem com o ângulo de orientação de fibras, mas a correlação entre TSI e índice de orientação de fibras depende em parte do teor de carga da folha (SHAKESPEARE, 1998).

O ângulo de orientação da maior rigidez à tração (do inglês, TSO) é uma importante qualidade do papel, tendo impacto significativo no desempenho da

máquina e no uso final do papel cartão. Quando interpretado corretamente, os perfis dos ângulos da CD indicam claramente a direção de onde melhorar o fluxo da caixa de entrada. Índice de rigidez à tração (do inglês, TSI) também desempenha um papel crítico na qualidade do papel (LOEWEN, S/D).

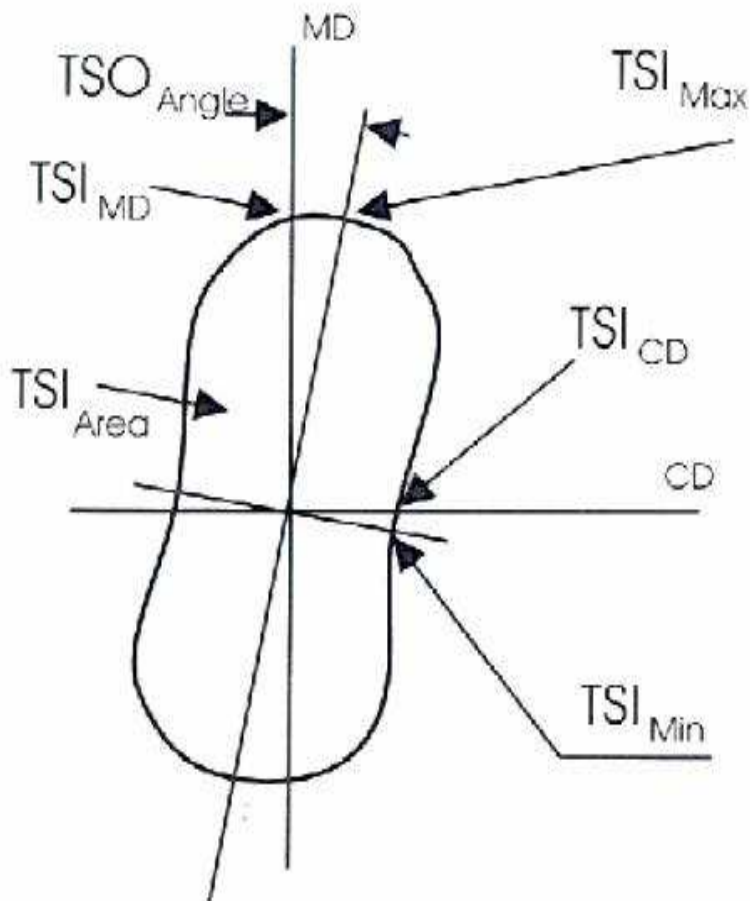


Figura 7 – Gráfico do ângulo polar

O TSI é a rigidez específica do papel, e representa a quantidade de força por unidade de extensão do comprimento dividido pelo peso básico. Quanto maior for, menos a amostra alonga quando puxada por uma determinada força. Por causa das diferenças de velocidades do jato e da tela, o TSI na MD é sempre maior que o TSI da CD. O alinhamento das fibras no sentido MD frequentemente não é o mesmo, devido a turbulência do jato. Isso é chamando ângulo de TSO (LOEWEN, S/D).

TSI na direção da máquina (TSI MD) indica o risco de ter problema de andamento da máquina e erro de sobreposição de imagem em impressoras multicoloridas (LINDBLAD and FURST, 2001).

TSI na direção transversal da máquina (TSI CD) descreve a elasticidade na direção CD. Está ligado a higroexpansão e estabilidade dimensional, problemas de sobreposição de imagem em impressoras multicoloridas, força de compressão e esmagamento, podendo ser relacionada com o SCT e RCT (LINDBLAD and FURST, 2001).

O TSI MD/CD é a razão entre os dois perfis descritos acima. Está relacionado ao andamento da folha na máquina de papel, delaminação, diferença entre os lados do papel e ao encanoamento. Valores para folding box board (FBB) estão na faixa de 1,9-2,3 (LINDBLAD and FURST, 2001).

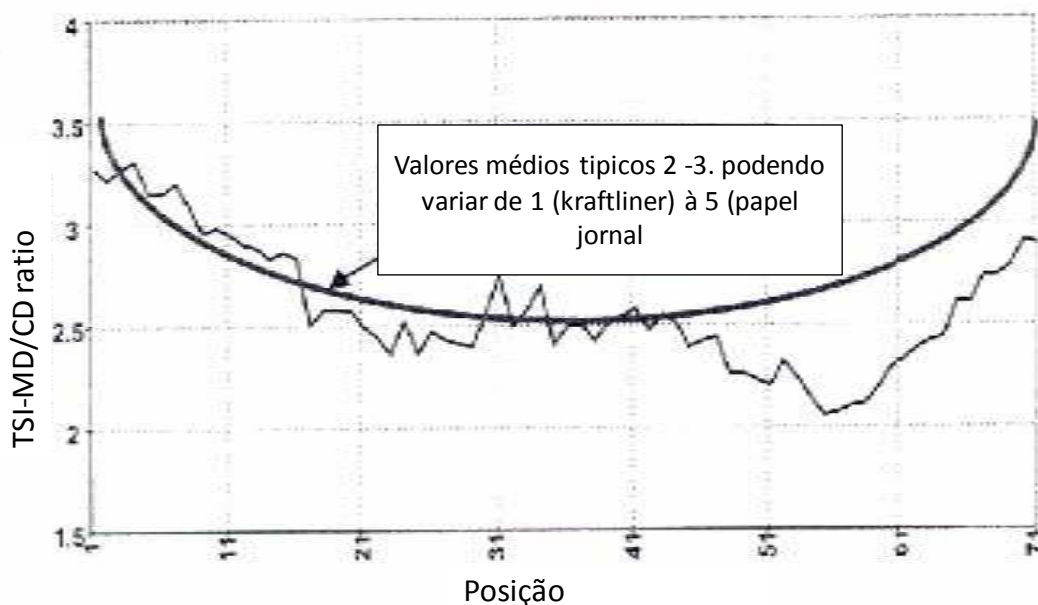


Figura 8 – Perfil típico da relação MD/CD, para valores de TSI

TSO é o ângulo onde o maior valor de TSI é encontrado. Pode ser interpretado como a direção na qual a maior quantidade de fibras estão apontadas, também conhecido como ângulo de alinhamento da fibra (LOEWEN, S/D).

TSO é muitas vezes confundido com orientação de fibras. Orientação de fibras é um dos componentes da *Tensile Stiffness Orientation*, as outras são as

forças e deformações adquiridas no processo de prensagem e na secaria da máquina de papel (LINDBLAD and FURST, 2001).

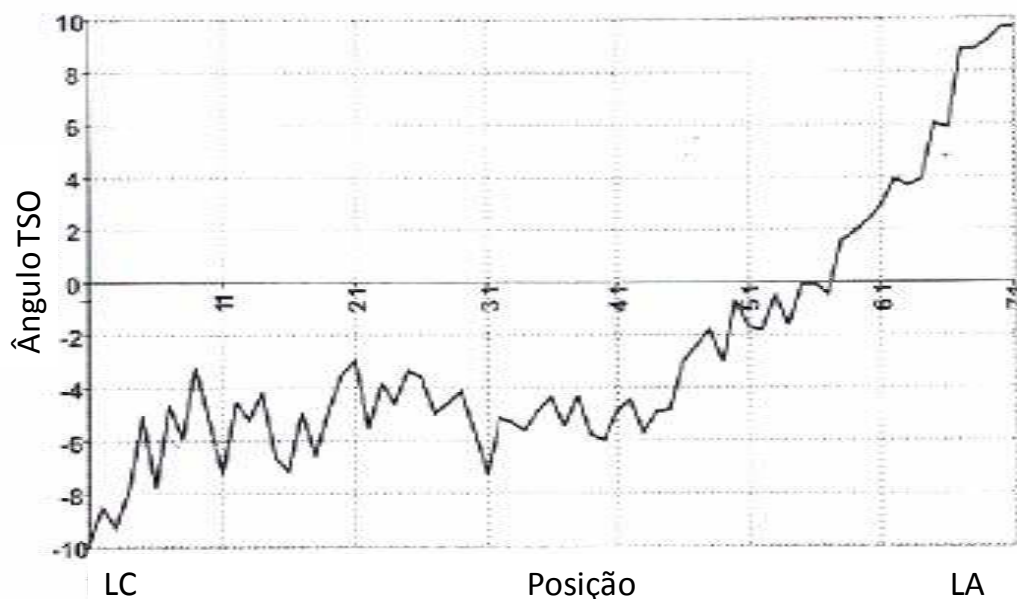


Figura 9 – Perfil típico de uma máquina Fourdrinier, para valores de TSO

Medições de ângulos elevados indicam a presença de fluxo cruzado na caixa de entrada. Segundo (LOEWEN, S/D) valores adequados de TSO, para papéis de imprimir e escrever entra na faixa de ± 3 graus. Todos os outros tipos de papéis devem ser produzidos com um ângulo de ± 5 graus (LINDBLAD and FURST, 2001).

2.5 Modelagem

Modelo matemático é definido por (EYKHOFF, 1974), como sendo uma representação dos aspectos essenciais de um sistema em uma forma utilizável. (DENN, 1987), afirma ser um sistema de equações cuja solução, tendo um conjunto de dados de entrada, é representativa da resposta do processo. Para (SEBORG et al., 1989) um modelo nada mais é do que uma abstração matemática de processo real.

O modelo matemático pode ser construído a partir de princípios fundamentais, configurando um modelo fenomenológico, ou pode ser obtido a

partir de dados empíricos do sistema a modelar, em um processo chamado de identificação (VIEIRA, 2003).

A natureza interativa deste processo é mostrada na Figura 10:

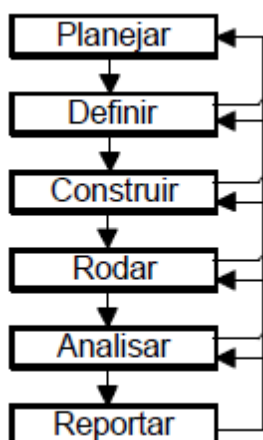


Figura 10 – Linha guia para modelagem

Cada passo não necessita ser totalmente concluído antes de seguir para o passo posterior. O processo de simulação é interativo e cada atividade é definida e algumas vezes redefinida com a interação (PRITSKER and PEGDEN, 1979).

Segundo (LUNA et al., 2006) as variáveis de entrada de um modelo são escolhidas através de informação conhecida *a priori* ou de forma empírica, via tentativa e erro, acarretando na escolha de variáveis redundantes ou de pouca importância. Outra forma de se determinar as variáveis de entrada é a utilização de critérios de informação tais como de informação *Bayesiana*, de *Akaike*, ou *Minimum Description Length*, os quais combinam a variância residual e a ordem do modelo, para estabelecer a necessidade de adequação do modelo com Princípio da Parcimônia.

A meta da construção do modelo é prover uma representação válida da operação de um sistema. Também o modelo deve apresentar qualquer outra representação estatística ou gráfica no sentido de satisfazer os objetivos do estudo. Um modelo não é falso ou verdadeiro, mas útil ou inútil. Uma vez validado, um modelo é útil quando provêem as informações necessárias para o cumprimento dos objetivos do estudo (HAYKIN, 1999).

Há várias formas de classificar técnicas de modelagem. Uma delas agrupa os métodos em três categorias denominadas modelagem caixa branca, cinza e preta (AGUIRRE, 2004).

Os modelos “caixa-branca” são perfeitamente conhecidos a partir dos aspectos fenomenológicos que ocorrem no processo (balanços de massa, energia, cinética de reações, termodinâmica). Para o tipo “caixa-cinza” os modelos são construídos utilizando os aspectos fenomenológicos conhecidos do processo, enquanto que os desconhecidos são descritos a partir de dados experimentais (modelos híbridos). Modelos “caixa-preta” são construídos apenas a partir dos dados empíricos, devido à não existência de qualquer conhecimento dos aspectos fenomenológicos que ocorrem no processo (VIEIRA, 2003).

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 and RUDD, 1994).

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

2.5.1 Redes neurais artificiais (RNA)

Uma rede neural artificial é uma estrutura que processa informações de forma paralela e distribuída e que consiste de unidades computacionais interconectadas por canais unidirecionais chamados de conexões. Cada

unidade computacional possui uma conexão de saída que pode ser dividida em quantas conexões laterais se fizer necessário, sendo que cada uma destas conexões transporta o mesmo sinal, o sinal de saída da unidade computacional. Esse sinal de saída pode ser contínuo ou discreto. O processamento executado por cada unidade computacional pode ser definido arbitrariamente, com a restrição de que ele deve ser completamente local, isto é, deve depender somente dos valores atuais dos sinais de entrada que chegam até a unidade computacional via as conexões e dos valores armazenados na memória local da unidade computacional (HECHT-NIELSEN, 1990).

Matematicamente, diz-se que um neurônio *perceptron* só está apto a resolver problemas linearmente separáveis. A função XOR é representada na Figura 11, na qual x_0 e x_1 representam as suas entradas e y a sua saída.

x_0	x_1	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Figura 11 – Função XOR

Uma RNA com duas entradas, uma saída e uma única camada *perceptron*, é representada na Figura 12. Onde, x_0 e x_1 são as entradas, ou seja, as variáveis que serão utilizadas para prever a saída (y) através de pesos (w_0 e w_1) gerados de acordo com a função de soma (Σ) e função de transferência (T).

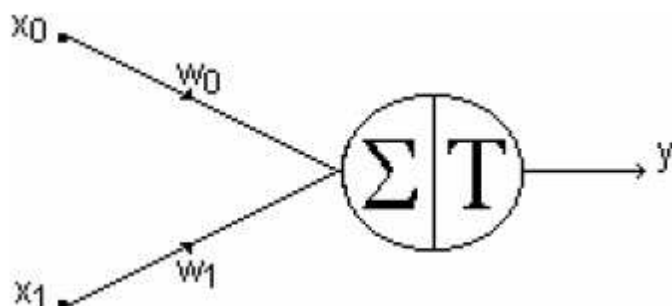


Figura 12 – RNA com duas entradas, uma saída e uma única camada *perceptron*

Modelos paramétricos não-lineares, como redes neurais artificiais, a escolha das entradas se torna muito importante, pois o número de entradas define parcialmente a estrutura da rede, conduzindo a modelos mais complexos à medida que o número de entradas aumenta (NARENDRA and PARTHASARATHY, 1990). Além disso, quanto maior o número de entradas, maior será o número de parâmetros a serem ajustados, aumentando a complexidade computacional, o período de treinamento, e diminuindo o desempenho do modelo, devido a inclusão de entradas pouco relevantes e ao aumento do número de mínimos locais na superfície de erro (BILLINGS and ZHENG, 1995).

