



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

*Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos*

# Otimização do setor de prensagem por meio de planejamento de produção em uma indústria de papel

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

*Aluna: Daniela Medeiros Devienne Drummond*

*Orientador: Prof.Dr.Reginaldo Guirardello - Unicamp*

*Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Teresa Moreira Rodrigues – Unicamp*

*Co-Orientador: Prof. Ignacio E. Grossmann – Canergie Mellon University*

CAMPINAS – SÃO PAULO

*Junho/2008*

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -  
UNICAMP

D844o Drummond, Daniela Medeiros Devienne  
Otimização do setor de prensagem por meio de  
planejamento d produção em uma indústria de papel /  
Daniela Medeiros Devienne Drummond.--Campinas, SP:  
[s.n.], 2008.

Orientador: Reginaldo Guirardello, Maria Teresa  
Moreira Rodrigues, Ignácio E. Grossmann  
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Otimização matemática. 2. Papel – Indústria. 3.  
Programação (Matemática). 4. Máquinas para confecção  
de papel. 5. Prensas mecânicas. 6. Planejamento da  
produção. I. Guirardello, Reginaldo. II. Rodrigues,  
Maria Teresa Moreira. III. Grossmann, Ignácio E.. IV.  
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Química. V. Título.

Título em Inglês: Optimization and production programming of the press  
section in a paper industry

Palavras-chave em Inglês: Optimization, Press section, Paper machine,  
MINLP, GAMS

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

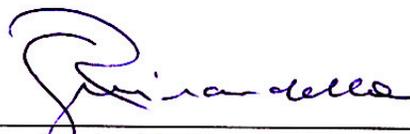
Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora: Liliane Maria Ferrareso Lona, Ana Maria Frattini  
Fileti, Heizir Ferreira de Castro, Jorge Andrey  
Wilhelms Gut

Data da defesa: 18/06/2008

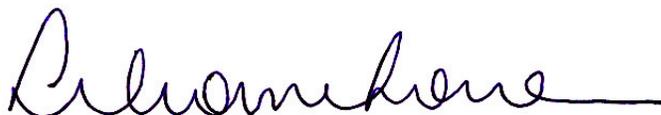
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado defendida por *Daniela Medeiros Devienne Drummond* e aprovada em *18 de Junho de 2008* pela banca examinadora constituída pelos Doutores:



---

Prof. Dr. Reginaldo Guirardello



---

Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Liliane Maria Ferrareso Lona



---

Prof. Dr. Ana Maria Frattini Fileti



---

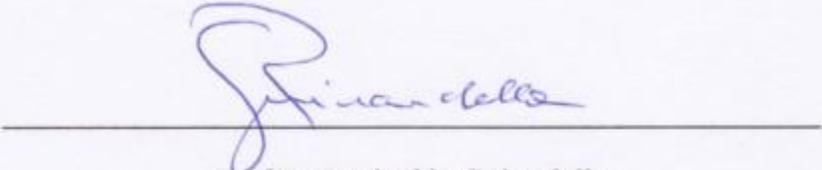
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Heizir Ferreira de Castro



---

Prof. Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut

Este exemplar corresponde à versão final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida por ***Daniela Medeiros Devienne Drummond*** e aprovada pela comissão julgadora em 18 de Junho de 2008.



Prof.Dr.Reginaldo Guirardello  
(Orientador)

# DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho ao meu marido Jair José por sempre ter me apoiado e incentivado nos desafios de minha vida e ao meu filho Thiago pelo seu carinho, compreensão e pelas palavras de amor durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu pai Roberto, minha mãe Maria Isabel e meu irmão Roberto.

# AGRADECIMENTOS

A DEUS pela vida.

Ao meu marido e filho pelo amor, incentivo e paciência.

Aos meus pais e irmão pelo carinho.

Ao Professor Reginaldo Guirardello pela paciência e orientação.

A Professora Maria Teresa Moreira Rodrigues, pela co-orientação e participação no desenvolvimento deste trabalho

Ao Professor Ignácio E. Grossmann pela co-orientação e participação no desenvolvimento deste trabalho e pela participação de seu grupo de pesquisa CAPD.

AO CNPQ (Centro Nacional de Pesquisa) pela bolsa de Doutorado e pela bolsa do Doutorado Sanduíche realizado na Carnegie Mellon University.

Aos amigos do grupo CAPD da CMU – Carnegie Mellon University, pela ajuda e carinho recebido, especialmente aos amigos Dr. Ricardo Lima e Eng<sup>a</sup> Rosanna Franco.

Aos amigos do LSOPQ, Consuelo, Stella e Fábio por sempre ter estado ao meu lado.

A colaboração para o desenvolvimento desta Tese dos amigos Eng. Luiz Gustavo Elisei e Eng. Edson Oliveira.

**“ Louvem ao Senhor, todas as nações;  
Exaltem-no, todos os povos!  
Porque imenso é o seu amor leal por nós,  
E a fidelidade do Senhor dura para sempre.”**

**Salmo 117: 1-2**

## RESUMO

A seção de prensagem é uma importante parte da máquina de papel, afetando as propriedades do produto, bem como interferindo no custo final de fabricação. O setor de prensagem é responsável pela retirada da água da folha, através de ação mecânica no NIP (zona de contato entre por dois rolos). Baixa eficiência deste setor acarreta inconveniente como à elevação do número de quebras da folha, pela diminuição da resistência à tração; aumento no consumo de vapor na seção secadora da máquina, e em muitos casos, a redução da produtividade devido à redução da velocidade da máquina. A eficiência da prensagem é muito importante: primeiro, uma grande quantidade de água deve ser removida da folha nas prensas para se obter economia na secagem; em segundo lugar, a maior eficiência na remoção de água produz uma folha mais seca e, portanto, mais resistente e menos sujeita a quebras. Na entrada das prensas, o conteúdo seco da folha varia entre 18 a 26 % e na saída varia entre 44 até 50 %.

Nos últimos anos, observou-se uma evolução bastante rápida dos conceitos de prensas, buscando uma adequação das exigências tais como economia no processo operacional, aumentando a remoção de água neste setor e ao mesmo tempo mantendo ou melhorando as características da folha de papel; e ainda novas demandas de eficiências exigidas nas máquinas. A redução de 1% de umidade da folha provoca uma redução do consumo de vapor na ordem de 4 a 5%. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático para otimização do setor de prensagem de uma máquina de papel através do seqüenciamento de produção de bobinas. O modelo foi desenvolvido em MILNP, o software utilizado para a modelagem foi o GAMS e o solver utilizado foi CPLEX10. Obtivemos uma redução média 46% nas trocas de feltros, juntamente com um aumento de 5% na remoção de água e 12% na produção de bobinas.

Palavras Chave: Otimização, Setor de Prensagem, Máquina de Papel, MILNP, GAMS.

## ABSTRACT

The process of paper manufacture is essentially the removal mechanics of a fiber suspension, starting in the formation where relatively low level of force mechanics is used to remove the free water between staple fibers. The biggest force mechanics used for continuous removal of this water is in the section of presses, where the located one between them in such a way involves the compression of the leaf for water withdrawal of the interior of staple fibers how much. The more compressed the leaf, greater the amount of water is removed. The pressing is made with the leaf in contact with one or two felts in NIP (zone of contact between two rolls). The press sector is an important part of the machine, affecting the properties of the paper, as the smoothness and the density, as well as intervening with the final cost of manufacture. Low efficiency of this sector causes inconvenience as to the rise of the number of in additions the leaf, for the reduction of the tensile strength; increase in the vapor consumption in the drying section, and in many cases, the reduction of the productivity due to reduction of the speed of the machine. The reduction of 1% of humidity of the web the reduction of the steam consumption in the order of 4 5%. This work has as objective the development of a mathematical model for optimization of the press section of a machine of paper through the sequence of production of reels. The model was developed in MILNP, the software used for the modeling was the used GAMS and solver was CPLEX10. We got an average reduction 46% in the replacement of felts, together with an increase of 5% in the removal of water and 12% in the production of reels.

Keywords: Optimization, Press section, Paper machine, MILNP, GAMS.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XIV</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>XVIII</b>
<b>CAPÍTULO 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTO.....	1
1.2. OBJETIVO E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	3
<b>CAPÍTULO 2 .....</b>	<b>5</b>
<b>INDÚSTRIA DO PAPEL .....</b>	<b>5</b>
2.1. HISTÓRIA DO PAPEL.....	5
2.2. PANORAMA DO SETOR.....	8
2.3. PAPÉIS PARA IMPRIMIR E ESCREVER .....	9
2.4. CLASSIFICAÇÃO DOS PAPÉIS PARA IMPRIMIR E ESCREVER.....	10
2.4.1.Papéis de Imprimir.....	10
2.4.2.Papéis de Escrever .....	12
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>13</b>
<b>MÁQUINA DE PAPEL .....</b>	<b>13</b>
3.1. MÁQUINA DE PAPEL .....	13
3.2. A FABRICAÇÃO DO PAPEL .....	15
3.3. ESQUEMA GERAL DE FUNCIONAMENTO DE UMA FABRICAÇÃO DO PAPEL.....	15
3.3.1. Preparação de Massa .....	15
3.3.2. Caixa de Entrada.....	16
3.3.3. Prensagem.....	16
3.3.4. Secagem.....	17
3.3.5. Calandra e Enroladeira .....	18

## **CAPÍTULO 4.....19**

<b>PRENSAGEM.....</b>	<b>19</b>
4.1. SETOR DE PRENSAGEM .....	19
4.2. PRINCÍPIO DA PRENSAGEM.....	20
4.2. PRENSAS DA MÁQUINA DE PAPEL.....	21
4.3. TEORIA DE PRENSAGEM.....	21
4.4. TIPOS DE NIP DE PRENSAGEM .....	23
4.5. FUNÇÃO DAS PRENSAS.....	23
4.6. EVOLUÇÃO DA PRENSAGEM.....	24
4.6.1. Prensa Plana.....	24
4.6.2. Prensas Ranhuradas .....	25
4.6.3. Prensa de Sucção .....	25
4.6.4. Prensas com Furos Cegos .....	26
4.6.5. Prensa de NIP estendido.....	26
4.6.6. Fatores que influenciam a eficiência de prensagem .....	26
4.6.7. Desaguamento de Dupla Face .....	27
4.6.8. Dupla Feltragem .....	27
4.6.9. Prensa de Alto Impulso.....	28
4.6.10. Prensas de Sapata.....	28

## **CAPÍTULO 5.....30**

<b>FELTROS.....</b>	<b>30</b>
5.1. INTRODUÇÃO .....	30
5.2. FABRICAÇÃO DE FELTROS .....	32
5.3. PROPRIEDADES TÉCNICAS DOS FELTROS .....	33
5.3.1. Espessura .....	33
5.3.2. Gramatura .....	33
5.3.3. Relação Manta/Base .....	33
5.3.4. Permeabilidade ao ar .....	33
5.3.5. Compressibilidade .....	34
5.3.6. Volume Vazio.....	34
5.4. PROBLEMAS RELACIONADOS AOS FELTROS .....	35
5.4.1. Depósitos .....	35
5.4.2. Compactação .....	36
5.4.3. Desgaste.....	37
5.4.4. Sistemas de condicionamento.....	37
5.4.5. Parada por motivos imprevistos .....	38

## **CAPÍTULO 6.....39**

<b>DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO .....</b>	<b>39</b>
6.1. ANÁLISE INICIAL DO PROBLEMA .....	39
6.2. SEQÜÊNCIA PARA DESENVOLVIMENTO DO MODELO .....	40
6.3. ANÁLISE DE PCA.....	40
6.4. INFLUÊNCIA DA CAPACIDADE DE ABSORÇÃO DOS FELTROS.....	41

6.5. CUSTO TOTAL DE OPERAÇÃO .....	43
6.5.1. Compra e troca de feltros.....	43
6.5.2. Custo de energia para prensagem e secagem.....	45
6.6. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO .....	46
6.6.1. Considerações Iniciais .....	46
6.7. SOFTWARE GAMS .....	51
6.8. SOLVER.....	52

## **CAPÍTULO 7.....53**

<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>53</b>
7.1. DADOS INDUSTRIAIS .....	53
7.2. DESCRIÇÃO GERAL DOS CASOS ESTUDADOS.....	55
7.3. PARTE I – ESTUDOS DE CASO.....	56
7.3.1. Estudo de Caso I.....	56
7.3.2. Estudo de Caso II.....	58
7.3.3. Estudo de Caso III .....	61
7.3.4. Estudo de Caso IV .....	63
7.3.5. Estudo de Caso V .....	65
7.3.6. Estudo de Caso VI.....	67
7.3.7. Estudo de Caso VII.....	69
7.3.8. Estudo de Caso VIII .....	71
7.3.9. Estudo de Caso IX .....	73
7.3.10. Estudo de Caso X .....	75
7.3.11. Estudo de Caso XI.....	77
7.3.12. Estudo de Caso XII.....	79
7.3.13. Estudo de Caso XIII .....	81
7.3.14. Estudo de Caso XIV .....	83
7.3.15. Estudo de Caso XV.....	85
7.3.16. Estudo de Caso XVI.....	87
7.3.17. Estudo de Caso XVII.....	89
7.3.18. Estudo de Caso XVIII.....	91
7.3.19. Estudo de Caso XIX .....	93
7.3.20. Estudo de Caso XX.....	95
7.3.21. Estudo de Caso XXI .....	97
7.3.22. Estudo de Caso XXII.....	99
7.4. PARTE II – ANÁLISE GERAL.....	103
7.4.1. Custos .....	103
7.4.2. Remoção de água.....	104
7.4.3. Seqüência e Aumento de Produção .....	105
7.4.4. Troca de Feltros .....	106
7.4.5. Duração de Feltros.....	107

## **CAPÍTULO 8.....109**

<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>109</b>
8.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	110

<b><u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>111</u></b>
<b><u>APÊNDICE .....</u></b>	<b><u>115</u></b>
<b><u>APÊNDICE 1 .....</u></b>	<b><u>117</u></b>
MODELO DE PRENSAGEM .....	118
<b><u>APÊNDICE 2 .....</u></b>	<b><u>123</u></b>
IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO GAMS/CPLEX 10 .....	124
<b><u>APÊNDICE 3 .....</u></b>	<b><u>131</u></b>
TABELAS AUXILIARES .....	132

## Índice de Figuras

<i>Figura 1.1: Divisão da máquina de papel.</i> .....	2
<i>Figura 3.1: Máquina de papel no passado.</i> .....	13
<i>Figura 3.2: Máquina de papel atual.</i> .....	14
<i>Figura 4.1: Secção de Prensas.</i> .....	19
<i>Figura 4.2: Princípio da prensagem.</i> .....	20
<i>Figura 4. 3: Teoria de Wahstrom.</i> .....	22
<i>Figura 4. 4: Prensa plana.</i> .....	24
<i>Figura 4. 5: Prensa ranhurada.</i> .....	25
<i>Figura 4. 6: Prensa de sucção.</i> .....	25
<i>Figura 4. 7: Prensa de furo cego.</i> .....	26
<i>Figura 4. 8: Prensa com duplo feltro.</i> .....	28
<i>Figura 4. 9: Prensa jumbo.</i> .....	28
<i>Figura 4. 10: Prensa de sapata (aberta).</i> .....	29
<i>Figura 4. 11: Prensa de sapata (fechada).</i> .....	29
<i>Figura 5. 1: Feltros do setor de prensagem.</i> .....	31
<i>Figura 5. 2: Processo de fabricação de feltros.</i> .....	32
<i>Figura 6. 1: Decaimento da porosidade com o tempo no feltro.</i> .....	42
<i>Figura 6. 2: Variáveis binárias.</i> .....	44
<i>Figura 6. 3: Custo de secagem e prensagem.</i> .....	45
<i>Figura 6.4: Balanço de massa.</i> .....	47
<i>Figura 7. 1: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso I.</i> .....	57
<i>Figura 7. 2: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso I.</i> .....	58
<i>Figura 7. 3: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso II</i> .....	60
<i>Figura 7. 4: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso II.</i> .....	60
<i>Figura 7. 5: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso III</i> .....	62
<i>Figura 7. 6: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso III.</i> .....	62
<i>Figura 7. 7: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso IV.</i> .....	64
<i>Figura 7. 8: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso IV.</i> .....	64
<i>Figura 7. 9: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso V.</i> .....	66
<i>Figura 7. 10: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso V..</i> .....	66
<i>Figura 7. 11: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso VI.</i> .....	68
<i>Figura 7. 12: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso VI.</i> .....	68
<i>Figura 7. 13: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso VII.</i> .....	70
<i>Figura 7. 14: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso VII.</i> .....	70

<i>Figura 7. 15: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso VIII</i> .....	72
<i>Figura 7. 16: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso VIII.</i> .....	72
<i>Figura 7. 17: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso IX.</i> .....	74
<i>Figura 7. 18: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso IX.</i> .....	74
<i>Figura 7. 19: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso X.</i> .....	76
<i>Figura 7. 20: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso X.</i> .....	76
<i>Figura 7. 21: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XI.</i> .....	78
<i>Figura 7. 22: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XI.</i> .....	78
<i>Figura 7. 23: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XII.</i> .....	80
<i>Figura 7. 24: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XII.</i> .....	80
<i>Figura 7. 25: Comparação de remoção de água por prensa – estudo de Caso XIII.</i> .....	82
<i>Figura 7. 26: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XIII.</i> .....	82
<i>Figura 7. 27: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XIV.</i> .....	84
<i>Figura 7. 28: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XIV.</i> .....	84
<i>Figura 7. 29: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XV.</i> .....	86
<i>Figura 7. 30: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XV.</i> .....	86
<i>Figura 7. 31: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XVI.</i> .....	88
<i>Figura 7. 32: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XVI.</i> .....	88
<i>Figura 7. 33: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XVII.</i> .....	90
<i>Figura 7. 34: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XVII.</i> .....	90
<i>Figura 7. 35: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XVIII.</i> .....	92
<i>Figura 7. 36: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XVIII.</i> .....	92
<i>Figura 7. 37: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XIX.</i> .....	94
<i>Figura 7. 38: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XIX.</i> .....	94
<i>Figura 7. 39: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XX.</i> .....	96
<i>Figura 7. 40: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XX.</i> .....	96
<i>Figura 7. 41: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XXI.</i> .....	98
<i>Figura 7. 42: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XXI.</i> .....	98
<i>Figura 7. 43: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XXII.</i> .....	99
<i>Figura 7. 44: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XXII.</i> .....	100
<i>Figura 7. 45: Remoção de água.</i> .....	104
<i>Figura 7. 46: Produção de bobinas.</i> .....	105
<i>Figura 7. 47: Troca de feltros.</i> .....	107
<i>Figura 7. 48: Duração de feltros.</i> .....	108

## Índice de Tabelas

<i>Tabela 2. 1: Produção de papéis.....</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2. 2: Produção de papel de imprimir e escrever.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabela 6. 1: Tabela de correlações .....</i>	<i>43</i>
<i>Tabela 6. 2: Dimensões dos feltros .....</i>	<i>45</i>
<i>Tabela 7. 1: Composição de troca de feltros .....</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 7. 2: Área e tempo de processamento de bobinas.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 7. 3: Dados do estudo de Caso I.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 7.4: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso I .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 7.5: Dados do estudo de Caso II.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 7.6: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso II .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 7.7: Dados do estudo de Caso III.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 7.8: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso III .....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 7.9: Dados do estudo de Caso IV.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 7.10: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso IV.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 7.11: Dados do estudo de Caso V.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 7.12: Dados do estudo de Caso VI.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 7.13: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso VI .....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 7.14: Dados do estudo de Caso VII.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 7.15: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso VII .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 7.16: Dados do estudo de Caso VIII.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 7.17: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso VIII .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabela 7.18: Dados do estudo de Caso IX.....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 7.19: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso IX .....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 7.20: Dados do estudo de Caso X.....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 7.21: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso X .....</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 7.22: Dados do estudo de Caso XI.....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7.23: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XI .....</i>	<i>77</i>
<i>Tabela 7.24: Dados do estudo de Caso XII.....</i>	<i>79</i>
<i>Tabela 7.25: Dados do estudo de Caso XIII.....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 7.26: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XIII .....</i>	<i>81</i>
<i>Tabela 7.27: Dados do estudo de Caso XIV.....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 7.28: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XIV .....</i>	<i>83</i>
<i>Tabela 7.29: Dados do estudo de Caso XV.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 7.30: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XV .....</i>	<i>85</i>
<i>Tabela 7.31: Dados do estudo de Caso XVI.....</i>	<i>87</i>

<i>Tabela 7.32: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XVI</i> .....	87
<i>Tabela 7.33: Dados do estudo de Caso XVII</i> .....	89
<i>Tabela 7.34: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XVII</i> .....	89
<i>Tabela 7.35: Dados do estudo de Caso XVIII</i> .....	91
<i>Tabela 7.36: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XVIII</i> .....	91
<i>Tabela 7.37: Dados do estudo de Caso XIX</i> .....	93
<i>Tabela 7.38: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XIX</i> .....	93
<i>Tabela 7.39: Dados do estudo de Caso XX</i> .....	95
<i>Tabela 7.40: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XX</i> .....	95
<i>Tabela 7.41: Dados do estudo de Caso XXI</i> .....	97
<i>Tabela 7.42: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XXI</i> .....	97
<i>Tabela 7.43: Dados do estudo de Caso XXII</i> .....	99
<i>Tabela 7.44: Resultados obtidos para os 22 estudo de caso – Modelo</i> .....	101
<i>Tabela 7.45: Resultados obtidos para os 22 estudo de caso – Industria</i> .....	102
<i>Tabela 7.46: Comparação dos custos anuais</i> .....	103
<i>Tabela 7.47: Valores Comparativos de porcentagem de custos e desaguamento</i> .....	103
<i>Tabela 7.48: Comparação de produção de bobinas</i> .....	106
<i>Tabela A3. 1: Resultados GAMS - Modelo</i> .....	132
<i>Tabela A3.2: Resultados GAMS - Industrial</i> .....	133

# Nomenclatura

$A_i$	área total da bobina $i$ processada
$CF_j$	custo de compra/troca do feltro $j$ (US\$/feltro)
$CP_{i,k}$	custo de energia no setor de prensagem da bobina $i$ (US\$/bobina) no intervalo $k$
$CS_{i,k}$	custo de vapor (US\$/massa de água) para a bobina $i$ no intervalo $k$
$ma_{ik}$	massa de água na saída do setor de prensagem da bobina $i$ no intervalo $k$
$m_k$	total de água evaporado no intervalo $k$
$m_k^e$	total de água na entrada do setor de prensagem no intervalo $k$
$m_k^s$	total de água na saída do setor de prensagem no intervalo $k$
$m_k^{rp}$	total de água removida na prensagem no intervalo $k$
$m_k^{sp}$	total de água na saída do setor de prensagem no intervalo $k$
$T_i$	tempo para processar a bobina $i$
$t_k$	tempo do intervalo $k$
$U_i^e$	umidade de entrada $e$ da bobina $i$ no setor de prensagem
$U_i^s$	umidade de saída $s$ da bobina $i$ na saída do setor de secagem
$u_{jk}$	variável auxiliar para o coeficiente de extração de água na prensagem $j$ no intervalo $k$
$m_{ik}^{(1)}$	massa de água na saída do setor de prensagem da bobina $i$ no intervalo $k$
$m_{ik}^{(2)}$	massa de água na saída do setor de prensagem da bobina $i$ no intervalo $k$
$M_1$	número grande (tempo total processado)
$M_2$	número grande (máxima extração de água removida)
$x_{ik}$	bobina $i$ processada no intervalo $k$
$y_{jk}$	feltro na prensa $j$ trocado no tempo inicial $k$

## *Símbolos Gregos*

$\alpha_j$	coeficiente de diminuição de uso de feltro $j$
$\lambda_{jk}$	fator de extração no feltro novo $j$ no intervalo $k$
$\varepsilon_{0,j}$	fração volumétrica no feltro novo $j$
$\theta_{jk}$	tempo de uso do feltro $j$ no início do intervalo $k$
$v_k$	variável auxiliar para água na saída do setor de prensagem no intervalo $k$
$\tau_{jk}$	tempo de uso do feltro $j$ no final do intervalo $k$
$\bar{\tau}_{jk}$	tempo de uso do feltro $j$ na metade do intervalo $k$

## Sobrescrito

$e$	entrada
$s$	saída
$rp$	retirada da prensagem
$sp$	saída da prensagem

## Subscritos

$i$	bobina
$j$	feltro
$k$	intervalo de tempo

# SIGLAS

B&B	Algoritmo Branch and Bound
GAMS	Código comercial de otimização (General Algebraic Modeling System)
MILP	Programação mista, inteira e linear
NIP	Zona de contato entre dois rolos
PCA	Análise de Componentes Principais
CFM	Unidade de permeabilidade estática do feltro
HE	Espessura da folha na entrada do NIP
HT	Redução de espessura no NIP
HM	Recuperação de espessura após o NIP
HS	Espessura resultante na folha
UWF	Papéis não revestidos à base de celulose

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. Contexto

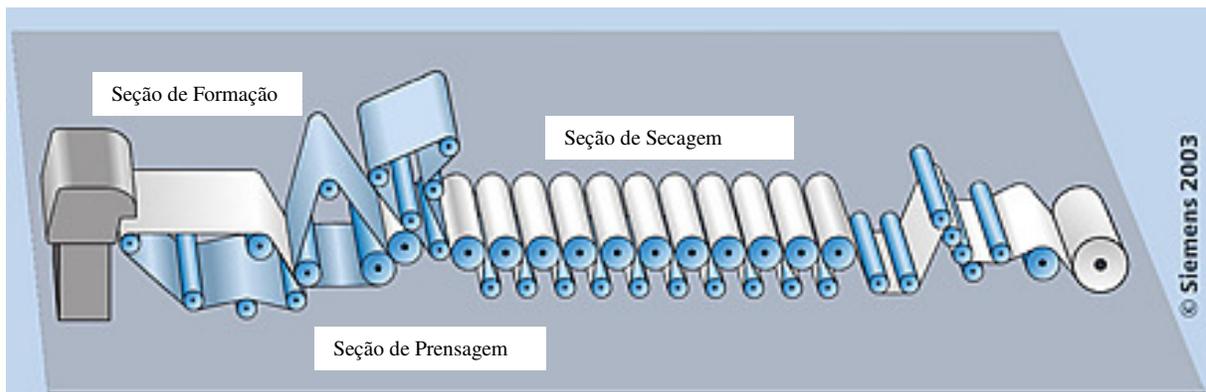
Devido ao grande interesse em otimizar partes de máquina de papel nos recentes anos, muitos trabalhos foram desenvolvidos para solução deste problema. Diversos trabalhos foram focados em otimizar diferentes partes na produção de papel, por exemplo, na área de conversão de papéis WESTERLUND (1980). Alguns autores estudaram a remoção de água no setor de prensagem, é possível achar algumas referências utilizando a prensagem do NIP de fluxo vertical WAHLSTROM (1960). Diferentes modelos matemáticos para partes de máquinas de papel podem ser estudados em KERKES (1991).

O processo de fabricação de papel é comum a qualquer planta. Inicialmente temos o preparo de massa, seguido pela formação do papel, depois o setor de prensagem para remoção de água da folha de papel, e por último a secagem da folha, através de ar quente. Em máquinas de papel, especificamente no setor de prensagem, temos duas principais funções, os feltros são responsáveis por conduzir a folha pela máquina FAROK (1991) e o NIP que é a zona de contato entre dois rolos, onde a água é transferida da folha de papel para o feltro. No setor de prensagem, objeto de estudo deste trabalho, temos uma vida média dos feltros da ordem de 35-45 dias, dependendo do tipo de feltro, visto que estes possuem diferentes características.

Consideramos neste trabalho o setor de prensagem, uma importante parte da máquina de papel, que afeta as propriedades do papel, tendo como impactando o custo final da fabricação. Baixa eficiência neste setor reduz a resistência do papel, aumenta o consumo de vapor no setor de secagem da máquina, e em alguns casos a reduz a produtividade, como consequência da menor velocidade da máquina. É mais econômico retirar água da folha de papel pelo setor de prensagem do que pela evaporação de água no setor de secagem RESSE

(2006). A redução de 1% da umidade da folha resulta na redução no consumo de vapor da ordem de 4 a 5%.

A folha de papel na seção de formação da máquina contém aproximadamente 99.5% de umidade. No setor de prensagem podemos remover água da folha mais economicamente, cerca de 20% de água, e no setor de secagem, aproximadamente 45% (Figura 1.1). Recentemente, tem sido de grande significância melhoria na operação da prensas, bem como economia nas operações das prensas, aumentar a remoção de água deste setor, e ao mesmo tempo aumentar a qualidade da folha de papel. Este trabalho descreve a minimização nas trocas dos feltros do setor de prensagem, através do sequenciamento da produção de papel, com o intuito de aumentar a remoção de água do setor de prensagem. O objetivo principal deste trabalho foi otimizar as trocas de feltros na máquina de papel, determinar um sequenciamento ótimo na produção dos diferentes tipos de papéis produzidos por esta máquina e a otimização de custos.



*Figura 1.1: Divisão da máquina de papel.  
Fonte: Siemens 2003*

## 1.2. Objetivo e Organização do Trabalho

O objetivo dessa Tese é o desenvolvimento de um modelo matemático para otimização do setor de prensagem através da programação da produção em uma fábrica de papel. Esta otimização acarreta um aumento da remoção de água do papel no setor de prensagem, minimizando assim o custo gasto para secagem do mesmo com ar quente.

Essa Tese foi organizada da seguinte forma:

### Capítulo 1 – Introdução

É feita uma introdução situando a otimização e a indústria papelreira.

### Capítulo 2 – Indústria do Papel

Apresenta e discute a revisão bibliográfica da literatura sobre a indústria papelreira contextualizando a história do papel.

### Capítulo 3 – Máquina de Papel

Apresenta uma máquina de papel e seu funcionamento é detalhadamente apresentado, uma vez que é objeto de estudo deste trabalho.

### Capítulo 4 - Prensagem

É responsável por apresentar a função de um setor de prensagem em uma máquina de papel, mostrando sua composição.

### Capítulo 5 - Feltros

É dedicado á apresentação as funções, características e problemas que podem ocorrer nos tecidos técnicos, mais comumente conhecidos como feltros para máquina de papel.

### Capítulo 6 – Desenvolvimento do Modelo Matemático

Apresenta a análise inicial do problema e o seqüenciamento para o desenvolvimento do modelo matemático para otimização do setor de prensagem. São apresentadas também as técnicas realizadas para a realização da análise estatística dos dados, PCA.

## Capítulo 7 – Resultados e Discussão

Traz os resultados obtidos pela otimização do setor de prensagem realizados em 22 estudos de caso realizados e análise anual, bem como a discussão obtida.

## Capítulo 8 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Apresenta as conclusões e sugestão para trabalhos.

## Capítulo 9 – Referências Bibliográficas

Lista as referências bibliográficas que foram citadas no corpo da Tese

## Apêndice 1

Apresenta o modelo desenvolvido para a prensagem do papel.

## Apêndice 2

Apresenta a implementação do modelo em GAMS.

## Apêndice 3

Apresenta tabelas auxiliares obtidas dos resultados dos programas em GAMS.

# CAPÍTULO 2

## INDÚSTRIA DO PAPEL

### 2.1. História do Papel

A história do papel está intimamente ligada à reprografia. De todo papel produzido no mundo, 90% é impresso. E foi como suporte reprográfico que o papel surgiu. Desde os primórdios da Humanidade, o Homem vem desenhando as lembranças visuais de sua vida. Isto data de 30 mil anos atrás. Esses desenhos nas paredes das cavernas eram chamados de pictografias. Depois, se tornaram mais complexos, e vieram as ideografias, os cuneiformes persas e até chegar aos hieróglifos egípcios por volta de 2.500 a.C. Conforme se pode concluir, o desenvolvimento da inteligência humana veio acompanhado pelas representações gráficas, tornando-se cada vez mais complexas, chegando, desse modo, a representar idéias. A História registra o uso de diversos tipos de suportes, como tabletes de barro, tecidos de fibra vegetal, papiros, pergaminhos e, finalmente, o papel.

As espécimes mais antigas de papiro datam de 3.500 a.C. e suas técnicas de preparação permanecem, até hoje, sem uma descrição fidedigna. Os papiros eram preparados à base de tiras extraídas de uma planta abundante no Nilo. Estas tiras eram posicionadas em ângulos retos, molhadas, marteladas e coladas. Apesar da palavra papel ser derivada de papyrus, são produtos completamente diferentes. Em 170 a.C, um método aperfeiçoado para a obtenção de pergaminho permitiu seu uso para a escrita. Sua denominação é derivada do nome do reinado Pergamus. Em 105 a.C., o imperador chinês Chien-ch'u, irritado em escrever sobre seda e bambu, ordena a seu eunuco Ts'ai Lun, que invente um novo material para a escrita. Ts'ai Lun produz uma substância feita de fibras de casca da amoreira, restos de roupa e cânhamo, umedecendo e batendo a mistura até formar um mingau. A seguir, usando uma peneira e secando ao sol a fina camada ali depositada,

obteve uma folha de papel. O princípio básico desse processo é o mesmo usado até hoje na fabricação do papel.

A manufatura do papel foi um segredo por mais de seis séculos. Contudo, já estava espalhada por toda a China. A partir da captura de alguns artesões chineses pelos mouros em Samarkanda no ano de 751, a fabricação de papel chega a Bagdá e Damasco. Com a expansão mulçumana, a manufatura do papel chega à Europa pela Península Ibérica. Data de 1094 a primeira fábrica de papel em Xativa, Espanha, e por volta de 1150 a fábrica de Fabiano, Itália. A partir daí, a Europa começa a difundir a arte de produzir papel: França em 1189, Alemanha em 1291, Inglaterra em 1330. Curiosamente, a idéia de fazer papel, a partir de fibras de madeira, perdeu-se em algum lugar do trajeto, pois o algodão e os trapos de linho se transformaram na principal matéria-prima utilizada. Quando Gutenberg nasceu, a manufatura de papel já era uma indústria bem desenvolvida por toda Europa. A tinta viscosa, essencial para impressão, também já estava em uso na Alemanha para impressão de títulos por blocos para livros manuscritos. A Gutenberg coube o crédito de vislumbrar as possibilidades culturais e comerciais do processo gráfico de reprodução.

No fim do século XVI, os holandeses inventaram a máquina que permitia desfazer os trapos com maior eficácia. A "holandesa" como ficou conhecida o equipamento, foi se propagando, chegando até nossos dias com o mesmo conceito básico, apesar dos inúmeros aperfeiçoamentos recebidos. A primeira fábrica de papel dos Estados Unidos foi construída na Pensilvânia em 1690. Em 1719, o francês Réaumur sugeriu o uso da madeira, uma vez que a forte concorrência da indústria têxtil dificultava e encarecia a principal matéria-prima usada na época: o algodão e o linho. Na ausência de um método viável de branqueamento, o papel branco só podia ser obtido a partir de trapos brancos. Como a demanda causada pela Revolução Industrial se intensificava, por causa dos controles escritos e contabilidade, a capacidade produtiva foi diminuindo. No final do século XVIII, com a descoberta do cloro, o conjunto de matérias-primas se ampliou. O efeito deteriorador exercido pelos novos agentes sobre o material motivou estudos sistemáticos do processo de branqueamento, levando a criação de métodos e condições que minimizavam tal efeito.

Em 1798, o francês Nicholas L. Robert projetou uma máquina para substituir a fabricação manual por imersão, e produzir um rolo contínuo a partir de uma grande tela de arame sem fim, girada à mão, para filtrar a massa. Incapaz de obter financiamento na

França, Robert vende a patente para os irmãos Fourdrinier na Inglaterra, que continuaram a desenvolver o equipamento, até que em 1807 construíram a máquina de papel. O projeto fracassou porque a matéria-prima era cara e escassa. Se a contínua escassez de matéria-prima fomentava a inovação, a crescente demanda clamava por processos mais eficientes. Em 1850, o alemão Keller, lendo a obra de Réaumur, desenvolveu a máquina para moer madeira e transformá-la em fibras. Paralelamente ao desenvolvimento da indústria papelreira, as artes gráficas, embalagens, cadernos e outros aplicativos tornaram o papel indispensável ao acelerado progresso vivenciado na época. A primeira ilustração em livros foi impressa por Albrecht Pfister, em 1460, por gravação em madeira. Os livros impressos entre 1570 e 1770 empregavam a ilustração em cobre, ao invés da madeira, o que resultou em perda de qualidade. Por mais de 400 anos depois de sua invenção, os tipos eram montados manualmente. Apesar das inúmeras tentativas de substituição do processo manual, somente em 1886, com a invenção da linotipo por Ottmar Mergenthaler, foi possível seu uso comercial.

A litografia, descoberta por Alois Semefelder em Munique por volta de 1798, também alavancou a impressão artística e, conseqüentemente, o consumo de papel. Era baseada no princípio do processo offset atual. A incompatibilidade da água com a graxa era provocada pela deposição de uma substância graxa nas áreas a serem impressas numa pedra porosa. A área de reserva era umedecida com uma mistura de goma arábica e água. Este processo, muito popular no meio do século XIX, foi sendo aperfeiçoado ao longo dos anos, até que em 1906, Rubel descobre o processo offset. Ainda que acidental este processo provocou uma verdadeira revolução nas artes gráficas. Pode-se afirmar que a partir do offset a reprodução gráfica deixou de ser uma arte e passou a ser uma indústria. A partir do início deste século, a produção de papel foi vigorosamente multiplicada. Acompanhando a segunda Revolução Industrial, a Era da Produção em Massa, os pequenos produtores dão lugar a grandes fábricas, face à economia de escala. Nesta época, o papel já era barato e a sua produção em massa, constante. Outro grande impulso no consumo de papel, devido ao invento de Chester Carlson, em 1938, foi à xerografia. Em 1960, com o lançamento da Xerox 914, a reprodução gráfica ficou muito simplificada. Dispensaram-se pessoas qualificadas, papéis especiais, reagentes químicos, etc. Atribui-se à xerografia, o início da terceira Revolução Industrial, a Era da Informação. A velocidade com que a Informação passou a circular teve forte influência no sucesso de muitas empresas. Os ganhos de

produtividade nos escritórios foram expressivos. Ainda há avanços tecnológicos apreciáveis, particularmente, em eletrônicos, computadores, telecomunicações, e a xerografia passam a complementá-los de forma admirável. O papel teve e tem uma participação destacada na cultura contemporânea, tanto que em seu livro *The 100: O Ranking of Influential People in History*, Michael Hart classifica Ts'ai Lun como o sétimo mais importante homem da Humanidade, na frente de Gutenberg (o oitavo) (fonte: *Papel Champion*, 2003).

## 2.2. Panorama do setor

A economia mundial continua indefinida, com as incertezas que ainda persistem como reflexo dos acontecimentos de 11 de setembro de 2001, agravadas com a guerra contra o Iraque, que implicaram na elevação de despesas com seguros, queda de confiança e redução na velocidade de integração da economia mundial. O crescimento modesto da economia americana e européia e a estagnação persistente na Alemanha e no Japão tiveram reflexos no consumo de papel e celulose em 2002, incentivando, novamente, movimentos de fusão e incorporação de empresas no mundo, como forma de elevar a eficiência operacional do setor. Em 2002 os preços de celulose mantiveram-se em alta ao longo do ano como consequência da redução dos estoques mundiais (tabela 2.1).