Nos diversos modelos propostos, dois aspectos básicos caracterizam as redes: sua forma de aprendizagem, supervisionada ou não; sua topologia, com ou sem realimentação. Assim, a aprendizagem de uma RNA é intimamente relacionada com a respectiva topologia da rede (HAYKIN, 1999).

No grau de supervisão mais forte possível, o supervisor fornece diretamente para a rede neural o valor dos pesos. Esse tipo de supervisão pode ser qualificado de muito forte. Em um grau de supervisão menor, denominado supervisão forte, o supervisor fornece um conjunto de treinamento, ou seja, um conjunto de entradas e suas respectivas saídas desejadas. Esse é o caso de redes tipo *feedforward* treinadas com algoritmos de correção de erros, como o algoritmo *Back-Propagation*. A supervisão forte recebe o nome de aprendizado supervisionado (HAYKIN, 1999).

A Tabela 1 abaixo mostra exemplos de topologias de rede para aprendizado supervisionado ((IFAC, 1998) citado por (JÚNIOR and YONEYAMA, 2002)):

Tabela 1 – Redes para aprendizado supervisionados

Redes sem realimentação:	Redes com Realimentação:
<i>Perceptron</i>	<i>Brain-State-in-a-Box (BSB)</i>
<i>Adaline, Madaline</i>	<i>Fuzzy Congitive Map (FCM)</i>
<i>Backpropagation (BP)</i>	<i>Boltzmann Machine (BM)</i>
<i>Cauchy Machine (CM)</i>	<i>Mean Field Annealing (MFT)</i>
<i>Adaptive Heuristic Critic (AHC)</i>	<i>Recurrent Cascade Correlation (RCC)</i>
<i>Time Delay Neural Network (TDNN)</i>	<i>Backpropagation through time (BPTT)</i>
<i>Associative Reward Penalty (ARP)</i>	<i>Real-time recurrent learning (RTRL)</i>
<i>Avalanche Matched Filter (AMF)</i>	<i>Recurrent Extended Kalman Filter (EKF)</i>
<i>Backpercolation (Perc)</i>	
<i>Artmap</i>	
<i>Adaptive Logic Network (ALN)</i>	
<i>Cascade Correlation (CasCor)</i>	
<i>Extended Kalman Filter (EKF)</i>	
<i>Learning Vector Quantization (LVQ)</i>	
<i>Probabilistic Neural Network (PNN)</i>	
<i>General Regression Neural Net (GRNN)</i>	

Na redução seguinte do nível de aprendizado, denominada supervisão fraca, o supervisor faz apenas o papel de um crítico, fornecendo uma avaliação grosseira da saída da rede neural, em vez de fornecer a saída desejada. No menor grau de supervisão, denominado supervisão muito fraca, o algoritmo de treinamento de rede neural tenta descobrir categorias dos dados de entrada e o supervisor participa apenas fornecendo os rótulos para este agrupamento. Este tipo de aprendizado é determinado aprendizado não supervisionado (HAYKIN, 1999).

A Tabela 2 abaixo mostra exemplos de topologias de rede para aprendizado não supervisionado ((IFAC, 1998) citado por (JÚNIOR and YONEYAMA, 2002)):

Tabela 2 – Redes para aprendizado não supervisionados

Redes sem Realimentação:	Redes com Realimentação:
--------------------------	--------------------------

<i>Learning Matrix (LM)</i>	<i>Additive Grossberg (AG)</i>
<i>Driver-Reinforcement Learning (DR)</i>	<i>Shunting Grossberg (SG)</i>
<i>Linear Associative Memory (LAM)</i>	<i>Discrete Hopfield (DH)</i>
<i>Counterpropagation (CPN)</i>	<i>Continuous Hopfield (CH)</i>
<i>Fuzzy Associative Memory (FAM)</i>	<i>Competitive learning</i>
<i>Optimal Linear Associative Memory (OLAM)</i>	<i>Kohonen Self-organizing Map (SOM)</i>
<i>Sparse Distributed Associative Memory (SDM)</i>	<i>Discrete Bidirectional Associative Memory (BAM)</i>
	<i>Temporal Associative Memory (TAM)</i>
	<i>Adaptive Bidirectional Associative Memory (ABAM)</i>
	<i>Binary Adaptive Resonance Theory (ART1)</i>
	<i>Analog Adaptive Resonance Theory (ART2)</i>
	<i>Topology-preserving map (TPM)</i>

2.5.2 Multilayer Perceptron (MLP)

A MLP é rede neural mais conhecida e estudada entre todas as existentes. Uma rede neural MLP consiste de uma *feed-forward*, com rede em camadas de McCulloch e neurônios de Pitt. Cada neurônio em uma MLP tem uma função de ativação não linear, que é continuamente diferenciável. Uma das funções de ativação freqüentemente usadas para MLP incluem a função sigmóide e a função de tangente hiperbólica (HU and HWANG, 2002).

Uma MLP tem três características distintas (HAYKIN, 1999):

- O modelo de cada neurônio na rede neural inclui uma função não linear de ativação. Uma fórmula não linear que normalmente satisfaz o requerimento é a sigmoide definida função logística:

$$y_i = \frac{1}{1 + \exp(-v_j)}$$

Equação 4 – Função sigmóide

Na qual, v_j é o campo local induzido do neurônio j e y_i é a saída do neurônio. A presença da não linearidade é importante, pois, caso contrário a

relação entrada-saída da rede poderia ser reduzida para uma *Single Layer Perceptron*;

- A rede contém uma ou mais camadas de neurônios escondidos que não são parte das entradas ou saídas da rede. Esses neurônios escondidos garantem que a rede aprenda tarefas por extração de características progressivamente mais significativas dos padrões de entrada (vetores);

- A rede exibe um grande grau de conectividade, determinada pelas sinapses da rede. Uma mudança na conectividade da rede requer uma mudança da população na conexão das sinapses, ou seus pesos.

Uma configuração típica de MLP é mostrada na Figura 13. Cada círculo representa um neurônio individual, esses neurônios estão organizados em camadas, marcados como camada oculta#1, camada oculta#2 e a *output*. Intercomunicações são promovidas somente entre de camadas sucessivas na rede. As letras N, H e M representam inúmeras outras entradas, camadas ocultas e saídas que podem ser utilizadas pela RNA. As setas, são as combinações possíveis de serem feitas dentro da rede (HU and HWANG, 2002).

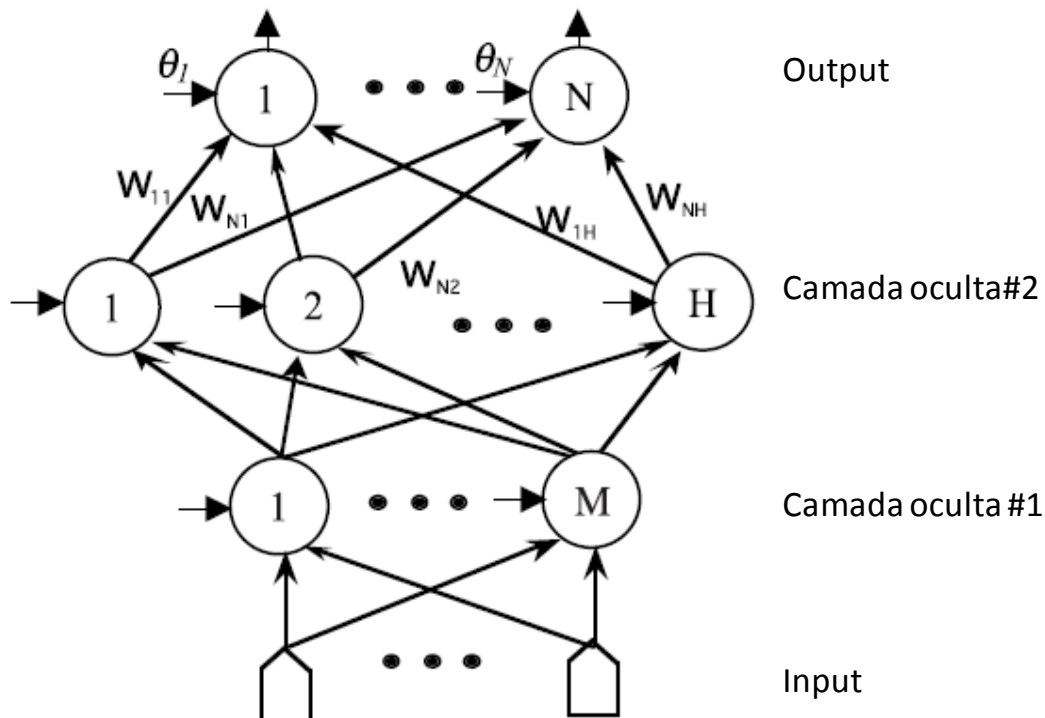


Figura 13 – Uma configuração MLP de três camadas

2.5.3 Análise de sensibilidade (AS)

Frequentemente não é possível obter uma relação direta entre um *parâmetro A* (causa) e uma *função B* (efeito). No entanto, pode-se às vezes correlacionar experimentalmente o parâmetro A com valores das derivadas da função B (efeito). (BITTENCOUT, 2007) mostra que a relação causa-efeito entre parâmetros de um processo pode ser expressa por fatores de sensibilidade $\frac{\partial y}{\partial x}$ via RNA. Onde cada fator de sensibilidade que representa um parâmetro A (causa) com um parâmetro B (efeito) serve para identificar qual das entradas (causa) apresenta maior influência na saída (efeito) do processo. Estes fatores podem servir para extrair o conhecimento e ajudar na avaliação do comportamento do processo de treinamento de uma RNA.

Todos os métodos de AS tem suas próprias características, teorias e amplitude de aplicação. Portanto, a escolha da metodologia de AS geralmente depende da medição de sensibilidade empregada, a precisão requerida na estimativa dos modelos de predição e o custo computacional envolvido (JAKHRANI et al., 2013).

Diferentes estudiosos utilizam diferentes métodos de AS de acordo com a natureza da análise e a precisão requerida. Em resumo, esses métodos incluem delineamento 'um fator de cada vez', análise diferencial, análise subjetiva e delineamento fatorial (HAMBLY, 1995).

A forma generalizada dos modelos da análise de sensibilidade diferencial (ASD) contém várias variáveis independentes tais como $x = x_1, \dots, x_n$ e uma variável dependente y , onde $y = f(x)$. A análise pode ser feita por uma equação aritmética que ilustra a relação entre a variável dependente e independente. O coeficiente de sensibilidade, para uma variável independente definida, pode ser determinado a partir da derivada parcial da variável dependente com relação a variável independente (JAKHRANI et al., 2013). Tal como:

$$S_i = \frac{\partial y}{\partial x_i} \left(\frac{x_i}{y} \right)$$

Onde o quociente $\frac{x_i}{y}$ é utilizado para normalizar o coeficiente removendo a influencia das unidades.

3 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais**. Ed. UFMG (2004)

ANDRIONI, L. J., Ed. (2006). Fabricação do Papel - Formação da Folha. Curitiba.

ANDRIONI, L. J., Ed. (2006). Fabricação do Papel - Preparo de Massa. Curitiba.

BILLINGS, S. A. and G. L. ZHENG. Radial basis function network configuration using genetic algorithms. **Neural Networks**, 8, (6), 877-890, 1995.

BITTENCOUT, F. R. **Uso da análise dos fatores de sensibilidade para encontrar a quantidade mínima de neurônios na camada escondida de uma RNA Perceptron Multicamadas através de Algoritmos Genéricos**. 2007. 103. Master. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte.

BORTOLIN, G. **On Modelling and Estimation of Curl and Twist in Multi-ply Paperboard**. 2002. 106. Doctor. Royal Institute of Technology. Stockholm.

CHEN, S.-C., J. BERGGREN, et al. A multivariable CD control application approach may be beneficial for certain applications. **Pulp & Paper International Process Control**, 2009.

DENN, M. M. **Process modeling**. Longman Scientific & Technical (1987)

EYKHOFF, P. **System identification : parameter and state estimation / [by] Pieter Eykhoff**. London ; New York [etc.] :, Wiley-Interscience (1974)

GALLAY, W. Stability of dimensions and form of paper: part 1. **TAPPI JOURNAL PEER REVIEWED PAPER**, 56, (11), 54-63, 1973.

GOYAL, H. **Paper On Web**. 2012. Disponível em: <<http://www.paperonweb.com/paperpro.htm#PhysicalPropertie>>. Acessado em: 05 set. 2012.

GREEN, C. Curl in Paper. **Appita J.**, 53, (4), 272-275, 2000.

GRUBER, E. (2008). Papermaking Properties of Pulps. Handbook of Pulp, Wiley-VCH Verlag GmbH: 1281-1289.

HAMBY, D. M. A Comparison of Sensitivity Analysis Techniques. **Health Physics**, 68, (2), 195-204, 1995.

HAYKIN, S. S. **Neural Networks: A Comprehensive Foundation**. Prentice Hall International (1999)

HECHT-NIELSEN, R. **Neurocomputing**. Addison-Wesley Publishing Company (1990)

HU, Y. H. and J. N. HWANG. **Handbook of Neural Network Signal Processing**. CRC Press (2002)

JAKHRANI, A. Q., A.-K. OTHMAN, et al. Sensitivity Analysis of a Standalone Photovoltaic System Model Parameters. **Journal of Applied Sciences**, 13, 220-231, 2013.

JOKIO, M. **Papermaking Science and Technology: Part 3, Finishing. Papermaking**. 10, Fapet (1999)

JÚNIOR, C. L. N. and T. YONEYAMA. **Inteligência artificial: em controle e automação**. Edgard Blucher (2002)

LINDBLAD, G. and T. FURST. **The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board**. Kista, Sweden, (2001)

LOEWEN, S. (S/D). TSO, TSI and Fibre Orientation OPTimization. Vancouver, LSZ PaperTech Inc.: 6.

LUNA, I., R. BALLINI, et al. Técnica de identificação de modelos lineares e não-lineares de séries temporais. **Revista Controle & Automação**, 17, (3), 2006.

MACDONALD, R. G. and J. N. FRANKLIN. **Pulp and Paper Manufacture: Papermaking and paperboard making**. 3, McGraw-Hill (1970)

MENDES, A. H. T. **Higroexpansibilidade de papel reprográfico produzido com fibras de eucalipto em máquina industrial**. 2006. 168. Mestre em Engenharia. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo.

NARENDRA, K. S. and K. PARTHASARATHY. Identification and control of dynamical systems using neural networks. **Trans. Neur. Netw.**, 1, (1), 4-27, 1990.