*Tabela 2. 1: Produção de papéis*

<b>Produção de Papel – em toneladas</b>			
	<b>2007</b>	<b>Jan – Jun/2007</b>	<b>Jan - Jun/ 2008</b>
<b>Papel de Imprensa</b>	<b>143.523</b>	<b>70.582</b>	<b>67.860</b>
<b>Papel de Imprimir e Escrever</b>	<b>2.493.236</b>	<b>1.254.236</b>	<b>1.240.590</b>
<b>Papel de Embalagem</b>	<b>4.367.365</b>	<b>2.173.450</b>	<b>2.206.242</b>
<b>Papel para fins sanitários</b>	<b>812.594</b>	<b>399.663</b>	<b>425.5547</b>
<b>Papel Cartão</b>	<b>635.999</b>	<b>314.744</b>	<b>351.664</b>
<b>Cartolina</b>	<b>46.275</b>	<b>22.341</b>	<b>20.892</b>
<b>Outros</b>	<b>466.978</b>	<b>227.828</b>	<b>231.926</b>
<b>Total</b>	<b>8.965.970</b>	<b>4.462.844</b>	<b>4.544.721</b>

*Fonte: Bracelpa*

### 2.3. Papéis para Imprimir e Escrever

É a segunda categoria de papel mais produzida e consumida (Tabela 2.2), participando, em 2003, com 29% da produção total de papel e 25% do volume total consumido. O Brasil é o 13º maior fabricante mundial de papéis de imprimir e escrever, participando com 2,4% da produção mundial. A produção brasileira de papéis de imprimir e escrever, em 2003, cresceu apenas 4% em relação ao ano anterior, enquanto o consumo caiu 4,4%. Quatro grupos empresariais - International Paper, Suzano, Votorantim e Ripasa - concentram 91% da produção. Os papéis mais fabricados são os “não revestidos à base de celulose” (UWF) que representam 77% do volume do segmento.

Observa-se, contudo, que esses grupos vêm incrementando a produção de papéis revestidos, atendendo à crescente demanda do mercado interno e substituindo, em parte, o volume importado. A expansão mais agressiva na produção de papéis revestidos é recente e deveu-se, principalmente, à entrada em operação dos coaters das fábricas de papel à base de celulose (coated Wood free). No caso dos papéis revestidos à base de pasta (coated Wood containing), o incremento foi concentrado na Inpacel (International Paper). O segmento exportou 34% do volume produzido em 2003, o que representou 43% da quantidade exportada de papéis de todos os tipos. A participação relativa do Brasil nas exportações mundiais de papéis não revestidos base de celulose decresceu de 8%, em 1990, para 6%, em 2002, como reflexo do aumento do consumo interno.

Em 2003, as importações de papel de imprimir e escrever decresceu 13% em relação ao ano anterior, representando 27% do volume de papel importado pelo País. A demanda interna por papéis de imprimir e escrever revestidos teve um crescimento de 10% ao ano, a partir de 1993, enquanto a demanda pelos tipos não revestidos teve um aumento inferior: 4,5% a.a. Os maiores volumes de papéis de imprimir e escrever, exigidos pelo crescimento da demanda interna, tem sido suprido pela diminuição das exportações e por acréscimos de produção oriundos de modernização das unidades industriais. As exportações brasileiras não acompanharam a evolução do comércio mundial.

Tabela 2. 2: Produção de papel de imprimir e escrever

Papel Imprimir / Escrever					
	Em 1000 toneladas				
	2002	2003	2004	2005	2006
<b>Produção</b>	<b>2.185</b>	<b>2.319</b>	<b>2.427</b>	<b>2.481</b>	<b>2.551</b>
<b>Importação</b>	<b>176</b>	<b>155</b>	<b>211</b>	<b>223</b>	<b>343</b>
<b>Exportação</b>	<b>629</b>	<b>771</b>	<b>785</b>	<b>922</b>	<b>847</b>
<b>Consumo aparente</b>	<b>1.732</b>	<b>1.703</b>	<b>1.853</b>	<b>1.782</b>	<b>2.047</b>
<b>Consumo “Per Capita” (kg)</b>	<b>9,9</b>	<b>9,6</b>	<b>10,1</b>	<b>9,6</b>	<b>10,9</b>

Fonte: Bracelpa

## 2.4. Classificação dos Papéis para Imprimir e Escrever

Os papéis para imprimir e escrever são classificados da seguinte forma:

### 2.4.1. Papéis de Imprimir

#### **Bíblia**

Papel fabricado com pasta química branqueada, gramatura máxima de 50 g/m<sup>2</sup>, teor elevado de carga mineral e elevada opacidade. Usado para impressão de bíblias e similares, podendo conter ou não linhas d'água.

#### **Bouffant de 1ª**

Papel fabricado com pasta química branqueada, não colado, com alta carga mineral, acima de 10 %, bem encorpado e absorvente. Usado para impressão de livros, em serviço geral de tipografia e mimeografia, podendo apresentar linhas d'água.

#### **Bouffant de 2ª**

Papel de impressão, semelhante ao “bouffant de 1ª”, porém contendo pasta mecânica.

**Couché**

Papel de impressão, que reúne o máximo de qualidades necessárias para a reprodução perfeita de “clichés”, conferidas pelo revestimento com cargas minerais em uma ou duas faces. Divide-se em subgrupos, que são destacados a seguir:

**Base para couché**

Papel para ser revestido em sua superfície com cargas minerais na máquina de revestir.

**Couché fora de máquina**

Papel “base para couché” (suporte) revestido com cargas minerais aglutinadas com colas, em uma ou nas duas faces, na máquina de revestir.

**Couché de máquina**

Papel fabricado e revestido totalmente na própria máquina de papel, em uma ou nas duas faces.

**Imprensa**

Papel de impressão de jornais e periódicos, fabricado principalmente com pasta mecânica ou mecano-química, na gramatura entre 45 a 56 g/m<sup>2</sup>, com ou sem linhas d’água no padrão fiscal, com ou sem colagem superficial.

**Jornal**

Papel de impressão, similar ao “imprensa”, porém, sem limitação de gramatura, alisado ou monolúcido. Usado para impressos comerciais, blocos de rascunho e outros.

**Mimeógrafo**

(Excluído - ver classificação Bouffant)

**Monolúcido**

Papel caracterizado pelo brilho em uma de suas faces, obtido em máquinas dotadas de cilindro monolúcido. Divide-se em subgrupos, que são destacados a seguir.

**Monolúcido de 1ª**

Papel fabricado com pasta química branqueada, com brilho em uma das faces. Usado para rótulos, cartazes, sacolas, embalagens e papéis fantasia.

**Monolúcido de 2ª**

Papel semelhante ao “monolúcido de 1ª”, porém contendo pasta mecânica ou aparas.

**Offset**

Papel de impressão, fabricado essencialmente com pasta química branqueada com elevada resistência da superfície. Usado geralmente para impressão em “offset”.

**2.4.2. Papéis de Escrever****Apergaminhado**

Apergaminhado com marca (Bond com marca): Papel fabricado com pasta química branqueada, com marca d'água, alisado, colado e com boa opacidade. Usado geralmente para correspondência.

**Apergaminhado (Bond):**

Papel fabricado com pasta química branqueada, alisada, colada e com boa opacidade. Usado para correspondência em geral, formulários, impressos, cadernos escolares e envelopes.

**Super-Bond (Bond cores):**

Papel semelhante ao “apergaminhado”, porém em cores e usado para o mesmo fins que aquele.

**Segundas vias (Flor Post)**

Papel fabricado com pasta química branqueada, geralmente com gramatura até 32 g/m<sup>2</sup>, branco ou em cores. Usado geralmente para segundas-vias em correspondência ou formulários impressos.

# CAPÍTULO 3

## MÁQUINA DE PAPEL

### 3.1. Máquina de Papel

Até o século XVIII, as folhas de papel eram feitas manualmente, como mostra a (Figura 3.1) o operário imergia uma tela, fixa em moldura de madeira, em um tanque contendo suspensão de fibras, formando uma folha que em seguida, era seca ao ar. Em 1799, o francês Nicolas Robert inventou uma máquina que possibilitava a formação de uma folha de papel, com o comprimento infinito. Era construída de madeira e possuía uma tela de tecido suspensa por roletes, na qual era lançada uma suspensão de fibras.

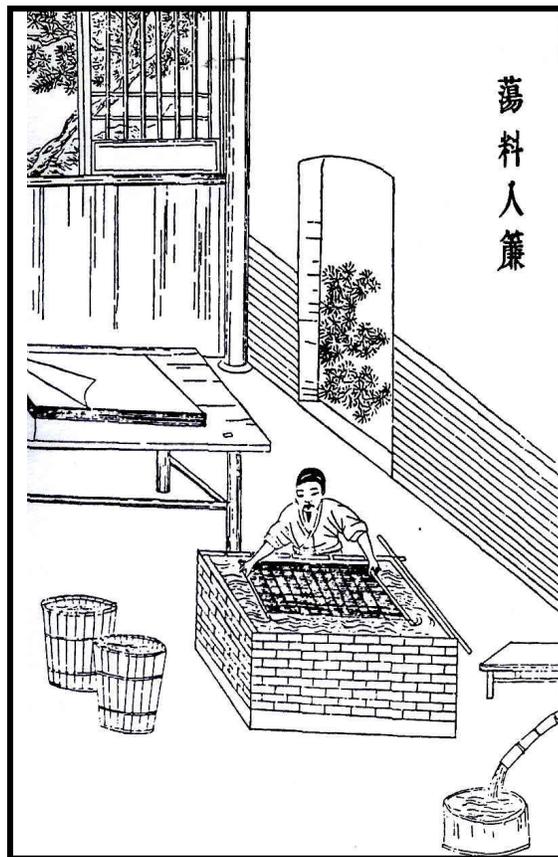


Figura 3.1: Máquina de papel no passado.  
Fonte: SENAI - IPT

Robert, por dificuldades financeiras e técnicas, não conseguiu levar adiante o seu projeto e foi obrigado a vender sua patente a dois franceses, os irmãos Fourdrinier, que também não tiveram muito sucesso.

Em 1818, Donkin apresentou, na Alemanha, sua primeira máquina. Nela, a massa permanecia em agitação e caía na tela por força de gravidade. Após ser prensada, a folha era enrolada no final da máquina. As máquinas de papel modernas, descendentes da inventada por Robert, são constituídas de várias seções independentes, cada qual com sua função e características próprias. Quase todas as seções da máquina de papel podem ser reformadas e melhoradas, com exceção da largura, que é fixa. Em geral, as partes de uma máquina de fabricação de papel são:

- ✓ Seção de formação;
- ✓ Seção de prensagem;
- ✓ Seção de secagem;
- ✓ Seção de enrolamento ou corte;
- ✓ Seção de transmissão de movimento;
- ✓ Poços e fundações;
- ✓ Seção de aplicações e tratamento da superfície.

Atualmente, devido à crise de energia, esforços estão sendo concentrados no desaguamento. A remoção da água começa por gravidade segue por meio de sucção e prensagem e termina por evaporação. A figura 3.2 mostra a configuração de uma máquina atual. (IPT – SENAI)



*Figura 3.2: Máquina de papel atual.*

*Fonte: SENAI - IPT*

## **3.2. A fabricação do papel**

A produção de papel é um processo de transformação no qual a celulose (matéria prima básica) juntamente com aditivo, que dão as características desejadas ao papel, formam uma suspensão. Esta suspensão entra na máquina de papel onde através de um desaguamento contínuo e progressivo ocorre a formação da folha que após passar por prensas desaguadoras e um sistema de aquecimento, obtém-se o papel semi-acabado. Para a fabricação do papel são utilizadas como matérias-primas fibras celulósicas virgens ou recicladas, sendo classificadas como:

- ✓ Fibras virgens: são fibras longas (coníferas) ou curtas (folhosas) branqueadas;
- ✓ Fibras recicladas: são misturas, onde predominam as fibras curtas.

Uma folha contendo exclusivamente fibra celulósica, não possui as características do papel que geralmente são desejados e adequados para conseguir a versatilidade que caracteriza os papéis existentes no mercado. Em decorrência disso, a indústria papeleira tornou-se uma grande consumidora de produtos químicos os quais são adicionados para dar ou melhorar certas propriedades do papel, a fim de eliminar ou controlar certos problemas na operação.

## **3.3. Esquema geral de funcionamento de uma Fabricação do Papel**

Este esquema de funcionamento de fabricação de papel baseia-se na apostila de obtenção de celulose e papel da ABTCP (1999).

### **3.3.1. Preparação de Massa**

A celulose em folhas ou em tabletes é desagregada em um equipamento chamado desagregador. Quando a fábrica de celulose é integrada com a fábrica de papel, a celulose já vem em suspensão e é armazenada em tanques de distribuição de massa. O desagregador, ou “hydrapulper” nada mais é do que um liquidificador doméstico de proporções gigantescas, com capacidade entre 500 a 20.000 litros, ou superior.

### 3.3.2. Caixa de Entrada

A caixa de entrada trata-se de um compartimento que tem a largura da tela formadora (onde a folha de papel é formada), ou pouco mais, e que tem a função de distribuir a suspensão de fibras sobre a tela, como uma lâmina contínua, o mais uniformemente possível. O jato de suspensão de fibras, ao sair da caixa de entrada, passa por uma abertura delimitada pelos lábios superior e inferior. O lábio superior é regulável e da sua maior ou menor abertura depende a vazão e a velocidade do jato que deságua sobre a tela formadora. No interior da caixa de entrada existe um ou mais cilindros perfurados rotativos, que tem a função de uniformizar a suspensão próxima ao ponto de saída, evitando floculação, isto é, aglomeração de fibras formando flocos que prejudicam a uniformidade da folha de papel ou sua aparência e, conseqüentemente, a má formação. As tarefas básicas a serem realizadas pela seção de formação de uma máquina de papel são destacadas a seguir:

- ✓ Diluir a massa até uma consistência suficientemente baixa que permita um alto grau de uniformidade na dispersão das fibras;
- ✓ Distribuir a suspensão diluída de fibra na seção de formação, mantendo-as dispersas de forma homogênea;
- ✓ Depositar individualmente e de maneira uniforme as fibras sobre a tela, ao mesmo tempo em que se inicie a drenagem da água pela tela;
- ✓ Compactar o material fibroso enquanto em estado plástico, a fim de se obter um contato íntimo entre as fibras;
- ✓ Por meio de sucção, remover o máximo possível a água das fibras, antes que a folha formada seja transferida para outra seção.

### 3.3.3. Prensagem

A folha de papel, ao sair da mesa plana já está formada, porém 80 a 85 % de sua constituição é ainda de água. A finalidade das prensas é retirar parte dessa água. A prensa é formada por 2 rolos cilíndricos, sendo o inferior de borracha ou ebonite e o superior, de material mais duro como granito ou microrock. As máquinas de papel têm 2, 3 ou 4 prensas. As prensas trabalham com feltro especial, agulhado, que serve para apoio e

condução da folha. No ponto de encontro entre os dois rolos é feita a prensagem do papel e feltro e a água contida no papel é transferida para o feltro.

Ao sair das prensas para a fase seguinte do processo a folha de papel ainda contém 60 a 65 % de água. Em algumas máquinas, com determinados tipos de papel, esse teor pode chegar a 50 - 55 %. A função primordial da prensagem úmida de uma máquina de papel é remover a quantidade máxima possível de água da folha de papel antes de submetê-la a secagem por calor. Outras funções são a redução do volume específico e a melhoria da lisura da folha. A capacidade da prensa em desempenhar estas funções, sem causar danos ao papel, como esmagamento, perdas de finos, rearranjo das fibras e enrugamento, depende do projeto da prensa, do feltro e das características operacionais.

Nas máquinas modernas de alta produção, a prensagem geralmente é feita com rolos de sucção que possuem maior capacidade de remoção de água do que as prensas lisas (de rolos lisos). A secagem é efetuada pela ação combinada da compressão mecânica e da sucção, aplicada através da estrutura porosa do rolo inferior. A água retirada da folha de papel, por compressão, passa pela estrutura tramada do feltro e é aspirada para dentro dos orifícios do rolo de sucção.

#### **3.3.4. Secagem**

A secagem é o setor da máquina de papel onde se faz a secagem final da folha e se realizam a cura das resinas adicionadas. A secagem é composta de inúmeros cilindros secadores. O número de secadores depende do tipo e do tamanho da máquina. Os secadores são cilindros de aço com superfície polida e trabalham com pressão de vapor. Para condução da folha, entre os cilindros secadores, usam-se feltros ou telas secadoras. A água evaporada do papel é extraída por coifas especiais. A umidade da folha, ao deixar a seção de secagem, varia de 3 a 8 %. Algumas máquinas de papel dispõem ainda nessa fase, de:

- ✓ Cilindro mono lustro ou monolúcido - grandes cilindros secadores onde o papel é prensado contra sua superfície, proporcionando em uma das faces lisura e brilho acentuado;
- ✓ Prensa de colagem - equipamentos que se destinam à impregnação superficial com químicos, para as mais diversas finalidades. Como mencionado anteriormente, temos como exemplo o papel offset, no qual é aplicada uma solução de amido

cozido, que lhe confere melhores características de impressão, maior resistência superficial e absorção mais controlada da tinta.

- ✓ Em uma fábrica de papel, entende-se por secagem o processo de remoção de água por evaporação, aplicando-se calor. O secador Yankee tem forma cilíndrica, com uma superfície que entra em contato com a folha de papel, e é altamente polida. Este equipamento foi desenvolvido para proporcionar uma lisura elevada em um dos lados do papel, como é desejável na manufatura de papel envelope. Devido à alta eficiência, o secador Yankee é também muito utilizado para produzir papéis absorventes, pois não expõe a folha úmida a tensões elevadas que podem ocorrer em máquinas de alta velocidade.
- ✓ A eficiência do equipamento depende essencialmente do contato íntimo entre a folha e a superfície aquecida, o que é conseguido pressionando-se a folha contra a parte inferior do secador. O rolo possui uma cobertura de borracha, sendo abaulada de acordo com a pressão aplicada e, empregam-se às vezes dois rolos de pressão: um para transferir o papel ao Yankee e outro para melhorar o contato entre o papel e o secador.
- ✓ O secador Yankee remove dez vezes mais água que secadores comuns, com a mesma área de secagem disponível, em igual período de tempo; é munido de um sifão muito eficiente, que quebra a camada de ar saturado que circunda a superfície do papel, e continuamente insufla ar quente e seco (98° C).

### **3.3.5. Calandra e Enroladeira**

A calandra é usada para o acerto da espessura e aspereza do papel, ainda na máquina de papel, enquanto que na enroladeira, a folha contínua de papel vai sendo bobinada até um determinado diâmetro, daí partindo para os vários processos de beneficiamento.

# CAPÍTULO 4

## PRENSAGEM

### 4.1. Setor de Prensagem

O setor de prensa em uma máquina de papel é responsável pela remoção de aproximadamente 18 a 20% de água da folha de papel, isso representa cerca de 12% do custo total de remoção de água na máquina. A maior quantidade de água que pode ser retirada do papel, antes que esse entre no setor de secagem representa uma grande economia, visto que o setor de secagem é responsável por 78% do custo de remoção de água na folha de papel. Sua principal função, então, é remover a máxima quantidade de água contida no papel por meios mecânicos. Na figura 4.1 representa-se um exemplo do setor de prensagem no qual é possível observar que o setor é composto de rolos guiam feltros (1), rolos guia folha (2), rolo sucção e pressão (3), rolo esticador (4), rolo regulador (5), tubos de sucção e chuveiros (6), raspadores (7) e feltros (8).

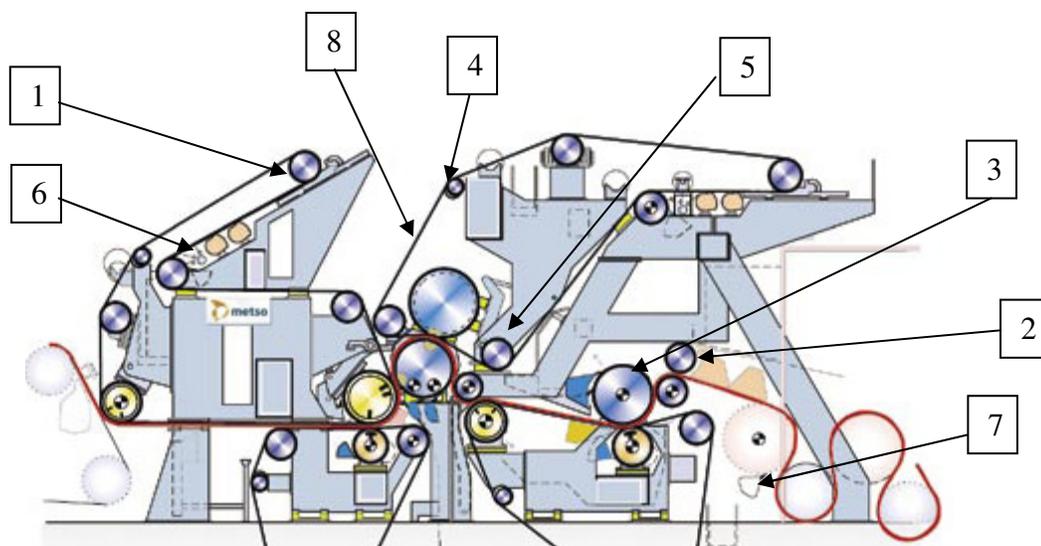
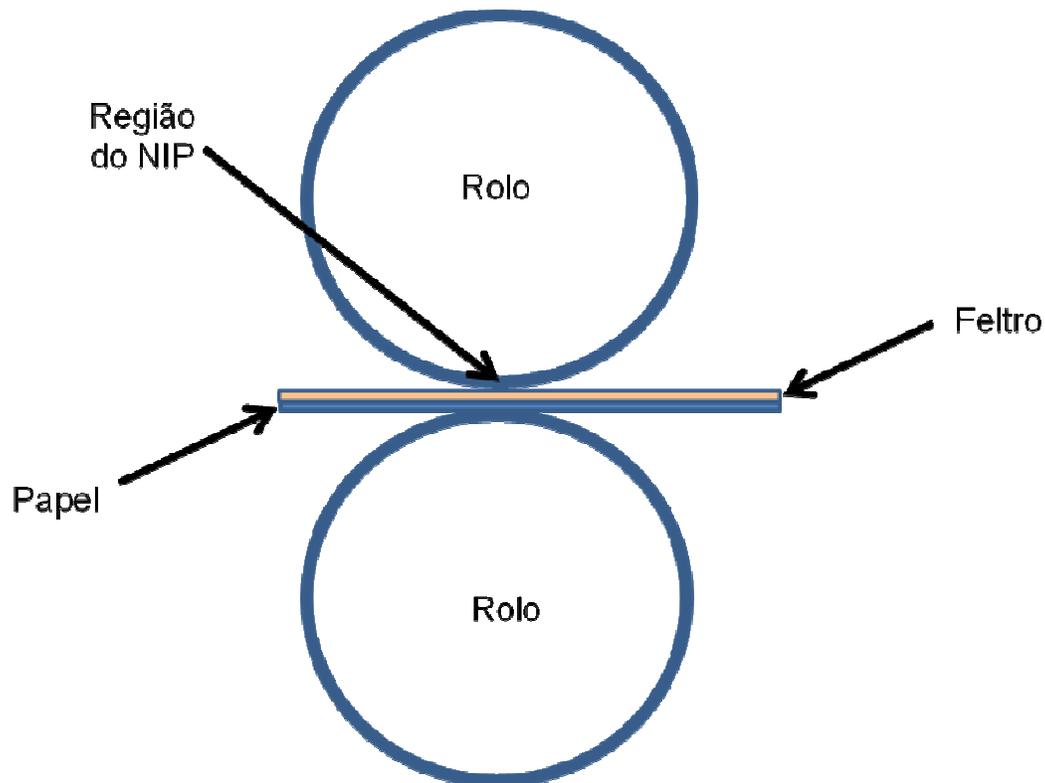


Figura 4.1: Secção de Prensas.

Fonte: Metso Paper.

## 4.2. Princípio da Prensagem

A prensagem úmida está baseada na compressão mecânica da folha e papel, em contato com feltro entre dois rolos, combinada com a sucção da água pelo rolo inferior.



*Figura 4.2: Princípio da prensagem.*

Maior remoção determina melhor eficiência da seção, levando em conta o aspecto econômico da operação e a qualidade final da produção. A maneira com que o feltro e a folha entram no NIP (zona de contato entre os rolos) de prensagem, ambos carregam consigo uma película de água retida pela tensão superficial das suas respectivas estruturas fibrosa, (figura 4.2). A extração de água na prensa é acompanhada por uma compressão da folha, na passagem entre os dois rolos. A prensagem está diretamente relacionada com, as pressões aplicadas, a largura ou área do NIP a qual está submetida à compressão, o tempo de permanência sob pressão da folha sobre os feltros e a capacidade de retenção e condução de água pelos feltros.

## 4.2. Prensas da Máquina de Papel

As etapas de remoção de água da folha na máquina de papel podem ser simplificadas da seguinte maneira FALSARELLA (1994):

- 1- Drenagem através dos foils na mesa de formação;
- 2- Vácuo aplicado pelas caixas e rolos de sucção;
- 3- Pressão de contato nas prensas;
- 4- Evaporação pelos cilindros secadores.

## 4.3. Teoria de Prensagem

Diversos modelos foram estudados e discutidos para conhecimento do mecanismo do NIP de uma prensa. Eles estão baseados em estudos e experiências de laboratório, os quais foram extrapolados para uma condição real de prensagem. O conceito básico de prensagem foi primeiramente formulado por WAHLSTROM (1969), e progressivamente refinado pelo próprio Wahlstrom e muitos outros, ocasionando no rápido desenvolvimento do conceito de prensagem.

O modelo matemático de Wahlstrom apresentado no Simpósio Internacional de Prensagem e Secagem em 1968 é o mais difundido e foi de grande valia para o entendimento da prensagem entre os NIPs de pressão controlada e fluxo controlado. Na (figura 4.3) é representado um NIP de fluxo transversal definido por dois rolos sólidos, com a folha e feltro passando através do NIP. Ambos estão insaturados na entrada do NIP, e contém quantidade de água suficiente para atingir a saturação no centro do NIP (mid-NIP). A configuração geométrica, curvas de distribuição de pressão, mecanismos de transferência de água, e curvas de espessura da folha e feltro são mostrados para o NIP de fluxo vertical.

A pressão aplicada na prensa é balanceada pelas forças opostas geradas pelo feltro e folha, e pode ser dividida em duas partes:

- ✓ Pressão do fluído (P1) gerada pelo movimento de água contido na folha e feltro.
- ✓ Pressão da estrutura fibrosa (P2) aplicada para a compressão da folha (pressão mecânica), equação (01).

A pressão total em qualquer ponto do NIP é igual à soma destes dois componentes.

$$PT = P_1 + P_2 \quad (01)$$

## Teoria de Wahlstrom

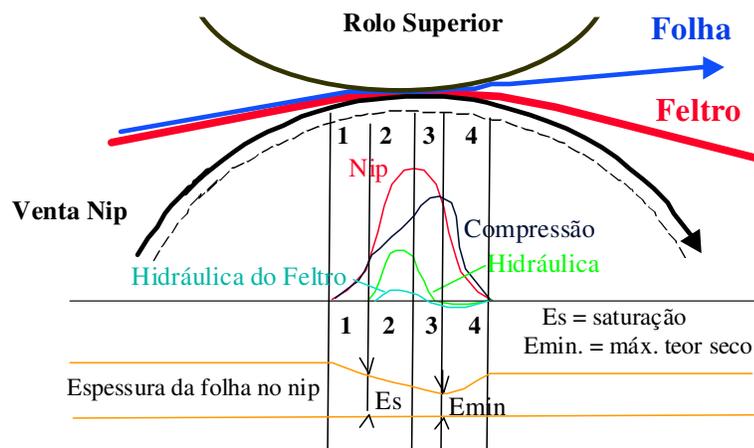


Figura 4. 3: Teoria de Wahstrom.

Baseado na interação das pressões do fluido e da estrutura fibrosa, o NIP pode ser dividido em quatro etapas, (figura 4.3):

**Etapa 1:** começa na entrada da zona de contato, onde se inicia a curva de prensagem (composição externa) e estende-se até o ponto que a folha de papel fica saturada (HT). O feltro não está saturado durante esta etapa. A pressão total na estrutura fibrosa da folha cresce com a compressão e ocorre uma variação muito pequena no teor seco do papel. A pressão total é consumida em comprimir a estrutura fibrosa.

**Etapa 2:** estende-se desde o ponto de saturação da folha (HT) até o ponto central da zona de contato. Como a folha está saturada e com aumento da pressão hidráulica, a água se transfere do papel para o feltro. Esse também chega à saturação e produz-se, então, um fluxo perpendicular de água através do feltro que é expelida e vai ocupar os espaços vazios existentes abaixo do feltro e assim, escapando do sistema.

**Etapa 3:** inicia-se no ponto central da zona do contato e segue até o ponto de máximo teor seco do papel no NIP (HM). Nesta etapa a folha de papel está comprimida ao máximo que a estrutura fibrosa do papel permite e, conseqüentemente, a pressão hidráulica interna que faz expulsar a água do papel cai à zero, não havendo mais qualquer fluxo de água. Nesta fase, de expansão que o feltro passa pelo ponto onde a sua pressão hidráulica interna é nula e,

como conseqüência, é interrompida a transferência da água contida no feltro para as áreas abertas (espaços vazios) de armazenagem provisória. O feltro volta a ficar insaturado.

**Etapa 4:** o feltro e a folha de papel expandem-se. O papel reabsorve água do feltro, mas devido à expansão, volta ao estado não saturado. Em ambos os materiais (papel e feltro) cria-se uma pressão hidráulica negativa. As forças de compressão que atuam sobre a estrutura da folha e do feltro são maiores que a pressão total. O vácuo devido à expansão será maior no papel do que no feltro, o que produz uma circulação de água e ar no interior do feltro e deste até o papel. Quando o papel e o feltro se separam, no final da etapa 4, a água que se apresenta na superfície limite entre elas, dividiu-se em conseqüência da separação das películas.

#### 4.4. Tipos de NIP de Prensagem

a) Relacionados à folha

- ✓ NIP de pressão controlada
- ✓ NIP de fluxo controlado

b) Relacionados à prensa

- ✓ NIP plano
- ✓ NIP ventilado

1° - Inteiradas com a folha de papel

- ✓ Impulso controlado;
- ✓ Pressão controlada;
- ✓ Fluxo controlado.

2° - Associadas às condições operacionais e sistema de prensagem

- ✓ Fluxo horizontal;
- ✓ Fluxo vertical;
- ✓ Fluxo vertical/horizontal.

#### 4.5. Função das Prensas

A função primária das prensas é remover água da folha para incremento do teor seco, interferindo na consolidação desta no NIP. O incremento de 1% no teor seco final da

folha nas prensas resulta na economia de vapor de 4-5% ou o equivalente em aumento de velocidade. A função secundária é aumentar a resistência úmida da folha e influir nas propriedades físicas e superficiais da mesma.

#### 4.6. Evolução da Prensagem

Três principais considerações afetaram o desenvolvimento da tecnologia de prensagem úmida (Fonte: ABTCP):

- ✓ Remoção de água;
- ✓ Operacionalidade;
- ✓ Qualidade da folha

Além disso, a necessidade de maior eficiência de funcionamento na seção de prensas e outros fatores econômicos, tais como limitações de espaço e energia afetaram o desenvolvimento da prensa úmida. As melhorias da eficiência operacional incluem todas as medidas que visam à redução do tempo de parada na seção de prensa causada pelas quebras da folha de papel e manutenção. Tais medidas englobam configurações e sistemas melhorados para trocas de rolo e feltro, bem como sistemas aprimorados para a passagem da folha.

##### 4.6.1. Prensa Plana

O papel e o feltro passam através do NIP formado por dois rolos lisos, tendo o rolo superior um revestimento duro e o rolo inferior um revestimento macio. A água expelida do NIP escorre pelo rolo inferior na direção oposta da folha sendo recolhida em uma calha, (figura 4.4).

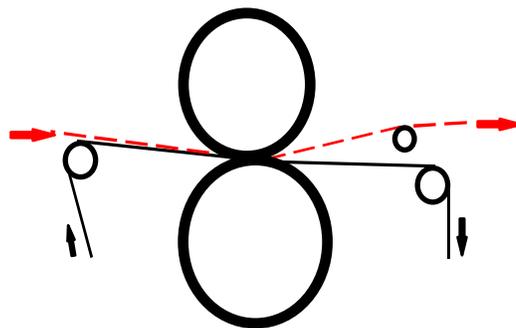


Figura 4. 4: Prensa plana.

### 4.6.2. Prensas Ranhuradas

A prensa ranhurada é uma prensa plana com ranhuras produzidas na superfície do rolo. A força centrífuga aliada a um chuveiro de purga direcionado contra o sentido de rotação do rolo remove a água das ranhuras. A folha recebe uma pressão distribuída mais uniformemente, devido ao espaço mais contínuo das áreas sólidas (figura 4.5).

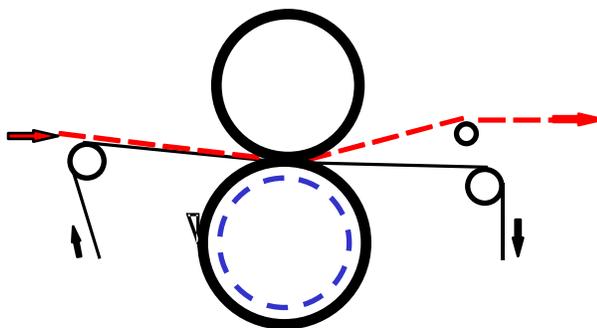


Figura 4. 5: Prensa ranhurada.

### 4.6.3. Prensa de Sucção

O rolo de sucção compõe-se de uma camisa perfurada, normalmente em bronze e recoberta por revestimento macio. Internamente está instalada uma caixa de vácuo fixa e selada contra a camisa giratória. Portanto, a caixa é estática em relação ao NIP e o movimento circular da camisa oferece constantemente uma área aberta por onde a água escapa do NIP ajudada pelo vácuo, diminuindo conseqüentemente a pressão hidráulica resistente no NIP da prensa (figura 4.6).

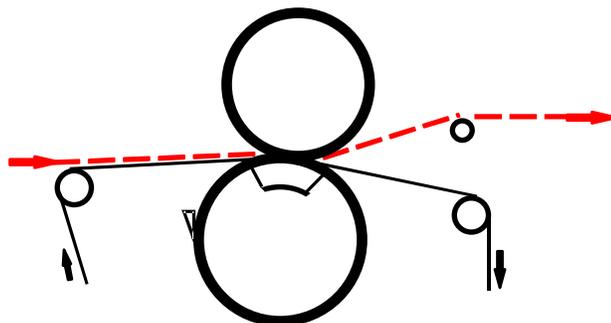


Figura 4. 6: Prensa de sucção.

#### 4.6.4. Prensas com Furos Cegos

Os furos no rolo têm o objetivo de reduzir a pressão hidráulica no NIP das prensas, contribuindo desta forma com o aumento da velocidade de operação das máquinas de papel (figura 4.7).

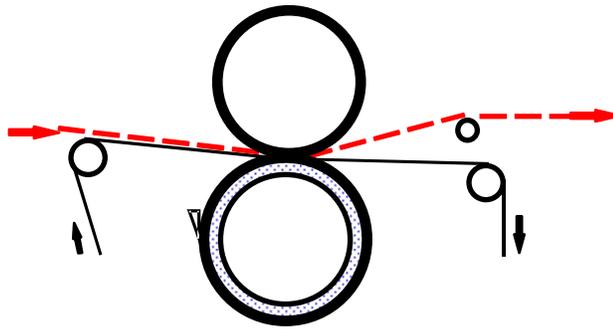


Figura 4. 7: Prensa de furo cego.

#### 4.6.5. Prensa de NIP estendido

Dois elementos rotativos são comprimidos um contra o outro; um dos elementos pode ser deformado elasticamente, para formação de uma larga superfície de contato. Uma camisa de prensagem, elástica, gira em torno de uma travessa fixa. Uma sapata de pressão, pressionada hidráulicamente e guiada na travessa, transmite a desejada força de prensagem à camisa, em toda a largura da máquina.

#### 4.6.6. Fatores que influenciam a eficiência de prensagem

Tomando como base a teoria de prensagem definida por Wahlstrom para um NIP de fluxo vertical, e outros estudos desenvolvidos para a refinação do mesmo modelo matemático, pode-se definir alguns fatores que influem sobre a eficiência de prensagem:

- ✓ Pressão aplicada;
- ✓ Tempo de residência no NIP;
- ✓ Redução do percurso da água;
- ✓ Distribuição de pressão no NIP;
- ✓ Re-umedecimento da folha;
- ✓ Temperatura da folha;

- ✓ Desaguamento eficaz do feltro;
- ✓ Outros fatores: não de menor importância, pode-se incluir ainda a geometria e arranjo das prensas, tipo de rolos e revestimento e aplicação correta de feltros, adequando estes e os outros fatores descritos anteriormente ao conceito de prensagem, matéria prima e velocidade da máquina.

#### **4.6.7. Desaguamento de Dupla Face**

As folhas que requerem um NIP de fluxo controlado devem utilizar o conceito de duplo feltro. Fazendo um comparativo do desaguamento de feltro único com o de feltro duplo podem ser consideradas 3 variáveis: carga da prensa, tempo de residência no NIP e distância do fluxo de água. Para o bom desempenho de prensas duplamente feltradas, deve-se considerar o seguinte:

- ✓ Os feltros devem ser adequadamente projetados com construções similares e troca simultânea;
- ✓ O condicionamento tem que permitir que os feltros retornem ao NIP limpos e com baixa umidade, evitando assim a perda de capacidade hidráulica por entupimento;
- ✓ A geometria de prensas deve evitar a formação de bolhas antes do NIP e minimizar o re-umedecimento da folha após o NIP;
- ✓ O revestimento dos rolos deve ser de preferência de furação cega para baixas velocidades e os rolos podem ser de revestimento plano.

#### **4.6.8. Dupla Feltragem**

O desenvolvimento da dupla feltragem para folhas de fluxo controlado está baseado em prensas de alto impulso, onde são aplicadas elevadas cargas para incremento do teor seco da folha. O impulso ou intensidade de prensagem é a pressão específica média que a folha experimenta no NIP, multiplicada pelo tempo de residência em que a mesma é aplicada no NIP, (figura 4.8).

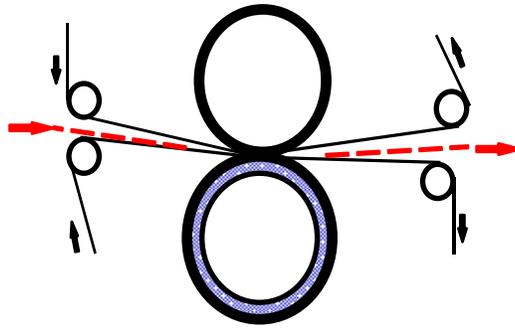


Figura 4. 8: Prensa com duplo feltro.