NEIMO, L. and S. P.-I. YHDISTYS. **Papermaking Chemistry**. 4, Fapet Oy (1999) 329.

NISKANEN, K. and I. KAJANTO. **Dimensional Stability**. 16 Finland, Paperi ja Puu Oy (2008)

OLIVEIRA, R. C. D. (2011). Apostila de Tecnologia do Papel - Programa de Pós-Graduação *Strictu Sensu*. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa.

PATAN, K. and T. PARISINI. Identification of a neural dynamical models for fault detection and isolation: the case of a real sugar evaporation process. **Journal of Process Control**, 2005.

PRINTWIKI. **Beater**. 2012. Disponível em: <<http://printwiki.org/Beater>>. Acessado em:

PRITSKER, A. A. B. and C. D. PEGDEN. **Introduction to simulation and SLAM**. Wiley : distributed by Halsted Press (1979)

RODRIGUES, V. **Encanoamento da folha de papel**. 2006. 82. Especialista. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.

SCHWEIGER, C. and J. RUDD. Prediction and control of paper machine parameters using adaptive technologies in process modeling. **TAPPI JOURNAL PEER REVIEWED PAPER**, 1994.

SEBORG, D. E., T. F. EDGAR, et al. **Process Dynamics and Control**. . John Wiley & Sons (1989)

SETH, R. S. and D. H. PAGE. Fibre properties and tearing resistance. **TAPPI JOURNAL PEER REVIEWED PAPER**, 71(2), (2), 103-110, 1998.

SHAKESPEARE, J. (1998). Tutorial: Fibre Orientation Angle Profiles - Process Principles and Cross Machine Control. Process Control, Electrical & Info. Conference Proceedings. Finland, TAPPI: 44.

SOUZA, A. M. D. **Principais implicações - TSO (Direcionamento das fibras) nas propriedades mecânicas do papel.** 2007. 62. Especialista. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa.

THORP, B. A. and J. KOCUREK. **Paper Machine Operations.** Joint Textbook Committee of the Paper Industry, TAPPI (1991)

VIEIRA, O. **Construção de modelos empíricos e projeto da operação de uma máquina de produção de cartão de embalagem.** 2003. 169. Doutor em Ciências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

WATTY, E. L. Causas de la inestabilidad dimensional en papeles fino. **ATCP**, 10, (6), 450-456, 19--.

CAPÍTULO 1: ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, POR MEIO DE REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA), DAS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O ENCANOAMENTO DIAGONAL EM UMA MÁQUINA INDUSTRIAL DE PAPEL CARTÃO

Resumo

A estabilidade dimensional do papel pode sofrer alterações devido a troca de umidade do meio, liberando o *stress* latente adquirido no processo de fabricação. Um dos resultados dessa liberação de tensões é o encanoamento diagonal. Este estudo tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade das diferentes variáveis de entrada de uma máquina industrial de papel, juntamente com algumas medições laboratoriais de forma a identificar sua importância de controle de qualidade de produção do papel cartão e relacionar com a propriedade do papel denominada de encanoamento diagonal (*twist*). Foi feito um levantamento do histórico de produção da máquina industrial referente a 2012 para observar os produtos com as maiores perdas de qualidade. A partir disso, correlacionados com os pontos críticos do perfil de medição na direção CD da máquina e conseqüentemente do papel. Encontramos algumas alterações na ordem em que as variáveis correlacionavam com o encanoamento diagonal, referentes as três análises do perfil (lado comando, meio e acionamento). Foi revelado, a partir da análise de sensibilidade, que as variáveis mais importantes e sensíveis, respectivamente para o lado comando, meio e acionamento da máquina, foram fluxo total da caixa de entrada da camada cobertura, pressão de vapor no 6º grupo de cilindros secadores e fluxo de massa lateral da camada base da formação do papel cartão (*Module Edge*).

Palavras-chave: encanoamento diagonal, análise de sensibilidade, estabilidade dimensional, papel cartão.

1. INTRODUÇÃO

Encanoamento diagonal do papel é um problema recorrente para a indústria de papel cartão quando o objetivo final é a impressão no papel vendido em folhas cortadas de acordo com a definição do cliente final (GOYAL,

2012). Acentuado encanoamento diagonal torna inviável o uso do lote no momento da alimentação das impressoras e com isso dificultando o uso final do produto e limitando a produção nas gráficas o que gera grandes prejuízos ao processo de comercialização e uso do papel Cartão. O agravante para esses problemas ocorre devido a repetitivas paradas para retirar folhas presas no sistema de alimentação das impressoras das instituições gráficas.

Encanoamento diagonal está intrinsecamente ligado a fenômenos que regem o funcionamento da caixa de entrada, orientação das fibras resultantes da formação da folha e estabilidade do papel após formação (NISKANEN, 1998).

A Figura 14 ilustra a deformação do papel, distinguindo encanoamento e encanoamento diagonal.

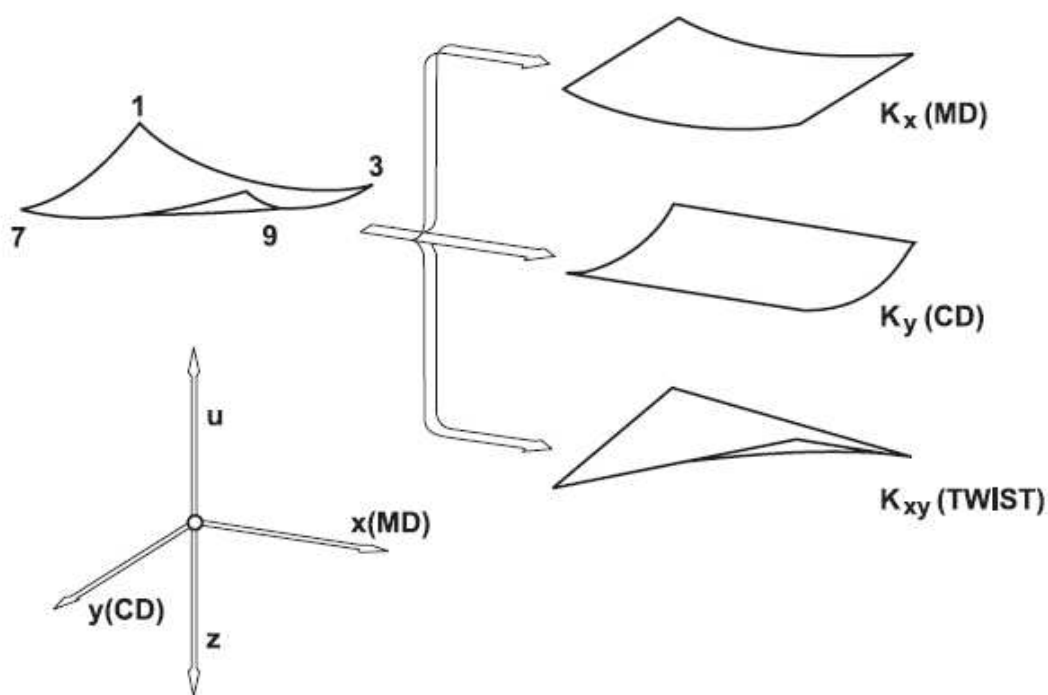


Figura 14 – Desvio fora do plano

Favorecer a estabilidade de papéis pode ocasionar em perda de propriedades. Por exemplo, quanto menor o grau de refino e maior a porosidade do papel, menos compacto será e terá maior estabilidade dimensional, uma vez que a expansão de uma fibra individual terá menor

influência nas fibras adjacentes. Um refino mais acentuado nas fibras propicia maior hidratação, resultando num decréscimo da estabilidade (WATTY, 19--).

A instabilidade dimensional representa a suscetibilidade do papel às mudanças de suas dimensões quando houver mudanças em seu conteúdo de umidade (GALLAY, 1973).

A análise de sensibilidade é uma etapa da criação da rede neural artificial (RNA), onde podemos identificar as variáveis que estão influenciando no *output* do modelo. Permitindo identificar os parâmetros que causam maior perturbação na performance do modelo. Deste modo, a análise de sensibilidade é realizada com o objetivo de definir a influência de alguns parâmetros (*input*) nos resultados (*output*) do modelo (JAKHRANI, A.Q. et al., 2013).

Neste trabalho, foi feito um levantamento dos dados de produção e discutida a relação entre variáveis independentes e o encanoamento diagonal (variável dependente), por meio da análise de sensibilidade. Definindo assim, quais são as variáveis que mais influenciam nos modelos para aperfeiçoar o controle de produção industrial, eficiência de máquina e qualidade do papel cartão produzido industrialmente.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição e escolha do material

Este estudo foi realizado em uma das máquinas de produção de papel cartão da Indústria Klabin Papéis da unidade de Monte Alegre-PR (KPMA). Inicialmente, dentro da gama de produtos fabricados pela Klabin Papéis da unidade Monte Alegre (KPMA) foi feito um levantamento para observar os produtos com maior ocorrência de desclassificação em função da propriedade de encanoamento diagonal do papel cartão.

O papel cartão avaliado é composto por 3 camadas fibrosas, sendo a camada da cobertura composta de celulose branqueada. Revestindo estas camadas de fibras são aplicadas 3 camadas de revestimento e no lado oposto do cartão (base do cartão) é aplicada uma camada de amido de superfície, conforme exemplificado na Figura 15.

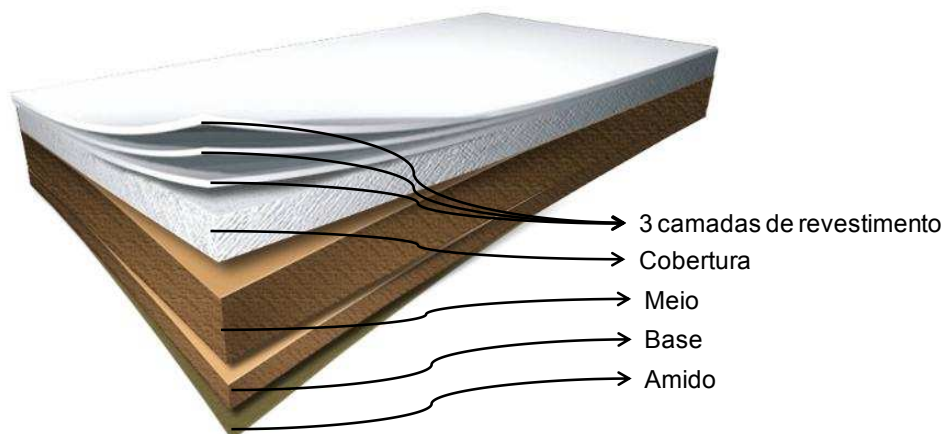


Figura 15 – Estrutura do papel cartão na direção z

A camada base é constituída de fibras longas, oriundas de polpação Kraft. Camada meio é uma mistura de pasta quimiotermodinâmica (CTMP), fibras Kraft curta e longa. A cobertura é constituída de fibra branqueada na proporção de 80% fibra curta e 20% fibra longa.

2.2 Determinação encanoamento diagonal

A análise de encanoamento diagonal foi feita ao final de cada rolo jumbo, em seu perfil transversal à máquina. Os corpos de prova (30x25cm) foram preparados seguindo procedimento interno do laboratório de controle da qualidade da fabrica. O primeiro ponto de medição representa o lado do comando (LC) da máquina e o restante das medições ocorre a cada 40 cm, até totalizar 10 corpos de prova. Sendo o último indicado pelo lado do acionamento (LA). As amostras são climatizadas por 20 minutos. Realização da metodologia é feita em uma sala climatizada, objetivando uma temperatura de $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade de $50\pm 10\%$. A Figura 16 representa o preparo.

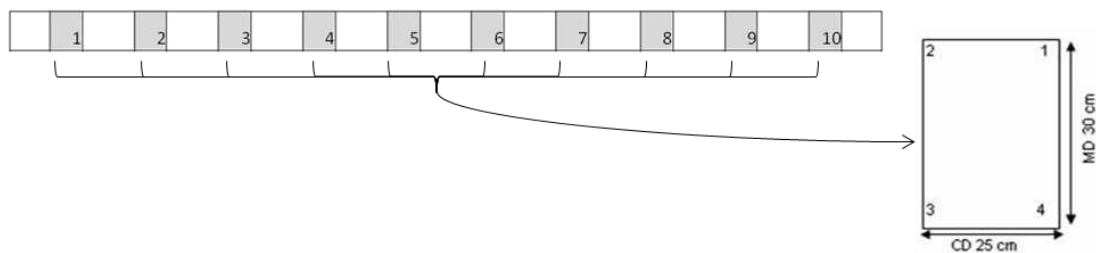


Figura 16 – Obtenção dos corpos de provas e medição laboratorial de encanoamento diagonal

Observando a numeração do retângulo (30x25 cm) na figura acima, poderemos calcular o valor de encanoamento diagonal. A metodologia se dá pela diferença entre o maior valor de uma das extremidades (1/3 ou 2/4) pelo menor valor da outra extremidade.

Por exemplo, caso tenhamos um papel com as seguintes medições: 1, 8, 2 e 6 mm, respectivamente da posição 1 a 4. O resultado seria uma diferenciação de 7 mm fora do plano.

2.3 Levantamento dos dados

Inicialmente, foi feito um levantamento da produção e selecionado os produtos desejados: CHD, CHW e CKF. As siglas CHD e CHW representam os produtos Carrier Board (CB). Já a sigla CKF engloba a linha Folding Box Board (FBB).

A produção industrial foi analisada no período de janeiro à dezembro de 2012, portanto, um ano de produção, por meio dos dados armazenados em servidor interno da KPMA.

2.4 Escolha das variáveis

O critério de escolha das variáveis para ser correlacionada, com o encanoamento diagonal, se deu baseado na literatura pertinente juntamente com diálogos entre operadores da máquina escolhida para este estudo, ou seja a máquina de papel nº9 (MP9). As variáveis foram correlacionadas após a

remoção de *outliers*, de acordo com boletins diários indicando falha ou desvios no processo produtivo. Ao total 62 variáveis foram avaliadas.

As tags, representadas por uma série de números e letras (ex.: 392PT2064A) que armazenam as informações relacionadas à descrição, funcionalidade, enfim, as características que descrevem a variável estudada.

2.5 Análise de sensibilidade (AS)

Esta análise tem a função de avaliar a intensidade da interação (sensibilidade) de cada variável de entrada para a variável de saída. Indicando, em ordem decrescente, as variáveis com maior impacto.

A análise é feita pela sensibilidade média absoluta, média e picos.

Sensibilidade média absoluta é a soma da distribuição temporal média dos valores absolutos das derivadas parciais dos pares de entrada-saída.

$$Média Absoluta = \frac{\sum_{k=1}^{N_{pats}} \left| \frac{\partial o_{k,i}}{\partial x_{k,j}} \right|}{N_{pats}}$$

Equação 5 – Média Absoluta para a Análise de Sensibilidade

Onde N_{pats} é o número de padrões no conjunto de dados sobre o qual a distribuição é calculada, $x_{k,j}$ é a entrada para j^{th} o padrão k^{th} , e $o_{k,i}$ é a i^{th} saída para o padrão k^{th} .

Sensibilidade média, é a média dos valores das derivadas parciais (reais, não absoluta).

$$Média = \frac{\sum_{k=1}^{N_{pats}} \frac{\partial o_{k,i}}{\partial x_{k,j}}}{N_{pats}}$$

Equação 6 – Média para a Análise de Sensibilidade

Sensibilidade de pico é o máximo das parciais de todas as interações entre as entradas e a saída.

$$Pico = \max \left(\left| \frac{\partial o_{k,i}}{\partial x_{k,j}} \right|, k \in 1, 2, \dots, N_{pats} \right)$$

Equação 7 – Pico para a Análise de Sensibilidade

O programa utilizado para o processamento das variáveis foi o software *Property Predictor*[®] (PAVILION, 2011).

A análise de sensibilidade foi feita com a RNA treinada. A partir dos pontos em que a rede neural foi testada no *dataset* são calculados, estatisticamente, quais entradas que foram excitadas, ou seja, causaram mais variabilidade na saída (ganho).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Levantamento e escolha do material

A Figura 17 indica a porcentagem dos cartões sujeitos à desclassificação por encanoamento diagonal, produzidos na máquina escolhida para o estudo.

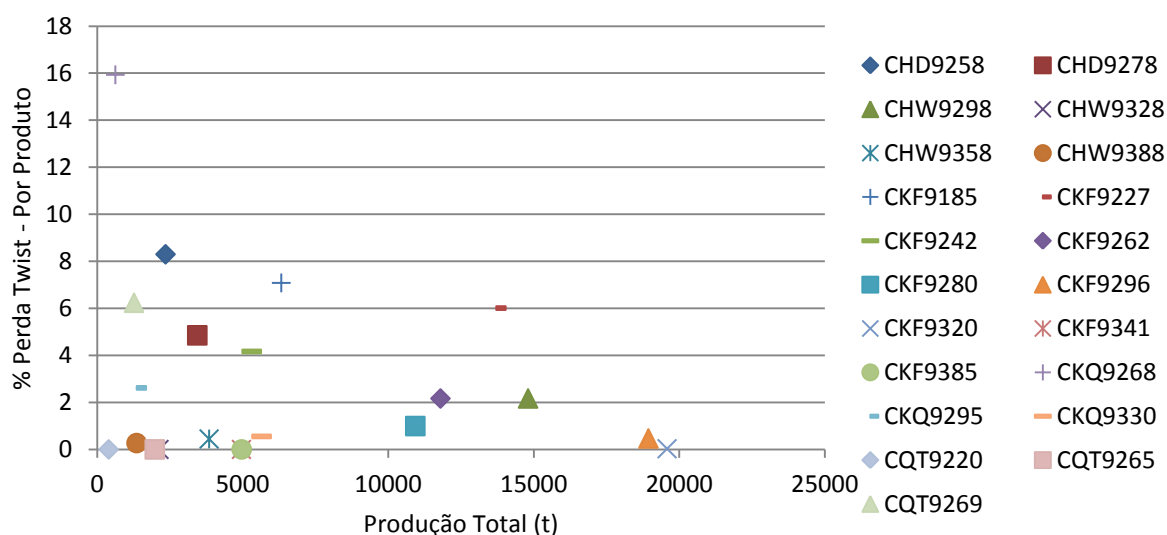


Figura 17 – Distribuição da produção de cartões (CB e FBB) na MP9

Na legenda da Figura 17, as letras correspondem o tipo de papel produzido (ex.: CKF), o primeiro dígito indica a máquina de papel onde o produto foi feito (ex.: MP9) e os últimos três dígitos expressam a gramatura nominal do papel (ex.: 227 g/m²).

Apesar da produção do CKF9227 não ser a mais expressiva, corresponde pela maior desclassificação ponderando a produção ao longo do ano. Como exemplificado e mostrado Figura 18, os valores pontuais das medições laboratoriais expressam grande variabilidade. Com medições superando o

limite superior de controle (LSC), causados devido a maior variação de seus valores individuais que geraram suas respectivas médias.

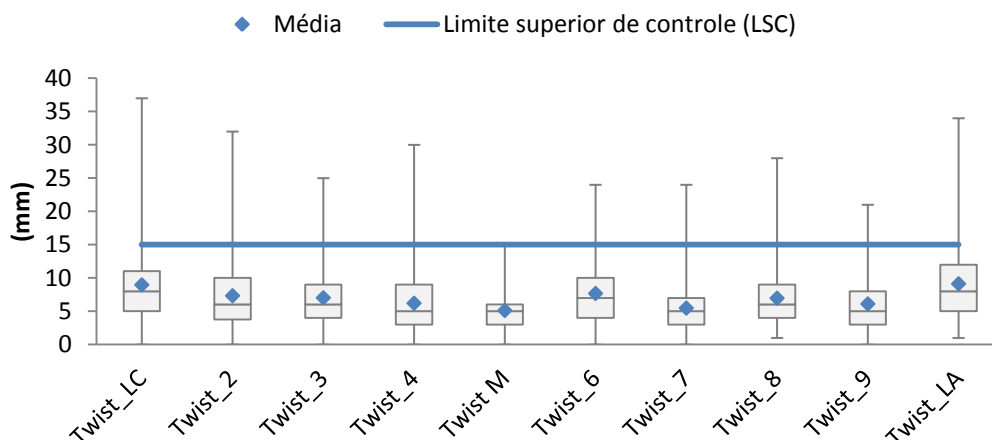


Figura 18 – Medição laboratorial dos corpos de prova, em mm, nos setores amostrados no sentido CD da máquina para o produto CKF9227

Segundo (CARLSSON, 1981), papéis com densidades mais baixas são mais suscetíveis a apresentar deformações fora do plano, agravando a estabilidade dimensional. Em nosso estudo, as maiores desclassificações ocorreram nas laterais da folha devido à turbulência do fluxo de massa na caixa de entrada. Com isso, as fibras mostram assimetria ao longo do perfil transversal, podendo ser acentuada ou amenizada pela relação jato/tela, abertura do lábio, velocidade da máquina, entre outras (LINDBLAD and FURST, 2001).

Com base na Figura 18, foram escolhidas as extremidades, lado do comando (LC) e acionamento (LA), por apresentarem as maiores perdas. E o meio da máquina, os corpos de prova codificados como posição (5), por ter apresentado a menor desclassificação no perfil, o oposto ao LC e LA.

3.2 Variáveis utilizadas, na análise de sensibilidade, para a quantificação da interação entre entrada e saída

A análise foi feita utilizando as variáveis com potencial impacto na propriedade estudada, podendo ser observadas na Tabela 3. Estas variáveis englobam, em sua totalidade, as variações tanto no sentido CD quanto MD da máquina. As variáveis dispostas na direção CD foram mapeadas, e aplicou-se

transformadas para poder relacionar um segmento de informações com a variável final. Esses valores representam as médias obtidas na mesma faixa da medição laboratorial do encanoamento diagonal avaliado nos corpos de prova, conforme apresentados na Figura 18.

Tabela 3 – Variáveis para classificação, da ordem mais importante, para atuar como controle do encanoamento diagonal

Descrição	Tag	Unidade
Encanoamento diagonal LC	50_09_Twist_LC	mm
Encanoamento diagonal M	50_09_Twist_M	mm
Encanoamento diagonal LA	50_09_Twist_LA	mm
ENCANOAMENTO 50% U.R. Posição 1	50_09_Encan50_1	mm
ENCANOAMENTO 50% U.R. Posição 5	50_09_Encan50_5	mm
ENCANOAMENTO 50% U.R. Posição 10	50_09_Encan50_10	mm
TSO Ângulo p01-02	50_09 506p01-02	°
TSO Ângulo p09-10	50_09 506p09-10	°
TSO Ângulo p19-20	50_09 506p19-20	°
TSI MD/CD p01-02	50_09 500p01-02 / 50_09 501p01-02	kNm/g
TSI MD/CD p09-10	50_09 500p09-10 / 50_09 501p09-10	kNm/g
TSI MD/CD p19-20	50_09 500p19-20 / 50_09 501p19-20	kNm/g
Ângulo da orientação das fibras_Base_049-070	39PERFANGULOFOBOTF4_049-070	°
Ângulo da orientação das fibras_Base_265-286	39PERFANGULOFOBOTF4_265-286	°
Ângulo da orientação das fibras_Base_535-556	39PERFANGULOFOBOTF4_535-556	°
Ângulo da orientação das fibras_Cobertura_049-70	39PERFANGULOFOTOPF4_049-70	°
Ângulo da orientação das fibras_Cobertura_265-286	39PERFANGULOFOTOPF4_265-286	°
Ângulo da orientação das fibras_Cobertura_535-556	39PERFANGULOFOTOPF4_535-556	°
Ratio da orientação das fibras_Base_049-70	39PERFORIENTFOBOTF4_049-70	
Ratio da orientação das fibras_Base_265-286	39PERFORIENTFOBOTF4_265-286	
Ratio da orientação das fibras_Base_535-556	39PERFORIENTFOBOTF4_535-556	
Ratio da orientação das fibras_Cobertura_049-70	39PERFORIENTFOTOPF4_049-70	
Ratio da orientação das fibras_Cobertura_265-286	39PERFORIENTFOTOPF4_265-286	
Ratio da orientação das fibras_Cobertura_535-556	39PERFORIENTFOTOPF4_535-556	
Shopper Riegler Camada Base	50_09SR_TQB	°SR
Shopper Riegler Camada Cobertura	50_09SR_TQC	°SR
Shopper Riegler Camada Meio	50_09SR_TQM	°SR
Performance MP9	39_Performance	
Velocidade Enroladeira Pope	392M3820_D115_VEL	m/min
Gramatura	9GRM_cond_ROLO_F1	g/m ²
Gramatura Revestimento	39_Tinta_Total_Medido	g/m ²
Espessura	9ESP_ROLO_F1	µm
Umidade	9UMID_ROLO_F1	% a.s.
Orientação Rolo Base	9ORIENT_rolot_bot_F4	
Orientação Rolo Cobertura	9ORIENT_rolot_top_F4_FATOR	

% Fibra Longa Refinada Meio	392PCT_PB_MV	%
Cola Breu Base	392FIC3001_CONS_ESP_BASE	kg/ton
Cola Breu Meio	392FIC3002_CONS_ESP_MEIO	kg/ton
Cola Breu Cobertura	392FIC3003_CONS_ESP_COB	kg/ton
Cola AKD Base	392FIC3014_CONS_ESP_BASE	kg/ton
Cola AKD Meio	392FIC3013_CONS_ESP_MEIO	kg/ton
Cola AKD Cobertura	392FIC3029_CONS_ESP_COB	kg/ton
Abertura Lábio Base	392ZT2195A_AO01	mm
Afastamento Lábio Base	392ZT2195B_AO01	mm
Pressão Cx. Entrada Base LC	392PT2194A	kPa
Pressão Cx. Entrada Base LA	392PT2194B	kPa
Fluxo Total Cx. Entrada Base	391_FLUXOTOTAL_CALC_CX_ENTRADA_LB	l/min
VJ Calculado da Base	392PIC2194_AO03	
VJ/VT Linha Base MP9	392VJ_VT_BASE	
Abertura Lábio Meio	392ZT2063A_AO01	mm
Afastamento Lábio Meio	392ZT2063B_AO01	mm
Pressão Cx. Entrada Meio LC	392PT2064A	kPa
Pressão Cx. Entrada Meio LA	392PT2064B	Kpa
Fluxo Total Cx. Entrada Meio	391_FLUXOTOTAL_CALC_CX_ENTRADA_LM	l/min
VJ Calculado da Meio	392PIC2064_AO03	
VJ/VT Meio	392VJVT_MEIO	
Abertura Lábio Cobertura	392ZT2061A_AO01	mm
Afastamento Lábio Cobertura	392ZT2061B_AO01	mm
Pressão Cx. Entrada Cobertura LC	392PT2062A	kPa
Pressão Cx. Entrada Cobertura LA	392PT2062B	kPa
Fluxo Total Cx. Entrada Cobertura	391_FLUXOTOTAL_CALC_CX_ENTRADA_LC	l/min
VJ Calculado da Cobertura	392PIC2062_AO03	
VJ/VT Linha Cobertura MP9	392VJ_VT_COB	
Module Edge Comando Base	392FT2141A	l/min
Module Edge Acionamento Base	392FT2141B	l/min
Transmissor de pressão LC prensa alisadora	392PT5546A	kNm
Contra prensa	392PT5546B	kNm
Transmissor de pressão LA prensa alisadora	392PT5546C	kNm
Conc Amido Cozido	MP9_T_AMIDO_COZ_CONC	%
Vapor 6º Grupo Inferior	392PIC4046_MV	bar
Pres. Dif. 6º Gr Inf	392PDIC4047_MV	bar
Pressão Vapor 6º Grupo	392PIC4048_MV	bar
Pres. Dif. 6º Gr Sup	392PDIC4049_MV	bar
BIAS 6º Grupo	392BIAS_GRUPO6	

3.3 Análise de Sensibilidade (AS) das variáveis de máquina

Os valores da Análise de Sensibilidade, obtidos mediante valores provenientes da RNA, representam unicamente o montante de dados

selecionado no período descrito anteriormente. A Análise de Sensibilidade foi utilizada para obter uma melhor compreensão do conjunto de dados, na tentativa de analisar as variáveis e *outliers* que possam ter sido gerados por leitura errônea no momento da coleta.

As variáveis da máquina que apresentaram influência no encanoamento diagonal dos papéis cartões no lado comando (LC), acionamento (LA) e meio da folha (M) na direção transversal (CD) da máquina, são apresentadas nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21. As variáveis mais significativas a influenciarem no encanoamento diagonal são observadas na escala de média absoluta de maior valor para os menores valores. Portanto, as variáveis mais relevantes são aquelas que apresentam maior valor de média absoluta. Do conjunto de 62 variáveis apresentados na Tabela 3, foram elencadas apenas a fração condizente com as relevantes à discussão, e são apresentadas em três Figuras seguindo as parcelas referentes ao LC, meio de máquina e LA. Nestas figuras podem ser vistos, em ordem de maior para menor valor, o grau de significância de sua participação no efeito de encanoamento e podem então ser trabalhadas de forma a prover melhor controle de encanoamento diagonal do papel cartão.

Das 19 variáveis selecionadas, exemplificadas nas Figura 19, Figura 20 e Figura 21, algumas apresentam o mesmo grau de relevância, pois obtiveram as mesmas médias absolutas.