#### 4.6.9. Prensa de Alto Impulso

Também chamadas de prensas de alto impacto, prensa com rolos de grande diâmetro ou rolos jumbo, elas se utilizam do conceito de desaguamento de dupla face combinado com rolos de grande, (figura 4.9).

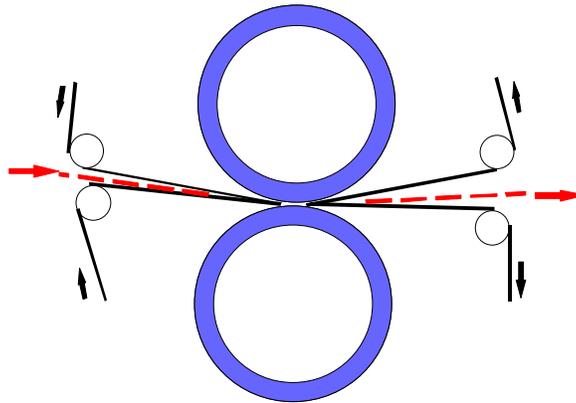
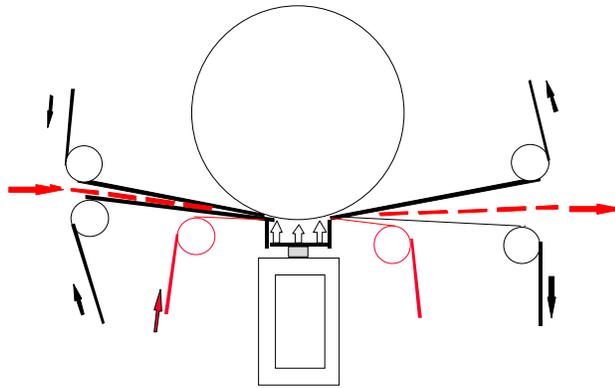


Figura 4. 9: Prensa jumbo.

#### 4.6.10. Prensas de Sapata

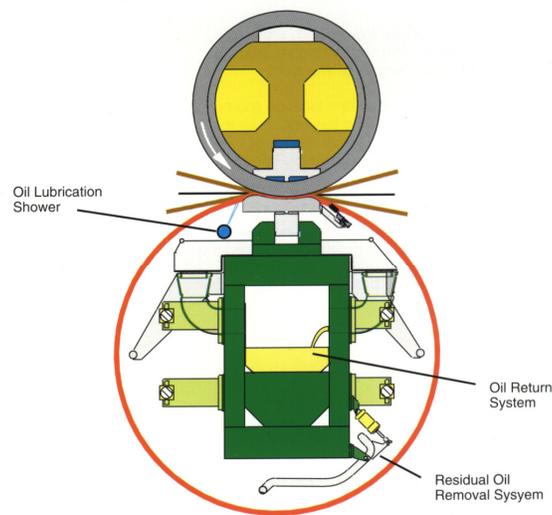
A utilização de prensas sapata (figura 4.10) proporciona diferentes vantagens com o aumento do teor seco, como a seguir relacionados:

- ✓ Aumento da resistência úmida da folha;
- ✓ Redução de quebras da folha com aumento da eficiência operacional;
- ✓ Incremento da densidade da folha e aumento dos testes de resistência física da folha.



*Figura 4. 10: Prensa de sapata (aberta).*

A figura 4.11 ilustra uma prensa de sapata fechada. A sapata é suportada sobre uma viga rígida e pressurizada contra uma camisa impermeável de poliuretano. A camisa lubrificada gira ao redor da sapata fixa pressionando o conjunto feltro/folha contra um rolo superior.



*Figura 4. 11: Prensa de sapata (fechada).*

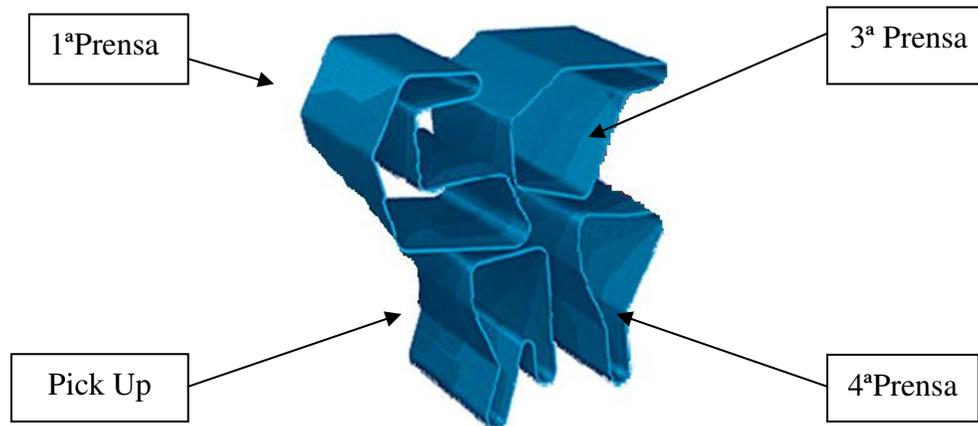
# CAPÍTULO 5

## FELTROS

### 5.1. Introdução

Os feltros são definidos como produtos têxteis, responsáveis pelo suporte físico da folha, transporte da folha, extração da água contida na folha e responsáveis por conferir acabamento e propriedades físicas da folha. Na prensagem, certa quantidade de água da folha é transferida para os feltros, alojando-se em seus interstícios, esse volume de água extraída, deve ser retirada do feltro, a fim de acondicioná-lo a uma nova prensagem. A absorção é feita pela ação capilar das fibras do feltro e pelos poros entre fibras. Se o feltro não absorver a água retirada da folha, após o NIP, em um curto espaço de tempo para permitir altas velocidades na máquina ou se os meios para remoção da água absorvida pelo feltro não forem eficientes, a pressão hidráulica criada provocará uma trituração da folha, ocasionando sua conseqüente quebra.

Os feltros são de diferentes tamanhos, custos e características físicas, sua duração depende da quantidade de água removida durante sua vida útil e assumem uma considerável parcela de responsabilidade na eficiência global da prensagem. Representa-se na figura 5.1 a configuração dos feltros do setor de prensagem de uma máquina de papel, o qual é composto por quatro feltros, diferentes entre si.



*Figura 5. 1: Feltros do setor de prensagem.*

O projeto dos feltros para se adequar à nova realidade das prensas, busca o máximo de desaguamento e um bom desempenho da máquina com uma aceitável vida útil. Cada posição de feltro nas prensas tem uma característica especial, resultado do seu estilo construtivo, estrutura, superfície e propriedades de compressão. Os feltros são produtos complexos, que englobam inúmeras variáveis interligadas, não somente ao produto têxtil, mas às suas aplicações e inter-relações junto à máquina de papel em seus aspectos de necessidades.

O dimensionamento de cada feltro deve estar voltado para cada aplicação específica, pois deverá conferir ao produto final as características necessárias para o desempenho operacional adequado e necessidades da máquina, ou seja, cada feltro é feito sob medida para satisfazer cada necessidade e condição de cada máquina de papel. Os feltros quando em operação são submetidos a intensas forças mecânicas e condições como: compressão, atrito, distorção, compactação e entupimento. Possuem restrita vida útil que irá variar de acordo com as condições acima relacionadas e demais influências os quais são submetidos. Algumas variáveis que devem ser consideradas durante o dimensionamento de feltros, são a seguir relacionadas:

1. Máquina de papel: tipo de prensas, velocidades e pressões operacionais;
2. Condicionamento e limpeza de feltros: vácuo, tipo de chuveiros, tipo de limpezas químicas;
3. Tipo de papel produzido: gramatura, matéria prima, água e características dos papeis;
4. Tipo de base de feltros e manta.

Se o feltro não absorver a água retirada da folha, após o NIP, em um curto espaço de tempo para permitir altas velocidades na máquina ou se os meios para remoção da água absorvida pelo feltro não forem eficientes, a pressão hidráulica criada provocará uma trituração da folha, ocasionando sua conseqüente quebra.

## 5.2. Fabricação de feltros

Em geral para a fabricação de um feltro, tem-se a seguinte seqüência, REESE (1999):

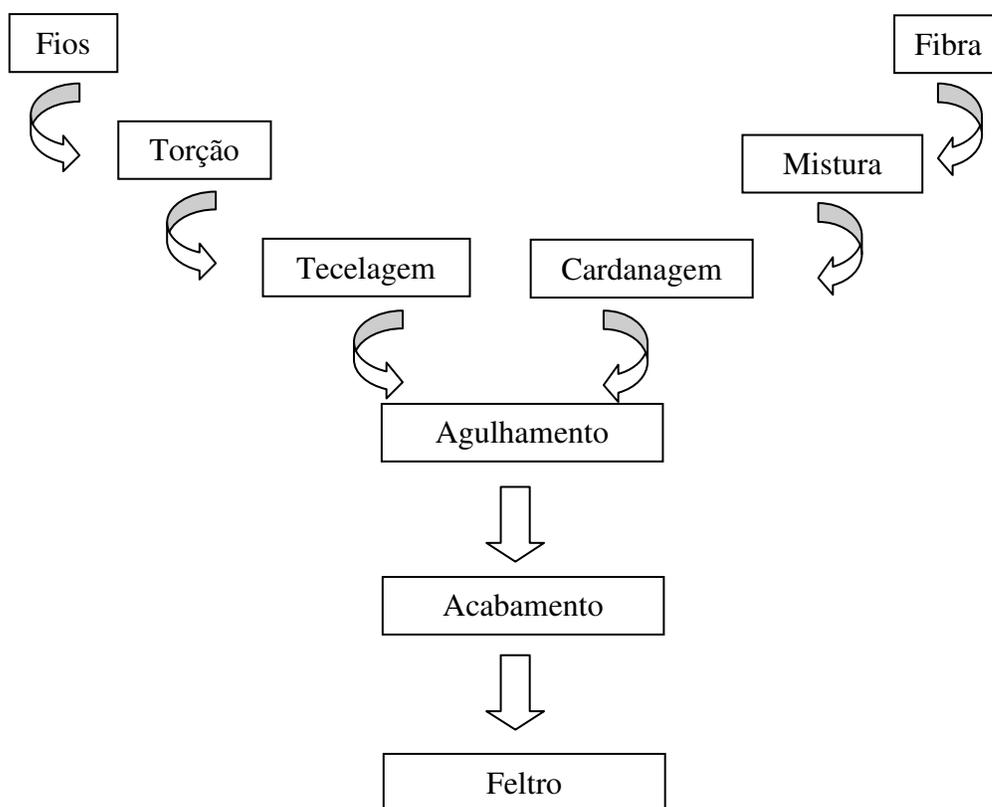


Figura 5. 2: Processo de fabricação de feltros.

Inicialmente para a formação do pano base, tem-se a preparação da matéria prima, ou seja, os fios para a formação do pano base. E em seguida, tem-se a torção dos fios para transformar monofilamentos em multifilamentos. O passo seguinte é a tecelagem. Para a formação da manta, temos a poliamida (nylon) como matéria prima, em seguida a cardanagem, ou seja, paralelismo das fibras. Neste ponto do processo, ocorre o agulhamento, da manta ao pano base. Por fim o acabamento, para melhorar as

características físicas, como espessura, lisura, permeabilidade, e por seguinte, sendo necessário ou não o tratamento químico, finalizando pela inspeção do produto, (figura 5.2).

### **5.3. Propriedades Técnicas dos Feltros**

#### **5.3.1. Espessura**

A espessura é uma importante característica do feltro durante o seu uso, pois está relacionada com a compactação e volume vazio, que influenciam na capacidade de drenagem do feltro. A espessura diminui bastante nos primeiros dias de uso do feltro, e depois de certa perda de espessura, o feltro tem que ser removido da máquina. De acordo com ADANUR (1997), os projetos de construção dos feltros determinam para cada posição de uma prensa, certa quantidade de véu a ser adicionado ao pano base, resultando em um peso final expresso em gramas por metro quadrado ( $\text{g/m}^2$ ).

#### **5.3.2. Gramatura**

A gramatura influencia na capacidade de manuseio da água e também na compressibilidade do feltro. O feltro deve possuir uma distribuição uniforme de massa, ou em caso contrário, o feltro pode provocar vibrações nas prensas, devido sua variação de densidade.

#### **5.3.3. Relação Manta/Base**

Esta relação é definida pela massa da manta, dividida pela massa da base, utilizada no feltro. Uma relação alta de manta/base pode provocar compactação precoce e baixa capacidade de remoção de água. Por outro lado, uma baixa relação manta/base pode provocar marcações na folha pelos fios da base do feltro, e com isto comprometer o desempenho do feltro na prensa.

#### **5.3.4. Permeabilidade ao ar**

É a medida de um volume de ar passando pelo feltro, por uma unidade de área (pés cúbicos / polegada quadrada ou CFM). Uma medida mais adequada para avaliar a resistência ao fluxo em um feltro nas condições de operação é medir a permeabilidade à

água; que junto com as medidas de permeabilidade ao ar, dá uma informação adicional sobre o desempenho de um feltro em determinada posição nas prensas.

### 5.3.5. Compressibilidade

As propriedades de compressão mecânica de um feltro afetam a largura do NIP e a pressão máxima no centro do NIP. Os parâmetros principais envolvidos com a compressibilidade do feltro são os volumes vazio a fração vazia e a espessura do feltro no centro do NIP. Segundo PAULAPURO (2000), a compressibilidade de um feltro é caracterizada freqüentemente, usando outro parâmetro chamado “relação água/feltro”. A relação água/feltro representa o peso de água que pode estar em uma estrutura a uma determinada pressão por peso de fibra do feltro.

### 5.3.6. Volume Vazio

O volume vazio é o espaço não ocupado pelos fios da base e da manta no tecido do feltro ADANUR (1997). Esta propriedade do feltro indica a quantidade de água que ele pode absorver. Volume vazio suficiente é um fator crítico quando a carga de água no NIP da prensa é muito alta. Em geral, as propriedades requeridas para feltros de máquina de fabricação de papel são:

- ✓ Remoção máxima de água do papel;
- ✓ Transferência segura da folha de papel;
- ✓ Runabilidade;
- ✓ Resistência ao ar;
- ✓ Resistência a compactação;
- ✓ Uniformidade;
- ✓ Break in;
- ✓ Instalação fácil.

## 5.4. Problemas relacionados aos feltros

### 5.4.1. Depósitos

Muitos depósitos são semelhantes, mas não se encontram dois precisamente iguais. Até mesmo uma mudança pequena dentro do processo, substâncias químicas de tratamento, diferentes fibras e cargas, velocidade de máquina, projeto do feltro, tensão do feltro, ou qualquer outra mudança, provoca alterações na quantidade e composição do depósito FURIBONDO (1987). Os depósitos de feltros podem ser orgânicos ou inorgânicos. Além da adição de cargas, sais insolúveis, hidróxidos, e óxidos podem depositar no feltro. Os depósitos podem ser formados em outro lugar da fábrica ou podem ser formados “in situ” no feltro. Estes depósitos inorgânicos também podem vir do refugo ou da fibra secundária. Os depósitos orgânicos podem incluir uma gama até mais larga de materiais. Materiais que na maioria das vezes são detectados na amostra analisada que apresentam características gordurosas provenientes de ácidos de breu e ésteres, óleo de hidrocarboneto e ceras. Depósitos orgânicos incluem freqüentemente uma variedade de componentes de fibra secundária como adesivos, plásticos (polietileno e polipropileno), resíduos de copolímeros de estireno-butadieno e preto de carbono. Substâncias químicas de tratamento, partículas de breu fortalecido, resinas de resistência úmida, auxiliar de retenção, partícula de colas, entre outros, podem ser achados nos depósitos de feltros. Depósitos podem ocorrer na superfície do feltro, ou eles podem ser encontrados, também, no interior do feltro. Em alguns casos, um tipo de depósito pode ocorrer na superfície, e um tipo diferente de depósito pode ser encontrado dentro do feltro. Depósitos podem causar baixo desempenho da seção de prensas, e problemas de qualidade da folha. Na seção das prensas podem ocorrer arraste de ar (perda de porosidade), redução da velocidade da máquina (perda de drenagem), esmagamento (perda de porosidade e baixo volume vazio do feltro), perda de vácuo no rolo de sucção e caixa de sucção, aumento no número de quebras e tempo de manutenção para troca do feltro.

Podem-se dividir estes materiais em cinco categorias:

a) – **Solúveis em álcalis:** são normalmente materiais orgânicos provenientes do próprio processo, como a lignina da madeira, amido, cola de breu e outros incorporados como aditivos. Estes materiais podem ser removidos do feltro com o uso de produtos a base de álcalis.

- b) – **Finos de papel:** são pequenas partículas de fibras que penetram mais nas camadas da manta em contato com a folha, e em menor proporção na estrutura da base e camada interna da manta do feltro. A melhor maneira de removê-las é através da ação mecânica do chuveiro de alta pressão e caixas de sucção.
- c) – **Cinzas ou cargas:** são materiais inorgânicos encontrados no feltro. Estes materiais inertes são os dióxidos de titânio, caulim, areia, carbonatos, talco e outros complexos metálicos de água dura. São removíveis pelo uso de ácidos ou produtos químicos específicos utilizados de preferência, em limpezas contínuas.
- d) – **Extraíveis:** estes materiais de entupimento são resinas ou polímeros solúveis em solventes. Os mais comuns são os pitches natural ou sintético, ceras, asfalto, látex, tintas, etc. O pitch natural é proveniente do processo de cozimento da madeira e de polpas mecânicas, sendo o restante, dos processos de desagregação das aparas utilizadas como matéria prima.
- e) – **Resinas para resistência úmida:** são polímeros sintéticos de caráter ácido (melanina e uréia formaldeído) ou neutro (polímeros de diferentes formas), produtos estes utilizados para fornecer resistência úmida em determinados tipos de papéis. A limpeza química com produtos químicos específicos e controles adequados pode proporcionar uma ação de limpeza pela quebra da estrutura química da resina.

Em máquinas de secar celulose os materiais de entupimento comumente encontrados nas análises de feltros retornados são os extraíveis, finos e cinzas ou cargas, na seguinte proporção:

- a) **Extraíveis:** variam de 60 a 80% e em situações críticas podem acusar valores próximos a 90-95% do total de material de entupimento encontrado.
- b) **Finos:** oscilam entre 15 a 20%, e em determinadas situações chegam até 30 % do total de material.
- c) **Cinzas:** depende do uso ou não de talco para o controle do pitch natural, portanto, são comuns valores de 0 a 20%.

#### 5.4.2. Compactação

Os materiais de entupimento atuam como aglutinantes e tendem a agrupar as fibras da manta dos feltros, causando maior adensamento do feltro no NIP. Portanto, o efeito de compactação determinado pela pressão total aplicada no NIP, pode ser acelerado pelo

aumento da pressão hidráulica em feltros entupidos. A perda de espessura do feltro é bastante acentuada na sua fase de assentamento, reduzindo posteriormente, com a compactação gradativa do feltro. Mesmo que os feltros contenham pouco ou nada de contaminante eles se compactam, ou seja, entopem pelas próprias fibras das mantas em função da pressão total aplicada no NIP.

### 5.4.3. Desgaste

O desgaste do feltro é constatado quando ocorre à perda progressiva de fibras, e ele pode ser causado pela ação mecânica e/ou química. Se a peça é mantida em máquina, os fios da base ficam expostos a uma ou a soma das ações de desgaste, destruindo a própria estrutura do feltro. Assim, o feltro perde sua resistência física e o desgaste prematuro é constatado, obrigando a sua substituição antes do previsto. Existem desgastes normais inerentes à própria posição e índices de utilização excessivos do feltro. Quando prematuro o desgaste pode ser observado em faixas ou homogêneo.

- ✓ Desgaste em faixas: provocado pelos chuveiros de alta pressão com operação inadequada, cobertura das caixas de sucção e rolos com defeito, chuveiro de lubrificação com adição de água não uniforme e/ou algum atrito causado por outro componente do circuito do feltro;
- ✓ Desgaste homogêneo: provocado por chuveiros de alta pressão com pressões acima do especificado, rolos mal retificados e/ou feltro inadequado para a operação a que se propõe.

### 5.4.4. Sistemas de condicionamento

Os sistemas atuais de condicionamento resumem-se basicamente em chuveiros de baixa pressão (alta vazão, lubrificação e detergente), chuveiros de alta pressão e caixas de sucção. O condicionamento pode ser feito mecanicamente, quimicamente ou pela combinação de ambos. Considerando a tendência cada vez maior de utilização de fibras recicladas, aumento de cargas, aditivos químicos e o fechamento dos sistemas de água com reutilização da água branca nos chuveiros, visando o controle de poluição e economia de energia, é necessário que os feltros sejam condicionados mecânica e quimicamente.

#### **5.4.5. Parada por motivos imprevistos**

Durante a vida útil dos feltros, além dos problemas que os mesmos podem sofrer conforme descrito nos itens anteriores existe também paradas para troca de feltros por motivos imprevistos, como:

- ✓ Acidentes em máquina;
- ✓ Problemas relacionados às prensas;
- ✓ Problemas nas caixas de vácuo.

# CAPÍTULO 6

## DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO

### 6.1. Análise inicial do problema

O processo para fabricação de papel é comum a qualquer fábrica, sendo inicialmente preparada a massa do papel, seguindo para a etapa de formação do papel pelo setor de formação, passando pelo setor de prensagem para retirada de água da folha de papel por prensagem e por último passando pelo setor de secagem, para secagem da folha através de ar quente, sendo enrolado em rolos gigantes chamados jumbo rolo. O setor de prensagem desta máquina de papel é essencialmente o mesmo em qualquer fábrica, com apenas algumas diferenças devido às novas tecnologias desenvolvidas para este setor ao longo dos anos.

No setor de prensagem, o objeto de estudo deste trabalho, a vida média de um feltro é dependente do tipo do feltro apresentando uma variação entre 35-45 dias. Sabendo que é mais econômica a retirada de água da folha de papel por prensagem do que por secagem. Este trabalho propõe um novo desenvolvimento no que diz respeito à análise de troca de feltros em uma máquina de papel. Para tanto, foi utilizado a Programação Mista Inteira e Linear para a otimização do seqüenciamento da produção de papéis.

## 6.2. Seqüência para desenvolvimento do modelo

As fases para desenvolvimento do modelo são demonstradas a seguir:

1. Dados iniciais:

- ✓ 1 máquina de papel;
- ✓ 4 diferentes feltros;
- ✓ Fabricação de 8 tipos de papeis diferentes;

2. Decisões a serem tomadas a cerca da fabricação de papel:

- ✓ Qual papel produzir;
- ✓ Quando produzir;
- ✓ Quanto produzir;
- ✓ Quando a necessidade de troca de feltros.

3. Obtenção dos dados industriais;

4. Análise dos dados através da técnica de PCA;

5. Análise da capacidade de absorção dos feltros;

6. Desenvolvimento de um modelo para prensagem do papel;

7. Desenvolvimento do modelo para otimização da vida útil dos feltros, através do seqüenciamento de produção de bobinas.

Após a seqüência acima descrita, o modelo então foi validado através dos dados reais industriais.

## 6.3. Análise de PCA

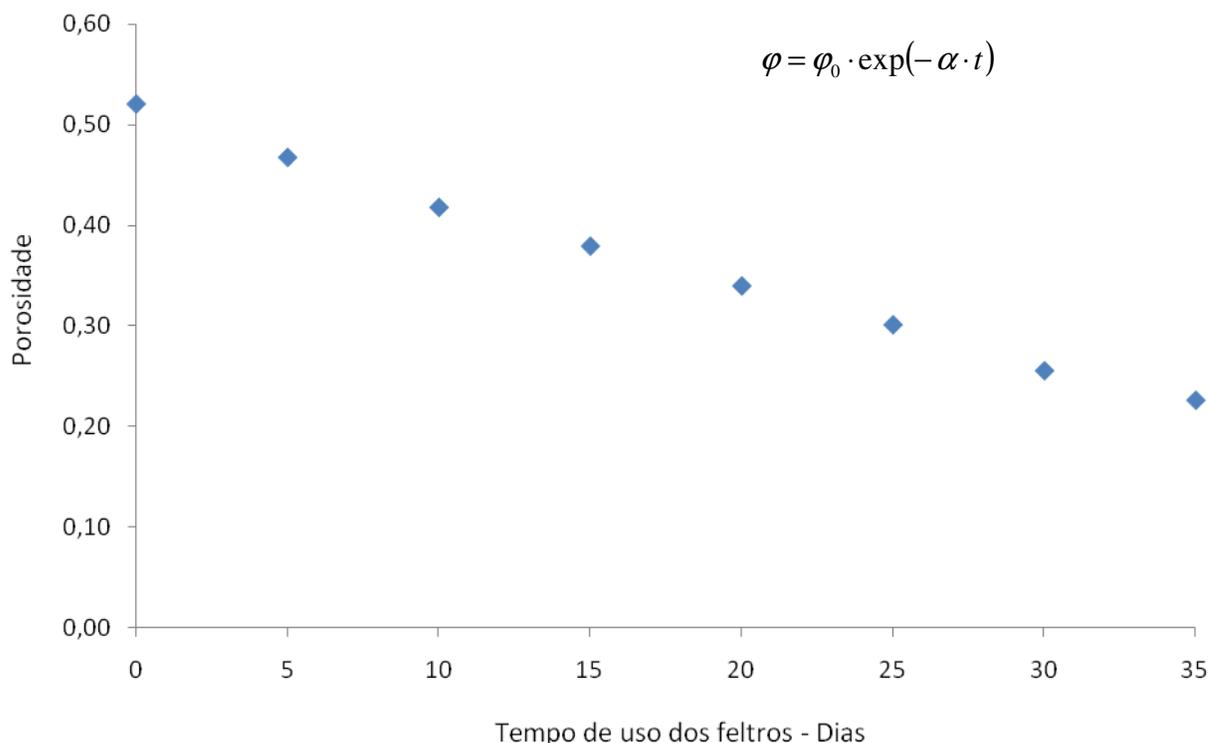
A análise de PCA tem como objetivo determinar a dimensionalidade de um conjunto de dados e produzir um pequeno número de combinações lineares (componentes principais) de um conjunto de variáveis que retêm o máximo possível de informação (variância) das variáveis originais. Ele realiza uma exploração inicial dos dados reduzindo o número grande de variáveis para um número menor de funções lineares (componentes principais) descrevendo ou ordenando dados através do agrupamento de variáveis que são correlacionadas.

Para realização deste trabalho foi necessária a obtenção de dados do andamento do setor de prensagem de uma máquina de papel em um determinado ano. A máquina escolhida possuía um monitoramento em diversos pontos do processo. O número de dados a serem analisados foi de aproximadamente 157.680, sendo esta a quantidade a dificuldade inicial para o desenvolvimento deste trabalho. Para selecionar as variáveis dentro desta coleção de dados que teriam realmente uma maior influência na troca dos feltros foi utilizada a ferramenta estatística de Análise de Componentes Principais – PCA, através da utilização dos softwares Statistica7 e Minitab 14, e que no item seguinte demonstrados os resultados obtidos desta análise.

#### **6.4. Influência da capacidade de absorção dos feltros**

Através dos softwares estatísticos foram feitas diversas planilhas para análise de PCA e observou-se que duas variáveis eram as que mais influenciavam nas trocas de feltros, sendo elas a velocidade da máquina de papel e a pressão exercida nas prensas, pois estas afetam diretamente a espessura e a porosidade do feltro. Quando a porosidade do feltro cai muito, ele passa a ter pouca capacidade de remoção de água. O decaimento da porosidade ocorre durante seu tempo de uso, que dura entre 30 a 45 dias, dependendo do tipo do feltro.

A porosidade e a espessura do feltro estão relacionadas entre si, como pode se verificar no modelo matemático descrito nesta tese. O que se observou a partir dos dados analisados foi uma queda continuada da porosidade com o tempo. Um ajuste exponencial da porosidade com o tempo mostrou-se adequado, como se pode observar para um caso apresentado na Figura 6.1 (corresponde ao feltro A da Tabela 6.1), além de fisicamente ter os limites corretos. Dessa forma, o feltro pode ser caracterizado pelo parâmetro  $\alpha$  (coeficiente de decaimento na curva exponencial ajustada), cujo valor depende de cada feltro e das condições de operação da prensa



*Figura 6. 1: Decaimento da porosidade com o tempo no feltro.*

Observou-se pela análise dos dados uma forte correlação entre o coeficiente de decaimento da porosidade do feltro ( $\alpha$ ) e a pressão e a velocidade utilizadas nas prensas. Um exemplo de correlação, para um caso específico de feltro, é a equação (02):

$$\alpha = (0,0000653 \cdot p + 0,0000122 \cdot v + 0,00336) / 24 \quad (02)$$

onde  $p$  é dado em Kpa,  $v$  em m/s e  $\alpha$  em 1/h. Outros feltros apresentam relações diferentes, pois  $\alpha$  é também uma função das propriedades físicas do feltro. Na tabela 6.1 apresentam-se exemplos do valor ajustado de  $\alpha$  a partir dos dados de porosidade, a espessura final do feltro e a espessura calculada utilizando-se o ajuste de  $\alpha$  em função de  $p$  e  $v$ . Pode-se observar uma boa concordância.

Tabela 6. 1: Tabela de correlações

Tipo de Filtro	Alfa (1/h)	Espessura Experimental (mm)	Espessura Calculado (mm)	Pressão (kPa)	Velocidade (m/s)
A	0,000897	-0,0281	-0,0283	76	992
B	0,000893	-0,0365	-0,0363	77	981
C	0,000913	-0,0317	-0,0311	77	1017
D	0,000876	-0,0373	-0,0417	70	985
E	0,000886	-0,0328	-0,0317	72	993
F	0,000909	-0,0471	-0,0514	77	1009
G	0,000985	-0,0584	-0,0530	110	984
H	0,000988	-0,0406	-0,0490	111	986
I	0,000994	-0,0358	-0,0330	113	986
J	0,001022	-0,0312	-0,0442	118	1012
K	0,001032	-0,0539	-0,0459	120	1021

Na construção do modelo de otimização utilizado nessa tese, optou-se por utilizar apenas o parâmetro de decaimento  $\alpha$  e a porosidade inicial do feltro. Além de simplificar a representação do modelo, pode-se representar o conjunto prensa/feltro com um número reduzido de parâmetros, uma vez que  $\alpha$  engloba características físicas do feltro e operacionais da prensa em um único parâmetro. Existem outros parâmetros do conjunto feltro/prensa que também devem ser especificados no modelo, todos relacionados à extração de água do papel, uma vez que essa é a função da prensagem. Entretanto, a relação com o tempo está toda no parâmetro  $\alpha$ .

## 6.5. Custo total de operação

Os custos operacionais mais importantes considerados para o desenvolvimento do modelo matemático foram: custo de compra e troca de feltros, custos para prensagem do papel e custos para secagem do papel, os quais serão descritos nos itens seguintes.

### 6.5.1. Compra e troca de feltros

Foi considerado que no início da produção todos os feltros são novos e definido as variáveis binárias  $y_{j1}$  para trocas de feltros na posição  $j$  no início do intervalo  $k$  (Figura

6.1). Cada posição é única nas máquinas de papel, (neste caso existem quatro diferentes) e definindo as variáveis binárias de troca de feltros, como a seguir:

$$y_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{se feltro na posição } j \text{ trocado no início do intervalo } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

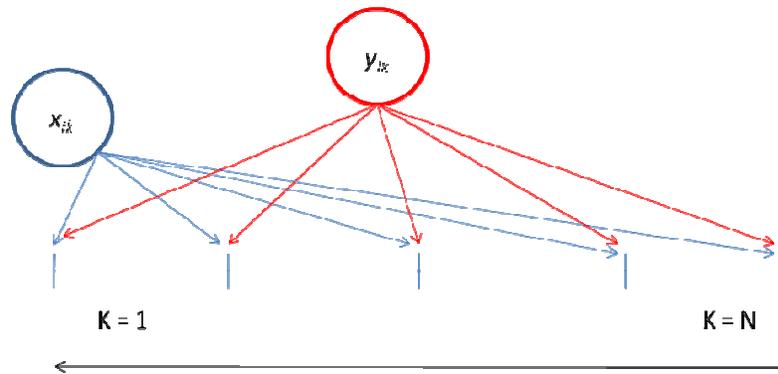


Figura 6. 2: Variáveis binárias.

Uma vez que se considera que a produção começa com feltros novos, então:

$$y_{j1} = 1 \quad j = 1,2,3,4 \quad (03)$$

Para os cálculos de custos dos feltros, foi necessária a obtenção das características físicas de cada feltro trocado, como volume de vazios, fração volumétrica de fibras, fator de extração, porosidade, espessura final e inicial. Devido ao fato de estes serem dados confidenciais não estará demonstrado neste trabalho. Os cálculos de custos dos feltros foram obtidos multiplicando-se a gramatura do feltro ( $\text{g/m}^2$ ), pelo custo que em geral é de US\$ 120,00/kg pela área de cada feltro o qual está representada na tabela 6.1.

Tabela 6. 2: Dimensões dos feltros

Posição	$j$	Comprimento m	Largura m
PU	1	34,5	8,5
1P	2	26,6	8,5
3P	3	23,5	8,5
4P	4	29,6	8,5

### 6.5.2. Custo de energia para prensagem e secagem

Para o cálculo de custo de energia de prensagem e secagem, foi adotada a base de cálculos utilizado na indústria papelreira, (figura 6.3), onde multiplicamos a quantidade de bobinas produzidas pelo custo de prensagem para obtenção do custo total gasto para produção do lote de bobinas, e o custo de secagem vezes o peso total do lotes de bobinas dividido pela área total de bobinas produzidas.

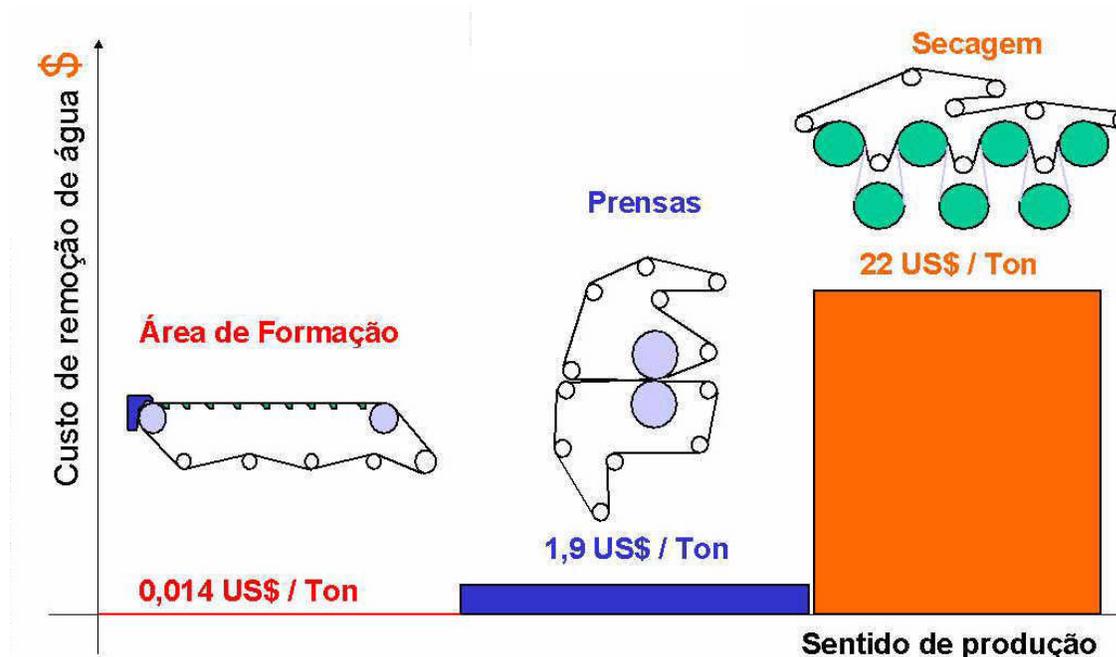


Figura 6. 3: Custo de secagem e prensagem.

Fonte: ABTCP

## 6.6. Desenvolvimento do modelo matemático

### 6.6.1. Considerações Iniciais

Foi dividida a programação por “bobinas no final do processo”, independentemente do tempo de processamento de cada um. Horizonte de tempo:  $T$

$$T = \sum_{k=1}^N t_k \quad (04)$$

Desde que não ocorram “inesperados”, ou pelo menos se planeje folga para o caso de inesperados, o tempo total  $T$  é mesmo independentemente da ordem de processamento. Entretanto, a unidade final de cada rolo processado muda, dependendo do que foi secado antes, que influencia o desgaste do feltro usado para secagem.

Definir as variáveis binárias para produção das bobinas:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{para bobina } i \text{ processado no intervalo } k \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

As seguintes restrições onde todas as bobinas (ou grupo de bobinas) podem ser produzidas em apenas um intervalo; cada intervalo processa uma bobina (ou grupo de bobinas).

$$\sum_{k=1}^N x_{ik} = 1 \quad i = 1, \dots, N \quad (05)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ik} = 1 \quad k = 1, \dots, N \quad (06)$$

Cada intervalo de tempo e dado por:

$$t_k = \sum_{i=1}^N T_i \cdot x_{ik} \quad (07)$$

Onde essas variáveis são relacionadas com o horizonte de tempo  $T$ :

$$T = \sum_{k=1}^N t_k \quad (08)$$

Neste modelo, a função objetivo inclui o custo de feltros novos, o custo de energia no setor de prensas, e custo de energia no setor de secagem. Utilizando o horizonte de tempo fixo, a função objetivo utiliza a remoção de água nas bobinas no setor de secagem em cada intervalo  $k$ ,  $m_k$ , e não o fluxo  $\dot{m}_k$ . A função objetivo é dada pela equação 08:

$$\min z = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^4 CF_j \cdot y_{jk} + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N CP_{i,k} \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^N CS_k \cdot m_k \quad (09)$$

O custo de energia na secagem para o intervalo  $k$  é dado por:

$$CS_k = \sum_{i=1}^N CS_{i,k} \cdot x_{ik} \quad (10)$$

A massa de água evaporada no intervalo  $k$  no setor de secagem é dada por:

$$m_k = m_k^e - m_k^s - m_k^{rp} \quad (11)$$

$$m_k^e = \sum_{i=1}^N [U_i^e \cdot A_i] \cdot x_{ik} \quad (12)$$

$$m_k^s = \sum_{i=1}^N [U_i^s \cdot A_i] \cdot x_{ik} \quad (13)$$

O balanço de massa na equação 11 corresponde à massa de água evaporada no intervalo  $k$ , a variável  $m_k^e$  é a quantidade inicial de água no início do setor de prensagem,  $m_k^s$  é a quantidade de água no final do setor de prensagem, e  $m_k^{rp}$  é a quantidade de água removida do setor de prensagem (figura 6.4). Os valores de área de cada bobina processada ( $A_i$ ) e de umidade do papel por unidade de área na entrada e saída do processo ( $U_i^e$  e  $U_i^s$ ) são dados.