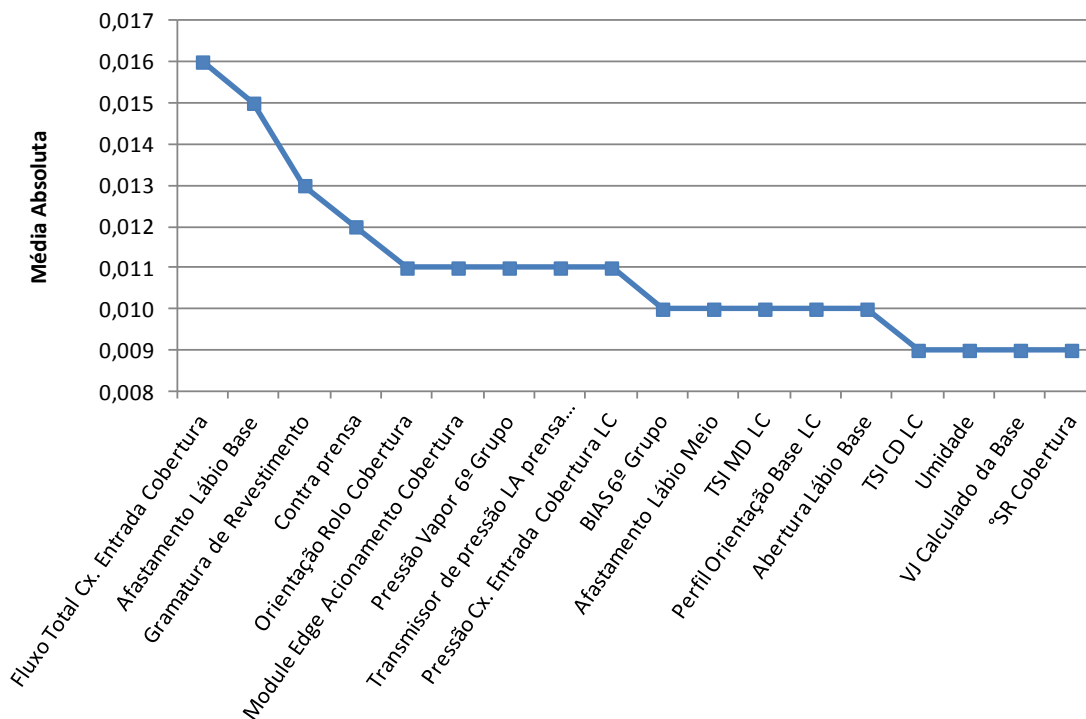


Figura 19 – Análise de Sensibilidade (AS) para o lado comando da máquina.

Analisando a Figura 19 notamos o afastamento ou retração do lábio tendo influência no modo de como o fluxo de massa atinge a tela formadora. Para caixa de entrada com lábio retraído, a tendência da massa, é de incidir na tela formadora com maior pressão. Com lábio adiantado, a formação da trama será definida pela velocidade da massa ao atingir a tela formadora (MACDONALD, 1970). A velocidade pode ser controlada pela pressão interna da caixa de entrada e pela abertura do lábio.

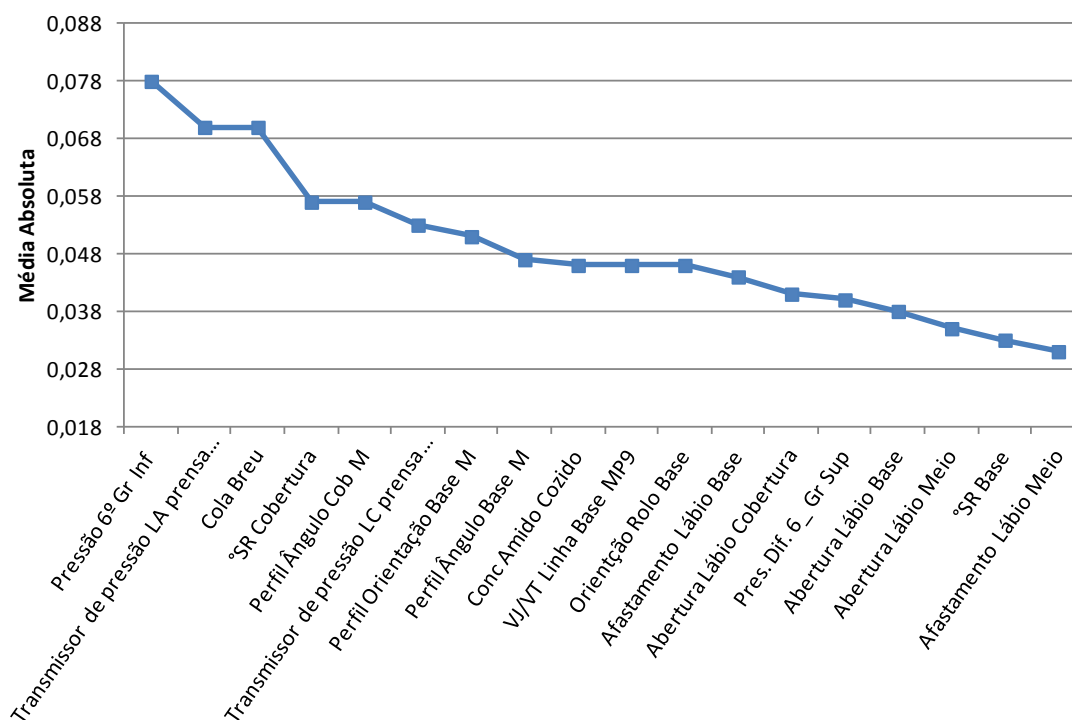


Figura 20 – Análise de Sensibilidade (AS) para a posição do meio da folha na direção CD da máquina.

Encanoamento diagonal está sempre relacionado com a orientação das fibras. Essa orientação combinado com mudança de umidade acarreta numa mudança do encanoamento diagonal. Porém não pode ser causado pelo fluxo de umidade em um lado do papel como seria o caso de encanoamento MD ou CD. A causa fundamental é sempre a estrutura do papel. Mudanças na umidade podem apenas agravar o fenômeno (NISKANEN, 1998).

(CHEN et al., 2009) ressalta que a orientação de fibras é a propriedade da folha que determina a força e a estabilidade dimensional (fortemente associado ao encanoamento e encanoamento diagonal).

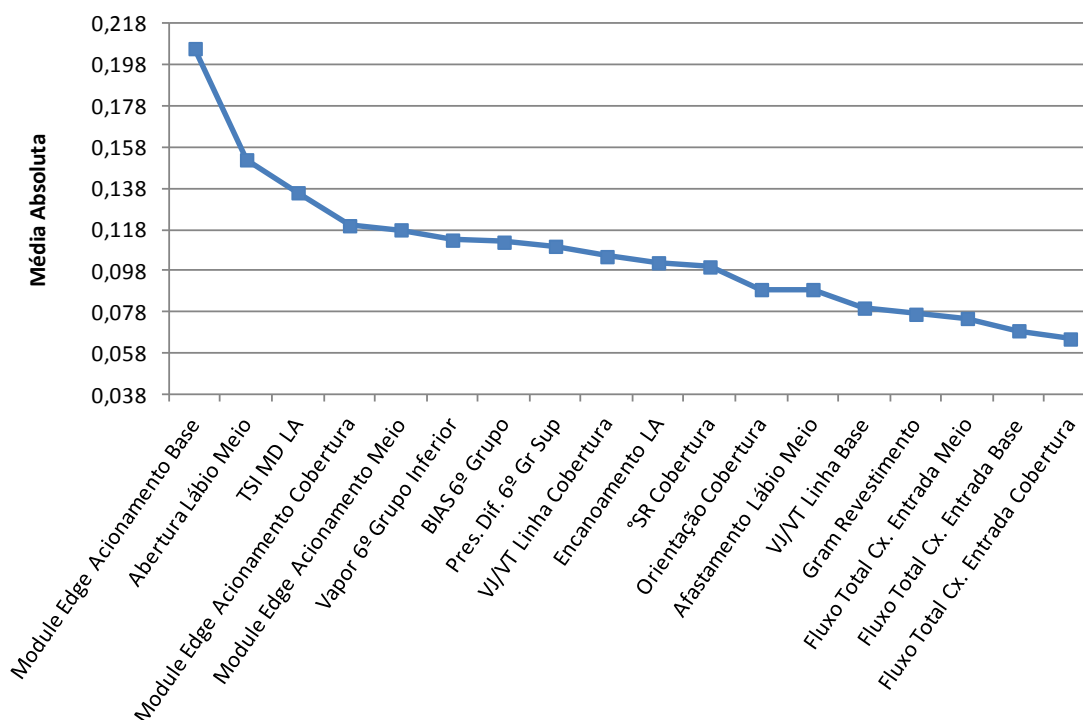


Figura 21 – Análise de Sensibilidade (AS) para o lado acionamento da máquina.

A diferença da velocidade entre o jato e a tela afeta diretamente o perfil de TSO. Assim, a orientação entre a base e cobertura pode sofrer alterações e implicar diretamente no encanoamento diagonal (LINDBLAD and FURST, 2001).

Encanoamento diagonal representa a combinação das curvaturas (encanoamento) na CD e MD, elevados desvios no encanoamento agravam os problemas de encanoamento diagonal. Provocado por desvios na orientação a partir da direção MD (VOITH, 2012).

Com base nas Análises de Sensibilidade das variáveis, selecionamos as 5 maiores que impactam no encanoamento diagonal, de acordo com o *dataset*, e estão apresentadas na Tabela 4. Essas variáveis estão agrupadas próximas aos maiores valores médios absolutos, indicando um comportamento diferenciado, se comparado ao restante, onde os valores decrescem bruscamente.

Tabela 4 – Variáveis de entrada mais influenciáveis no encanoamento diagonal

		LC	M	LA
Ordem de Importância na variável saída	1°	Fluxo Total Cx. Entrada Cobertura	Pressão 6° Gr Inf	Module Edge Acionamento Base
	2°	Afastamento Lábio Base	Transmissor de pressão LA prensa alisadora	Abertura Lábio Meio
	3°	Gramatura de Revestimento	Cola Breu	TSI MD LA
	4°	Contra prensa	°SR Cobertura	Module Edge Acionamento Cobertura
	5°	Orientação Rolo Cobertura	Perfil Ângulo Cob M	Module Edge Acionamento Meio

Na Tabela 4, podemos observar em ordem decrescente de importância no encanoamento diagonal. Contudo, não apresentaram nenhuma unanimidade em suas análises. Seria esperada alguma concordância entre as frações LC e LA, pois ambas representam as maiores perdas ao longo do perfil.

Além disso, esperava-se observar variáveis relacionadas à orientação de fibras, relação VJ/VT, abertura e afastamento do lábio dentre as mais fortemente influenciáveis nos valores de encanoamento diagonal. Variáveis inerentes a dinâmica da caixa de entrada, tais como, pressão, afastamento, fluxo, fluxo lateral (*Module Edge*) tem influência direta na orientação das fibras. Sendo ainda *inputs* para cálculos do VJ/VT.

Uma ferramenta utilizada, pela operação, para a correção do perfil de encanoamento diagonal é o ajuste na secaria mostrando-se com maior intensidade no meio de máquina. No entanto, tal correção não deve ser aplicada para a correção do encanoamento diagonal, se correlacionada com o perfil de encanoamento (VOITH, 2012). Esse tipo de ajuste transmite um falso controle sobre a propriedade em questão, pois a medida que muda o teor de umidade do ambiente as liberações de tensões atuam revelando a real instabilidade dimensional do papel.

As informações presentes nas Análises de Sensibilidade mostraram a importância da realização da análise para o aperfeiçoamento das redes neurais, pois essas informações possibilitam o desenvolvimento de modelos

mais robustos, com menos *outliers* e mais precisos na predição da propriedade em questão.

4. CONCLUSÃO

Para a base de dados analisada as conclusões a seguir podem ser estabelecidas:

Os dados revelam um potencial, para a operação da máquina de papel, na tomada eficaz de decisão no momento de correções por perdas devido ao encanoamento diagonal.

Sugerimos para a equipe de produção da máquina que é melhor utilizar as ferramentas de atuação da máquina de papel. Mudanças no VJ/VT acarretam muita influência na orientação de fibras, e não está sendo utilizado com a devida frequência.

Desmitificar a relação entre a correção do perfil de encanoamento diagonal com atuação na secaria, resguardando esse artifício para devida atuação em encanoamento.

Saber usar as variáveis (Fluxo total, vazão Module Edge, Abertura e Afastamento do lábio aliadas principalmente a relação Jato/Tela) com parcimônia impede equívocos na correção do perfil de encanoamento diagonal.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLSSON, L. Out-of-Plane Hygroinstability of Multi-Ply Paperboard. **Fibre Science and Technology**, 14, 201-212, 1981.

CHEN, S.-C., J. BERGGREN, et al. A multivariable CD control application approach may be beneficial for certain applications. **Pulp & Paper International Process Control**, 2009.

GALLAY, W. Stability of dimensions and form of paper: part 1. **TAPPI JOURNAL PEER REVIEWED PAPER**, 56, (11), 54-63, 1973.

GOYAL, H. **Paper On Web**. 2012. Disponível em: <<http://www.paperonweb.com/paperpro.htm#PhysicalPropertie>>. Acessado em: 05 set. 2012.

JAKHRANI, A. Q., A.-K. OTHMAN, et al. Sensitivity Analysis of a Standalone Photovoltaic System Model Parameters. **Journal of Applied Sciences**, 13, 220-231, 2013.

LEVLIN, J. E., L. SÖDERJHELM, et al. **Pulp and Paper Testing**. Fapet Oy (1999)

LINDBLAD, G. and T. FURST. **The Ultrasonic Measuring Technology on Paper and Board**. Kista, Sweden, (2001)

MACDONALD, R. G. and J. N. FRANKLIN. **Pulp and Paper Manufacture: Papermaking and paperboard making**. 3, McGraw-Hill (1970)

NISKANEN, K. and I. KAJANTO. **Dimensional Stability**. 16 Finland, Paperi ja Puu Oy (2008)

PAVILION (2011). Analyze - Reference manual. R. Automation. v **3.7.5**.

VOITH (2012). Influence on curl, twist and misregister.

WATTY, E. L. Causas de la inestabilidad dimensional en papeles fino. **ATCP**, 10, (6), 450-456, 19--.

CAPÍTULO 2: UTILIZAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS, NO CONTROLE DO ENCANOAMENTO DIAGONAL, EM MÁQUINA INDUSTRIAL DE PAPEL CARTÃO

Resumo

Medições laboratoriais são importantes para garantir a qualidade final do material entregue ao cliente. Particularmente na medição do encanoamento diagonal, as amostragens são feitas no final de cada rolo jumbo. Demandando tempo para eventuais correções, por parte da máquina. Este trabalho tem por objetivo criar uma rede neural artificial para, no futuro, servir como um sensor virtual. Foram feitas três redes neurais artificiais, do tipo *Multi-Layer Perceptron* (MLP), para prever três setores do perfil da máquina de papel. Sendo, o lado do comando (LC), meio de máquina (M) e lado do acionamento (LA). Foi utilizado um mix de produtos que melhor representaram o processo. Encontramos um R^2 de 0,426; 0,557 e 0,597, respectivamente, para os setores do LC, M e LA. Nos permitindo concluir que estes, os resultados indicam que os modelos são aptos para representar o processo.

Palavras-chave: rede neural artificial, encanoamento diagonal, *Multi-Layer Perceptron*, papel cartão.

1. INTRODUÇÃO

O modelo matemático pode ser construído a partir de princípios fundamentais, configurando um modelo fenomenológico, ou pode ser obtido a partir de dados empíricos do sistema a modelar, em um processo chamado de identificação (VIEIRA, 2009).

Uma rede neural artificial é uma estrutura que processa informações de forma paralela e distribuída e que consiste de unidades computacionais interconectadas por canais unidirecionais chamados de conexões. Cada unidade computacional possui uma conexão de saída que pode ser dividida em quantas conexões laterais se fizer necessário, sendo que cada uma destas conexões transporta o mesmo sinal, o sinal de saída da unidade computacional (HECHT-NIELSEN, 1990).

Os modelos “caixa-branca” são perfeitamente conhecidos a partir dos aspectos fenomenológicos que ocorrem no processo (balanços de massa, energia, cinética de reações, termodinâmica). Para o tipo “caixa-cinza” os modelos são construídos utilizando os aspectos fenomenológicos conhecidos do processo, enquanto que os desconhecidos são descritos a partir de dados experimentais (modelos híbridos). Modelos “caixa-preta” são construídos apenas a partir dos dados empíricos, devido à não existência de qualquer conhecimento dos aspectos fenomenológicos que ocorrem no processo (VIEIRA, 2003).

Os mecanismos de manifestação do encanoamento diagonal são causados por diferentes fatores quando examinados em papéis de alta e baixa gramatura. Para gramaturas altas é causado pela diferença da orientação das fibras entre as duas faces do papel (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

A grande diferença na orientação entre as duas camadas ocorre ao longo da direção que desvia do ângulo de orientação médio da fibra nos dois lados. O encanoamento diagonal pode ser calculado pela seguinte expressão:

$$K_{xy} = \frac{\Phi_C - \Phi_B}{d_K} (\varepsilon_{CD} - \varepsilon_{MD}) + (K_{MD} - K_{CD})(\Phi_C + \Phi_B)$$

Equação 8 – Componentes do encanoamento diagonal

Nas quais, ε_{CD} e ε_{MD} são as deformações medias de toda a folha na direção CD e MD. Φ_C e Φ_B são as orientações dos ângulos na cobertura e na base do cartão. d_K é a distância característica entre as camadas da cobertura e da base do cartão. Em muitos casos o segundo termo $((K_{MD} - K_{CD})(\Phi_C + \Phi_B))$ pode ser omitido (NISKANEN and KAJANTO, 2008).

A estabilidade dimensional do papel que define o grau da manifestação do encanamento diagonal é afetada por um alto número de fatores inter-relacionados, incluindo diferentes gradientes de temperatura na secaria, variação da umidade relativa na folha e tensões mecânicas nas fibras, por isso as resultantes dessas variáveis ligadas torna difícil a análise e entendimento (BORTOLIN, 2002).

Neste trabalho, foram feitas redes neurais artificiais (RNA) para a variável encanoamento diagonal. *Outputs* da RNA representam as medições laboratoriais, da propriedade encanoamento diagonal, no total de 3 pontos do

perfil transversal da máquina de papel. Sendo representados pelas duas laterais e o ponto central. O objetivo desse trabalho é formular uma rede neural capaz de prever o fenômeno do encanoamento diagonal em uma máquina industrial de papel cartão sendo apta para rodar como um sensor virtual.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Metodologia utilizada nesse trabalho foi semelhante às propostas por (EDWARDS et al., 1999; BORTOLIN, 2002; PESCH, 2005; VIEIRA 2009) e demais autores que modelaram redes neurais artificiais para diversas propriedades do papel.

2.1 Caracterização do material

Os cartões revestidos com três camadas, utilizados nesse estudo foram os Folding Box Board (FBB): CKF9185, CKF9227, CHD9258, CKQ9268, CKF9296, CHW9298 e CKF9320, respectivamente com gramatura nominal de 185, 227, 258, 268, 296, 298 e 320 g/m².

2.2 Identificação das variáveis de entrada

Dentre as variáveis listadas na Tabela 5 foram priorizadas as inerente as caixas de entrada, tais como: a relação velocidade do jato e tela (VJ/VT), pressão, abertura e afastamento do lábio; dosagem de amido e aditivos (Breu e AKD), aplicados em cada camada do papel; variáveis da secaria, expressas como diferencial de pressão entre cilindros secadores; Shopper Riegler das matérias primas utilizadas na produção dos cartões; e propriedades do cartão como: gramatura, gramatura de revestimento, espessura, umidade, TSI e TSO. A listagem completa das variáveis pode ser visualizada na Tabela 5.

Tabela 5 – Variáveis do processo com influência no encanoamento diagonal dos cartões.

Descrição	Tag	Unidade
ENCANOAMENTO 50% U.R. Posição 1	50_09_Encan50_1	mm
ENCANOAMENTO 50% U.R. Posição 5	50_09_Encan50_5	mm
ENCANOAMENTO 50% U.R. Posição 10	50_09_Encan50_10	mm
TSO Ângulo p01-02	50_09 506p01-02	°
TSO Ângulo p09-10	50_09 506p09-10	°
TSO Ângulo p19-20	50_09 506p19-20	°
TSI MD/CD p01-02	50_09 500p01-02 / 50_09 501p01-02	kNm/g
TSI MD/CD p09-10	50_09 500p09-10 / 50_09 501p09-10	kNm/g
TSI MD/CD p19-20	50_09 500p19-20 / 50_09 501p19-20	kNm/g
Ângulo da orientação das fibras_Base_049-070	39PERFANGULOFOBOTF4_049-070	°
Ângulo da orientação das fibras_Base_265-286	39PERFANGULOFOBOTF4_265-286	°
Ângulo da orientação das fibras_Base_535-556	39PERFANGULOFOBOTF4_535-556	°
Ângulo da orientação das fibras_Cobertura_049-70	39PERFANGULOFOTOPF4_049-70	°
Ângulo da orientação das fibras_Cobertura_265-286	39PERFANGULOFOTOPF4_265-286	°
Ângulo da orientação das fibras_Cobertura_535-556	39PERFANGULOFOTOPF4_535-556	°
Ratio da orientação das fibras_Base_049-70	39PERFORIENTFOBOTF4_049-70	
Ratio da orientação das fibras_Base_265-286	39PERFORIENTFOBOTF4_265-286	
Ratio da orientação das fibras_Base_535-556	39PERFORIENTFOBOTF4_535-556	
Ratio da orientação das fibras_Cobertura_049-70	39PERFORIENTFOTOPF4_049-70	
Ratio da orientação das fibras_Cobertura_265-286	39PERFORIENTFOTOPF4_265-286	
Ratio da orientação das fibras_Cobertura_535-556	39PERFORIENTFOTOPF4_535-556	
Shopper Riegler Camada Base	50_09SR_TQB	°SR
Shopper Riegler Camada Cobertura	50_09SR_TQC	°SR
Shopper Riegler Camada Meio	50_09SR_TQM	°SR
Performance MP9	39_Performance	
Velocidade Enroladeira Pope	392M3820_D115_VEL	m/min
Gramatura	9GRM_cond_ROLO_F1	g/m ²
Gramatura Revestimento	39_Tinta_Total_Medido	g/m ²
Espessura	9ESP_ROLO_F1	µm
Umidade	9UMID_ROLO_F1	% a.s.
Orientação Rolo Base	9ORIENT_rolot_bot_F4	
Orientação Rolo Cobertura	9ORIENT_rolot_top_F4_FATOR	
% Fibra Longa Refinada Meio	392PCT_PB_MV	%
Cola Breu Base	392FIC3001_CONS_ESP_BASE	kg/ton
Cola Breu Meio	392FIC3002_CONS_ESP_MEIO	kg/ton
Cola Breu Cobertura	392FIC3003_CONS_ESP_COB	kg/ton
Cola AKD Base	392FIC3014_CONS_ESP_BASE	kg/ton
Cola AKD Meio	392FIC3013_CONS_ESP_MEIO	kg/ton
Cola AKD Cobertura	392FIC3029_CONS_ESP_COB	kg/ton
Abertura Lábio Base	392ZT2195A_AO01	mm
Afastamento Lábio Base	392ZT2195B_AO01	mm
Pressão Cx. Entrada Base LC	392PT2194A	kPa

Pressão Cx. Entrada Base LA	392PT2194B	kPa
Fluxo Total Cx. Entrada Base	391_FLUXOTOTAL_CALC_CX_ENTRADA_LB	l/min
VJ Calculado da Base	392PIC2194_AO03	
VJ/VT Linha Base MP9	392VJ_VT_BASE	
Abertura Lábio Meio	392ZT2063A_AO01	mm
Afastamento Lábio Meio	392ZT2063B_AO01	mm
Pressão Cx. Entrada Meio LC	392PT2064A	kPa
Pressão Cx. Entrada Meio LA	392PT2064B	Kpa
Fluxo Total Cx. Entrada Meio	391_FLUXOTOTAL_CALC_CX_ENTRADA_LM	l/min
VJ Calculado da Meio	392PIC2064_AO03	
VJ/VT Meio	392VJVT_MEIO	
Abertura Lábio Cobertura	392ZT2061A_AO01	mm
Afastamento Lábio Cobertura	392ZT2061B_AO01	mm
Pressão Cx. Entrada Cobertura LC	392PT2062A	kPa
Pressão Cx. Entrada Cobertura LA	392PT2062B	kPa
Fluxo Total Cx. Entrada Cobertura	391_FLUXOTOTAL_CALC_CX_ENTRADA_LC	l/min
VJ Calculado da Cobertura	392PIC2062_AO03	
VJ/VT Linha Cobertura MP9	392VJ_VT_COB	
Module Edge Comando Base	392FT2141A	l/min
Module Edge Acionamento Base	392FT2141B	l/min
Transmissor de pressão LC prensa alisadora	392PT5546A	kNm
Contra prensa	392PT5546B	kNm
Transmissor de pressão LA prensa alisadora	392PT5546C	kNm
Conc Amido Cozido	MP9_T_AMIDO_COZ_CONC	%
Vapor 6º Grupo Inferior	392PIC4046_MV	bar
Pres. Dif. 6º Gr Inf	392PDIC4047_MV	bar
Pressão Vapor 6º Grupo	392PIC4048_MV	bar
Pres. Dif. 6º Gr Sup	392PDIC4049_MV	bar
BIAS 6º Grupo	392BIAS_GRUPO6	

2.3 Coleta dos dados históricos do processo de produção dos cartões

Para realização deste trabalho utilizou-se, como fonte de informações, a base de dados da Máquina de Papel nº9 (MP9) disponível internamente através de servidor PI (Plant Information), OSIsoft®, utilizado pela Klabin Papéis unidade Monte Alegre.

Os modelos do encanoamento diagonal foram desenvolvidos a partir de dados históricos do período de 3 anos de operação da MP9, respectivos somente ao produto mencionado anteriormente. Totalizando 2914 medições de cada variável, tempo suficiente para captar a dinâmica do processo e gerar a quantidade de dados necessária para análises confiáveis. Os *outliers* foram

removidos de acordo com boletins diários indicando falha ou desvios no processo produtivo.

Os dados abrangem análises de laboratório das amostras coletadas 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.

Tabela 6 – Mapeamento dos pontos de coleta das amostras

Setor	Posição	Databox
LC	Inicial	49
	Final	70
M	Inicial	265
	Final	286
LA	Inicial	535
	Final	556

O *delay* (atraso) entre input e outputs também foi uma variável calculada. A partir do comprimento total da folha na máquina e da vazão e diâmetro das tubulações, o tempo médio de atraso foi estimado para cada seção do conjunto de dados. Correspondendo a 1 minuto para as variáveis da caixa de entrada e 2 minutos para aplicação de químicos responsáveis pela colagem interna dos cartões.

2.4 Software

O Property Predictor[®] provem todas as ferramentas necessárias para se desenvolver e programar sensores virtuais de alta precisão (PAVILION, 2011). Tais 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

2.5 Pré-processamento dos dados

Para aumentar a confiabilidade dos dados, alguns cuidados foram tomados para eliminar possíveis problemas, tais como: erros de leitura no instrumento, paradas na produção e produção inferior ao padrão estabelecido pela empresa. Pré-processamento dos dados baseou-se na eliminação de *outliers*.

2.5.1 Treinamento das redes neurais

O critério mais importante para o sucesso do treinamento e otimização da rede neural é uma generalização precisa. Deverá ser tomado cuidado com a memorização dos dados de entrada. Um conjunto de validação é criado a partir dos dados de treinamento ou uma seqüência de dados aparte com *outputs* conhecidos. Isso então é usado para checar a precisão da rede neural treinada. O processo de selecionar o final da rede, e a formação e otimização envolvidos, requer uma serie de etapas. Estas etapas envolve grau de aprendizado, distribuição do peso inicial, números de nós nas várias camadas e o número de camadas em si, ou seja, uma quantidade significativa de tentativas e erros envolvidos para testar todo tipo de rede para que haja a melhor combinação de parâmetros.

O conjunto de treinamento deve ser variado e conter o espectro inteiro do problema em questão a ser representado.

2.5.2 Análise do modelo

A análise do modelo foi realizada com base na equação de erro médio relativo e no coeficiente de correlação linear (VIEIRA, 2009). Considera que valores com erro relativo médio abaixo de 10% indicam um razoável ajuste e aceites para as práticas propostas.

$$E = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|M_i - Mp_i|}{M_i}$$

Equação 9 – Erro médio relativo

Donde E é o erro médio relativo, M_i são valores obtidos experimentalmente, Mp_i representam os valores preditos pelo modelo e n é o número de dados experimentais.