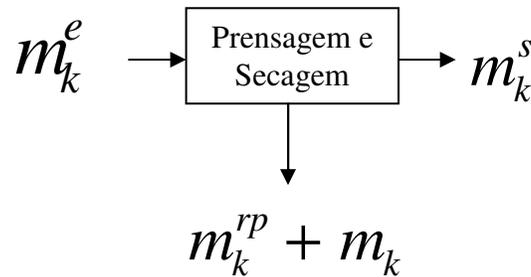


Figura 6.4: Balanço de massa.

A massa de água retirada pela prensagem no intervalo  $k$  é dada por:

$$m_k^{rp} = \sum_{j=1}^4 m_{jk} \quad k = 1, \dots, N \quad (14)$$

A água removida no setor de prensagem é igual à massa de água na parte inicial do setor de prensagem menos a massa de água que sai do papel depois de deixar o setor de prensagem (e antes da entrada do setor de secagem):

$$m_k^{rp} = m_k^e - m_k^{sp} \quad k = 1, \dots, N \quad (15)$$

Da teoria de prensagem, tem-se que a quantidade de água na saída do setor de prensagem, após o intervalo  $k$ , é dada por:

$$m_k^{sp} = m_k^e \cdot \prod_{j=1}^4 \frac{1}{[1 + \bar{\Lambda}_{jk}]} \quad k = 1, \dots, N \quad (16)$$

Em que o fator de extração  $\bar{\Lambda}_{jk}$  depende da média do tempo de utilização do feltro  $\bar{\tau}_{jk}$ , da seguinte forma:

$$\bar{\Lambda}_{jk} = \lambda_{jk} \cdot \frac{\varepsilon_{0,j} \cdot \exp(-\alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk})}{[1 - (1 - \varepsilon_{0,j}) \cdot \exp(-\alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk})]} \quad (17)$$

$$\Lambda_{jk}^0 = \sum_{i=1}^N \lambda_{ij} \cdot x_{ik} \quad (18)$$

Em que  $\lambda_{jk}$  o fator de extração do feltro novo  $j$  para cada bobina  $i$ ,  $\alpha_j$  o coeficiente de diminuição da vida útil do feltro, e  $\varepsilon_{0,j}$  a fração volumétrica de fibra no feltro novo. Para equação (17) pode-se observar que para  $\bar{\tau}_{jk} \rightarrow \infty$  tem-se que  $\bar{\Lambda}_{jk} \rightarrow 0$ , o qual na equação (16) implica que  $m_k^{sp} \rightarrow m_k^e$ , ou seja, a massa de água que sai da prensagem é igual à que entra no setor de prensagem. Para o desenvolvimento completo da equação 17, ver apêndice 1.

A média de tempo de operação do feltro  $j$  na máquina de papel,  $\bar{\tau}_{jk}$  é igual ao tempo do feltro  $j$  no início do intervalo  $k$ ,  $\theta_{jk}$ , mais a média deste intervalo de tempo  $t_k$  é dada pela equação (19):

$$\bar{\tau}_{jk} = \theta_{jk} + 0.5 \cdot t_k \quad (19)$$

O valor  $\theta_{jk}$  depende da origem do feltro, ou seja, resultante da máquina ( $y_{jk} = 0$ ), ou novo ( $y_{jk} = 1$ ). A variável  $\theta_{jk}$  mede o tempo de vida dos feltros desde que foram trocados. Para novos feltros  $\theta_{jk} = 0$ . O tempo de vida de operação dos feltros nas prensas no intervalo  $k$  é dado por:

$$\tau_{jk} = \theta_{jk} + t_k \quad k = 1, \dots, N \quad (20)$$

$$\theta_{jk} = \tau_{j,k-1} \cdot (1 - y_{jk}) \quad k = 2, \dots, N \quad (21)$$

$$\theta_{j1} = 0 \quad (22)$$

Neste modelo, o tempo requerido para troca de feltros, foi negligenciado, pois tipicamente representa 1-3% do tempo total. O custo operacional de troca dos feltros inclui o custo de compra de um novo, no valor do parâmetro  $CF_j$ .

O modelo dado pelas equações (3) – (4) e (6) – (22) corresponde a uma programação mista inteira e linear (MILP) a qual envolve formas não lineares e variáveis contínuas, tais como nas equações (9), (16), e (21). Para obter um modelo mais tratável, o modelo foi reformulado utilizando-se formas lineares nas variáveis inteiras e não lineares apenas nas variáveis contínuas.

Em primeiro lugar, a restrição (21) pode ser trocada por restrições equivalentes:

$$\theta_{jk} = \tau_{j,k-1}^{(2)} \quad (23)$$

$$\tau_{j,k-1} = \tau_{j,k-1}^{(1)} + \tau_{j,k-1}^{(2)} \quad (24)$$

$$0 \leq \tau_{j,k-1}^{(1)} \leq M_1 \cdot y_{jk} \quad (25)$$

$$0 \leq \tau_{j,k-1}^{(2)} \leq M_1 \cdot (1 - y_{jk}) \quad (26)$$

Em que  $M$  é um número dado (parâmetro do modelo), grande o suficiente para incluir todos os valores possíveis de tempo anterior.

Em seguida, o termo  $cs_k \cdot m_k$  na equação (9) pode ser substituído por:

$$cs_k \cdot m_k = cs_k \cdot (m_k^e - m_k^s - m_k^{rp}) = cs_k \cdot (m_k^e - m_k^s - m_k^e + m_k^{sp}) = cs_k \cdot m_k^{sp} - cs_k \cdot m_k^s \quad (27)$$

O último termo da equação (27) pode ser escrito como,

$$CS_k \cdot m_k^s = \left( \sum_{i=1}^N CS_{ik} \cdot x_{ik} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^N U_i^s \cdot A_i \cdot x_{ik} \right) = \sum_{i=1}^N CS_{ik} \cdot U_i^s \cdot A_i \cdot x_{ik} \quad (28)$$

Desde que apenas para um  $x_{ik}$  seja igual a 1 em cada somatório.

O primeiro termo da equação (27) pode ser escrito como:

$$\sum_{k=1}^N CS_k \cdot m_k^{sp} = \sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N CS_{ik} \cdot ma_{ik} \quad (29)$$

$$m_k^{sp} = \sum_{i=1}^N ma_{ik} \quad (30)$$

Em que  $ma_{ik} = 0$  se  $x_{ik} = 0$ . Equação (9) então:

$$\min z = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^4 CF_j \cdot y_{jk} + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N CP_{i,k} \cdot x_{ik} + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N CS_{ik} \cdot ma_{ik} - \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N CS_{ik} \cdot U_i^s \cdot A_i \cdot x_{ik} \quad (31)$$

Em terceiro lugar, o termo de extração de água no setor de prensagem pode ser escrito como:

$$\ln(m_k^{sp}) = \ln(m_k^e) - \sum_{j=1}^4 \ln(1 + \bar{\Lambda}_{jk}) \quad (32)$$

$$\ln \bar{\Lambda}_{jk} = \ln \Lambda_{jk}^0 - \alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk} + \ln(\xi_{0,j}) - \ln(1 - (1 - \xi_{0,j}) \cdot \exp(-\alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk})) \quad (33)$$

Definido as variáveis auxiliares:

$$u_{jk} = \ln \bar{\Lambda}_{jk} \quad (34)$$

$$v_k = \ln(m_k^{sp}) \quad (35)$$

Então as restrições resultam no modelo equivalente,

$$v_k = \sum_{i=1}^N (\ln(U_i^e \cdot A_i)) \cdot x_{ik} - \sum_{j=1}^4 \ln(1 + \exp(u_{jk})) \quad (36)$$

$$u_{jk} = \sum_{i=1}^N (\ln \lambda_{ij}) \cdot x_{ik} - \alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk} + \ln \xi_{0,j} - \ln(1 - (1 - \xi_{0,j}) \cdot \exp(-\alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk})) \quad (37)$$

$$ma_{ik} = m_{ik}^{(1)} \quad (38)$$

$$m_{ik}^{(1)} + m_{ik}^{(2)} = \exp(v_k) \quad (39)$$

$$0 \leq m_{ik}^{(1)} \leq M_2 \cdot x_{ik} \quad (40)$$

$$0 \leq m_{ik}^{(2)} \leq M_2 \cdot (1 - x_{ik}) \quad (41)$$

Em que  $M_2$  é um parâmetro grande o suficiente para considerar a máxima extração de água que podem ser removidas da bobina  $i$ .

Note que a quantidade de água  $m_k^{sp}$  na saída do setor de prensagem não pode ser menor que a quantidade de água  $m_k^s$  fixada para a saída do processo de secagem. Caso contrário, uma restrição adicional deve ser adicionada:

$$v_k \geq \sum_{i=1}^N (\ln(U_i^s \cdot A_i)) \cdot x_{ik} \quad (42)$$

O modelo MILP é formulado para minimização da função objetivo dada pela equação (30), sujeito as restrições das equações (3), (4) – (6), (19) – (20), (22) – (26), e (36) – (42).

## 6.7. Software GAMS

O Software GAMS (General Algebraic Modeling System) é designado à construção e solução de grandes e complexos modelos de programação matemática, oferecendo recursos poderosos para programadores e sendo mais compreensível para usuários de modelos de outras disciplinas. Podendo fazer declarações de modelos algébricos de forma concisa numa linguagem que é facilmente lida tanto por modeladores quanto por computadores. Assim, o Software GAMS pode melhorar substancialmente a produtividade de modeladores e expandir a extensão e utilidade de programação de aplicações matemáticas em análise de plano de ação e tomada de decisões. O objetivo de desenvolver o GAMS surgiu de

experiências frustradas de um grupo de modeladores econômicos do Banco Mundial. Os programadores deste grupo escreviam seus programas em FORTRAN e para preparar cada modelo para a solução, o trabalho era árduo e erros eram fáceis de serem cometidos e difíceis de serem encontrados. O programador do modelo era a única pessoa que sabia exatamente como ele funcionava. E ainda, se um programador desistia, levava meses para o sucessor dominar o modelo. Os Modelos eram difíceis e caros para serem mudados, especialmente se a mudança não havia sido prevista e planejada. Em apresentações de seminários, os modeladores tinham que defender as versões existentes de seus modelos quase que irracionalmente, porque o tempo e o dinheiro necessários fazer as modificações propostas eram proibitivos. Desta forma, o GAMS é projetado para mudar esta situação, produzindo um sistema de estrutura e linguagem de programação no qual expressões concisas, generalizações e portabilidade são facilmente mantidas e o computador é utilizado também para rastrear erros e detalhes de programação.

## **6.8. Solver**

O solver utilizado para o desenvolvimento deste modelo foi a associação dos solvers CPLEX10/SBB/CONOPT, onde o CONOPT (Contínuos Optimizer) utiliza o algoritmo do Gradiente Reduzido Generalizado o qual método consiste essencialmente em calcular iterativamente o gradiente reduzido da função objetivo, ou seja, determinar as derivadas desta função em ordem as variáveis de decisões, já o SBB (standard Branch and Bound) utiliza o algoritmo da ramificação e limite, onde através dele conseguimos a obtenção do ótimo global da função objetivo, e o solver CPLEX 10 utiliza o algoritmo Branch and Bound.

# CAPÍTULO 7

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 7.1. Dados Industriais

Inicialmente foram coletados os dados necessários para a modelagem, através de dados industriais e foi analisada a quantidade de troca de feltros em um determinado ano. Foram elaboradas tabelas, listando a quantidade de troca de feltros, sua vida útil e suas características físicas. No ano considerado, foram efetuadas 22 composições de troca de feltros em quatro posições distintas. Na tabela 7.1, relaciona-se as trocas de feltros realizadas através de letras e números dependendo da posição, feltro pick up chamamos PU, feltro de 1ª prensa chamamos de 1P, 3ª prensa chamamos de 3P e 4ª prensa de 4P e números para cada feltro novo trocado na mesma posição (ver figura 5.1). Cada número refere-se a um feltro diferente na posição indicada acima.

*Tabela 7. 1: Composição de troca de feltros*

<i>Composição de Troca</i>	<i>Posição Pick UP</i>	<i>Posição 1ª Prensa</i>	<i>Posição 3ª Prensa</i>	<i>Posição 4ª Prensa</i>
1	PU-1	1P-1	3P-1	4P-1
2	PU-2	1P-2	3P-2	4P-2
3	PU-3	1P-2	3P-3	4P-3
4	PU-4	1P-3	3P-4	4P-4
5	PU-5	1P-3	3P-4	4P-4
6	PU-6	1P-3	3P-5	4P-5
7	PU-6	1P-3	3P-6	4P-5
8	PU-6	1P-3	3P-6	4P-6
9	PU-7	1P-3	3P-6	4P-6
10	PU-7	1P-4	3P-6	4P-6
11	PU-7	1P-4	3P-7	4P-7
12	PU-8	1P-4	3P-7	4P-7
13	PU-9	1P-5	3P-8	4P-8
14	PU-10	1P-5	3P-8	4P-9
15	PU-11	1P-5	3P-9	4P-9
16	PU-11	1P-6	3P-9	4P-10
17	PU-12	1P-6	3P-10	4P-11
18	PU-13	1P-7	3P-11	4P-12
19	PU-13	1P-7	3P-12	4P-12
20	PU-14	1P-7	3P-12	4P-13
21	PU-14	1P-7	3P-13	4P-13
22	PU-15	1P-8	3P-14	4P-14

Os dados lançados no programa do GAMS foram inicialmente tratados visando à obtenção do tempo de processamento de cada bobina, bem como a área total de cada bobina, como mostrado na tabela 7.2

*Tabela 7. 2: Área e tempo de processamento de bobinas*

<b>Papel</b>	<b>Área de Bobinas (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Tempo de Processamento (h)</b>
<b>P1</b>	<b>601</b>	<b>1,25</b>
<b>P2</b>	<b>748</b>	<b>1,45</b>
<b>P3</b>	<b>858</b>	<b>1,50</b>
<b>P4</b>	<b>955</b>	<b>1,65</b>
<b>P5</b>	<b>1075</b>	<b>1,77</b>
<b>P6</b>	<b>1144</b>	<b>1,83</b>
<b>P7</b>	<b>1334</b>	<b>2,00</b>
<b>P8</b>	<b>1437</b>	<b>2,08</b>

## 7.2. Descrição geral dos casos estudados

O programa desenvolvido foi implementado em GAMS versão 25.5, juntamente com os solvers CPLEX10/SBB/CONOPT. Foi utilizada uma estação de trabalho Pascal com 4 processadores– Intel Xeon™ com 3,20 GHz, no laboratório do Prof.Grossmann na Carnegie Mellon University em Pittsburgh, Pensilvânia, USA, no ano de 2007/2008, período onde foi desenvolvido meu Doutorado Sanduíche. Os resultados estão apresentados da seguinte forma:

Parte I:

- ✓ 22 estudos de caso;

Parte II – Análise Geral:

- ✓ Custos;
- ✓ Remoção de água;
- ✓ Seqüência de produção;
- ✓ Aumento de produção;
- ✓ Troca de feltros;
- ✓ Duração de feltros.

Para a comparação dos resultados obtidos, foram simulados dois tipos de programas para as composições de trocas. Programas com o seqüenciamento fixo das bobinas, sendo este igual ao industrial no ano considerado, e programas com o seqüenciamento livre, onde o modelo sugeriu o melhor seqüenciamento de produção de bobinas para maior remoção de água na prensagem.

### 7.3. Parte I – Estudos de Caso

Nesta seção relacionamos os 22 estudos de caso estudados no ano considerado, onde se apresenta os dados, resultados e análise de cada um dos programas estudados.

#### 7.3.1. Estudo de Caso I

No estudo de Caso I, foram produzidas ao total 406 bobinas. Na tabela 7.3 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7. 3: Dados do estudo de Caso I*

<b>Tipo do Papel</b>	<b>Quantidade de bobinas</b>	<b>Tempo de processamento h</b>	<b>Tamanho do lote de bobinas m<sup>2</sup></b>	<b>Peso do lote de bobinas ton.</b>	<b>Custo de prensagem US\$</b>	<b>Custo de secagem US\$</b>
P1	113	141	67867,80	68	214,700	77,044.898
P2	36	52	26934,34	27	68,400	88,661.089
P3	38	57	32603,41	30	72,200	87,919.157
P4	61	101	58252,19	58	115,900	92,591.397
P5	62	110	66640,08	67	117,800	95,851.155
P6	45	83	51480,00	51	85,500	94,439.024
P7	51	102	68023,80	68	96,900	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 3,28% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.4, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.4: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso I

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T4	T1	T4
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

No figura 7. 1 observa-se os valores obtidos de remoção de água para as 4 posições de prensas dessa máquina, onde se obteve um aumento de 2,77% comparando-se o modelo e o industrial, e na figura 7.2 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

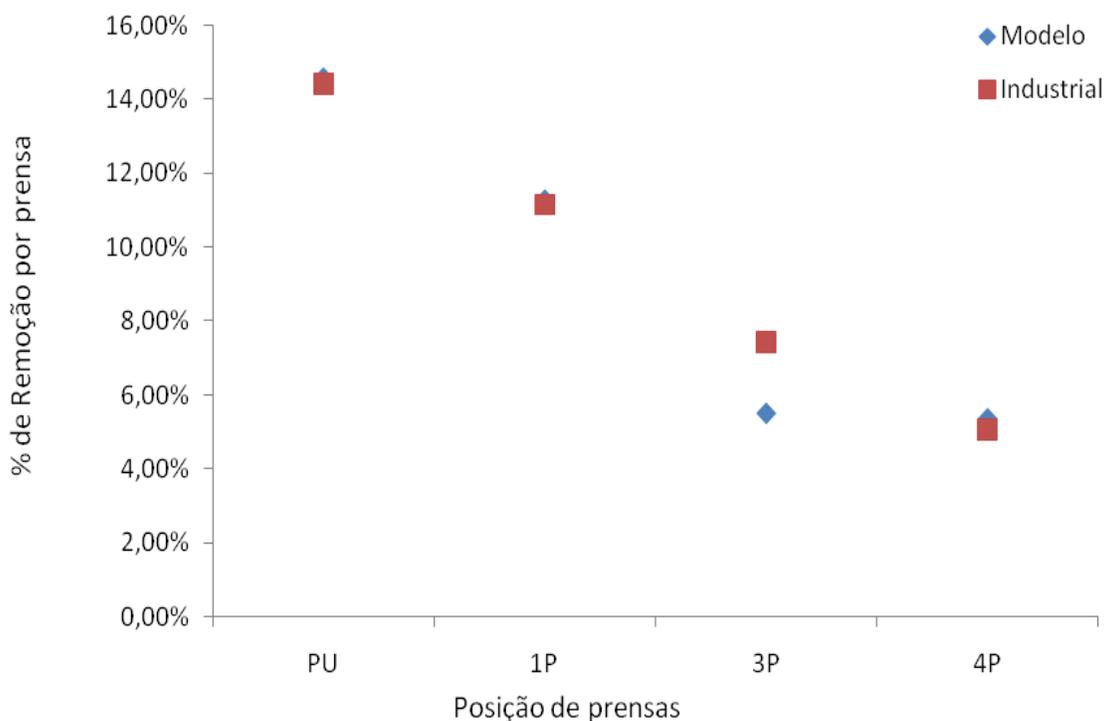


Figura 7. 1: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso I.

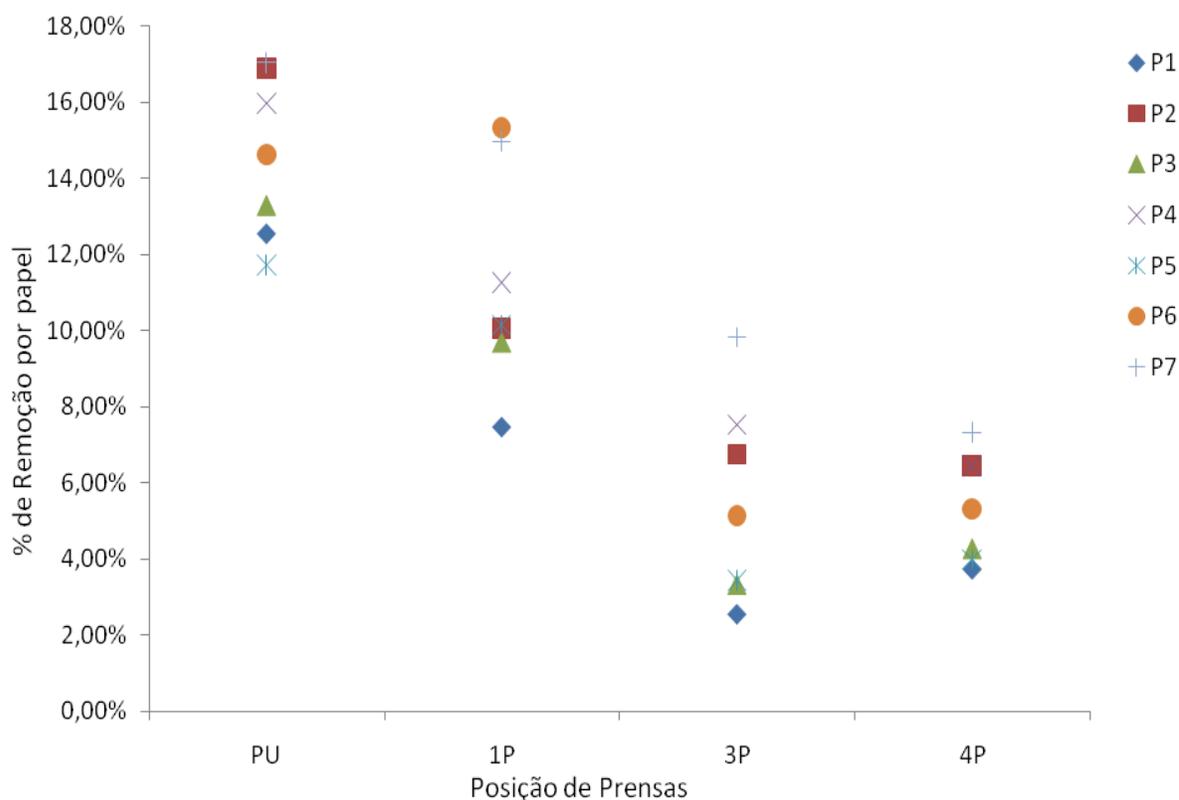


Figura 7. 2: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso I.

### 7.3.2. Estudo de Caso II

No estudo de Caso II, foram produzidas ao total 441 bobinas. Na tabela 7.5 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.5: Dados do estudo de Caso II

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	162	203	97297,00	97	307,800	77,044.898
P2	109	158	81551,18	81	207,100	88,661.089
P3	28	42	24023,56	22	53,200	87,919.157
P4	56	92	53477,42	53	106,400	92,591.397
P5	59	104	63415,56	63	112,100	95,851.155
P6	15	28	17160,00	17	28,500	94,439.024
P7	12	24	16005,60	16	22,800	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 6,38% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Neste estudo de caso teve-se somente necessidade de troca de feltros para o programa industrial, conforme tabela 7.6.

Tabela 7.6: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso II

Posição de Feltro	Industrial		
	Intervalo de Tempo		
	T1	T3	T4
PU	$y_{jk=1}$	-	-
1P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	-

No figura 7.3 observa-se os valores obtidos de remoção de água para as 4 posições de prensas dessa máquina, onde se obteve um aumento de 4,14% comparando-se o modelo e o industrial, e na figura 7.4 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

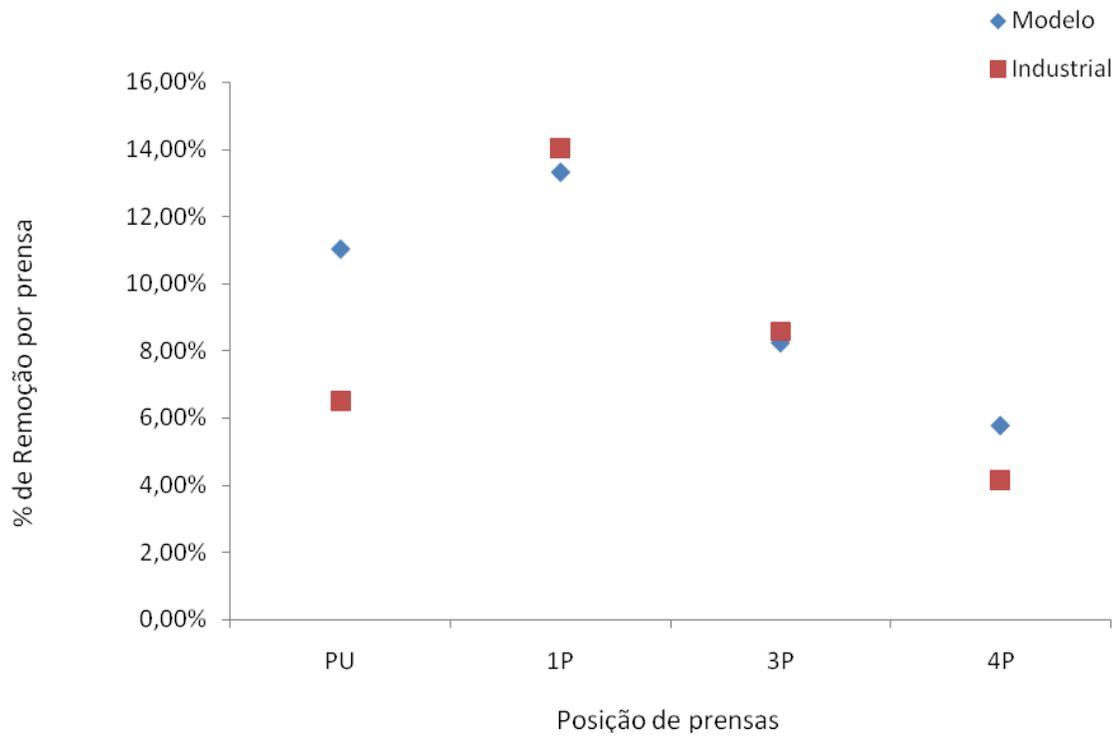


Figura 7. 3: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso II

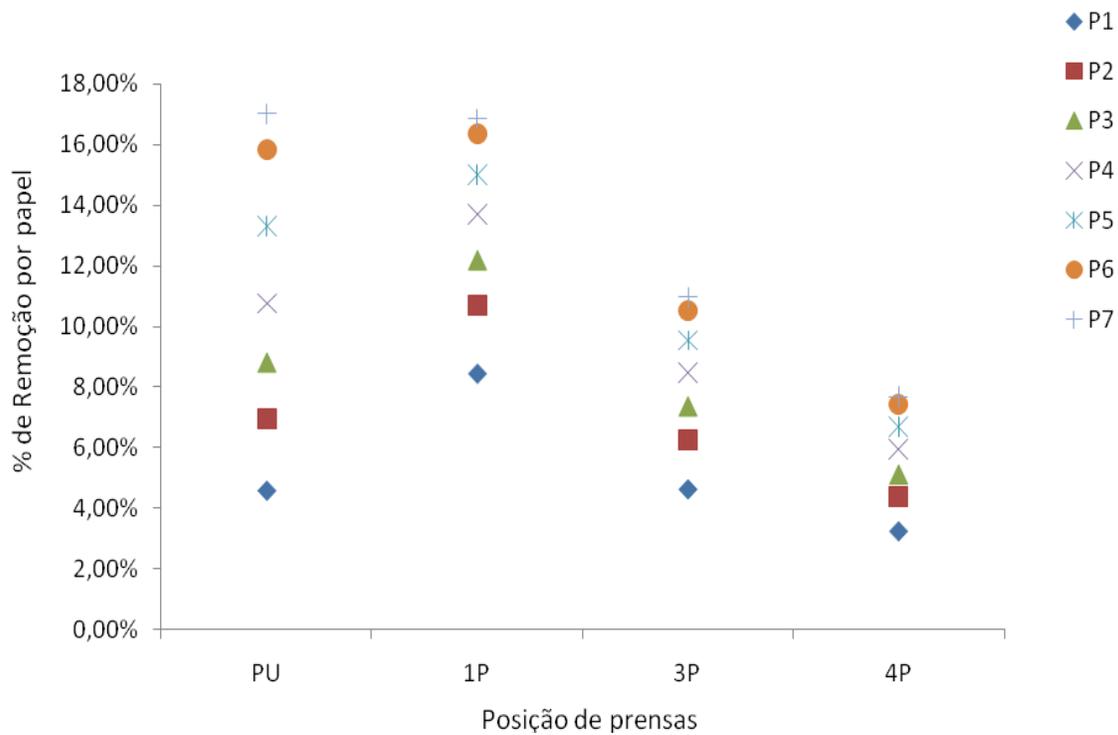


Figura 7. 4: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso II.

### 7.3.3. Estudo de Caso III

No estudo de Caso III, foram produzidas ao total 553 bobinas. Na tabela 7.7 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.7: Dados do estudo de Caso III*

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	197	246	118318,20	118	374,300	77,044.898
P2	46	67	34416,09	34	87,400	88,661.089
P3	26	39	22307,59	21	49,400	87,919.157
P4	80	132	76396,32	76	152,000	92,591.397
P5	117	207	125756,28	126	222,300	95,851.155
P6	40	73	45760,00	46	76,000	94,439.024
P7	39	78	52018,20	52	74,100	95,894.118
P8	8	17	11492,00	11	15,200	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 5,36% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.8, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

*Tabela 7.8: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso III*

Posição de Feltro	Modelo			Industrial				
	Intervalo de Tempo			Intervalo de Tempo				
	T1	T5	T7	T1	T2	T3	T4	T5
PU	$y_{jk=1}$	-	-	$y_{jk=1}$	-	-	-	-
1P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
3P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	-
4P	$y_{jk=1}$	-	-	$y_{jk=1}$	-	-	-	$y_{jk=1}$

Na figura 7.5 observam-se os valores obtidos de remoção de água para as 4 posições de prensas dessa máquina, onde se obteve um aumento de 4,26% comparando-se o modelo e o industrial, e na figura 7.6 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

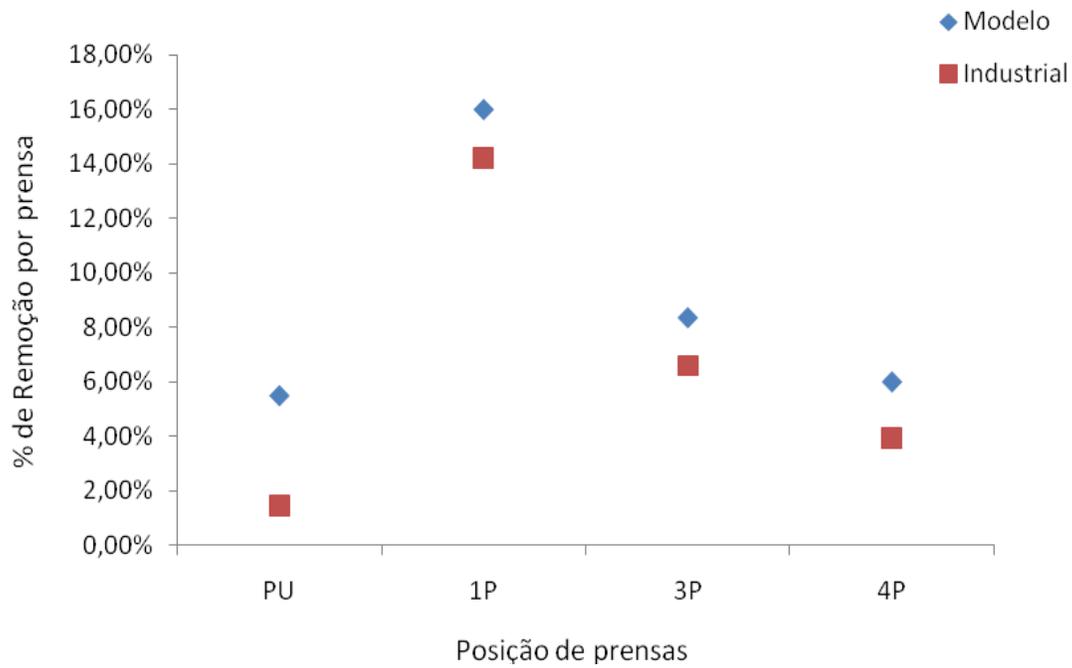


Figura 7. 5: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso III

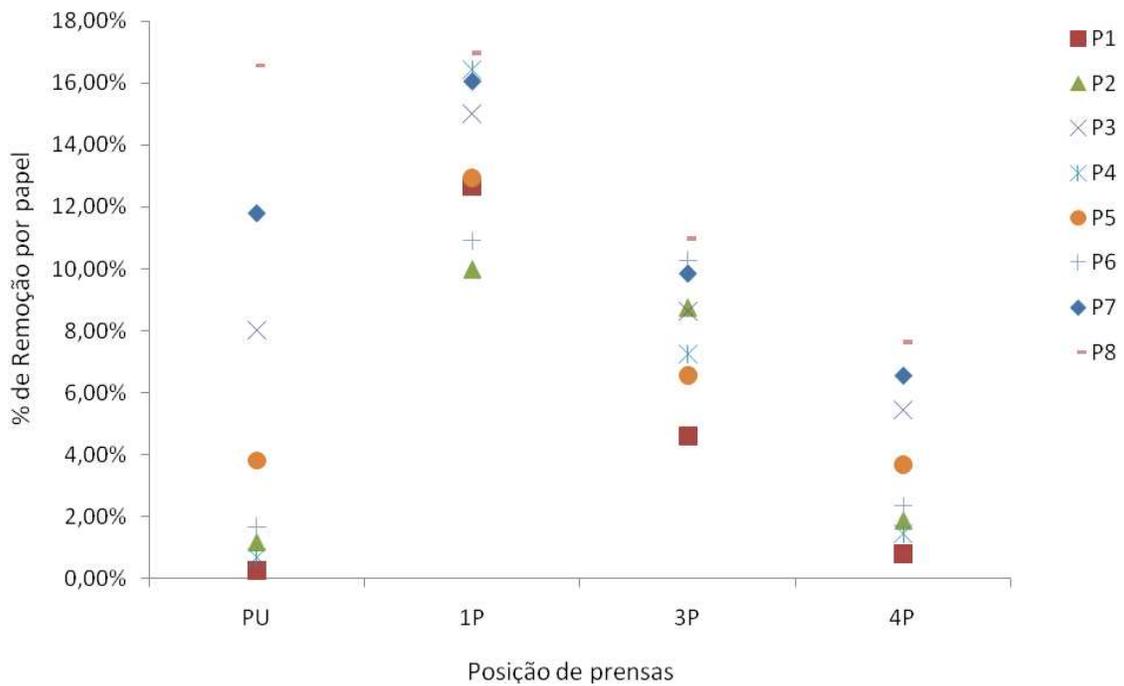


Figura 7. 6: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso III.

### 7.3.4. Estudo de Caso IV

No estudo de Caso IV, foram produzidas ao total 553 bobinas. Na tabela 7.9 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.9: Dados do estudo de Caso IV

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	197	246	118318,20	118	374,300	77,044.898
P2	46	67	34416,09	34	87,400	88,661.089
P3	26	39	22307,59	21	49,400	87,919.157
P4	80	132	76396,32	76	152,000	92,591.397
P5	117	207	125756,28	126	222,300	95,851.155
P6	40	73	45760,00	46	76,000	94,439.024
P7	39	78	52018,20	52	74,100	95,894.118
P8	8	17	11492,00	11	15,200	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 5,18% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.10, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.10: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso IV

Posição de Feltro	Modelo		Industrial			
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo			
	T1	T4	T1	T2	T3	T4
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	-	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	-	-

Representa-se na figura 7.7, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa neste caso teve um aumento na ordem de 5,66% na

remoção de água total, e na figura 7.8 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

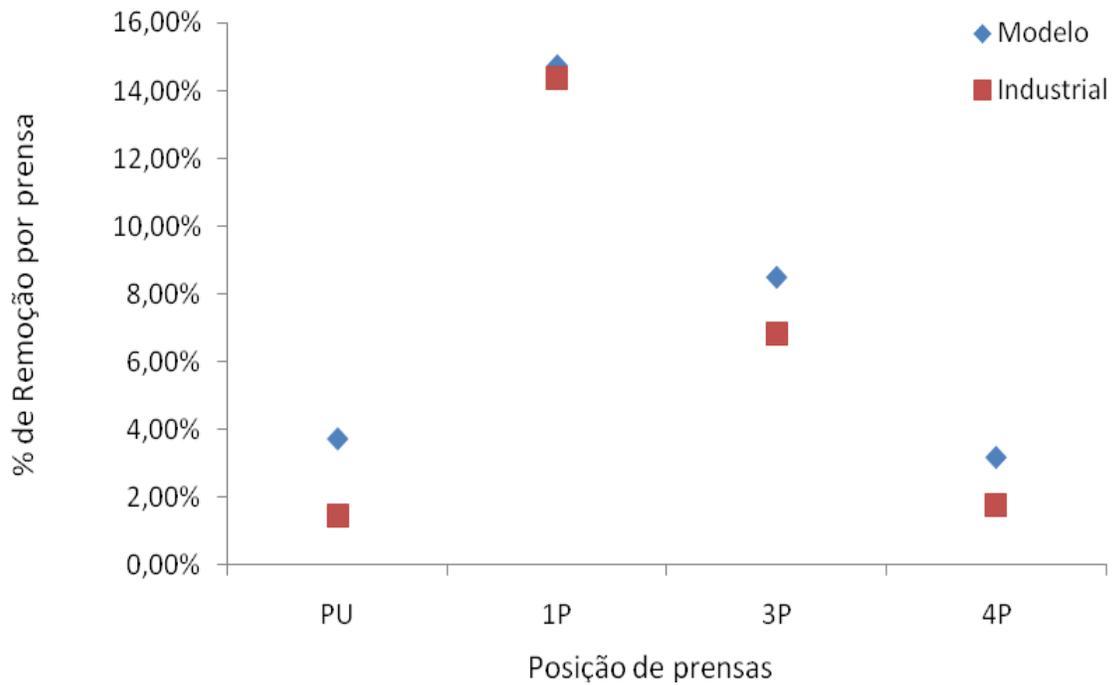


Figura 7. 7: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso IV.