Coefficiente de Correlação Linear (R^2) entre o valor predito para a propriedade e seu valor verdadeiro. É a medida estatística para mensurar a força da relação entre os valores atuais e os preditos, variando de +1 a -1. Quanto mais próximo de 1, mais forte é a relação linear positiva, próximo a -1 a relação é fortemente negativa. Este coeficiente é definido como

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

Equação 10 – Coeficiente de correlação linear

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 à 1.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do conjunto de dados

A utilização de um maior número de gramaturas não surtiu efeito positivo nas correlações dos modelos. Devido a isso, optou-se por modelar apenas os valores dos produtos: CKF9227, CKQ9268 e CKF9320, as quais correspondem ao máximo, mínimo e média perda para a propriedade estudada exemplificado na Figura 22.

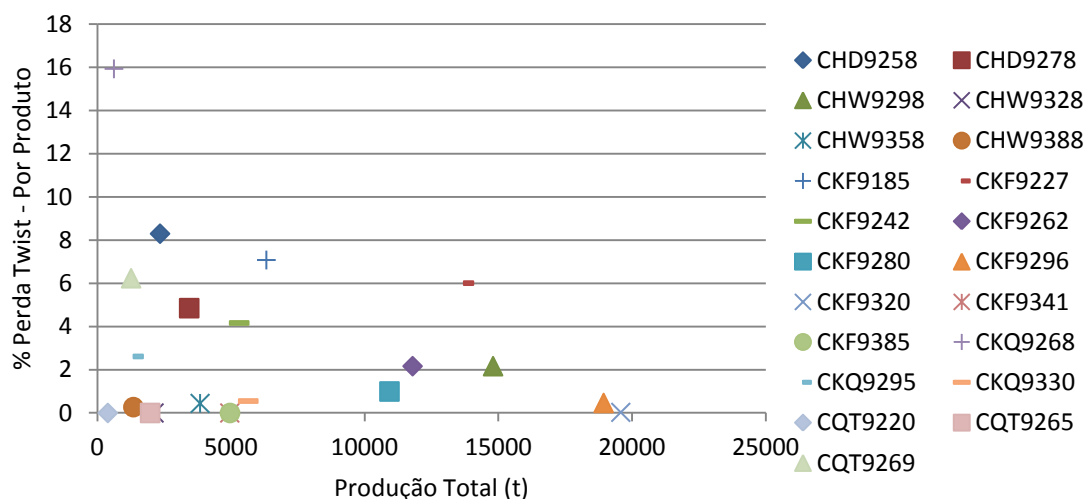


Figura 22 – Distribuição da produção de cartões (CB e FBB) na MP9

3.2 Pré-processamento dos dados

Na Figura 23, pode ser observado o processo de remoção de *outliers*. A tag analisada é a medição do desempenho da máquina. Os pontos em vermelho correspondem a valores que estavam variando entre 0 e menores que 2. Em nosso procedimento esses pontos foram eliminados do *dataset* por conter informação imprecisa. Sendo constituído por dados gravados quando a máquina estava em processo de reinício de eventual parada, quebra ou rompimento da folha, o que não representa uma operação normal.

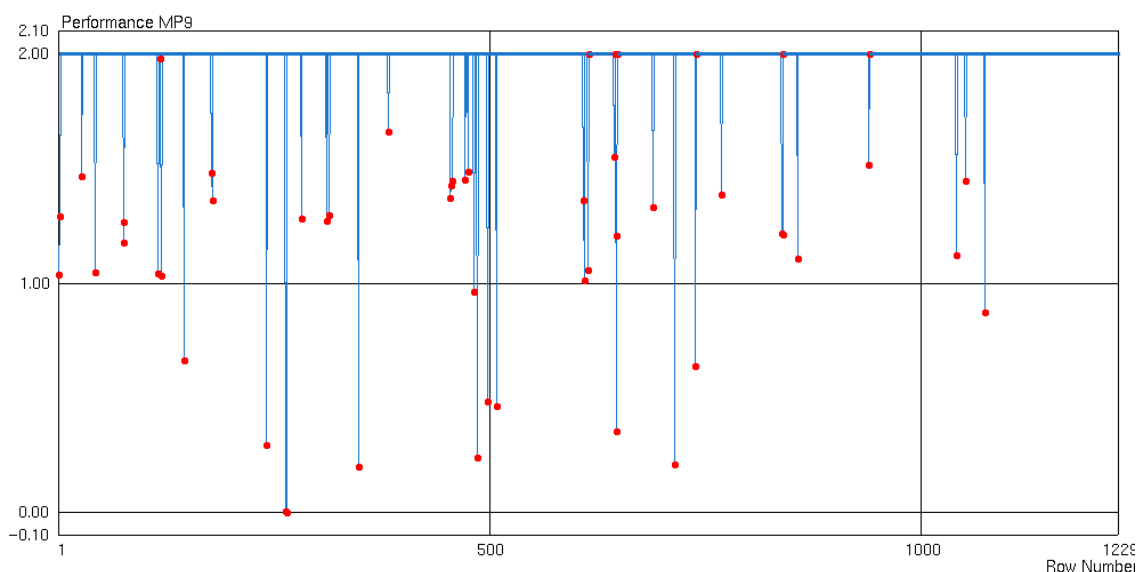


Figura 23 – Remoção de *outliers*

Após remoção de *outliers* restaram 796, 803 e 802 conjuntos de dados capazes de representar o processo, respectivamente para as posições LC, M e LA.

3.3 Treinamento da rede neural

A arquitetura do modelo baseado em rede neural foi composta por 62 variáveis de entrada, uma variável de saída e 20 neurônios na camada intermediária. A RNA foi treinada utilizando uma *Multi-Layer Perceptron* com 3 camadas. O algoritmo padrão, utilizado pelo software, para o treinamento da RNA foi do tipo *backpropagation*, com o período de 10000 épocas.

A Tabela 3, representa a distribuição dos padrões usados para o treinamento de cada rede neural para criação dos modelos. Optou-se por escolher um algoritmo padrão para utilizar 78% dos dados para treinamento da rede, 15% usados para o teste e o restante (7%) para a validação do modelo.

Tabela 3 – Distribuição dos padrões, na criação dos modelos

	Treinamento	Teste	Validação	Total
LC	584	118	94	796
M	586	121	96	803
LA	586	120	96	802

A Tabela 4 mostra os melhores resultados de cada rede no momento do treinamento. Os melhores resultados foram obtidos até 30% do tempo estipulado, sendo, 485 épocas para o LC, 2533 épocas para o meio de máquina e 2866 épocas para a RNA do LA.

Tabela 4 – Erro relativo das etapas de treinamento da rede

		Erro Relativo	R ²
LC	Treinamento	0.727	0.472
	Teste	0.693	0.520
M	Treinamento	0.643	0.586
	Teste	0.769	0.408
LA	Treinamento	0.572	0.673
	Teste	0.757	0.427

A criação de três RNA para o perfil do papel na máquina na direção CD foi feita para utilizar ao máximo os controles de orientação de fibras instalados nas laterais das caixas de entrada. Extrapolar os valores médios do perfil, ou de um segmento, resultaria num modelo incapaz de representar o processo, possuindo ou não, coeficientes de correlação elevados, pois a rede neural artificial estaria modelando dados e não o processo em si.

3.4 Valores preditos confrontados com os reais

A linha central nas Figura 24, Figura 26 e Figura 28 representa o modelo perfeito. As linhas paralelas são 3 desvios padrões em relação a linha central. A linha vermelha indica o melhor enquadramento dos dados nos modelos. Assim, a comparação entre os valores preditos e reais são mostrados nas Figura 25, Figura 27 e Figura 29.

O modelo criado para os *inputs* referentes ao lado de comando da máquina, representado na Figura 24, obteve um coeficiente de correlação linear de 0,426. Como uma regra geral, um R^2 igual ou maior que 0,35 indica que o modelo é satisfatório para predição e recomendação de setpoint. A mesma regra pode ser feita para o erro relativo, caso for menor ou igual a 0,8 (PAVILION, 2004).

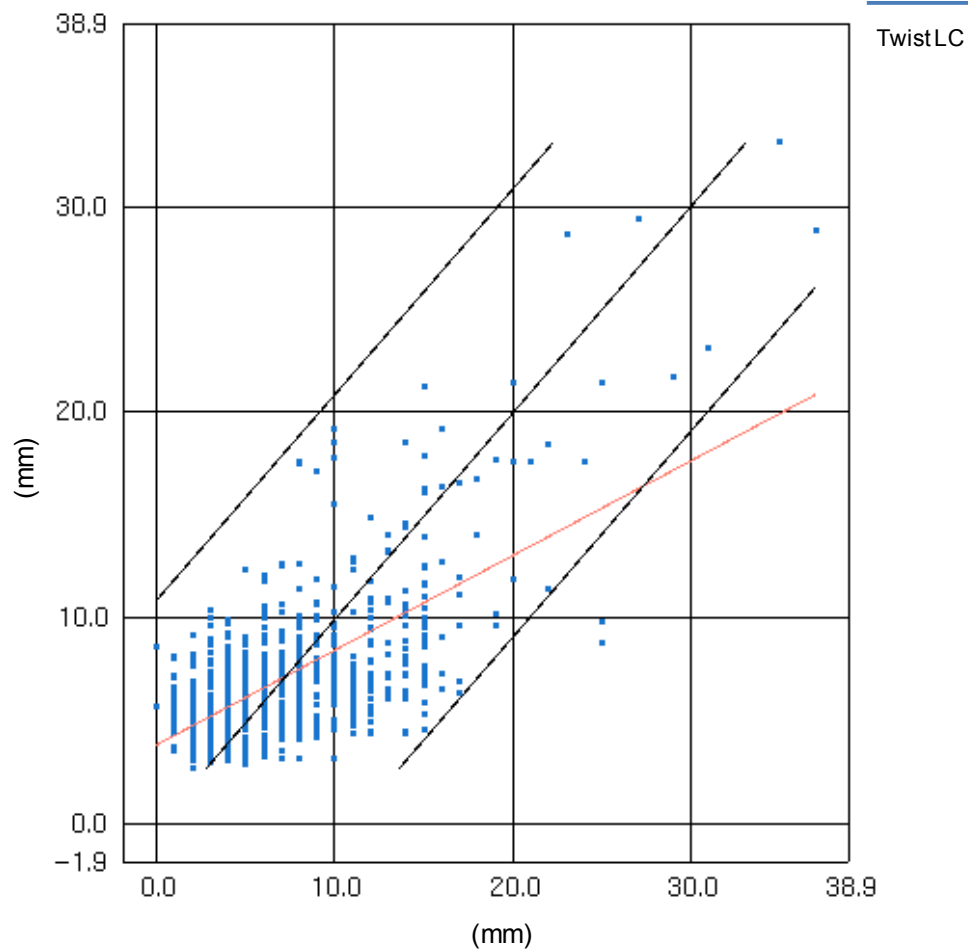


Figura 24 – Predito x Real para a saída: Encanoamento diagonal LC

Os resultados dos valores reais e preditos destoam da linha em vermelho, relativo ao modelo perfeito (linha central). Os valores distantes do conjunto de dados, ou seja, fora das duas linhas paralelas à central não puderam ser considerados como *outliers* pela falta de informações.

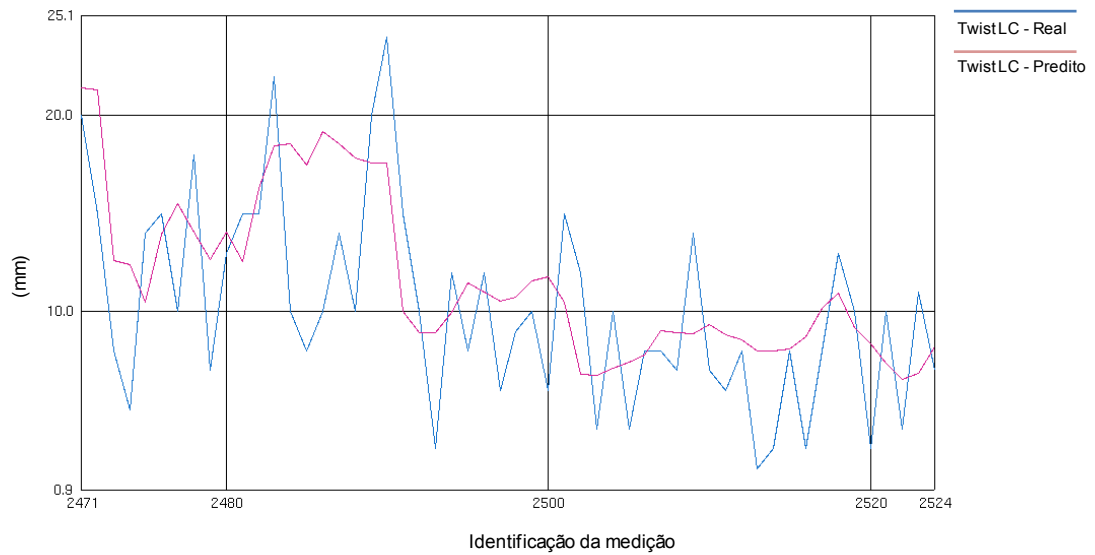


Figura 25 – Comparação entre o valor predito e o real (LC)

Na Figura 25 notamos a tentativa do modelo em buscar, dentro do *dataset*, os valores obtidos nas medições laboratoriais.

O modelo criado para os *inputs* referentes ao meio da máquina, representado na Figura 26, obteve um R^2 de 0,557. Satisfazendo a condição estabelecida pelo fabricante do software.