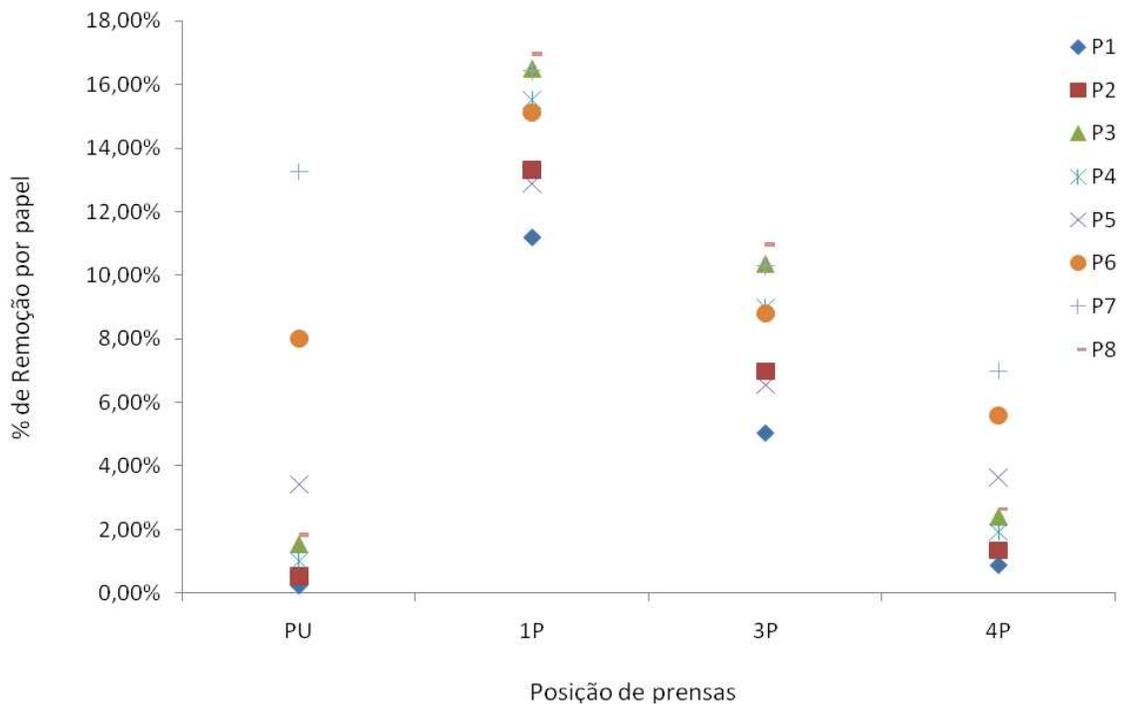


Figura 7. 8: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso IV.

### 7.3.5. Estudo de Caso V

No estudo de Caso V, foram produzidas ao total 153 bobinas. Na tabela 7.11 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.11: Dados do estudo de Caso V*

<b>Tipo do Papel</b>	<b>Quantidade de bobinas</b>	<b>Tempo de processamento h</b>	<b>Tamanho do lote de bobinas m<sup>2</sup></b>	<b>Peso do lote de bobinas ton.</b>	<b>Custo de prensagem US\$</b>	<b>Custo de secagem US\$</b>
P1	64	80	38438,40	38	121,600	77,044.898
P2	12	17	8978,11	9	22,800	88,661.089
P3	6	9	5147,91	5	11,400	87,919.157
P4	20	33	19099,88	19	38,000	92,591.397
P5	6	11	6449,04	6	11,400	95,851.155
P6	27	50	30888,00	31	51,300	94,439.024
P7	18	36	24008,40	24	34,200	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 4,32% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Neste estudo de caso não tivemos trocas para o modelo nem o industrial. Representa-se na figura 7.9, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa neste caso teve um aumento na ordem de 4,44% na remoção de água total, e na figura 7.10 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

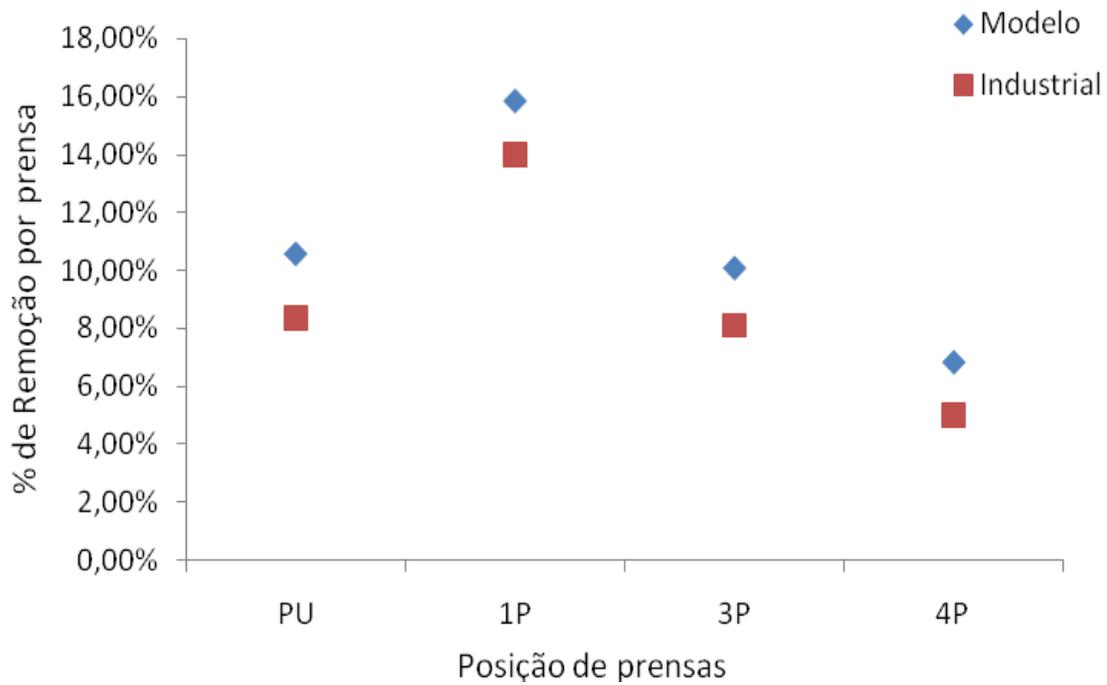


Figura 7. 9: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso V.

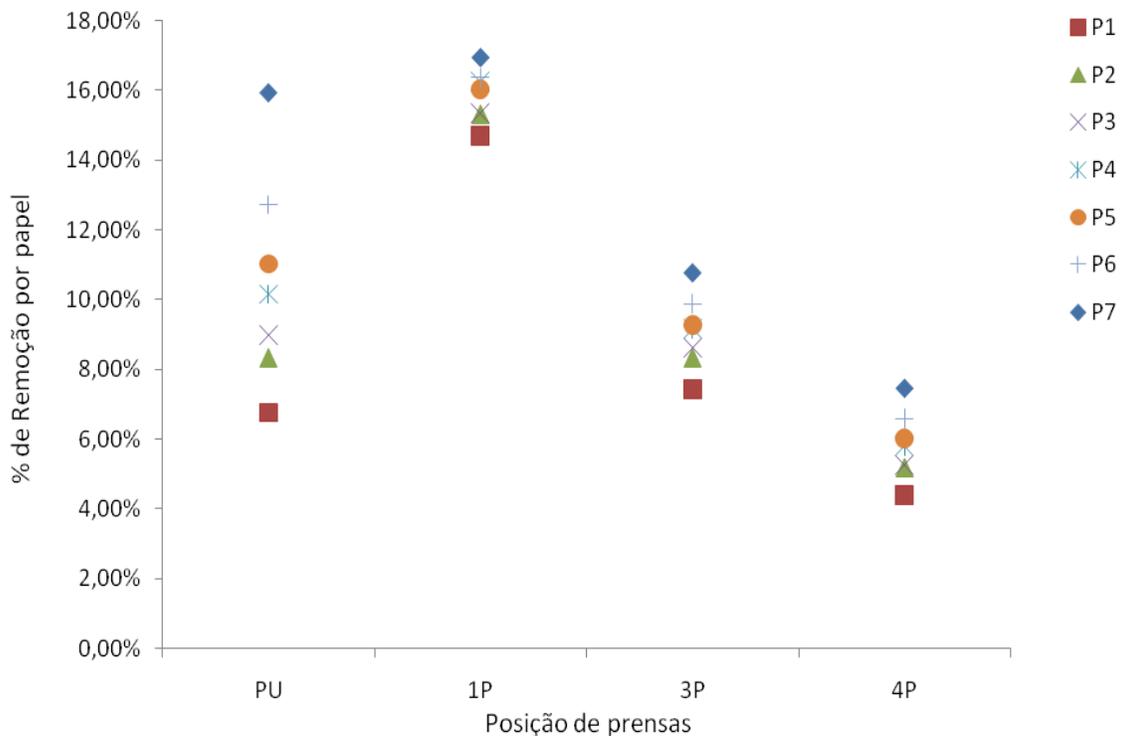


Figura 7. 10: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso V..

### 7.3.6. Estudo de Caso VI

No estudo de Caso VI, foram produzidas ao total 449 bobinas. Na tabela 7.12 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.12: Dados do estudo de Caso VI

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	180	225	108108,00	108	342,000	77,044.898
P2	75	109	56113,20	55	142,500	88,661.089
P3	46	69	39467,28	37	87,400	87,919.157
P4	62	102	59207,15	59	117,800	92,591.397
P5	36	64	38694,24	39	68,400	95,851.155
P7	43	86	57353,40	57	81,700	95,894.118
P8	7	15	10055,50	10	13,300	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 7,11% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Não houve necessidade de troca de feltros no modelo, mas sim no industrial conforme tabela 7.13.

Tabela 7.13: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso VI

Posição de Feltro	Industrial		
	Intervalo de Tempo		
	T1	T3	T4
PU	$y_{jk=1}$	-	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$
4P	$y_{jk=1}$	-	-

Representa-se na figura 7.11, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 2,00% na remoção de água total, e na figura 7.12 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

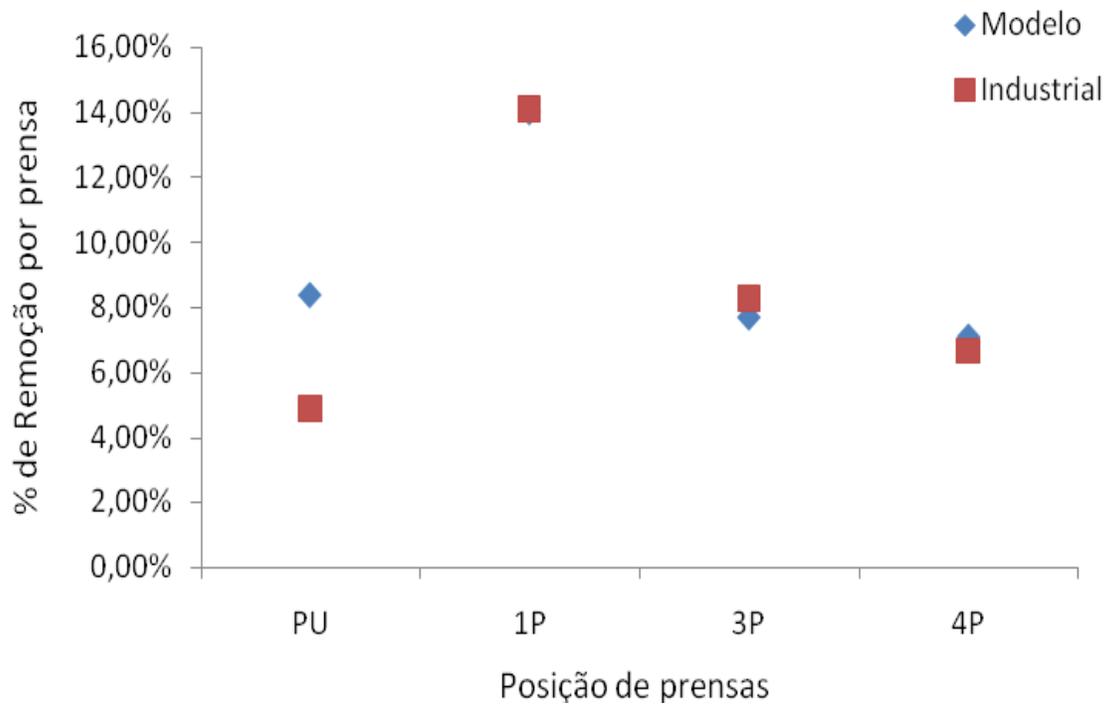


Figura 7. 11: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso VI.

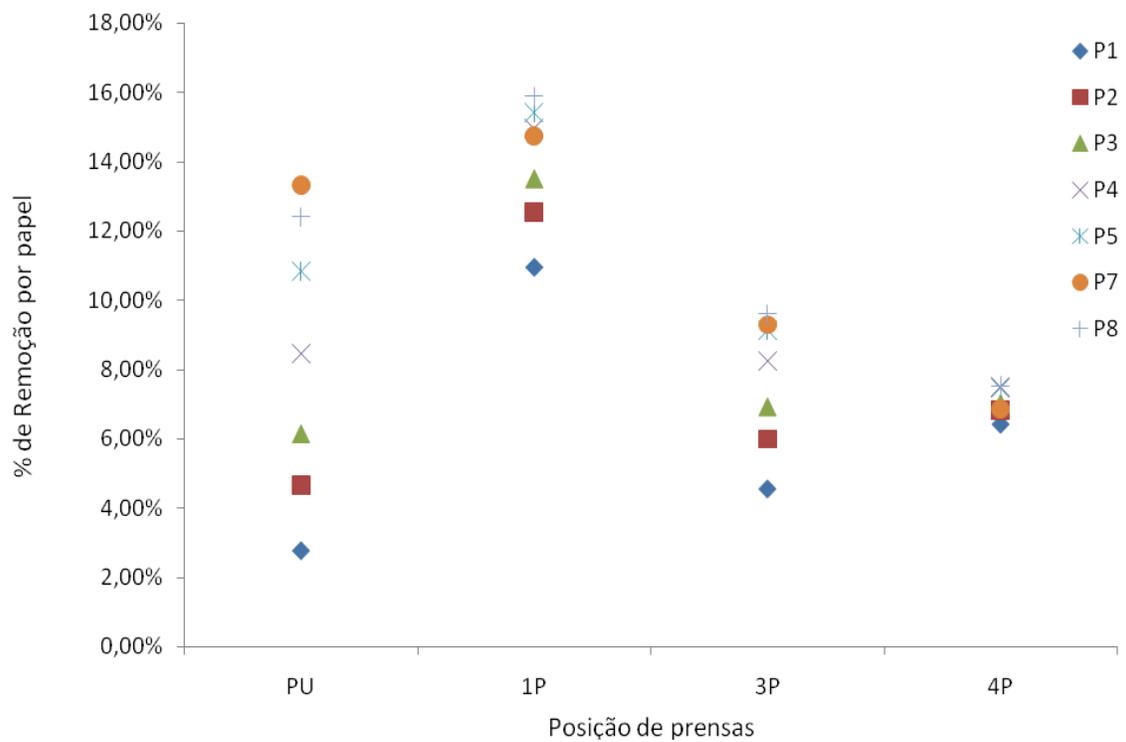


Figura 7. 12: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso VI.

### 7.3.7. Estudo de Caso VII

No estudo de Caso VII, foram produzidas ao total 449 bobinas. Na tabela 7.14 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.14: Dados do estudo de Caso VII

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	180	225	108108,00	108	342,000	77,044.898
P2	75	109	56113,20	55	142,500	88,661.089
P3	46	69	39467,28	37	87,400	87,919.157
P4	62	102	59207,15	59	117,800	92,591.397
P5	36	64	38694,24	39	68,400	95,851.155
P7	43	86	57353,40	57	81,700	95,894.118
P8	7	15	10055,50	10	13,300	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 5,90% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Não houve necessidade de troca de feltros no modelo, mas sim no industrial conforme tabela 7.15.

Tabela 7.15: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso VII

Posição de Feltro	Industrial	
	Intervalo de Tempo	
	T1	T4
PU	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.13, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 4,13% na

remoção de água total, e na figura 7.14 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

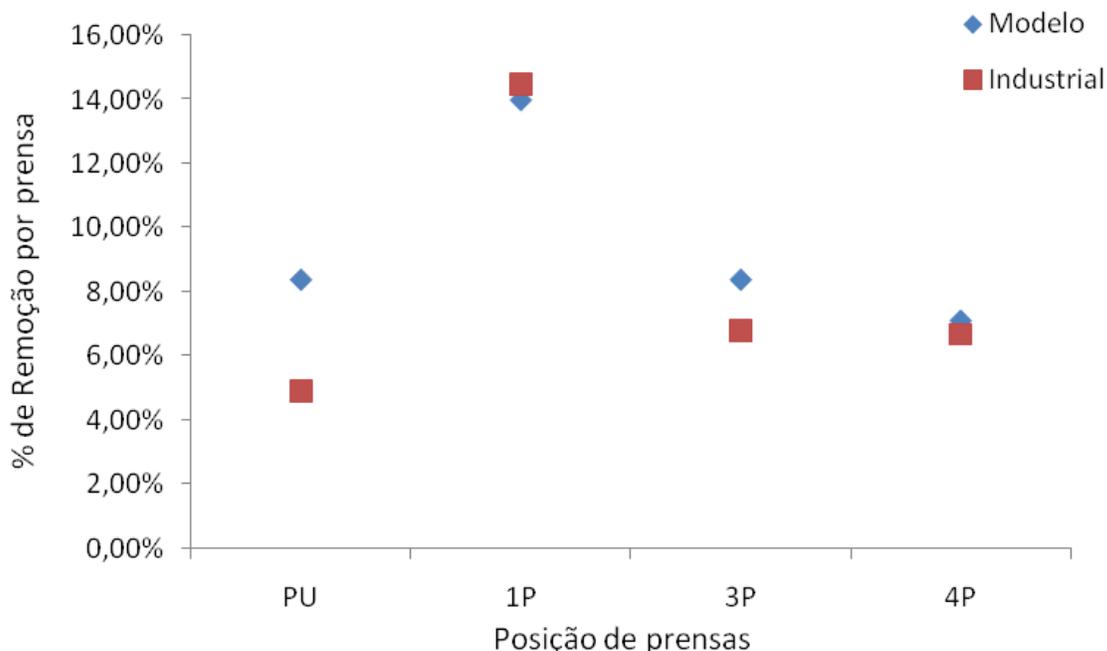


Figura 7. 13: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso VII.

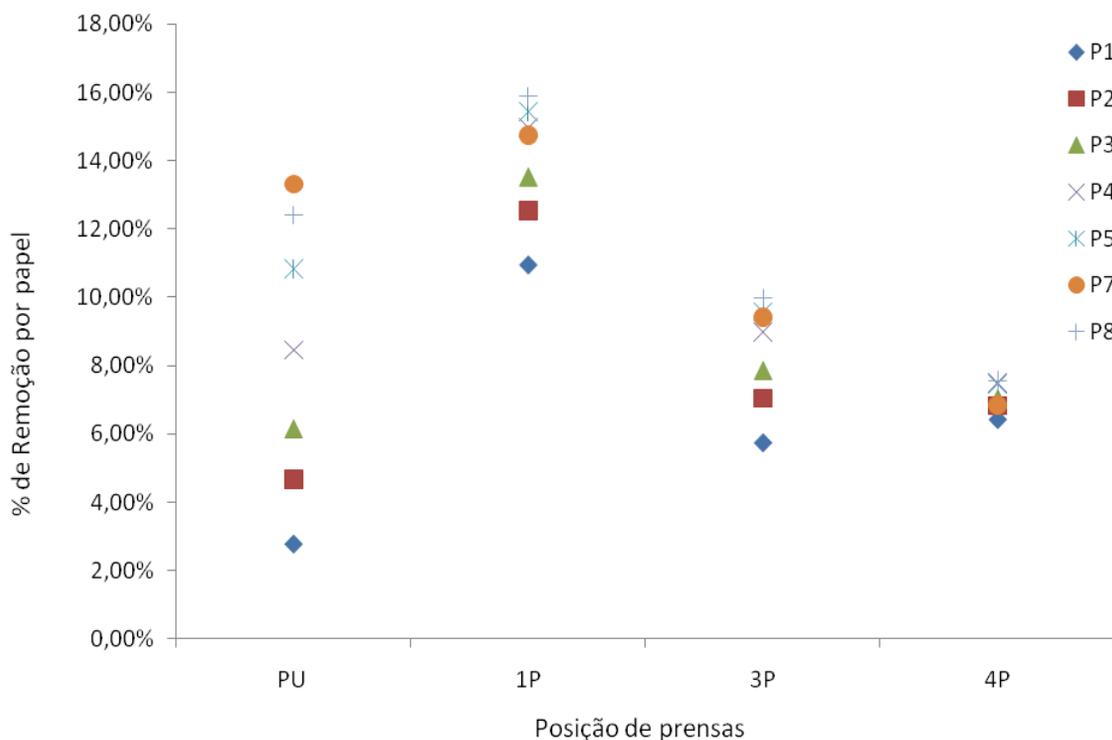


Figura 7. 14: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso VII.

### 7.3.8. Estudo de Caso VIII

No estudo de Caso VIII, foram produzidas ao total 449 bobinas. Na tabela 7.16 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.16: Dados do estudo de Caso VIII

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	180	225	108108,00	108	342,000	77,044.898
P2	75	109	56113,20	55	142,500	88,661.089
P3	46	69	39467,28	37	87,400	87,919.157
P4	62	102	59207,15	59	117,800	92,591.397
P5	36	64	38694,24	39	68,400	95,851.155
P7	43	86	57353,40	57	81,700	95,894.118
P8	7	15	10055,50	10	13,300	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 8,00% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Não houve necessidade de troca de feltros no modelo, mas sim no industrial conforme tabela 7.17.

Tabela 7.17: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso VIII

Posição de Feltro	Industrial	
	Intervalo de Tempo	
	T1	T4
PU	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
4P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$

Representa-se na figura 7.15, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 3,93% na

remoção de água total, e na figura 7.16 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

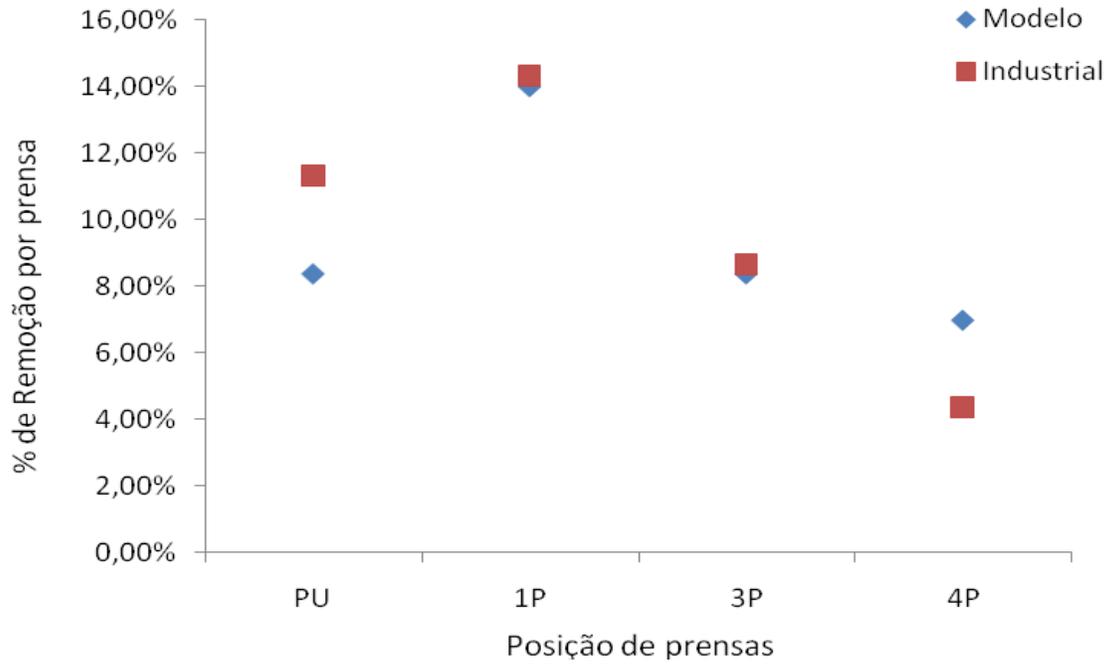


Figura 7. 15: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso VIII

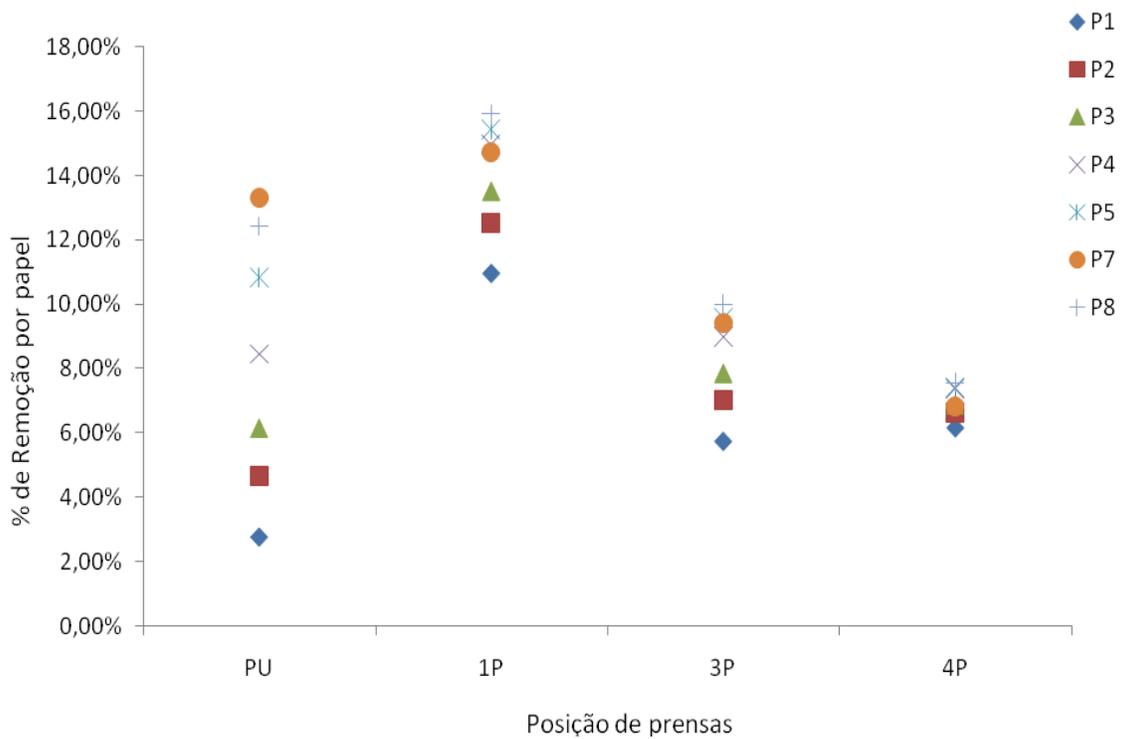


Figura 7. 16: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso VIII.

### 7.3.9. Estudo de Caso IX

No estudo de Caso IX, foram produzidas ao total 307 bobinas. Na tabela 7.18 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.18: Dados do estudo de Caso IX

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P3	14	21	12011,78	11	26,600	87,919.157
P4	19	31	18144,13	18	36,100	92,591.397
P5	185	327	198845,40	199	351,500	95,851.155
P6	28	51	32032,00	32	53,200	94,439.024
P7	47	94	62688,60	63	89,300	95,894.118
P8	14	29	20111,00	20	26,600	87,466.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 5,00% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Não houve necessidade de troca de feltros no modelo, mas sim no industrial conforme tabela 7.19.

Tabela 7.19: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso IX

Posição de Feltro	Industrial	
	Intervalo de Tempo	
	T1	T2
PU	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-

Representa-se no gráfico 7.17, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 3,09% na remoção de água total, e na figura 7.18 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

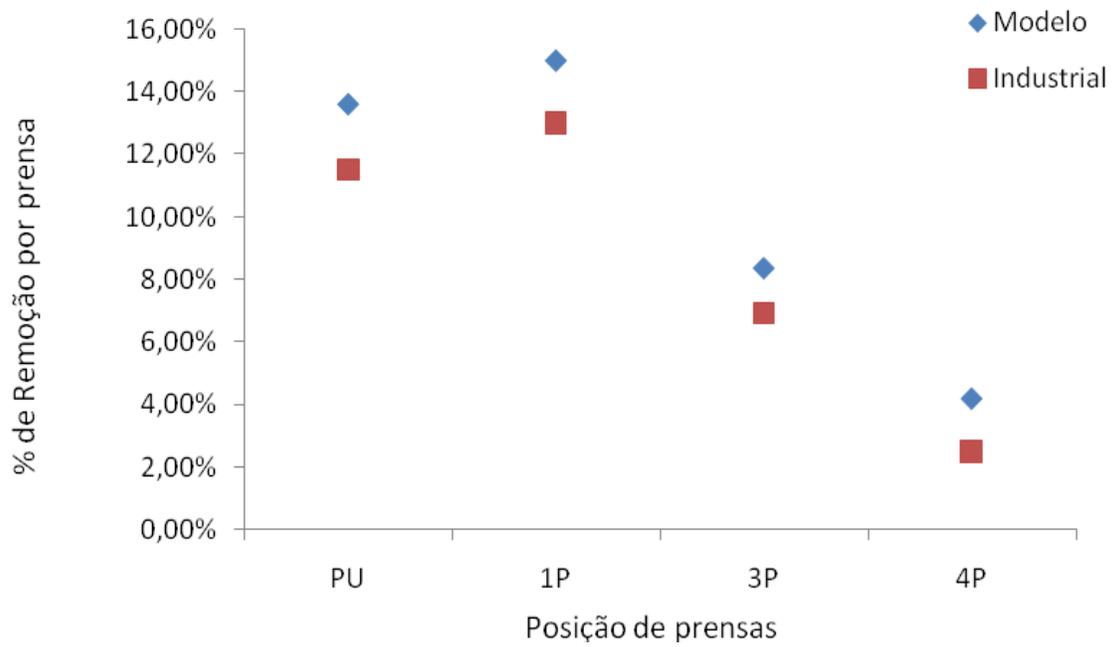


Figura 7. 17: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso IX.

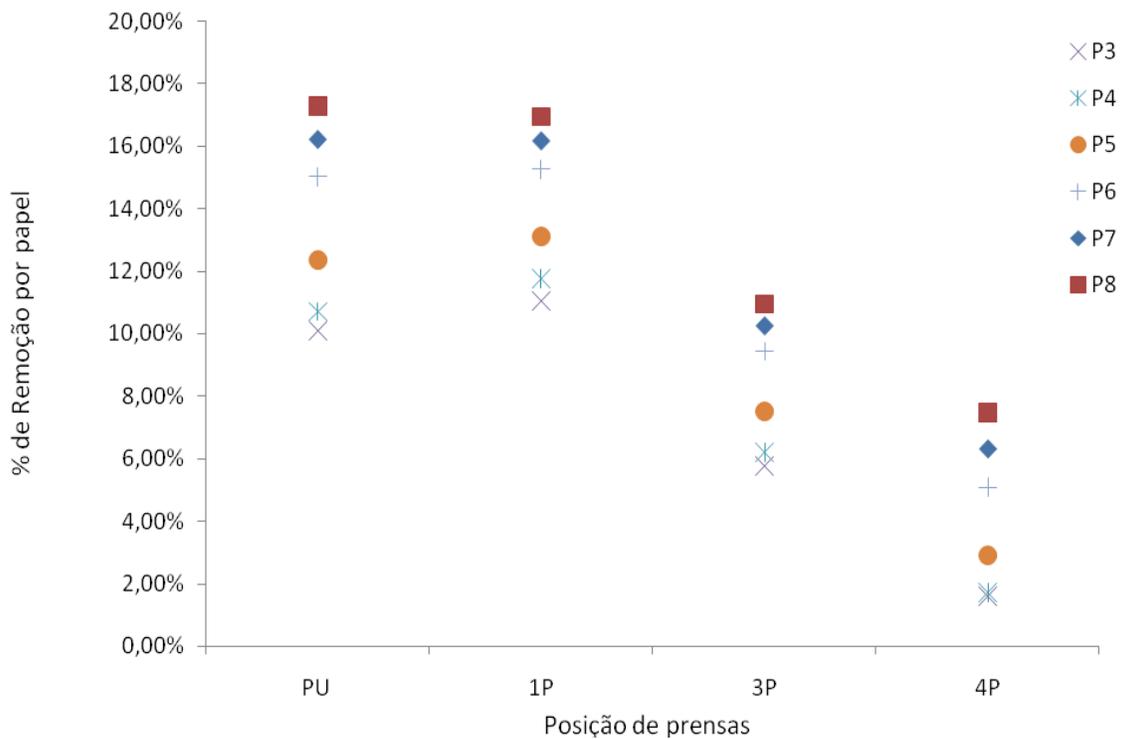


Figura 7. 18: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso IX.

### 7.3.10. Estudo de Caso X

No estudo de Caso X, foram produzidas ao total 307 bobinas. Na tabela 7.20 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.20: Dados do estudo de Caso X*

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P3	14	21	12011,78	11	26, 600	87, 919.157
P4	19	31	18144,13	18	36, 100	92, 591.397
P5	185	327	198845,40	199	351, 500	95, 851.155
P6	28	51	32032,00	32	53, 200	94, 439.024
P7	47	94	62688,60	63	89, 300	95, 894.118
P8	14	29	20111,00	20	26, 600	87, 466.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 1,32% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.21, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

*Tabela 7.21: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso X*

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T5	T1	T2
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.19, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 6,15% na remoção de água total, e na figura 7.20 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

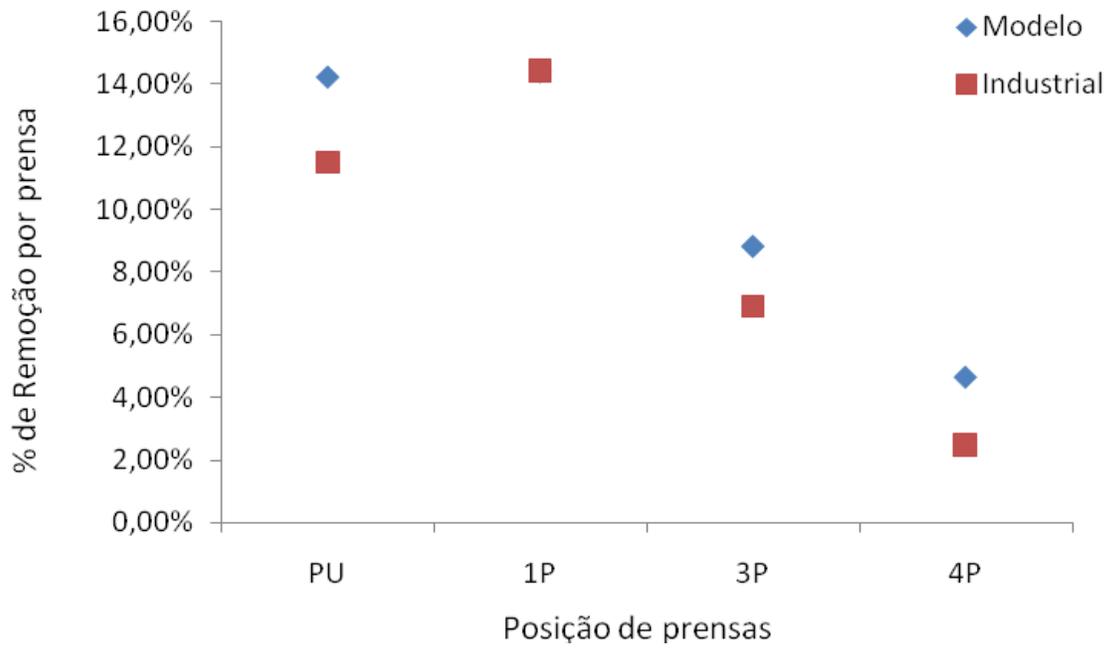


Figura 7. 19: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso X.

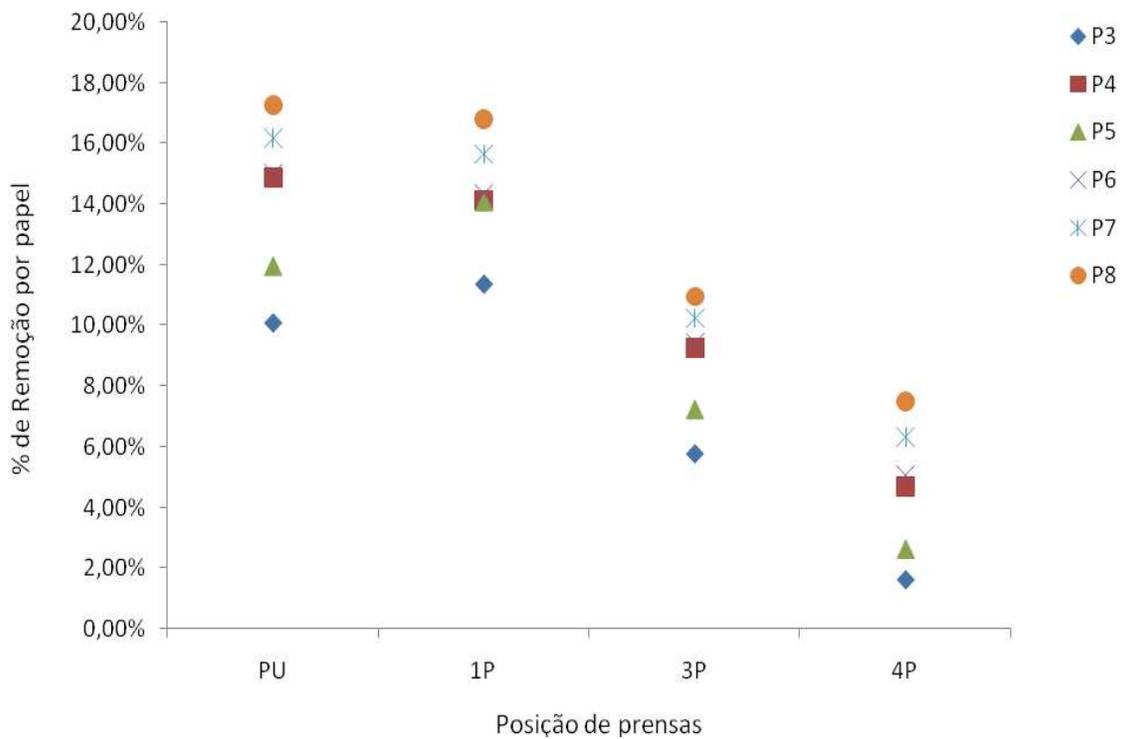


Figura 7. 20: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso X.

### 7.3.11. Estudo de Caso XI

No estudo de Caso XI, foram produzidas ao total 307 bobinas. Na tabela 7.22 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.22: Dados do estudo de Caso XI

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P3	14	21	12011,78	11	26, 600	87, 919.157
P4	19	31	18144,13	18	36, 100	92, 591.397
P5	185	327	198845,40	199	351, 500	95, 851.155
P6	28	51	32032,00	32	53, 200	94, 439.024
P7	47	94	62688,60	63	89, 300	95, 894.118
P8	14	29	20111,00	20	26, 600	87, 466.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 0,95% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.23, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.23: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XI

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo T1	Intervalo de Tempo T5	Intervalo de Tempo T1	Intervalo de Tempo T2
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.21, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 4,66% na

remoção de água total, e na figura 7.22 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

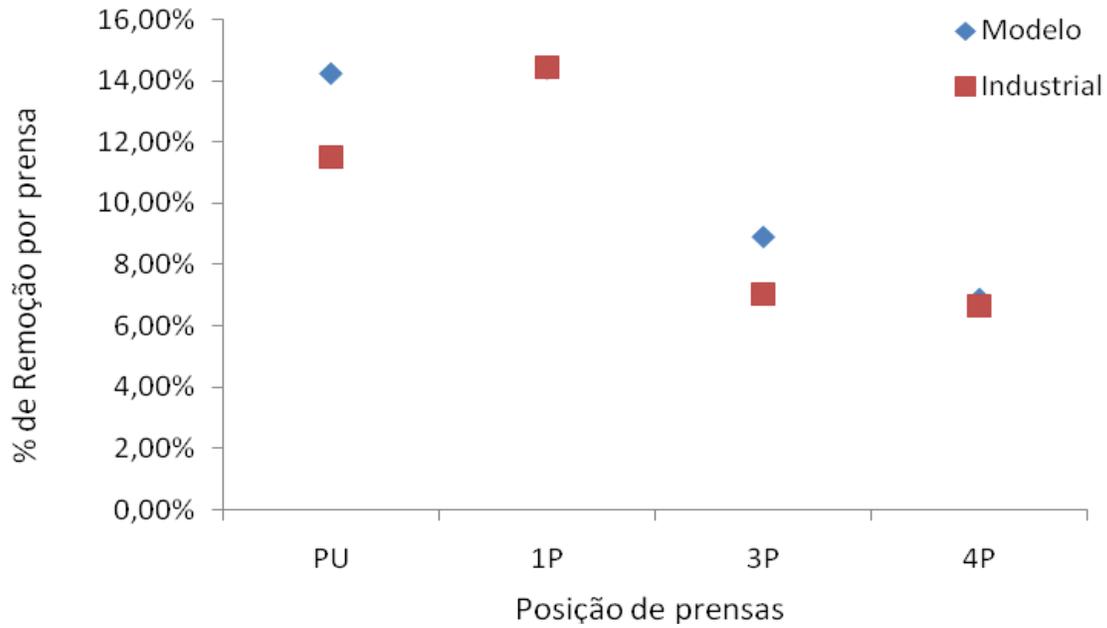


Figura 7. 21: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XI.

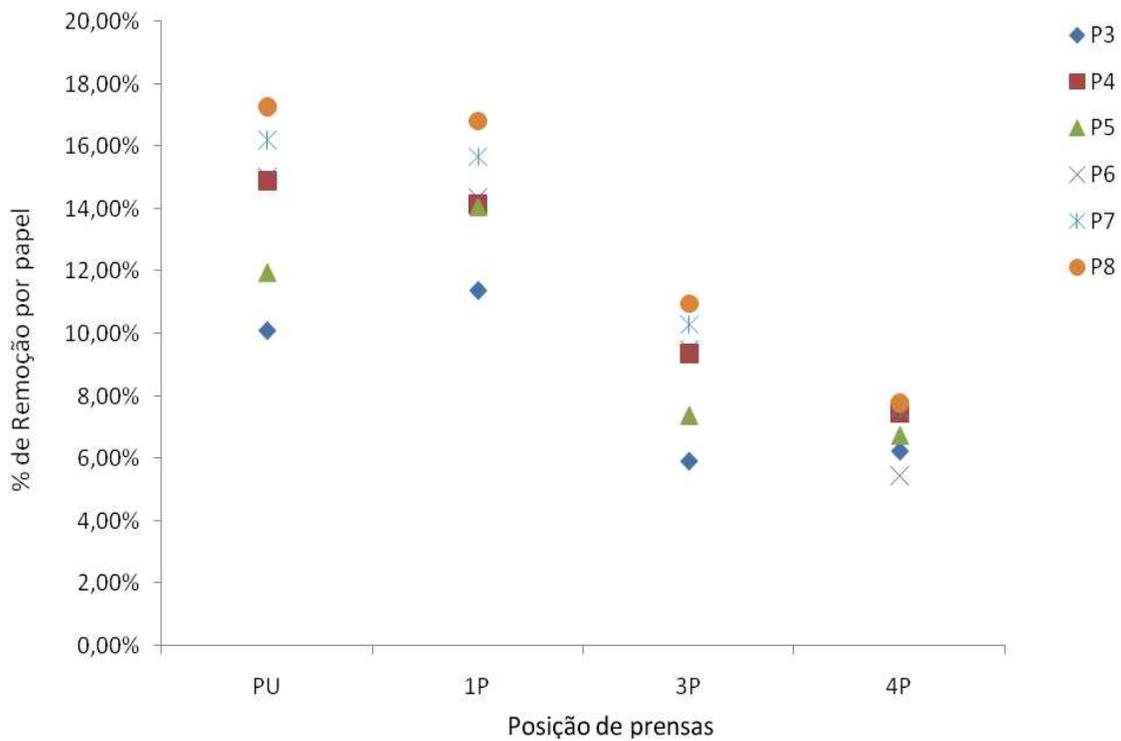


Figura 7. 22: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XI.

**7.3.12. Estudo de Caso XII**

No estudo de Caso XII, foram produzidas ao total 298 bobinas. Na tabela 7.24 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.24: Dados do estudo de Caso XII*

<b>Tipo do Papel</b>	<b>Quantidade de bobinas</b>	<b>Tempo de processamento h</b>	<b>Tamanho do lote de bobinas m<sup>2</sup></b>	<b>Peso do lote de bobinas ton.</b>	<b>Custo de prensagem US\$</b>	<b>Custo de secagem US\$</b>
<b>P1</b>	<b>167</b>	<b>209</b>	<b>100300,20</b>	<b>100</b>	<b>317,300</b>	<b>77,044.898</b>
<b>P2</b>	<b>45</b>	<b>65</b>	<b>33667,92</b>	<b>33</b>	<b>85,500</b>	<b>88,661.089</b>
<b>P3</b>	<b>33</b>	<b>50</b>	<b>28313,49</b>	<b>26</b>	<b>62,700</b>	<b>87,919.157</b>
<b>P4</b>	<b>35</b>	<b>58</b>	<b>33423,39</b>	<b>33</b>	<b>66,500</b>	<b>92,591.397</b>
<b>P5</b>	<b>15</b>	<b>27</b>	<b>16122,60</b>	<b>16</b>	<b>28,500</b>	<b>95,851.155</b>
<b>P7</b>	<b>25</b>	<b>6</b>	<b>4001,40</b>	<b>4</b>	<b>5,700</b>	<b>95,894.118</b>

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 4,97% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Neste estudo de caso não tivemos necessidade de troca nem para o modelo nem para o industrial. Representa-se na figura 7.23, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 11,93% na remoção de água total, e na figura 7.24 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

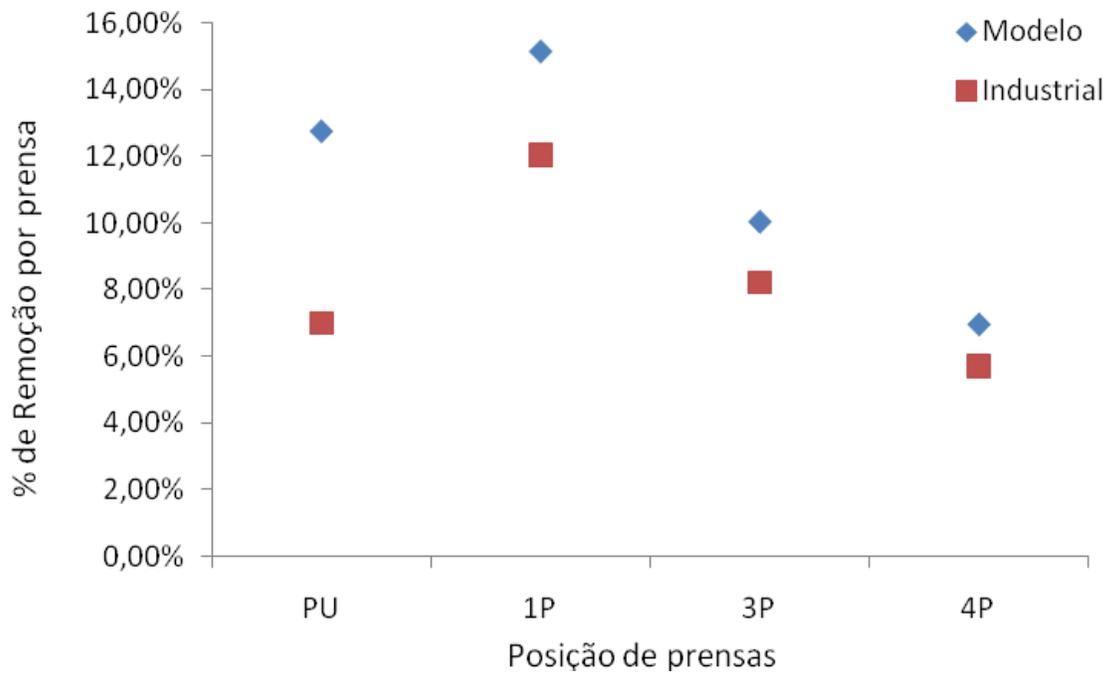


Figura 7. 23: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XII.

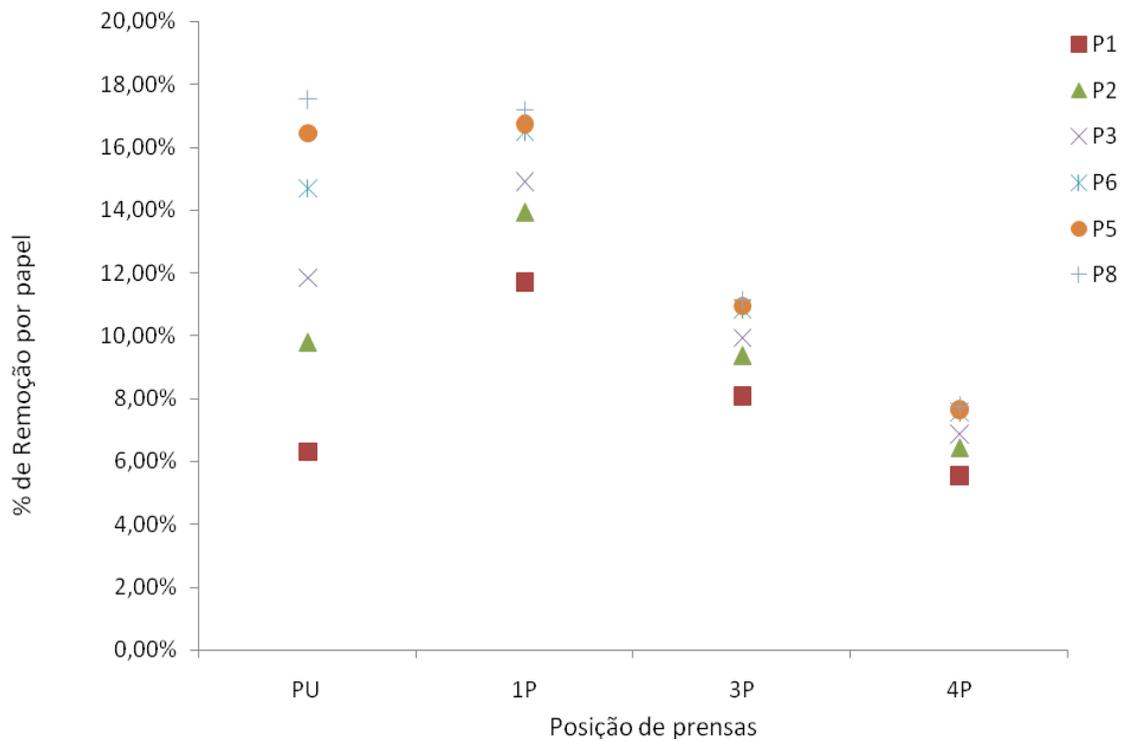


Figura 7. 24: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XII.

### 7.3.13. Estudo de Caso XIII

No estudo de Caso XIII, foram produzidas ao total 339 bobinas. Na tabela 7.25 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.25: Dados do estudo de Caso XIII*

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	139	179	83483,40	83	264,100	77,044.898
P2	27	39	20200,75	20	51,300	88,661.089
P3	77	116	66064,80	61	146,300	87,919.157
P4	39	64	37243,21	37	74,100	92,591.397
P5	83	147	89211,72	89	157,700	95,851.155
P6	4	7	4576,00	5	7,600	94,439.024
P7	25	50	33345,00	33	47,500	95,894.118
P8	5	10	7182,50	7	9,500	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 6,04% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.26, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

*Tabela 7.26: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XIII*

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T6	T1	T3
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
4P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$

Representa-se na figura 7.25, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 8,33% na remoção de água total, e na figura 7.26 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

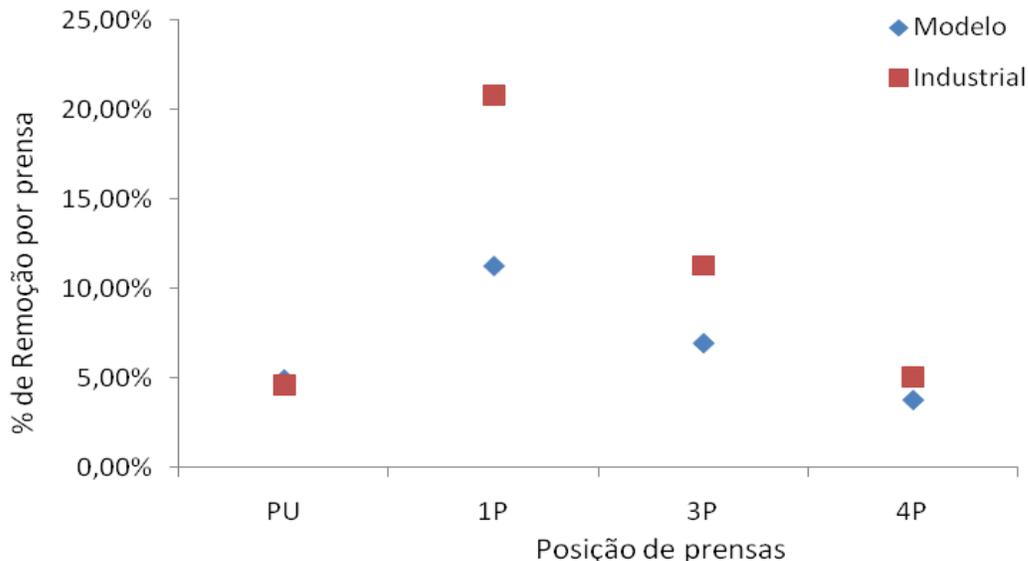


Figura 7. 25: Comparação de remoção de água por prensa – estudo de Caso XIII.

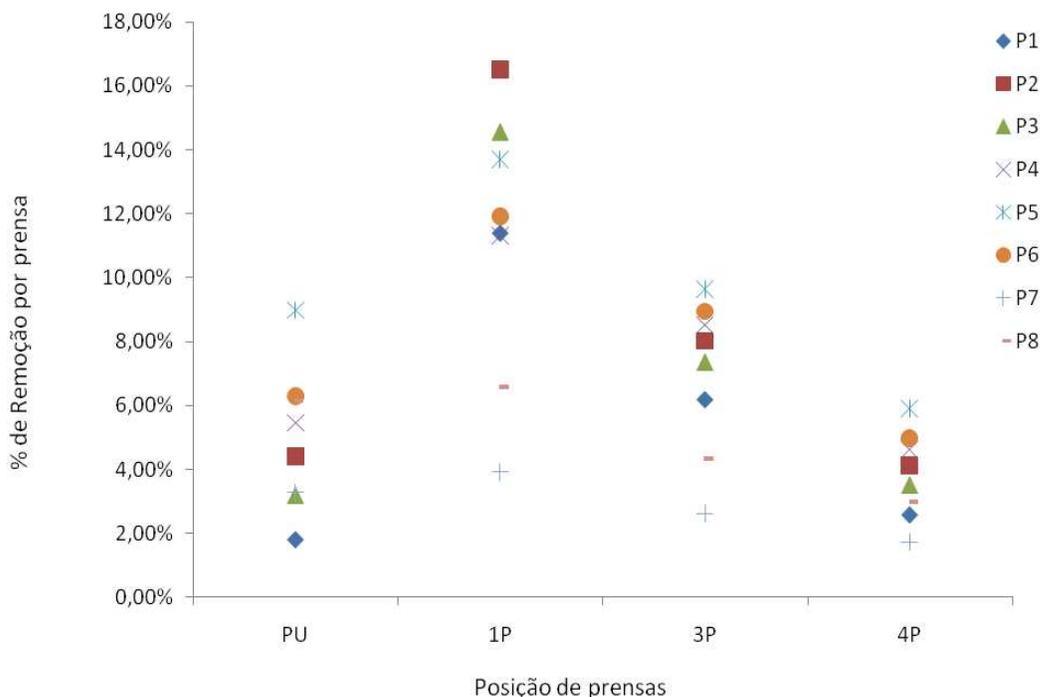


Figura 7. 26: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XIII.

### 7.3.14. Estudo de Caso XIV

No estudo de Caso XIV, foram produzidas ao total 528 bobinas. Na tabela 7.27 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.27: Dados do estudo de Caso XIV

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	133	166	79879,80	80	252,700	77,044.898
P2	28	41	20948,93	21	53,200	88,661.089
P3	78	117	66922,78	62	148,200	87,919.157
P4	41	68	39153,11	39	77,900	92,591.397
P5	175	309	188097,00	188	332,500	95,851.155
P6	26	48	29744,00	30	49,400	94,439.024
P7	43	86	57353,40	57	81,700	95,894.118
P8	4	8	5746,00	6	7,600	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 3,68% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.28, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.28: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XIV

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T4	T1	T2
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.27, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 3,48% na remoção de água total, e na figura 7.28 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

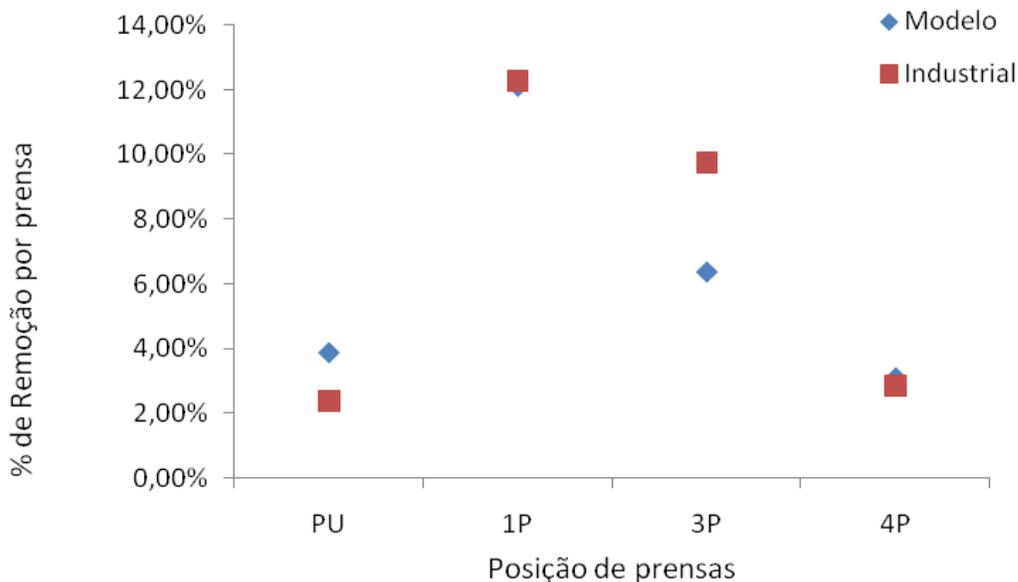


Figura 7. 27: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XIV.

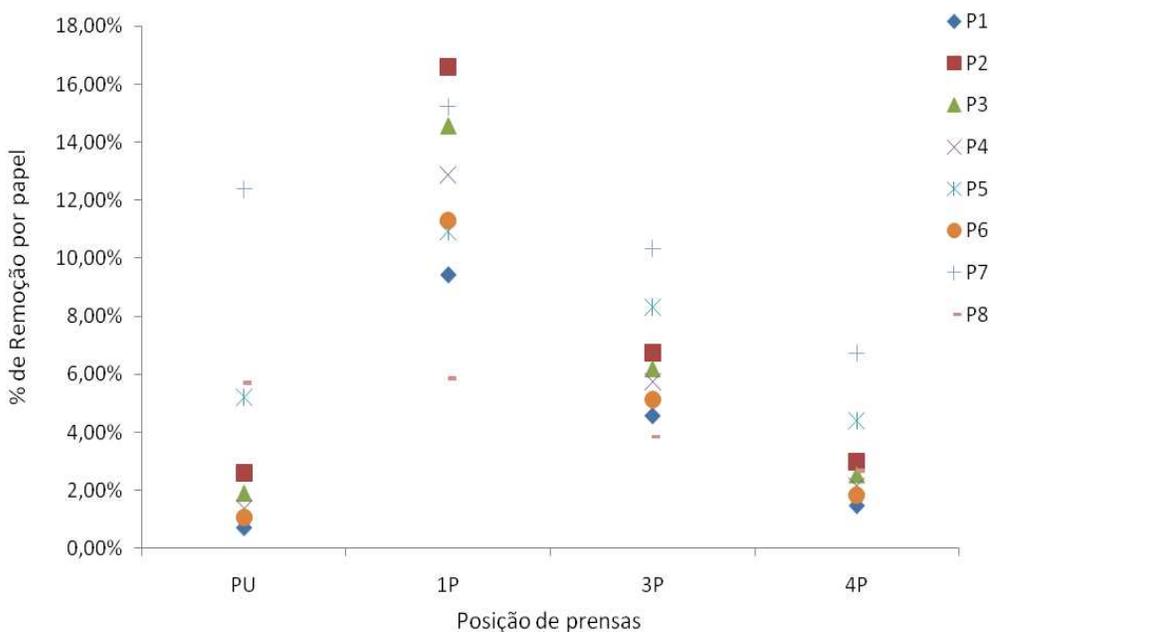


Figura 7. 28: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XIV.

### 7.3.15. Estudo de Caso XV

No estudo de Caso XV, foram produzidas ao total 528 bobinas. Na tabela 7.29 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.29: Dados do estudo de Caso XV

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	133	166	79879,80	80	252,700	77,044.898
P2	28	41	20948,93	21	53,200	88,661.089
P3	78	117	66922,78	62	148,200	87,919.157
P4	41	68	39153,11	39	77,900	92,591.397
P5	175	309	188097,00	188	332,500	95,851.155
P6	26	48	29744,00	30	49,400	94,439.024
P7	43	86	57353,40	57	81,700	95,894.118
P8	4	8	5746,00	6	7,600	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 1,98% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.30, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.30: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XV

Posição de Feltro	Modelo		Industrial		
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo		
	T1	T4	T1	T3	T4
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	-

Representa-se na figura 7.29, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 3,31% na remoção de água total, e na figura 7.30 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

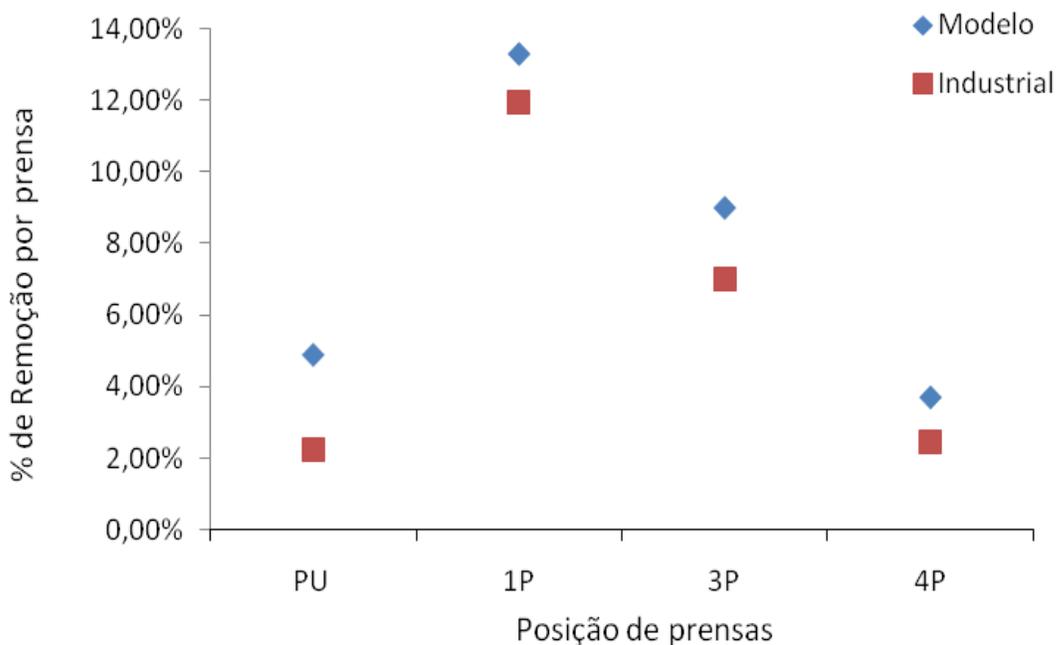


Figura 7. 29: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XV.

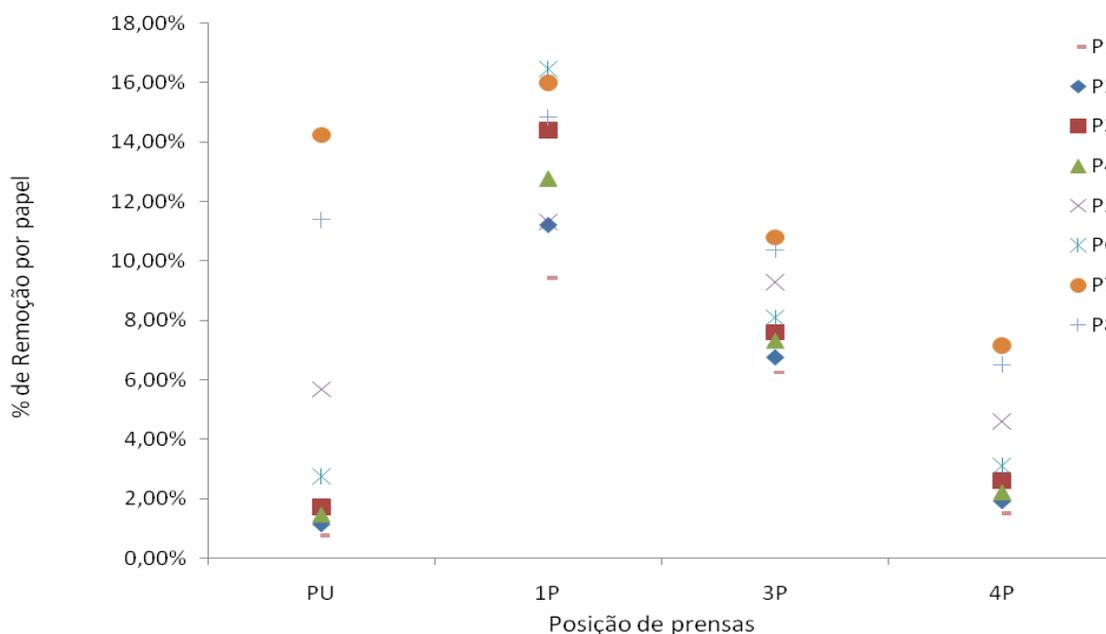


Figura 7. 30: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XV.

### 7.3.16. Estudo de Caso XVI

No estudo de Caso XVI, foram produzidas ao total 528 bobinas. Na tabela 7.31 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.31: Dados do estudo de Caso XVI*

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	133	166	79879,80	80	252,700	77,044.898
P2	28	41	20948,93	21	53,200	88,661.089
P3	78	117	66922,78	62	148,200	87,919.157
P4	41	68	39153,11	39	77,900	92,591.397
P5	175	309	188097,00	188	332,500	95,851.155
P6	26	48	29744,00	30	49,400	94,439.024
P7	43	86	57353,40	57	81,700	95,894.118
P8	4	8	5746,00	6	7,600	87,446.043

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 1,52% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.32, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

*Tabela 7.32: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XVI*

Posição de Feltro	Modelo			Industrial			
	Intervalo de Tempo			Intervalo de Tempo			
	T1	T3	T4	T1	T2	T3	T4
PU	$y_{jk=1}$	-	-	$y_{jk=1}$	-	-	-
1P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	-	$y_{jk=1}$	-	-	-

Representa-se na figura 7.31, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 2,87% na remoção de água total, e na figura 7.32 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

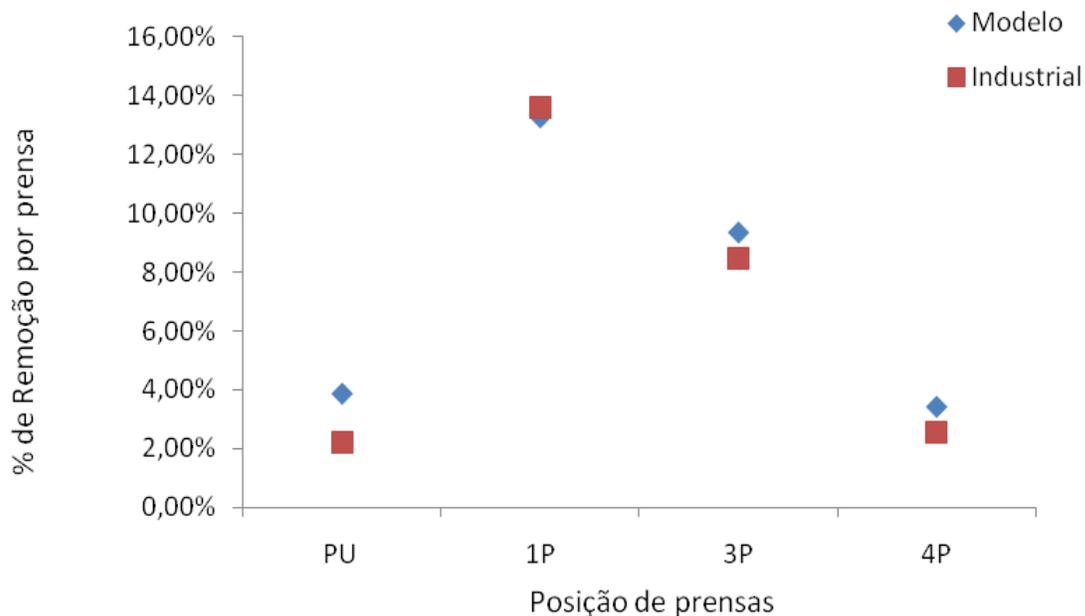


Figura 7. 31: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XVI.

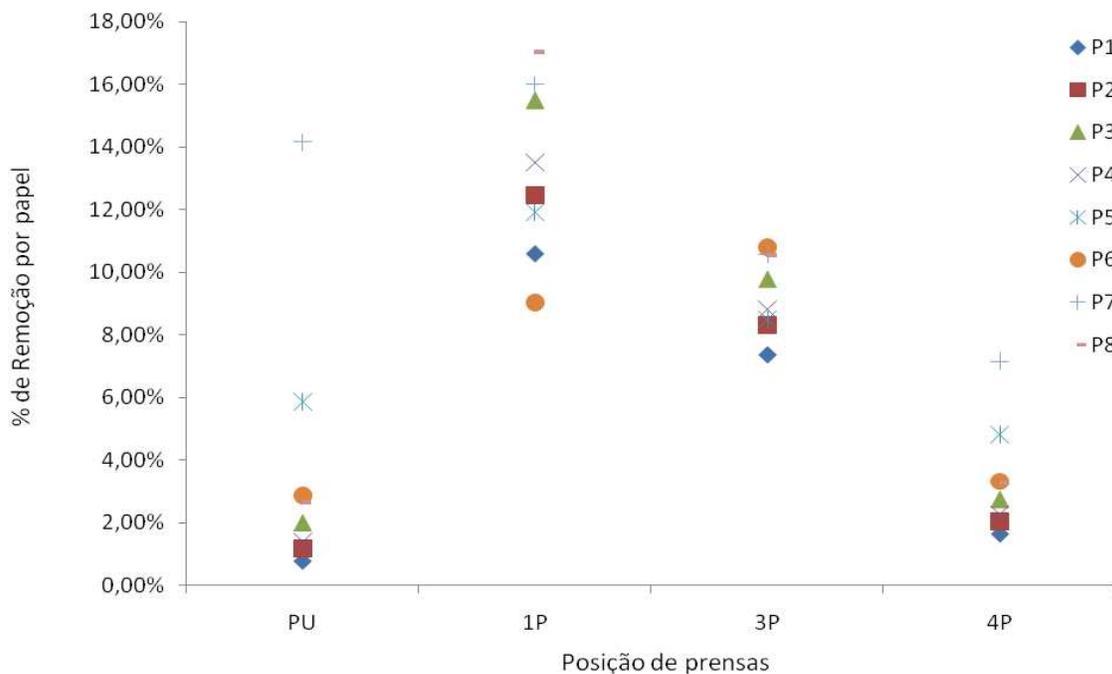


Figura 7. 32: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XVI.

### 7.3.17. Estudo de Caso XVII

No estudo de Caso XVII, foram produzidas ao total 486 bobinas. Na tabela 7.33 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

*Tabela 7.33: Dados do estudo de Caso XVII*

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	164	205	98498,00	98	311,600	77,044.898
P2	32	46	23491,63	24	60,800	88,661.089
P3	33	50	28313,49	26	62,700	87,919.157
P4	51	84	48702,65	49	96,900	92,591.397
P5	112	198	120382,08	120	212,800	95,851.155
P6	35	64	40040,00	40	66,500	94,439.024
P7	59	118	78694,20	79	112,100	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 3,80% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.34, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

*Tabela 7.34: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XVII*

Posição de Feltro	Modelo				Industrial			
	Intervalo de Tempo				Intervalo de Tempo			
	T1	T2	T3	T6	T1	T2	T3	T5
PU	$y_{jk=1}$	-	-	-	$y_{jk=1}$	-	-	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	-	-	$y_{jk=1}$	-	-	-

Representa-se na figura 7.33, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 2,81% na remoção de água total, e na figura 7.34 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

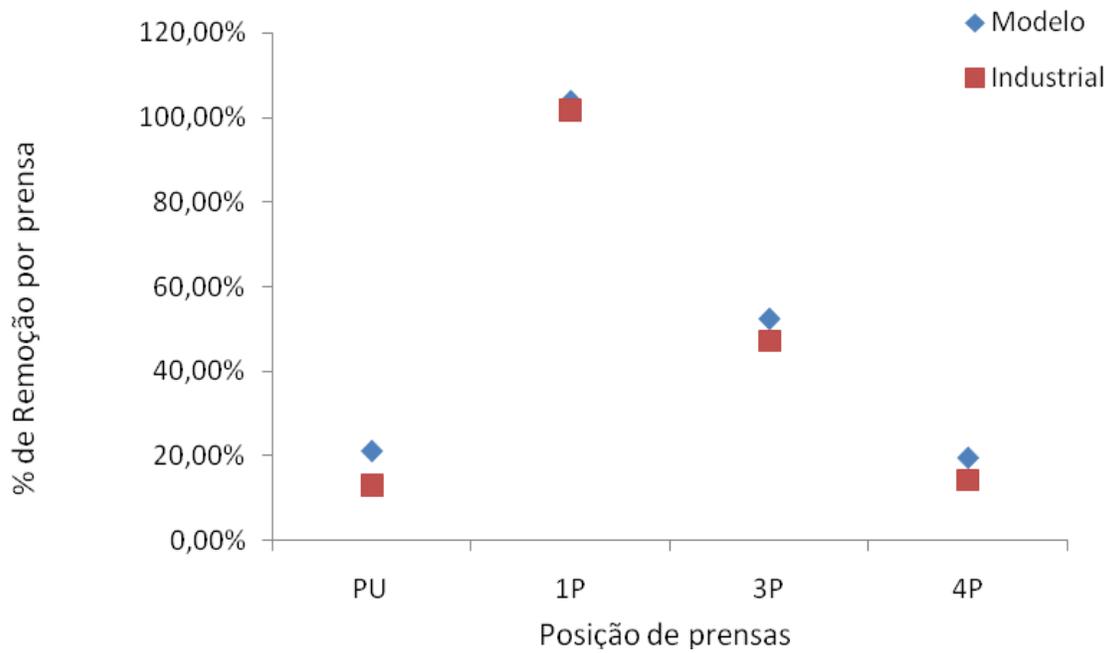


Figura 7. 33: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XVII.

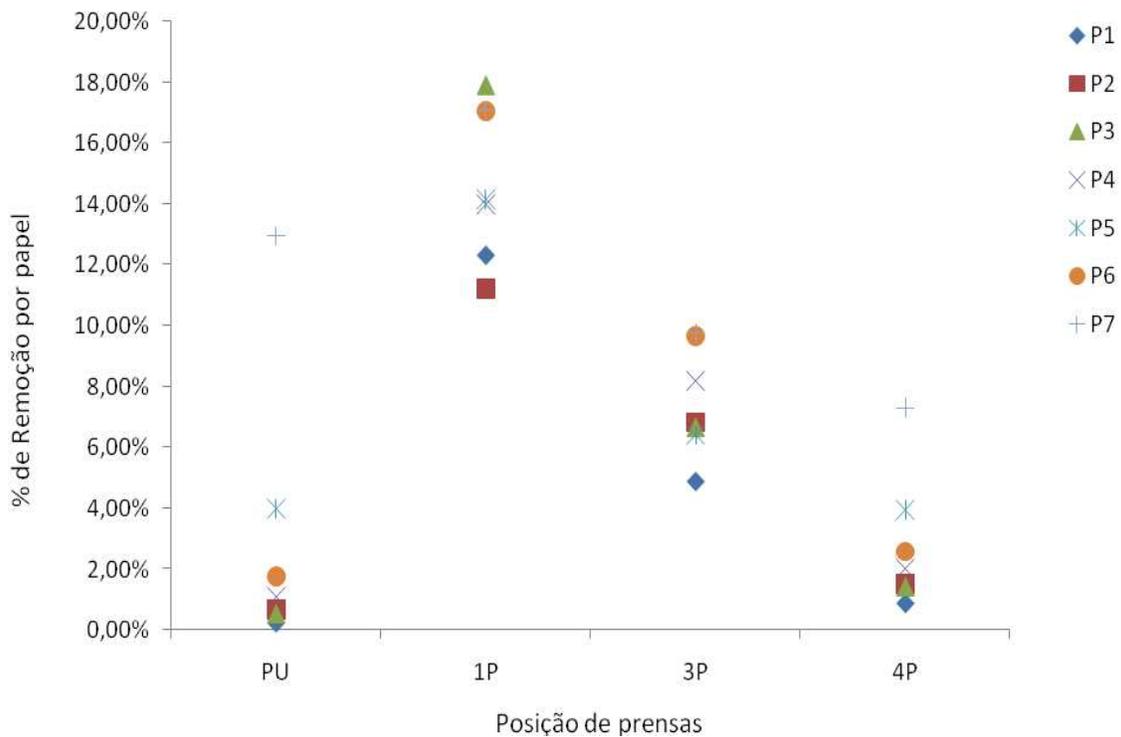


Figura 7. 34: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XVII.