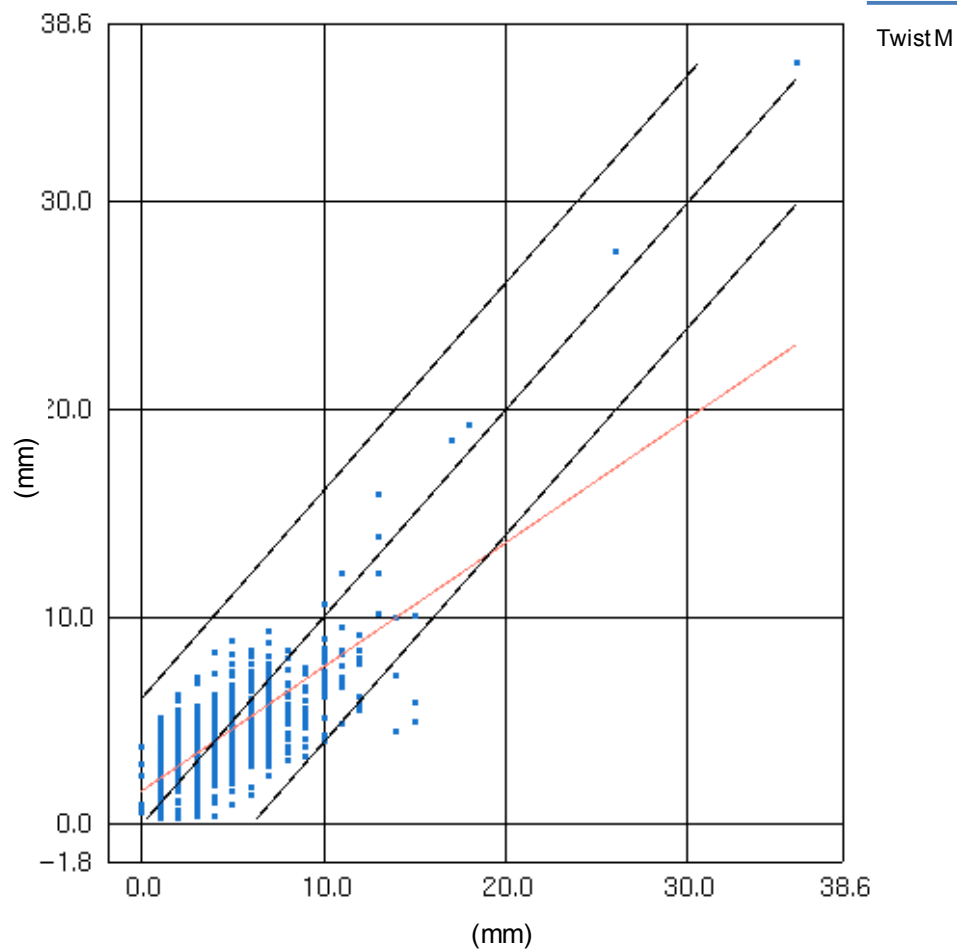


Figura 26 – Predito x Real para a saída: Encanoamento diagonal M

Os pontos fora da marcação de 3 desvios padrões, Figura 26, não puderam ser confirmados como *outliers* devido à inexistência de fatos que comprovavam a discrepância dos dados.

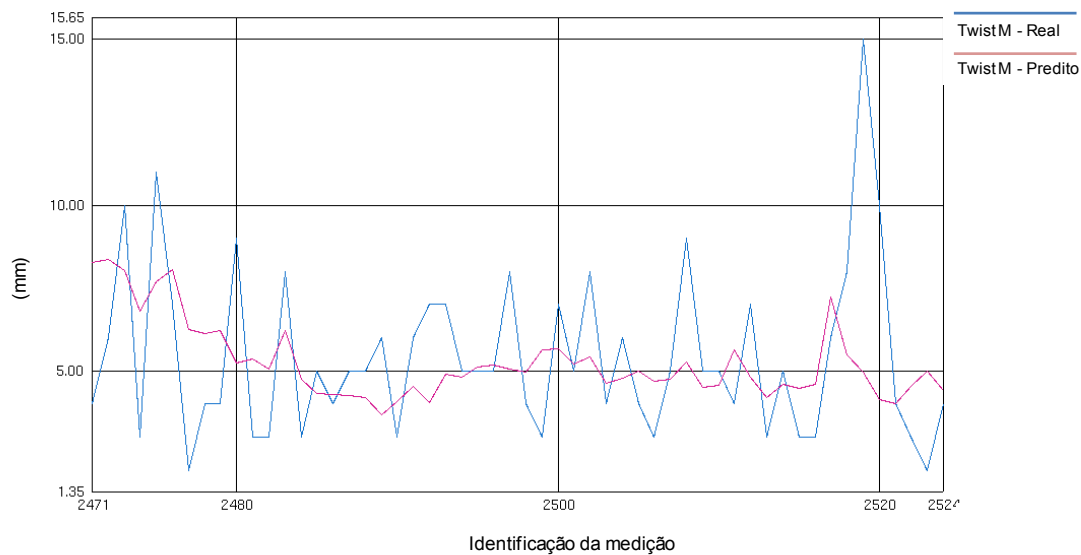


Figura 27 – Comparação entre o valor predito e o real (M)

A dificuldade do modelo de captar os picos de medição entre os valores reais e preditos é oriunda dos dados fora dos limites dos desvios padrão aceitos.

O modelo criado para os *inputs* referentes ao lado de acionamento da máquina, representado na Figura 28, obteve um coeficiente de correlação linear de 0,597.

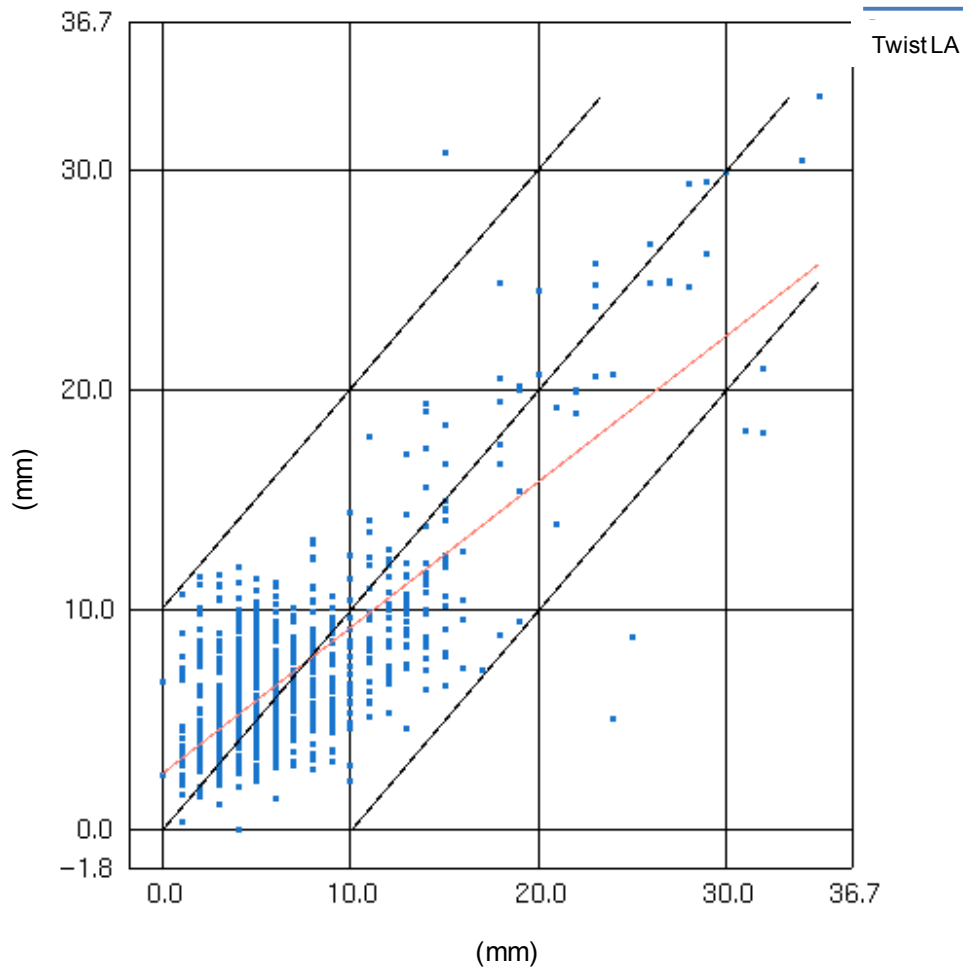


Figura 28 – Predito x Real para a saída: Encanoamento diagonal LA

Os valores distantes do conjunto de dados não puderam ser considerados como *outliers* pela falta de informações. A exclusão dos mesmos favoreceria o desempenho, mas acarretaria em perda de confiança do modelo.

Os resultados dos valores reais e preditos destoam da linha, em vermelho, relativo ao modelo perfeito (linha central).

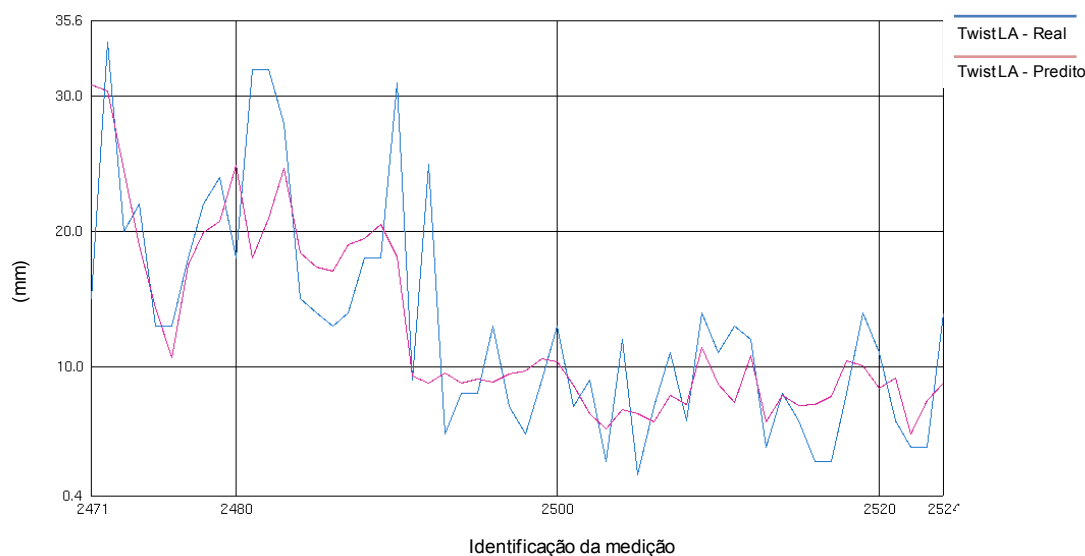


Figura 29 – Comparação entre o valor predito e o real (LA)

Considerando os resultados das análises apresentados nas Figura 24 a Figura 29, observamos na Figura 24 a maior variação dos resultados em relação aos outros modelos obtidos. Devido a isso, o modelo encontrado com os dados do lado dos comandos da máquina apresentou o menor valor de coeficiente de correlação.

4. CONCLUSÃO

Para a base de dados analisada neste estudo, as conclusões a seguir podem ser estabelecidas:

A aplicação de uma rede neural, do tipo caixa preta, foi suficiente para prever a propriedade de encanoamento diagonal. Todos os modelos obtiveram valores de correlação acima do estipulado como mínimo recomendável pelo fabricante do software.

A melhor correlação aconteceu no *dataset* utilizado para criar o modelo do lado de acionamento da máquina, predizendo de forma mais efetiva a variável.

Com a RNA estruturada, será possível inseri-lá em um sensor virtual para o acompanhamento, em tempo real, das variações do processo. Esperamos, com isso, evitar perdas devido a espera entre as análises laboratoriais do encanoamento diagonal.

Como as amostras, para realização do teste laboratorial do encanoamento diagonal, são feitos ao final de cada rolo jumbo, os operadores tem que confiar em seu conhecimento empírico do processo para manter a variável dentro dos limites estipulados. Como a estruturação da RNA apta para ser usada em um sensor virtual, eliminaríamos o tempo entre rolos para conhecer a real situação da propriedade estudada e observaríamos a variação de minuto em minuto através do sensor *online*.

O impacto positivo, desta implementação, será oriunda do benefício financeiro proveniente da não desclassificação do papel produzido. Auxiliando-nos nas taxas de acompanhamento de performance, qualidade e disponibilidade da máquina de papel. Implicando em manutenção da receita previamente estipulada além de evitar possíveis reclamações de clientes pelo descrédito de entregar produto fora da especificação.

Portanto, o modelo matemático desenvolvido neste trabalho constitui uma ferramenta palpável para predição do encanoamento diagonal.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORTOLIN, G. **On Modelling and Estimation of Curl and Twist in Multi-ply Paperboard**. 2002. 106. Doctor. Royal Institute of Technology. Stockholm.

EDWARDS, P. J., A. F. MURRAY, et al. The application of neural networks to the papermaking industry. **IEEE transactions on neural networks / a publication of the IEEE Neural Networks Council**, 10, (6), 1456-1464, 1999.

HECHT-NIELSEN, R. **Neurocomputing**. Addison-Wesley Publishing Company (1990)

NISKANEN, K. and I. KAJANTO. **Dimensional Stability**. 16 Finland, Paperi ja Puu Oy (2008)

PAVILION (2004). Property Predictor 7 - User's guide. I. Pavilion Technologies. **Version 7.1**.

PAVILION (2011). Analyze - Reference manual. R. Automation. **v 3.7.5**.

PESCH, L. R. **Uma Estrutura para Controle de Umidade na Fabricação de Papel**. 2005. 76. Mestre em Engenharia Química. Universidade Estadual de Maringá. Maringá.

VIEIRA, O. **Construção de modelos empíricos e projeto da operação de uma máquina de produção de cartão de embalagem**. 2003. 169. Doutor em Ciências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.

4 CONCLUSÃO GERAL

Para a base de dados analisada as conclusões a seguir podem ser estabelecidas:

Os dados revelam um potencial, para a operação da máquina de papel, na tomada eficaz de decisão no momento de correções por perdas devido ao encanoamento diagonal.

Sugerimos para a equipe de produção da máquina que é melhor utilizar as ferramentas de atuação da máquina de papel. Mudanças no VJ/VT acarretam muita influência na orientação de fibras, e não está sendo utilizado com a devida frequência.

Desmitificar a relação entre a correção do perfil de encanoamento diagonal com atuação na secaria, resguardando esse artifício para devida atuação em encanoamento.

Saber usar as variáveis (Fluxo total, vazão Module Edge, Abertura e Afastamento do lábio aliadas principalmente a relação Jato/Tela) com parcimônia impede equívocos na correção do perfil de encanoamento diagonal.

A aplicação de uma rede neural, do tipo caixa preta, foi suficiente para prever a propriedade de encanoamento diagonal. Todos os modelos obtiveram valores de correlação acima do estipulado como mínimo recomendável pelo fabricante do software.

A melhor correlação aconteceu no *dataset* utilizado para criar o modelo do lado de acionamento da máquina, predizendo de forma mais efetiva a variável.

Com a RNA estruturada, será possível inseri-lá em um sensor virtual para o acompanhamento, em tempo real, das variações do processo. Esperamos, com isso, evitar perdas devido a espera entre as análises laboratoriais do encanoamento diagonal.

Como as amostras, para realização do teste laboratorial do encanoamento diagonal, são feitos ao final de cada rolo jumbo, os operadores tem que confiar em seu conhecimento empírico do processo para manter a variável dentro dos limites estipulados. Como a estruturação da RNA apta para ser usada em um sensor virtual, eliminaríamos o tempo entre rolos para conhecer a real situação da propriedade estudada e observaríamos a variação de minuto em minuto através do sensor *online*.

O impacto positivo, desta implementação, será oriunda do benefício financeiro proveniente da não desclassificação do papel produzindo. Auxiliando-nos nas taxas de acompanhamento de performance, qualidade e disponibilidade da máquina de papel. Implicando em manutenção da receita previamente estipulada além de evitar possíveis reclamações de clientes pelo descrédito de entregar produto fora da especificação.

Portanto, o modelo matemático desenvolvido neste trabalho constitui uma ferramenta palpável para predição do encanoamento diagonal.