### 7.3.18. Estudo de Caso XVIII

No estudo de Caso XVII, foram produzidas ao total 468 bobinas. Na tabela 7.35 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.35: Dados do estudo de Caso XVIII

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	164	205	98498,00	98	311,600	77,044.898
P2	32	46	23491,63	24	60,800	88,661.089
P3	33	50	28313,49	26	62,700	87,919.157
P4	51	84	48702,65	49	96,900	92,591.397
P5	112	198	120382,08	120	212,800	95,851.155
P6	35	64	40040,00	40	66,500	94,439.024
P7	59	118	78694,20	79	112,100	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 5,30% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.36, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.36: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XVIII

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T5	T1	T2
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.35, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 11,08% na remoção de água total, e na figura 7.36 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

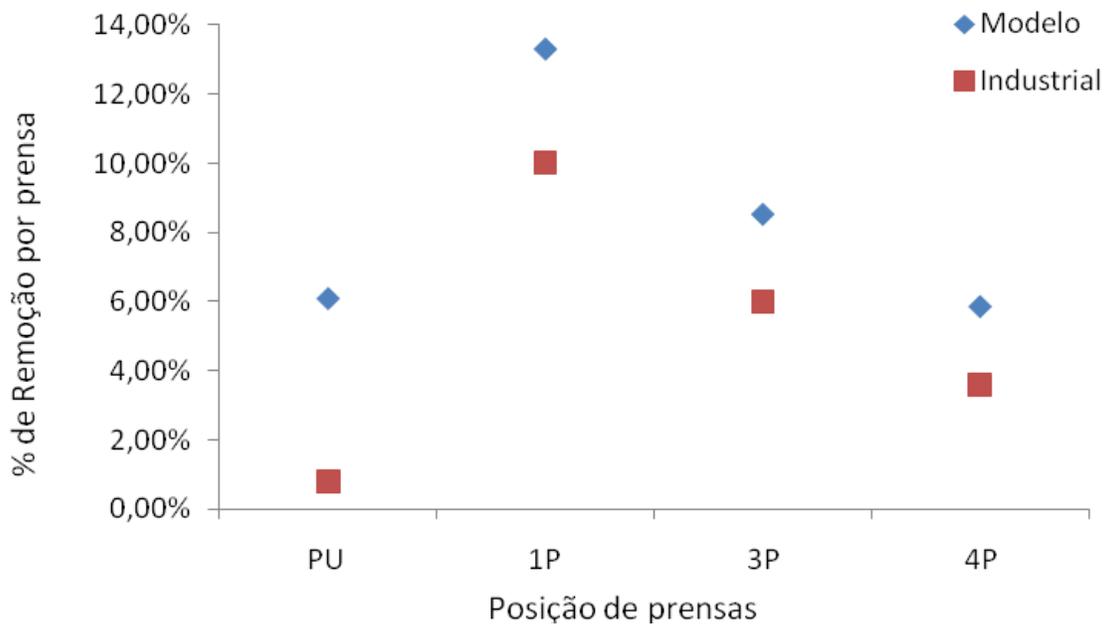


Figura 7. 35: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XVIII.

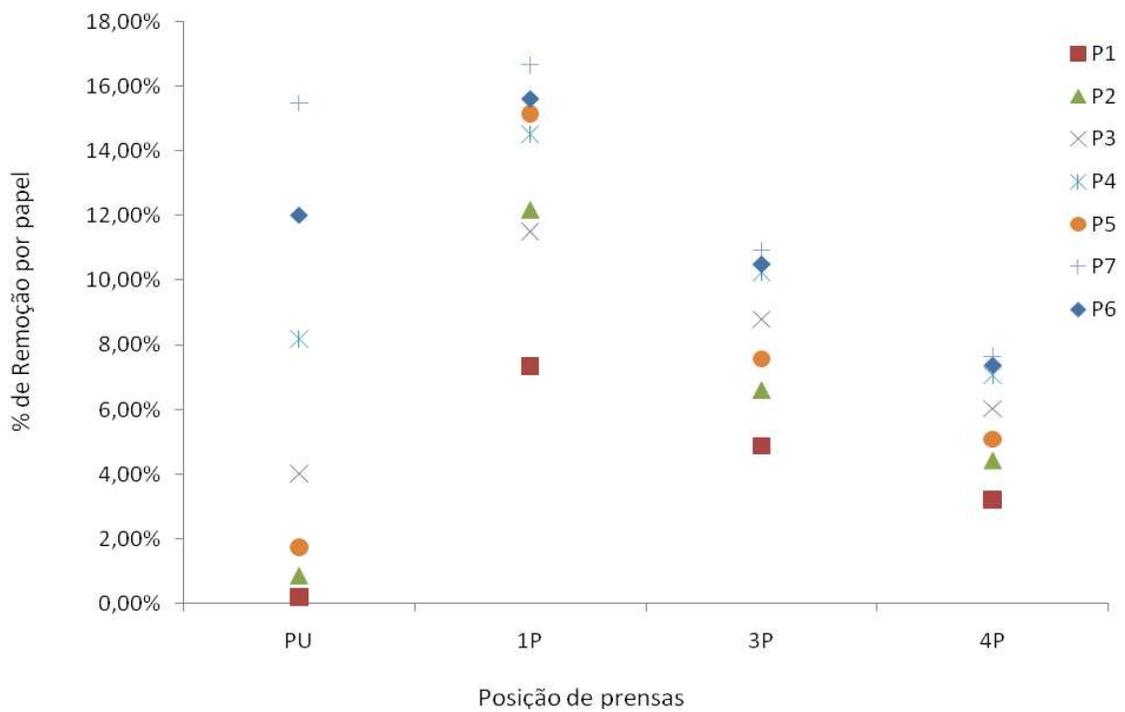


Figura 7. 36: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XVIII.

### 7.3.19. Estudo de Caso XIX

No estudo de Caso XIX, foram produzidas ao total 468 bobinas. Na tabela 7.37 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.37: Dados do estudo de Caso XIX

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	164	205	98498,00	98	311,600	77,044.898
P2	32	46	23491,63	24	60,800	88,661.089
P3	33	50	28313,49	26	62,700	87,919.157
P4	51	84	48702,65	49	96,900	92,591.397
P5	112	198	120382,08	120	212,800	95,851.155
P6	35	64	40040,00	40	66,500	94,439.024
P7	59	118	78694,20	79	112,100	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 5,32% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.38, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.38: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XIX

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T6	T1	T2
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.37, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 11,33% na remoção de água total, e na figura 7.38 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

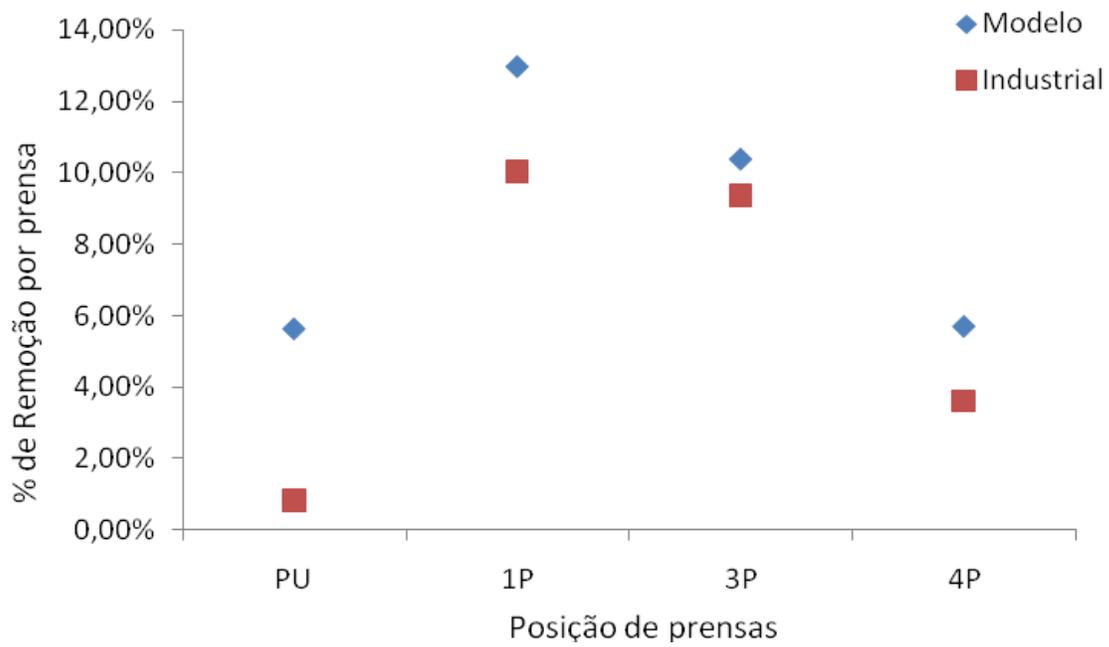


Figura 7. 37: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XIX.

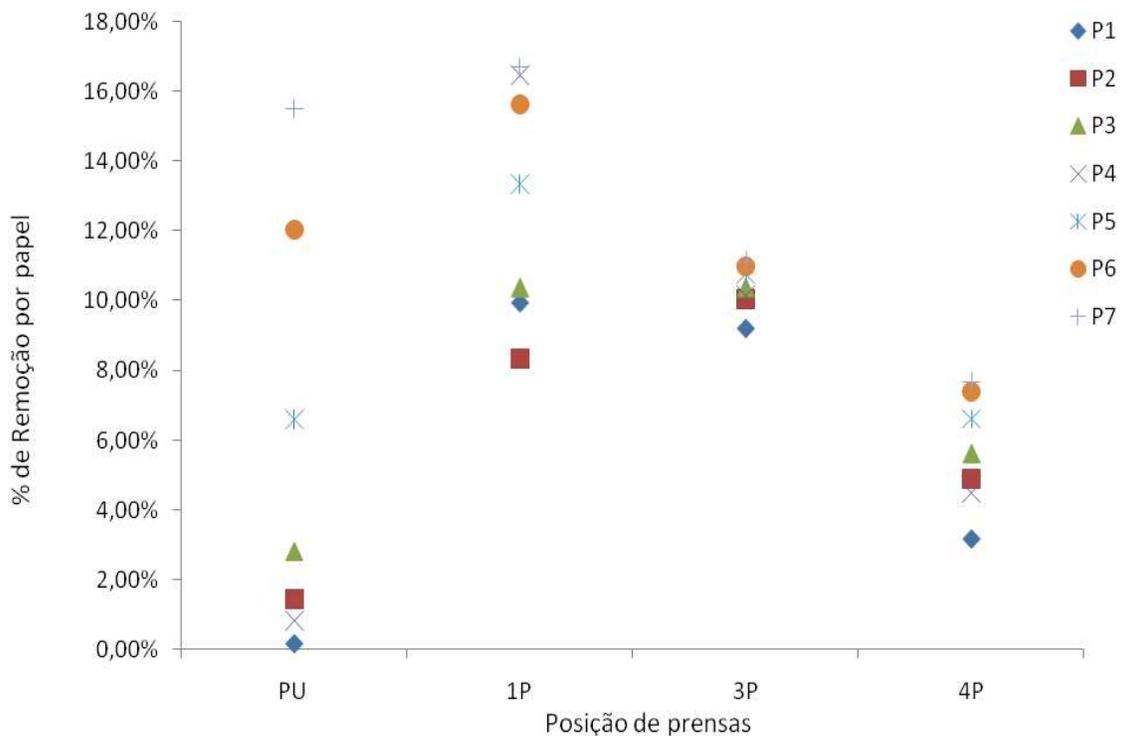


Figura 7. 38: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XIX.

### 7.3.20. Estudo de Caso XX

No estudo de Caso XX, foram produzidas ao total 325 bobinas. Na tabela 7.39 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.39: Dados do estudo de Caso XX

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	95	119	57057,00	57	108,500	77,044.898
P2	9	13	6733,58	7	17,100	88,661.089
P3	17	26	14585,73	14	32,300	87,919.157
P4	34	56	32468,44	32	64,600	92,591.397
P5	101	178	108558,84	109	191,900	95,851.155
P6	22	40	25168,00	25	41,800	94,439.024
P7	47	94	62688,60	63	89,300	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 1,23% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.40, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.40: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XX

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo		Intervalo de Tempo	
	T1	T5	T1	T3
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.39, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 2,78% na

remoção de água total, e na figura 7.40 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

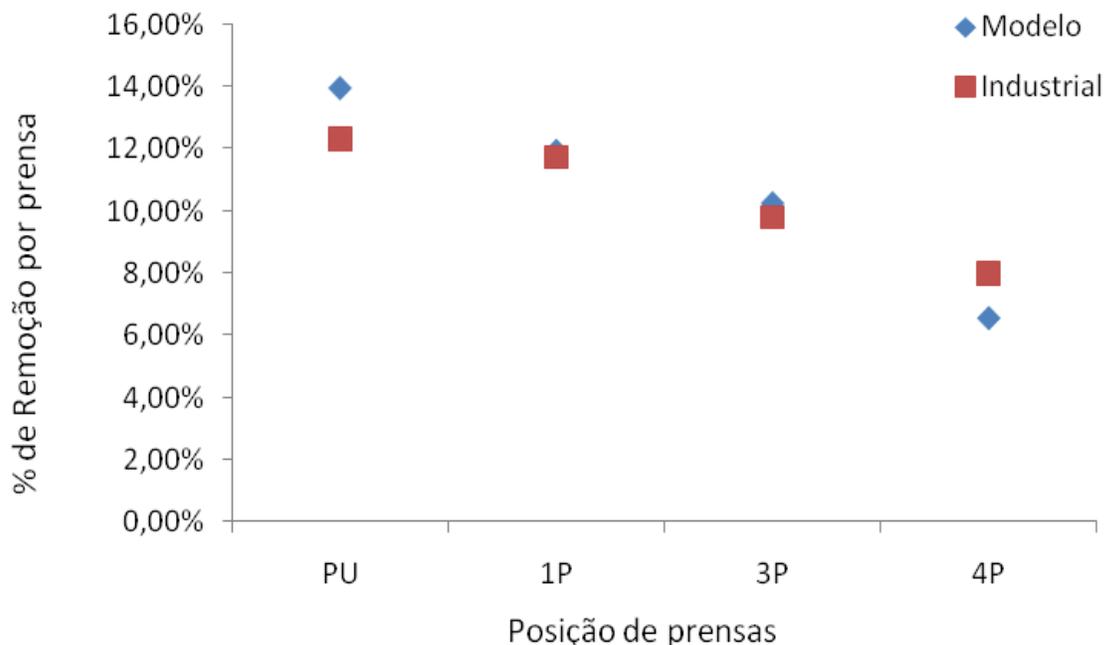


Figura 7. 39: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XX.

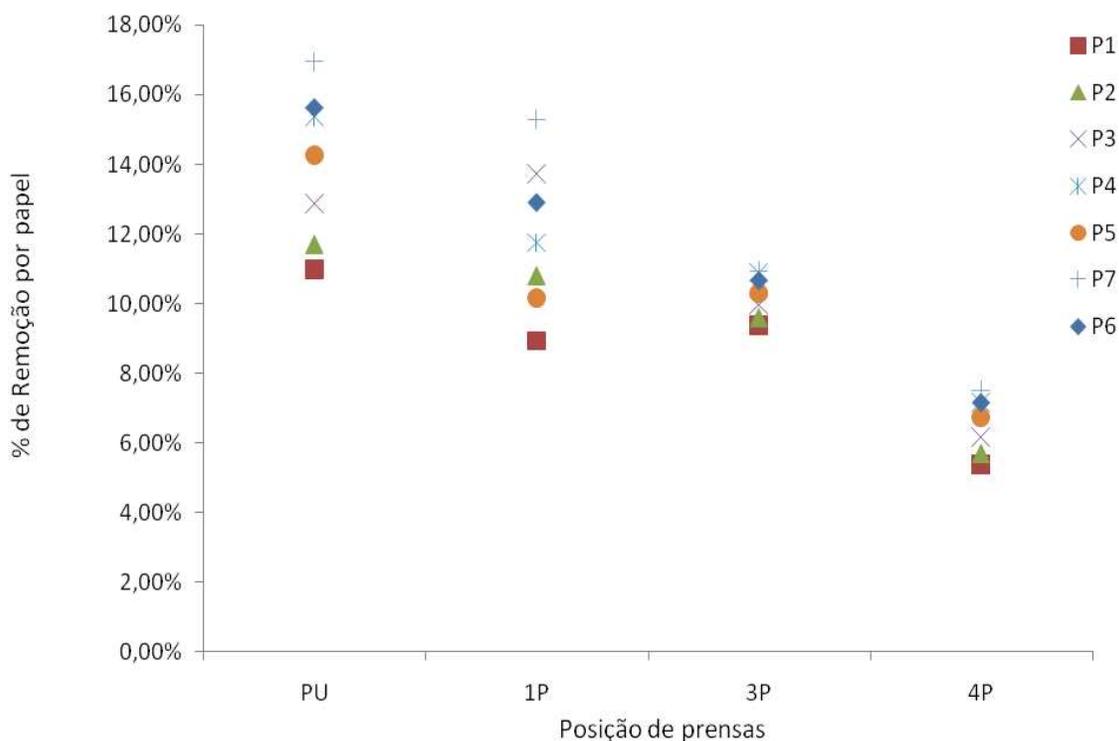


Figura 7. 40: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XX.

### 7.3.21. Estudo de Caso XXI

No estudo de Caso XXI, foram produzidas ao total 325 bobinas. Na tabela 7.41 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.41: Dados do estudo de Caso XXI

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento H	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P1	95	119	57057,00	57	108,500	77,044.898
P2	9	13	6733,58	7	17,100	88,661.089
P3	17	26	14585,73	14	32,300	87,919.157
P4	34	56	32468,44	32	64,600	92,591.397
P5	101	178	108558,84	109	191,900	95,851.155
P6	22	40	25168,00	25	41,800	94,439.024
P7	47	94	62688,60	63	89,300	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 4,09% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. Na tabela 7.42, compara-se a troca de feltros realizada para o modelo e o industrial.

Tabela 7.42: Comparação de troca de feltros – Estudo de Caso XXI

Posição de Feltro	Modelo		Industrial	
	Intervalo de Tempo T1	Intervalo de Tempo T5	Intervalo de Tempo T1	Intervalo de Tempo T3
PU	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
1P	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$	$y_{jk=1}$
3P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-
4P	$y_{jk=1}$	-	$y_{jk=1}$	-

Representa-se na figura 7.41, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 5,85% na

remoção de água total, e na figura 7.42 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

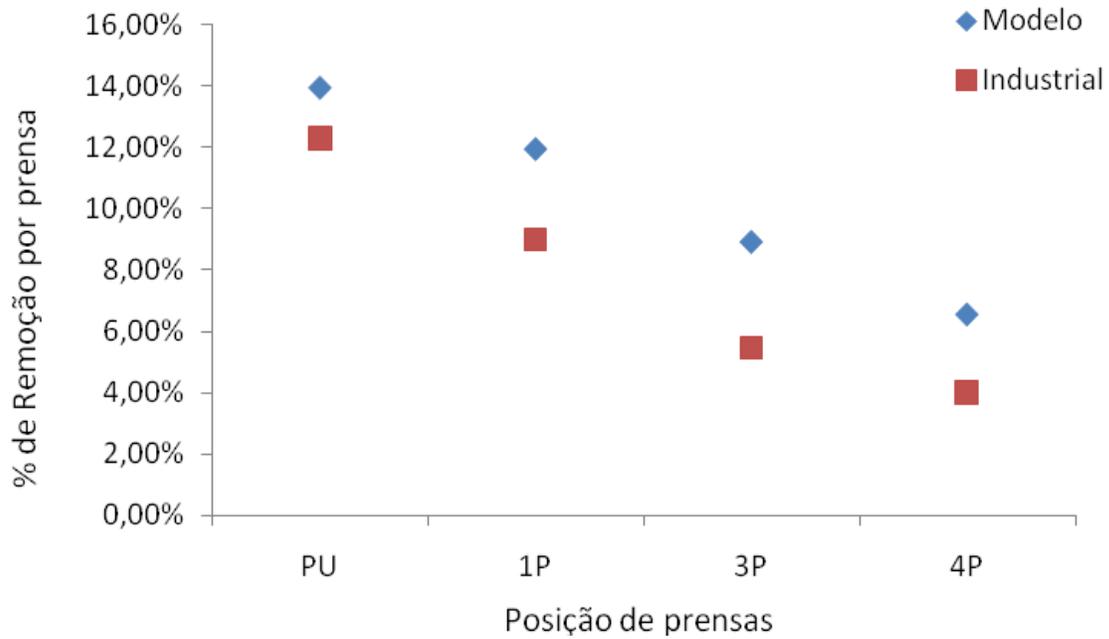


Figura 7. 41: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XXI.

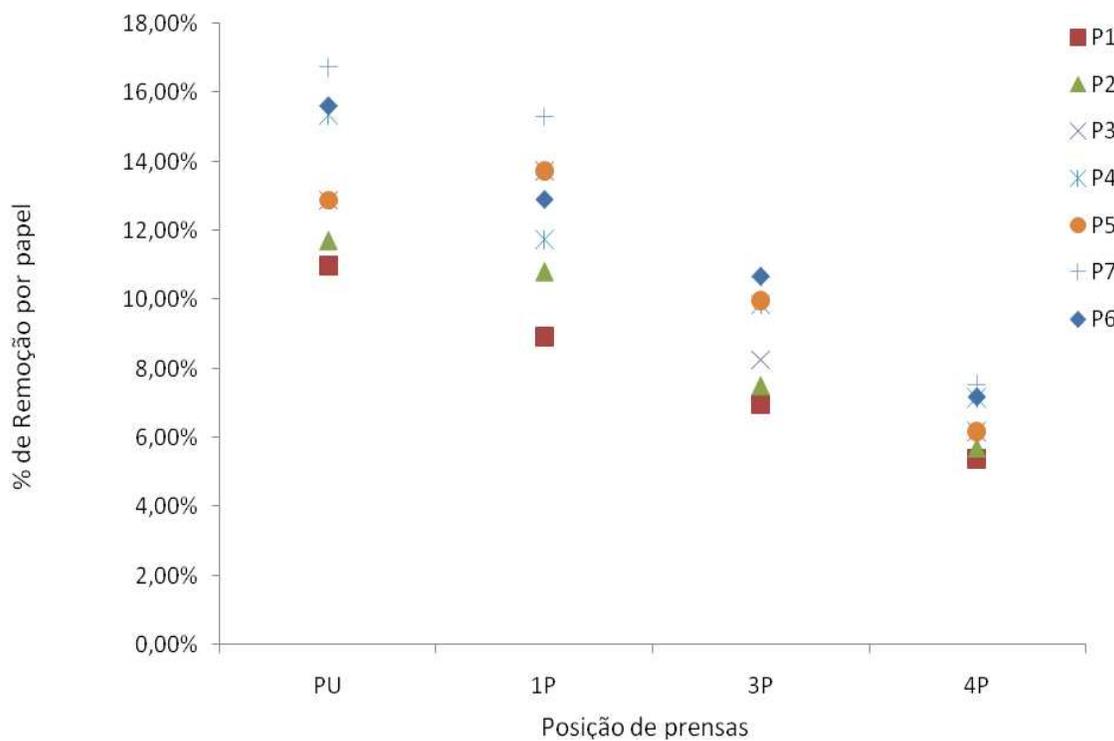


Figura 7. 42: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XXI.

### 7.3.22. Estudo de Caso XXII

No estudo de Caso XXII, foram produzidas ao total 51 bobinas. Na tabela 7.43 apresenta-se o tipo de papéis produzidos, quantidade de bobinas produzida em cada lote, o tempo total disponível para produção das bobinas, tamanho de cada lote, peso de cada lote e custo para prensagem e secagem de cada lote de bobinas.

Tabela 7.43: Dados do estudo de Caso XXII

Tipo do Papel	Quantidade de bobinas	Tempo de processamento h	Tamanho do lote de bobinas m <sup>2</sup>	Peso do lote de bobinas ton.	Custo de prensagem US\$	Custo de secagem US\$
P5	21	37	22571,64	23	39,900	95,851.155
P6	13	24	14872,00	15	24,700	94,439.024
P7	17	34	22674,60	23	32,300	95,894.118

Em relação à troca de feltros realizadas neste estudo de caso, observa-se que tivemos uma economia de 0,29% em relação ao custo para compra e troca dos feltros. neste estudo de caso não tivemos necessidade de troca para o modelo e industrial. Representa-se na figura 7.43, a comparação entre os resultados obtidos em relação à remoção de água em cada prensa, neste caso tivemos um aumento na ordem de 0,36% na remoção de água total, e na figura 7.44 representa-se a retirada de água por papel em cada prensa.

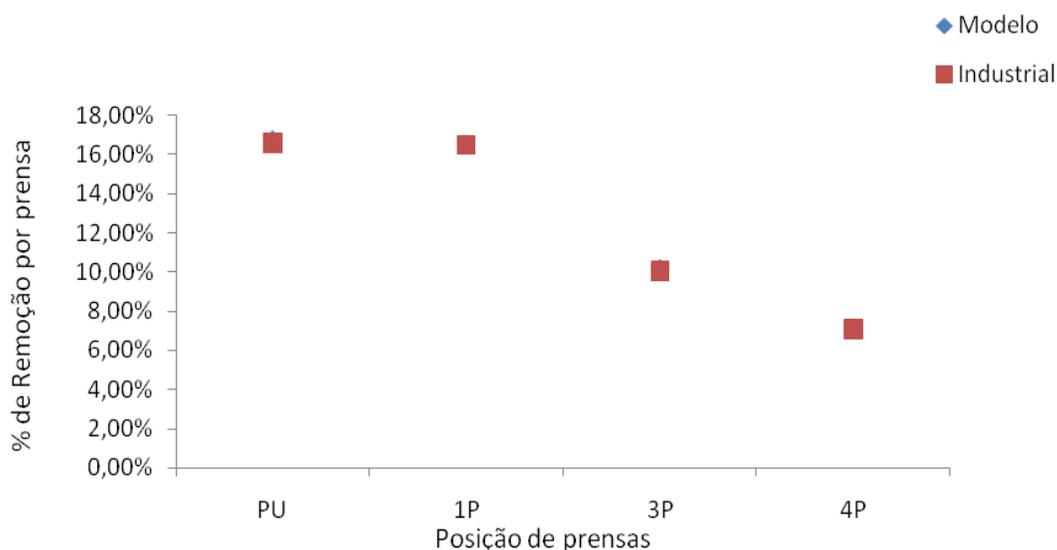
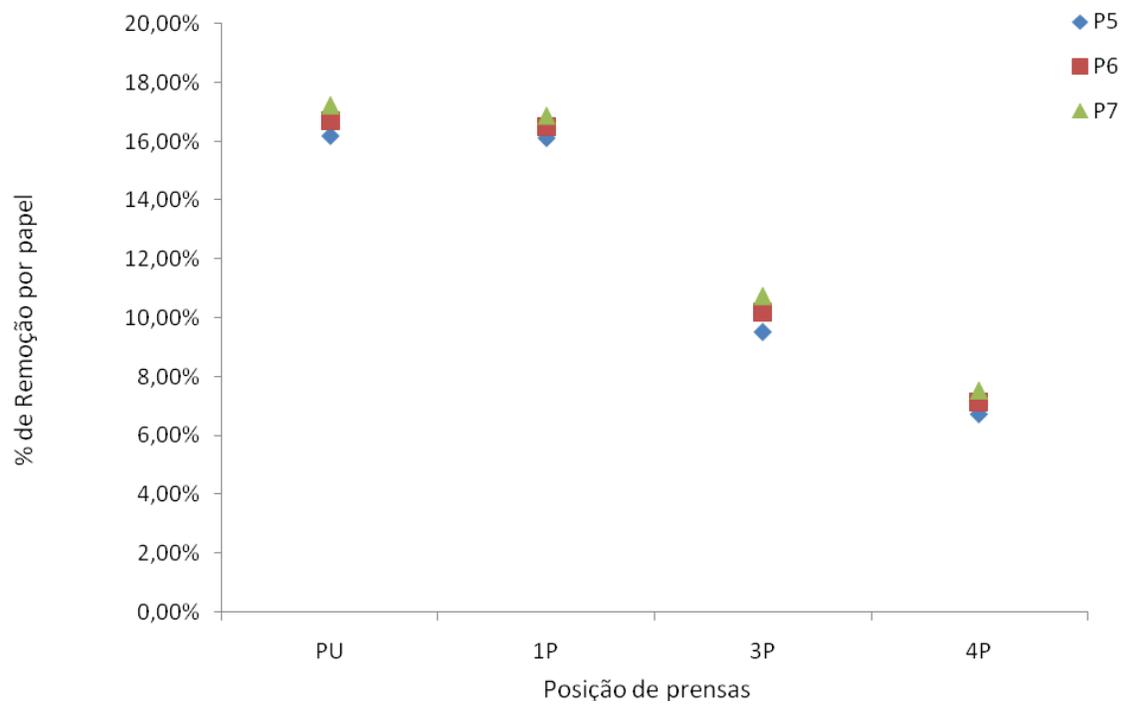


Figura 7. 43: Comparação de remoção de água por prensa – Estudo de Caso XXII.



*Figura 7. 44: Remoção de água de cada papel por prensa – Estudo de Caso XXII.*

Nas tabelas 7.44 e 7.45 demonstra-se os valores obtidos em relação aos valores de função objetivo, seqüenciamento de produção, porcentagem de água removida e número de troca de feltros nos 22 estudos de casos rodados.

Tabela 7.44: Resultados obtidos para os 22 estudo de caso – Modelo

Programa	FO	Seqüência de Produção	% de água removida na prensagem	Nº de troca de feltros
1	1.339.540,64	P7, P6, P3, P2, P5, P4, P1	40,35%	1
2	1.149.043,90	P7, P3, P5, P2, P6, P4, P1	40,56%	-
3	1.876.817,00	P6, P5, P3, P2, P8, P7, P4, P1	34,96%	2
4	1.843.936,39	P6, P8, P7, P3, P5, P4, P2, P1	34,54%	2
5	548.445,73	P7, P6, P5, P3, P4, P2, P1	44,41%	-
6	1.178.451,83	P7, P8, P4, P2, P5,P3,P1	42,10%	-
7	1.158.288,14	P7,P4,P8,P2,P5,P3,P1	42,93%	-
8	1.158.804,51	P8,P7,P4,P2,P3,P5,P1	46,97%	-
9	1.343.868,92	P5,P8,P7,P6,P4,P3	41,44%	-
10	1.377.090,53	P5,P8,P7,P6,P3,P4	43,33%	1
11	1.308.067,08	P8,P7,P6,P5,P4,P3	47,80%	1
12	667.892,95	P7,P5,P4,P3,P2,P1	39,19%	-
13	1.215.507,93	P8,P7,P5,P6,P4,P3,P2,P1	36,39%	1
14	1.942.235,40	P5,P7,P6,P3,P8,P2,P4,P1	33,59%	1
15	1.831.275,28	P5,P4,P1,P2,P7,P6,P8,P3	34,92%	1
16	1.826.365,02	P7,P5,P2,P8,P4,P3,P6,P1	23,53%	2
17	1.966.321,95	P1,P5,P7,P4,P6,P3,P2	37,11%	4
18	1.254.242,59	P1,P5,P3,P2,P4,P6,P7	39,36%	1
29	1.194.141,77	P5,P1,P3,P2,P4,P6,P7	44,97%	1
20	1.075.855,09	P7,P6,P5,P4,P3,P2,P1	43,20%	1
21	1.103.481,01	P7,P6,P5,P4,P3,P1,P2	52,54%	1
22	374.243,37	P7,P5,P6		-

Tabela 7.45: Resultados obtidos para os 22 estudo de caso – Industria

Programa	FO	Seqüência de Produção	% de água removida na prensagem	Nº de troca de feltros
1	1.384.899,93	P1,P5,P4,P7,P6,P3,P2	37,59%	2
2	1.227.348,27	P1,P2,P5,P4,P3,P6,P7	36,42%	2
3	1.983.190,64	P1,P5,P4,P2,P6,P7,P3,P8	30,70%	4
4	1.944.769,10	P1,P5,P4,P2,P6,P7,P3,P8	28,88%	3
5	573.234,03	P1,P6,P4,P7,P2,P3,P5	39,96%	-
6	1.268.586,85	P1,P2,P3,P4,P5,P6,P8	40,10%	2
7	1.230.895,03	P1,P2,P3,P4,P5,P6,P8	38,80%	1
8	1.259.575,23	P1,P2,P3,P4,P5,P6,P8	43,04%	3
9	1.363.005,74	P5,P7,P6,P4,P3,P8	38,36%	1
10	1.395.571,63	P5,P7,P6,P4,P3,P8	37,19%	1
11	1.320.670,66	P5,P7,P6,P4,P3,P8	35,87%	1
12	702.847,25	P1,P2,P4,P3,P5,P6	30,87%	-
13	1.293.604,77	P1,P5,P3,P4,P2,P8,P6,P7	32,91%	1
14	2.016.449,09	P5,P1,P3,P7,P4,P2,P6,P8	30,27%	2
15	1.868.295,93	P5,P1,P3,P7,P4,P2,P6,P8	32,05%	2
16	1.854.535,00	P5,P1,P3,P7,P4,P2,P6,P8	20,72%	3
17	2.044.029,58	P1,P5,P7,P4,P6,P8,P3,P2	26,03%	4
18	1.324.475,59	P1,P5,P3,P2,P4,P6,P7	28,03%	2
19	1.261.212,09	P1, P5, P3, P2, P4, P6, P7	42,19%	1
20	1.089.207,17	P5, P1, P7, P4, P6, P3, P2	37,35%	1
21	1.150.522,26	P5, P1, P7, P4, P6, P3, P2	52,18%	1
22	375.328,62	P5, P7, P6	37,59%	-

## 7.4. Parte II – Análise Geral

Nessa seção do trabalho fez-se uma análise dos resultados no ano considerado em relação aos custos totais anuais (custos de feltros, custos de secagem e custos totais), remoção de água, aumento de produção de bobinas e seqüenciamento e troca e duração de feltros.

### 7.4.1. Custos

Em relação ao custo, verifica-se na tabela 7.46 a redução anual obtida pelo modelo desenvolvido, no qual tivemos uma redução nos custos para troca de feltros da ordem de 11,08%, redução no custo de secagem de 3,87% e 4,04% no custo total.

*Tabela 7.46: Comparação dos custos anuais*

Custo	Modelo	Industrial
Feltros	US\$ 4.948.734,56	US\$ 5.565.148,50
Secagem	US\$ 22.461.308,14	US\$ 23.365.331,08
Total	US\$ 27.394.376,39	US\$ 28.547.354,49

Na tabela 7.47 é efetuada uma comparação entre os valores obtidos pelo modelo desenvolvido e os dados reais, em relação à porcentagem de custo e proporção de desaguamento. Nesta tabela, foram focadas apenas as etapas de prensagem e secagem, os quais são objeto de estudo do presente trabalho. Os valores de custo de desaguamento para a seção de formação do papel não foram considerados.

*Tabela 7.47: Valores Comparativos de porcentagem de custos e desaguamento*

Seção	Custo Industrial	Custo Modelo	Proporção de Desaguamento Industrial	Proporção de Desaguamento Modelo
Formação	~10%	-	95-97%	-
Prensagem	~12%	~10%	3%	5%
Secagem	~78%	~75%	1%	5%

### 7.4.2. Remoção de água

A remoção de água em feltros é um grande desafio, pois de um lado tem-se a capacidade física do feltro, do outro existe a necessidade de maior remoção de água. Dos dados industriais descritos na literatura, verifica-se que o setor de prensas consegue retirar cerca de 12% de água da folha de papel, e que com um incremento de 1% conseguido neste setor corresponde uma economia de 4 a 5% no setor de secagem.

Para todas as análises dos resultados desse modelo, inicialmente foram rodados os programas utilizando-se a mesma seqüência de produção de bobinas da fábrica, e posteriormente para comparação dos resultados obtidos, os mesmo programas foram rodados de forma “livre”, ou seja, sem que nenhuma seqüência fosse imposta ao programa.

Na figura 7.45, apresenta-se a comparação dos resultados obtidos entre o modelo fixo e o modelo livre, onde no qual pode ser verificado um aumento na remoção de água no setor de prensagem na ordem de 5% no ano considerado.

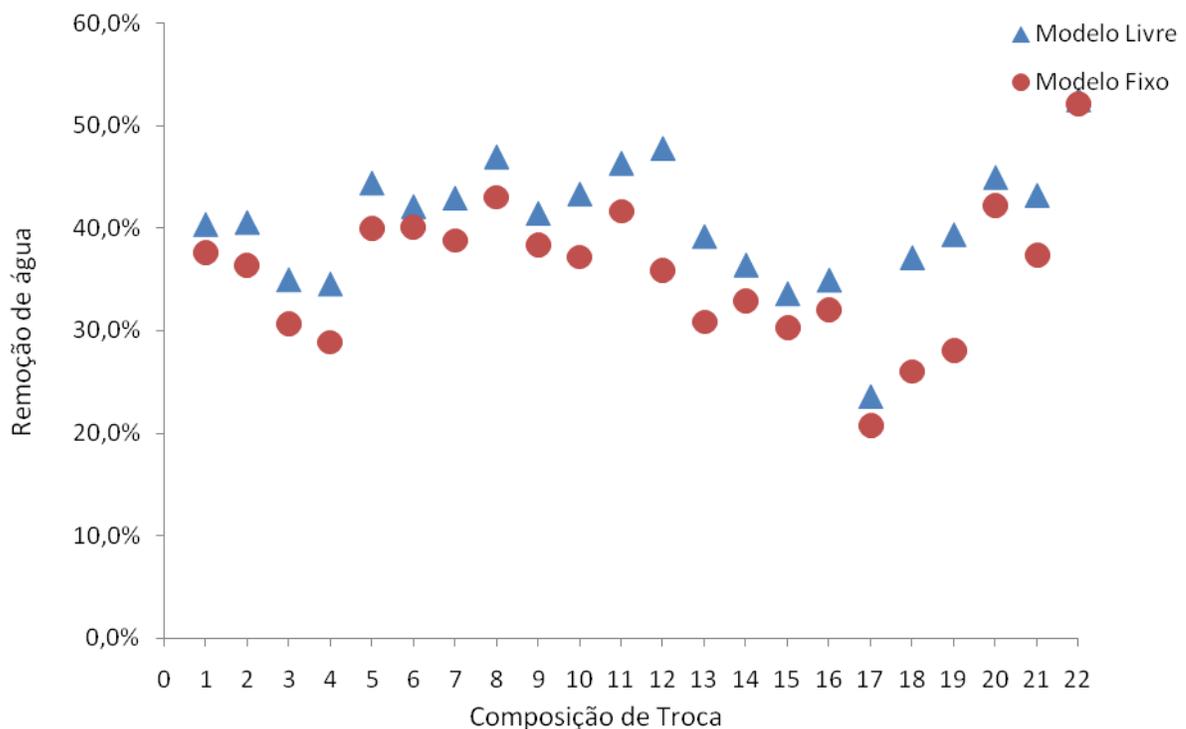
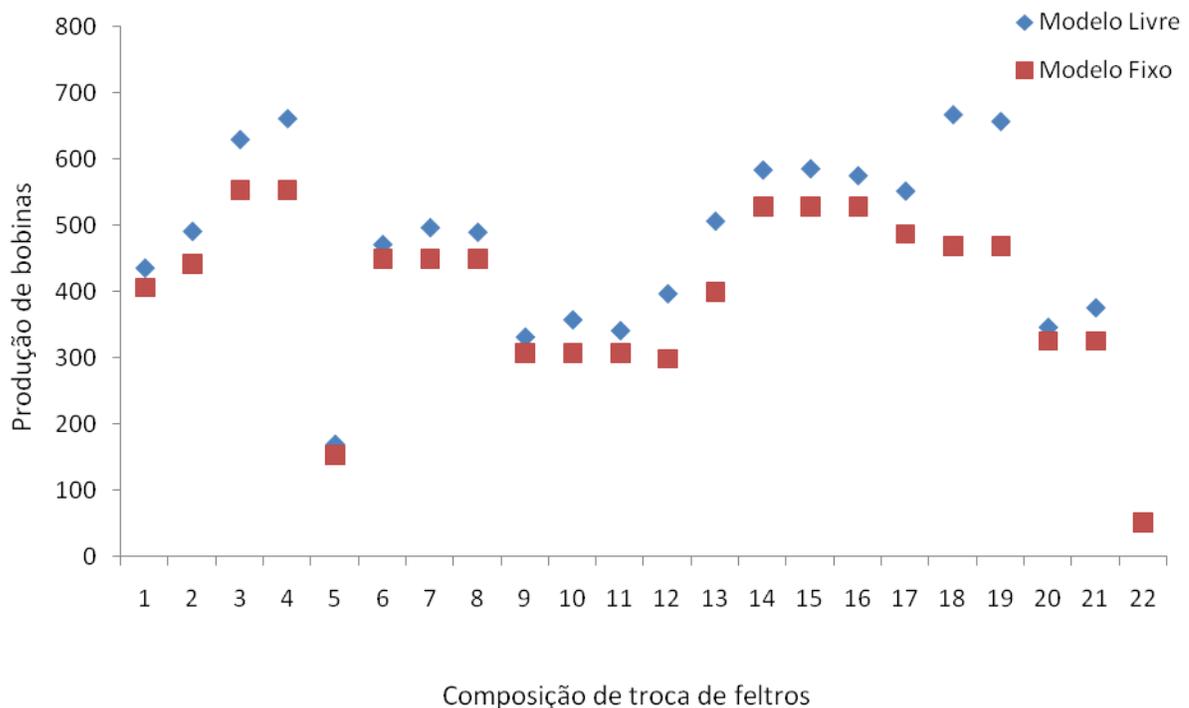


Figura 7. 45: Remoção de água.

### 7.4.3. Seqüência e Aumento de Produção

Consideramos neste modelo um horizonte de tempo fixo e uma produção fixa de bobinas (dados do problema). Com o seqüenciamento otimizado, pode-se aproveitar melhor o uso dos feltros. Dessa forma, com a economia conseguida (em termos de US\$), pode-se então obter um aumento de produção e da vida útil dos feltros para o mesmo valor (em US\$) empregado. O aumento conseguido pelo modelo em relação à produção de bobinas foi em média de 12% durante o ano estudado, conforme figura 7.46.



*Figura 7. 46: Produção de bobinas.*

Na tabela 7.48, podemos observar a quantidade de bobinas produzidas a mais com a utilização do modelo matemático.

*Tabela 7.48: Comparação de produção de bobinas*

<b>Troca</b>	<b>Industrial</b>	<b>Modelo</b>	<b>Aumento</b>
1	406	436	30
2	441	491	50
3	553	630	77
4	553	661	108
5	153	170	17
6	449	471	22
7	449	497	48
8	449	497	48
9	307	332	25
10	307	358	51
12	298	307	99
13	399	507	108
14	528	584	56
15	528	586	58
16	528	575	47
17	486	552	66
18	468	667	199
19	468	657	189
20	325	346	21
21	325	376	51
22	51	51	0

#### 7.4.4. Troca de Feltros

A troca de feltros é uma das partes da máquina de papel em que se um grande custo de tempo de troca perda e custo de compra, além do tempo “perdido” de produção. A cada parada para troca de feltros é gasto aproximadamente 1 hora e 30 minutos, e após isso mais algum tempo para retorno da máquina à produção. Por isso com um melhor seqüenciamento na produção das bobinas, temos maiores condições para diminuir as trocas realizadas na máquina de papel, e com isso um aumento significativo na produção das bobinas. Na figura 7.47, representamos as trocas realizadas nesta maquina no referido ano estudo, de acordo com as posições de cada feltro, e obtivemos uma redução de 46% em média na redução de troca dos feltros, comparando-se o modelo livre com os dados industriais.

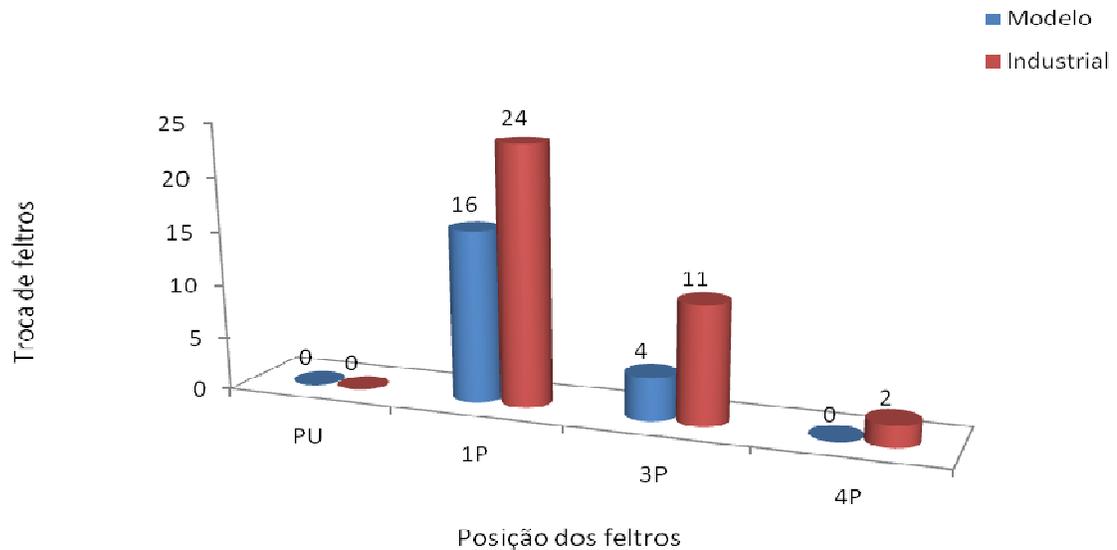


Figura 7. 47: Troca de feltros.

#### 7.4.5. Duração de Feltros

A duração de feltro é uma área muito explorada no quesito de economia de custos. Quanto mais tempo um feltro durar em máquina melhor, porém à medida que o tempo passa, o feltro acaba perdendo sua principal característica, que é a retirada de água por prensagem. Então o ponto principal no que diz respeito em trocas de feltros é encontrar um ponto em que o feltro dure mais em máquina sem perder sua capacidade de absorção. Através do modelo desenvolvido, tivemos um aumento em média de 15% na vida útil do feltro, levando-se em conta ao melhor seqüenciamento obtido pelo modelo matemático no caso livre. Podemos observar os resultados, comparando-se os valores no gráfico 7.48. Onde a linha azul representa a duração dos feltros em dias, no caso real, e a linha vermelha a duração em dias dos feltros obtidos pelo modelo matemático. Ambos durante a composição de roca dos feltros durante o ano estudado.

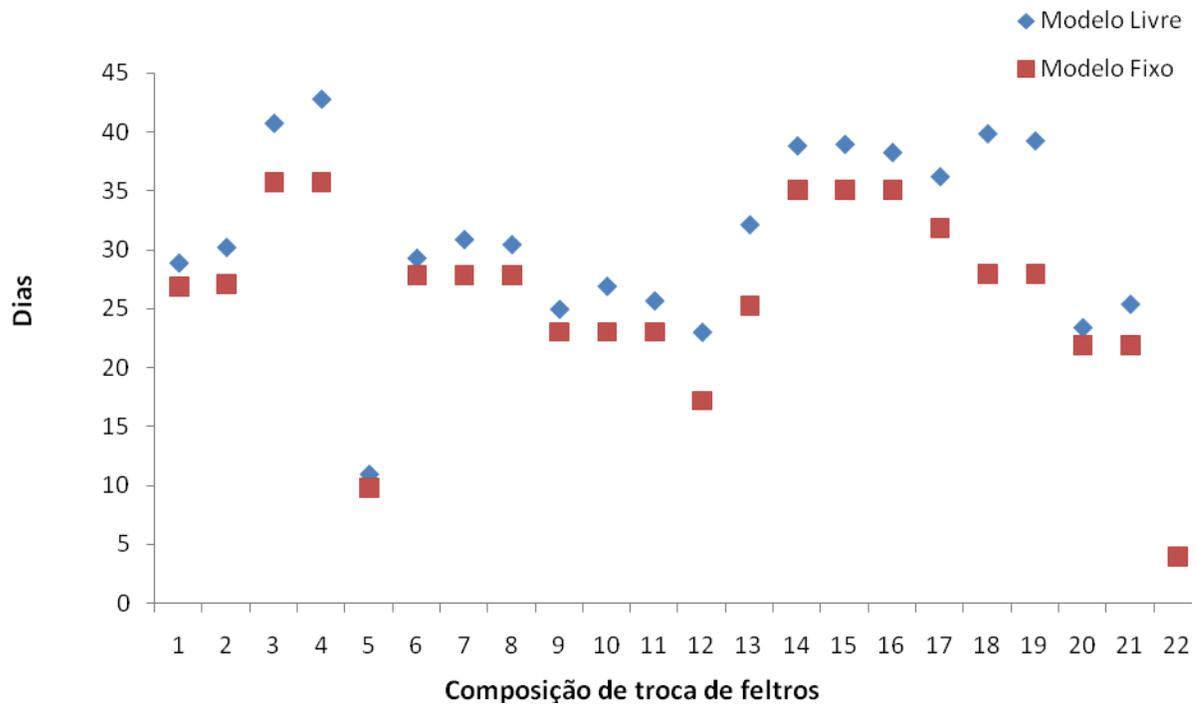


Figura 7. 48: Duração de feltros.

# CAPÍTULO 8

## CONCLUSÕES

Ao escolher esse tema para Tese de doutorado, pretendia-se desenvolver um modelo matemático em MILP para otimização do setor de prensagem através da obtenção do melhor seqüenciamento de produção de bobinas. O maior desafio deste trabalho logo no início, onde para poder identificar as variáveis de maior importância no processo de fabricação de papel desta máquina, tínhamos um volume muito grande de dados a serem analisados e através desta análise descobrir qual direção seguir para o desenvolvimento deste modelo. As principais conclusões que podemos obter com esse trabalho foi redução de 4% no custo anual total para a fabricação de papéis, essa economia é de grande valia, visto que o custo de energia representa cerca de 50% do custo total para operação da máquina.

Podemos dar um maior enfoque na redução de 12% no que diz respeito aos custos de trocas de feltros. Com isso podemos concluir que o modelo desenvolvido foi eficiente e mostrou rápida resolução. Podemos citar os seguintes benefícios:

- ✓ Aumento da remoção de água no setor de prensagem de 5%;
- ✓ Maior durabilidade dos feltros em dias;
- ✓ Menor quantidade de trocas de feltros no período;
- ✓ Redução do custo de energia para secagem do papel;
- ✓ Melhor seqüenciamento de produção das bobinas.

Espera-se que com esse trabalho possa ter utilidade na área de fabricação de papeis, contribuindo para a melhoria de produção e redução de custos.

## **8.1 Sugestões para trabalhos futuros**

Para trabalhos futuros, sugere-se o desenvolvimento de um modelo que vise integrar a preparação de massa, com o modelo já desenvolvido neste trabalho. Isto poderá acarretar um aumento na remoção de água no setor de prensagem, e conseqüentemente, maior durabilidade dos feltros. Recomenda ainda o desenvolvimento de modelos estocásticos para o caso de paradas imprevistas, ruptura do papel e feltro, também é recomendada.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ ADANUR, S; “Paper Machine Clothing”. Published by Technomic Publishing, 1997;
- ✓ BLAZEWICZ,J.;ECKER,K.H.;PESCH,E.SCHIDT,G.;WEGLARZ,J,J. – “Scheduling Computer and Manufacturing Process” – Springer – Verlag, Berlim, 1996.491p;
- ✓ BROOKE, A., KENDRICK, D. and MEERAUS, A. *GAMS: a user’s guide*. San Francisco: The Scientific Press, 1988;
- ✓ FALSARELLA, P. “Apostila de treinamento VOITH”, - Curso de Especialização em Papel – IV Turma, ABTCP- EPUSP-FDTE, Janeiro de 1994;
- ✓ FAROUK EL-HOSSEUHY, an equation for press felt compression, Tappi Journal p193-196(1991);
- ✓ FURIBONDO, N.; “Pulp & Paper – Wire, Felt Cleaning Programs Can Improve Paper Machine Runability”. August, 1987;
- ✓ IVAN I. PIKULIK, D. GILBERT, J. D. McDonald, and J. R. HENDERSON, A new instrument for measuring the permeability of paper machine clothing, April 1991 Tappi Journal;
- ✓ ISAAK RUDMAN and DAVID I. ORLOFF, Dynamic thickness and temperature measurements during wet pressing and impulse drying, Tappi Journal, July 2002;
- ✓ IVAN I. PIKULIK, J. DAVID MC.DONALD, CHRISTINE J. MENTELE, and DAVID V. LANGE, The effect of refining, forming, and pressing on fine paper quality, Tappi Journal, June 1998;
- ✓ JAMES BOERNER and DAVID ORLOFF, Effects of basis weight and freeness on sheet permeability and critical impulse-drying temperature, Vol. 77, No. 2 Tappi Journal;
- ✓ JACQUES SILVY, Flow in a compressible porous media: The case of paper wet-press felts, Engineering Conference, 1990;

- ✓ J.D. McDonald, J. HAMEL and R.J. KERKES, Design Equation for Paper Machine Press Sections Journal of Pulp and Paper Science: Vol. 26 NO. 11 November 2000;
- ✓ JOHAN M. HAKASON, Liquid Permeability of Fibrous Porous Solids, Thesis for the Degree of Licentiate of Engineering 2003;
- ✓ JOSEF KALLRATH, Planning and scheduling in the process industry, OR Spectrum (2002) 24: 219–250;
- ✓ JOSEF KALLRATH, Mixed Integer Optimization in the chemical process industry Experience, Potential and Future Perspectives, Trans IChemE, Vol 78, Part A, September 2000;
- ✓ J. C. ROUX and J. P. VINCENT, A proposed model in the analysis of wet pressing, February 1991 Tappi Journal;
- ✓ J. DAVID McDonald and RICHARD J. KERKES, A decreasing permeability model of wet pressing: applications, December 1991 Tappi Journal;
- ✓ J. DAVID McDonald and RICHARD J. KERKES, A decreasing-permeability model of wet pressing with rewetting, Vol. 78, No. 11 Tappi Journal;
- ✓ J.D. McDonald, I.I. PIKULIK, P.L. KO and T.H. Owston, Optimizing Market Pulp Felt Design for Water Removal Journal of Pulp and Paper Science, Vol. 28 NO. 1 January 2002;
- ✓ J.WANG, A.N. HRYMAK and R.H. PELTON, Specific Surface and Effective Volume of Water-Swollen Pulp Fibers by a Permeability Method, Journal of Pulp and Paper science, Vol. 28 N. 1 January 2002;
- ✓ JORGEN GULLBRAND, The influence of stress variations in wet pressing, Licentiate Thesis 2004;
- ✓ KENNETH WALKER and MARC F. FUGLER, Press section performance VOL. 79: NO. 11 Tappi Journal;
- ✓ KERKES R.J, McDonald J.D, A decreasing permeability model of wet pressing: theory. Tappi Journal.74 (12):150-156(1991);
- ✓ MARCO F.C.LUCISANO, JOACHIM B.PETRINI, ANDREW R.MARTIN, The role of evaporative dewatering in impulse pressing, Tappi Journal March 2003;

- ✓ MARKKU KARLSSON and JARI HAMALAINEN, A Model-Based decision aid system to add calculate to papermaking, European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2004;
- ✓ MICHAEL R.DOWLING, STEPHEN J.IÁNSON, RICHARD W.HOYLAND and SHARON M.HOOLE, The strength of periodic press section marks in paper Tappi Journal vol4 n°4;
- ✓ NEUM, J.A. “Paper Machine Showers and Fabric Dewatering: Theory and Application”, AES Engineered Systems, Queensbury, New York, USA;
- ✓ PARADIS MARK A., GENCO JOSEPH.M, BOUSFIELD DOUGLAS W, HASSLER JOHN C., WILDFONG VAUGHN, Determination of drainage resistance coefficients under know shear rate. Tappi Journal August 2002;
- ✓ PAULAPURO, H, “Papermaking Science and Technology – Book 8 - Papermaking Part 1, Stock -Preparation and Wet End”. Printed by Gummerus Printing, Jyväskylä, Finland 2000;
- ✓ PETER WORFORD, Press section water balance testing, Vol. 1: NO. 5 Tappi Journal;
- ✓ PHELAN PAUL, AHRENS FREDRICK, WORRY GARY, Laboratory study of shoe pressing for low basis weight paper applications, April 2001/Vol. 84: N. 4;
- ✓ RENDER, B. &STAIR, R.M. – Quantitative Analysis for Management” –Prentice – Hall Inc. New Jersey sixth edition, 1997, 769p;
- ✓ RICHARD J. CLOS, LOUIS L. EDWARDS, and INDRA GUNAWAN, Vol. 77, No. 6 Tappi Journal, A limiting-consistency model for pulp dewatering and wet pressing;
- ✓ RICHARD J. KEREKES and J. DACID McDonald, A decreasing permeability model of wet pressing: theory December 1991 Tappi Journal;
- ✓ REESE, R.A., The fabrics: what you need to know about press fabrics, Solutions Journal January 2006;
- ✓ REESE R.A, Save energy by optimizing paper machine clothing, Solution p21-20 (2006);
- ✓ REESE, R.A., Paper Machine Wet Press Manual, Tappi Press, Atlanta 1999;
- ✓ STEPHEN L’ANSON and TIM ASHWORTH, Differentiated permeability surface layer (DPSL) Pressing theory, Tappi Journal reviewed paper 2000;

- ✓ SKELTON JONH, TONEY M.MARY, A computer model of roll press NIP, March 2001/ Vol 84 n°3;
- ✓ TORBJSRN HELLE and TROND FORSRTHE, Influence of felt structure on water removal in a press NIP, Vol. 77, No. 6 Tappi Journal;
- ✓ TIP 0404-01 - Determination of water removal by wet presses;
- ✓ TIP 0404-19 - Press section monitoring;
- ✓ TIP 0404-20 - Physical characterization of press fabrics: basis weight, air permeability, void volume under loading and pressure uniformity;
- ✓ TIP 0404-26 - Paper machine clothing performance analysis;
- ✓ TIP 0404-28 - Method for evaluating thickness of wet press fabrics;
- ✓ TIP 0404-29 - Porosity measurement of press felts on the paper machine (HSPT);
- ✓ TIP 0404-43 - Water permeability of press fabrics;
- ✓ TIP 0404-52 - Press section optimization;
- ✓ TIP 0404-59 - Methods to minimize sheet rewet in the press section;
- ✓ The dynamics of wet pressing, Project 3258, Members of the Institute of Paper Chemistry, Appleton, Wisconsin, 1975;
- ✓ VINICIUS LOBOSCO, On the Modeling of Mechanical Dewatering in Papermaking, Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology Department of Fiber and Polymer Technology, Division of Paper Technology, Stockholm 2004;
- ✓ WAHLSTROM, P. B., Pulp Paper Mag. Can 70(19); 76 (1969);
- ✓ WESTERLUND, T, HARJUNKOSKI, I, ISAKSSON, J, Solving a production optimization problem in a paper-converting mill with MINLP, Computer Chem.Eng (22):563-570(1980);
- ✓ WAHLSTRON, P.B, pulp Paper Mag, Can. 61(8):T379, (1960);
- ✓ Celulose e Papel, Tecnologia de fabricação do papel, 2ª edição, IPT SENAI

# APÊNDICE

# APÊNDICE 1

## Modelo de Prensagem

A massa de água que é removida durante certo intervalo de tempo  $T_i$  é:

$$m_k^{rp} = m_k^e - m_k^{sp} = \int_0^{T_i} (\dot{m}_k^e - \dot{m}_k^{sp}) \cdot dt \quad (A1)$$

onde:

$\dot{m}_k^e$  vazão de água dentro do papel que entra no setor de prensagem no intervalo  $k$

$m_k^e$  massa de água que entrou no setor de prensagem no tempo  $T_i$  no intervalo  $k$

$\dot{m}_k^{sp}$  vazão de água dentro do papel que sai do setor de prensagem no intervalo  $k$

$m_k^{sp}$  massa de água que saiu do setor de prensagem no tempo  $T_i$  no intervalo  $k$

A vazão de água na entrada do processo de prensagem é dada por:

$$\dot{m}_k^e = v_p \cdot L_p \cdot e_p \cdot \varepsilon_{H_2O}^e \cdot \rho_{H_2O} \quad (A2)$$

onde:

$v_p$  velocidade do papel (m/s)

$L_p$  largura do papel (m)

$e_p$  espessura do papel (m ou mm/1000)

$\varepsilon_{H_2O}^e$  fração volumétrica de água dentro do papel na entrada

$\rho_{H_2O}$  massa específica da água (Kg/m<sup>3</sup>)

Como na entrada da prensagem, para uma dada bobina, esses valores permanecem constantes, tem-se que:

$$m_k^e = \int_0^{T_i} (v_p \cdot L_p \cdot e_p \cdot \varepsilon_{H_2O}^e \cdot \rho_{H_2O}) \cdot dt = v_p \cdot L_p \cdot e_p \cdot \varepsilon_{H_2O}^e \cdot \rho_{H_2O} \cdot T_i \quad (A3)$$

Por outro lado,  $m_k^e$  é a massa de água que está dentro da bobina no início, ou seja:

$$m_k^e = A_i \cdot U_i^e \quad (A4)$$

onde:

$$A_i \quad \text{é a área total da bobina (m}^2\text{)} \quad A = (v_p \cdot T_i) \cdot L_p \quad (A5)$$

$U_i^e$  é a umidade de entrada por área (Kg/m<sup>2</sup>)

A vazão de água no papel que sai do setor de prensagem no intervalo  $k$  é dada por:

$$\dot{m}_k^{sp} = v_p \cdot L_p \cdot e_p \cdot \varepsilon_{H_2O}^s \cdot \rho_{H_2O} \quad (A6)$$

O balanço de frações volumétricas (celulose, água e ar) em cada bobina é dado por:

$$\varepsilon_{\text{cel}} + \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{ar}} = 1 \quad (\text{A7})$$

A porosidade do papel é a soma das frações volumétrica de água e ar:

$$\phi_p = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} + \varepsilon_{\text{ar}} \quad (\text{A8})$$

Esses valores mudam com a prensagem, de tal forma que é preciso relacionar a fração volumétrica com as características da prensa e do feltro utilizado. Por outro lado, considera-se que todas as demais propriedades da bobina de papel (espessura, largura) têm os mesmos valores antes e depois da prensagem (mas não durante a mesma; a espessura do papel muda com a prensagem, mas depois volta ao valor anterior).

Para cada feltro em cada prensa, o balanço de frações volumétricas (fibra, água e ar) é dado por:

$$\xi_{\text{fibra}} + \xi_{\text{H}_2\text{O}} + \xi_{\text{ar}} = 1 \quad (\text{A9})$$

A porosidade do feltro é a soma das frações volumétricas de água e ar:

$$\varphi = \xi_{\text{H}_2\text{O}} + \xi_{\text{ar}} \quad (\text{A10})$$

Sabe-se que a porosidade dos feltros muda com o tempo de operação, da forma:

$$\varphi = \varphi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \quad (\text{A11})$$

A vazão mássica de fibra de feltro em cada prensa  $j$  é dada por:

$$\dot{m}_{\text{fibra}}^j = v_f \cdot L_f \cdot e_f \cdot \xi_{\text{fibra}} \cdot \rho_{\text{fibra}} \quad (\text{A12})$$

onde:

$v_f$  velocidade do feltro (m/s)

$L_f$  largura do feltro (m)

$e_f$  espessura do feltro (m ou mm/1000)

$\xi_{\text{fibra}}$  fração volumétrica de fibra dentro do feltro

$\rho_{\text{fibra}}$  massa específica da fibra de feltro ( $\text{Kg/m}^3$ )

Cada feltro  $j$  tem suas próprias características, mas para cada feltro a vazão mássica de fibra que entra no ponto de contato com o papel (NIP) é igual à vazão mássica de fibra que sai. Além disso, a massa de fibra total em cada feltro é a mesma do início ao final de sua vida útil. Dessa forma, tem-se que:

$$\xi_{\text{fibra}} \cdot e_f = \text{cte} \quad (\text{A13})$$

Além disso, tem-se que:

$$\xi_{\text{fibra}} = 1 - \varphi = 1 - \varphi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot t) \quad (\text{A14})$$

Dessa forma, a espessura de cada feltro varia com o tempo da seguinte forma:

$$e_f = e_f^0 \cdot \frac{(1 - \varphi_0)}{(1 - \varphi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot t))} \quad (\text{A15})$$

Para encontrar a relação entre a quantidade de água em um feltro com a quantidade de água em uma bobina de papel, faz-se um balanço de água, de tal forma que a soma das vazões de água (no papel e no feltro) que entram no NIP de uma prensa sejam iguais à soma das vazões de água que saem do mesmo. Utilizando ainda a condição de equilíbrio entre água no papel e no feltro na saída do NIP e a condição de remoção de água do feltro no vácuo, chega-se a:

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^j = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{j-1} \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{jk}} \quad (\text{A16})$$

onde:

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^{j-1}$  fração volumétrica de água na bobina na entrada da prensa  $j$

$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^j$  fração volumétrica de água na bobina na saída da prensa  $j$  e entrada da  $j+1$

$\Lambda_{jk}$  fator de extração da bobina processada no intervalo  $k$  na prensa  $j$

O fator de extração  $\Lambda_{jk}$  relaciona parâmetros do feltro e da bobina processada:

$$\Lambda_{jk} = \frac{v_f \cdot e_f \cdot \varphi}{v_p \cdot e_p \cdot \phi} \cdot k \cdot (1 - \beta) \quad (\text{A17})$$

onde:

$k$  constante de equilíbrio entre água no feltro e água no papel

$\beta$  fração de água removida do feltro pelo vácuo

Utilizando-se a variação de  $e_f$  e  $\varphi$  com o tempo, chega-se a:

$$\Lambda_{jk} = \lambda_{jk} \cdot \frac{(1 - \varphi_0) \cdot \exp(-\alpha \cdot t)}{[1 - \varphi_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot t)]} \quad (\text{A18})$$

$$\lambda_{jk} = \frac{v_f \cdot e_f^0 \cdot \varphi_0}{v_p \cdot e_p \cdot \phi_p} \cdot k \cdot (1 - \beta) \quad (\text{A19})$$

Observar que  $\lambda_{jk}$  é uma constante que depende de cada feltro e de cada bobina processada. Tem que ser determinada experimentalmente a partir da razão entre as umidades de saída e de entrada em cada prensa (observar que para  $t=0$  tem-se que

$\Lambda_{jk} = \lambda_{jk}$ ). Não é necessário determinar os outros parâmetros individualmente ( $k$ ,  $\beta$ , etc.), pois todos estão aglutinados em um único parâmetro ( $\lambda_{jk}$ ). Observar ainda que  $v_f = v_p$ , já que não há deslizamento entre papel e feltro.

Para o caso de quatro prensas, tem-se que:

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^1 = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^0 \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{1k}} \quad (\text{A20})$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^2 = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^1 \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{2k}} \quad (\text{A21})$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^3 = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^2 \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{3k}} \quad (\text{A22})$$

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^4 = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^3 \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{4k}} \quad (\text{A23})$$

Dessa forma:

$$\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^s = \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}^e \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{1k}} \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{2k}} \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{3k}} \cdot \frac{1}{1 + \Lambda_{4k}} \quad (\text{A24})$$

A partir das equações (33) e (37), tem-se então que:

$$\dot{m}_k^{sp} = \dot{m}_k^e \cdot \prod_{j=1}^4 \frac{1}{[1 + \Lambda_{jk}]} \quad (\text{A25})$$

Para a aplicação da equação (32) é necessário fazer uma integração. Como o tempo de processamento de uma bobina é muito menor que o tempo de vida útil de um feltro, pode-se fazer a integração numérica de cada intervalo de tempo utilizando-se o ponto médio do mesmo:

$$\int_a^b f(t) \cdot dt \cong f\left(\frac{a+b}{2}\right) \cdot (b-a) \quad (\text{A26})$$

Dessa forma, a partir das equações (34), (56) e (57), obtém-se a equação para a massa de água que saiu do setor de prensagem no tempo  $T_i$  no intervalo  $k$ :

$$m_k^{sp} = m_k^e \cdot \prod_{j=1}^4 \frac{1}{[1 + \bar{\Lambda}_{jk}]} \quad k = 1, \dots, N \quad (\text{A27})$$

onde o fator de extração  $\bar{\Lambda}_{jk}$  depende do tempo de uso do feltro, da seguinte forma:

$$\bar{\Lambda}_{jk} = \lambda_{jk} \cdot \frac{(1 - \varphi_{0,j}) \cdot \exp(-\alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk})}{[1 - \varphi_{0,j} \cdot \exp(-\alpha_j \cdot \bar{\tau}_{jk})]} \quad (\text{A28})$$

$$\bar{\tau}_{jk} = \theta_{jk} + 0.5 \cdot t_k \quad (\text{A29})$$

sendo  $\lambda_{jk}$  o fator de extração do feltro novo,  $\alpha_j$  o coeficiente de diminuição da vida útil do feltro e  $\varphi_{0,j}$  a porosidade inicial do feltro  $j$ .

# APÊNDICE 2

## Implementação do Modelo GAMS/CPLEX 10

### \$ONTEXT

Este modelo procura determinar o planejamento de produção de papel por meio de minimização da função de custo. Esta função considera: troca dos feltros na prensagem, custo de energia para operar as prensas, e custo de energia no processo de secagem apos a prensagem. As restrições do processo consideram o balanço de água removida na prensagem e na secagem, bem como a eficiência dos feltros na prensagem, que varia com o tempo de operação. O modelo foi formulado como uma programação mista inteira e linear. As variáveis binárias incluem a programação de produção e a troca dos feltros.

### \$OFFTEXT

### \$offlisting

### SETS

I bobina /P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7/

J feltro /PU,1P,3P,4P/

K intervalo /T1,T2,T3,T4,T5,T6,T7/

ALIAS (J,L)

TABLE JL valor

	PU	1P	3P	4P
PU	1	0	0	0
1P	1	1	0	0
3P	1	1	1	0
4P	1	1	1	1 ;

### SCALAR

NP numero de feltros / 4 /

NI numero de intervalos de tempo / 7 /

M numero grande / 651.00 /

MM numero muito grande /20.0 /

## PARAMETER

UE (I) umidade de entrada do papel do setor de prensagem (g/m<sup>2</sup>)

/ P1 0.00004615

P2 0.00004945

P3 0.00005192

P4 0.00005969

P5 0.00006181

P6 0.00006593

P7 0.00007417/

US (I) umidade de saída do papel do setor de secagem (ton/m<sup>2</sup>)

/ P1 0.000005

P2 0.000005

P3 0.000005

P4 0.000005

P5 0.000005

P6 0.000005

P7 0.000005/

A (I) area total de papel de cada lote de bobinas (m<sup>2</sup>)

/ P1 97297.20

P2 81551.18

P3 24023.56

P4 53477.42

P5 63415.56

P6 17160.00

P7 16005.60/

T(I) tempo de processamento de cada lote de bobinas (H)

/ P1 203.00

P2 158.00

P3 42.00

P4 92.00

P5 104.00

P6 28.00

P7 24.00 /

CF(J) custo de compra e troca dos feltros (US\$)

/ PU 66691.470

1P 37415.028

3P 40341.510

4P 50058.336/

ALFA(J) coeficiente de decaimento de massa de agua retirada (1\h)

/ PU 0.002083

1P 0.001250

3P 0.001667

4P 0.001667/

EP(J) fração volumétrica de fibras no feltro novo

/ PU 0.6227

1P 0.5680

3P 0.6220

4P 0.6490/

TABLE CP (I K) custo de energia gasto na prensagem de i em k (US\$/ton água)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
P1	307.800	307.800	307.800	307.800	307.800	307.800	307.800
P2	207.100	207.100	207.100	207.100	207.100	207.100	207.100
P3	53.200	53.200	53.200	53.200	53.200	53.200	53.200
P4	106.400	106.400	106.400	106.400	106.400	106.400	106.400
P5	112.100	112.100	112.100	112.100	112.100	112.100	112.100
P6	28.500	28.500	28.500	28.500	28.500	28.500	28.500
P7	22.800	22.800	22.800	22.800	22.800	22.800	22.800;

TABLE LA (I, J) fator de extração na prensagem da bobina i com feltro j

	PU	1P	3P	4P
P1	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250
P2	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250
P3	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250
P4	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250
P5	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250
P6	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250
P7	0.2134	0.2813	0.1852	0.1250;

TABLE CS (I K) custo de energia gasto na secagem de i em k (US\$/ton água)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
P1	77044.897	77044.897	77044.897	77044.897	77044.897	77044.897	77044.897
P2	86881.089	86881.089	86881.089	86881.089	86881.089	86881.089	86881.089
P3	87919.156	87919.156	87919.156	87919.156	87919.156	87919.156	87919.156
P4	92591.397	92591.397	92591.397	92591.397	92591.397	92591.397	92591.397
P5	95851.155	95851.155	95851.155	95851.155	95851.155	95851.155	95851.155
P6	94439.024	94439.024	94439.024	94439.024	94439.024	94439.024	94439.024
P7	95894.117	95894.117	95894.117	95894.117	95894.117	95894.117	95894.117 ;

## VARIABLES

X(I, K)	bobina i processada no intervalo k
Y(J, K)	feltro na prensa j trocado no inicio do intervalo k
TA (J, K)	variável auxiliar de tempo feltro j intervalo k
TE (J, K)	variável auxiliar de tempo feltro j intervalo k
T1(J, K)	variável auxiliar de tempo feltro j intervalo k
T2(J, K)	variável auxiliar de tempo feltro j intervalo k
TM (J, K)	variável auxiliar de tempo feltro j intervalo k
MA (I, K)	massa de água na saída da prensagem da bobina i no intervalo k
M1(I, K)	variável auxiliar para água na saída (dentro do papel) bobina i intervalo k
M2(I, K)	variável auxiliar para água na saída (dentro do papel) bobina i intervalo k
V(K)	variável auxiliar para água na saída da prensagem no intervalo k
U (J, K)	variável auxiliar para coeficiente de extração de água na prensagem
VR (J, K)	ln da massa de água removida pelo feltro j no intervalo k
MR (J, K)	massa de água removida pelo feltro j no intervalo k
Z1	custo de feltros
Z2	custo de prensagem
Z3	custo de secagem
Z	custo total;

POSITIVE VARIABLE TA, TM, T1, T2, TE, MA, M1, M2 ;

BINARY VARIABLE X, Y ;

Y.FX (J, 'T1') = 1;

EQUATIONS

BOBINA (I)	cada bobina somente se processa em um intervalo
INTER(K)	cada intervalo só processa uma bobina
TEMPO (J, K)	equação para o tempo de uso do feltro
TEMPM (J, K)	equação auxiliar para tempo médio do feltro
TEMP1(J, K)	equação auxiliar para o tempo anterior
TEMP2(J, K)	equação auxiliar para o tempo anterior
TEMP3(J, K)	equação auxiliar para o tempo anterior
TEMP4(J, K)	equação auxiliar para o tempo anterior
AGUA(K)	equação auxiliar para o logaritmo da água na saída da prensagem
SAIDA(K)	limite para água na saída da prensagem
LAMBDA (J, K)	equação auxiliar para coeficiente de extração
AUX1(I, K)	equação auxiliar para água na saída da prensagem
AUX2(I, K)	equação auxiliar para água na saída da prensagem
AUX3(I, K)	equação auxiliar para água na saída da prensagem
AUX4(I, K)	equação auxiliar para água na saída da prensagem
LRE (J, K)	equação para ln da massa de água removida feltro j intervalo k
REM (J, K)	equação para água removida pelo feltro j no intervalo k
CUSTF	equação para custo de troca dos feltros
CUSTP	equação para custo de prensagem
CUSTS	equação para custo de secagem
CUSTO	define a função objetivo do modelo;

BOBINA (I).  $\text{SUM}(K, X(I, K)) = E = 1;$

INTER(K).  $\text{SUM}(I, X(I, K)) = E = 1;$

TEMPO (J, K).  $TA(J, K) = E = TE(J, K) + \text{SUM}(I, T(I) * X(I, K));$

TEMPM (J, K).  $TM(J, K) = E = TE(J, K) + 0.5 * \text{SUM}(I, T(I) * X(I, K));$

TEMP1(J,K)\$(ORD(K) NE 1) ..  $TA(J, K-1) = E = T1(J, K-1) + T2(J, K-1);$

TEMP2(J,K)\$(ORD(K) NE 1) ..  $TE(J, K) = E = T2(J, K-1);$

TEMP3(J, K) \$(ORD(K) NE 1).  $T1(J, K-1) = L = M * Y(J, K);$

TEMP4(J,K)\$(ORD(K) NE 1) ..  $T2(J, K-1) = L = M * (1 - Y(J, K));$

AGUA(K).  $V(K) = E = \text{SUM}(I, \text{LOG}(UE(I) * A(I)) * X(I, K)) - \text{SUM}(J, \text{LOG}(1.0 + \text{EXP}(U(J, K))))$ ;

SAIDA(K).  $V(K) = G = \text{SUM}(I, \text{LOG}(US(I) * A(I)) * X(I, K))$ ;

LAMBDA(J, K).  $U(J, K) = E = \text{SUM}(I, \text{LOG}(LA(I, J)) * X(I, K)) - \text{ALFA}(J) * \text{TM}(J, K) + \text{LOG}(EP(J)) - \text{LOG}(1.0 - (1.0 - EP(J)) * \text{EXP}(-\text{ALFA}(J) * \text{TM}(J, K)))$ ;

AUX1(I, K).  $MA(I, K) = E = M1(I, K)$ ;

AUX2(I, K).  $M1(I, K) = L = MM * X(I, K)$ ;

AUX3(I, K).  $M2(I, K) = L = MM * (1 - X(I, K))$ ;

AUX4(I, K).  $M1(I, K) + M2(I, K) = E = \text{EXP}(V(K))$ ;

LRE(J, K).  $VR(J, K) = E = \text{SUM}(I, \text{LOG}(UE(I) * A(I)) * X(I, K)) + U(J, K) - \text{SUM}(L, JL(J, L) * \text{LOG}(1.0 + \text{EXP}(U(J, K))))$ ;

REM(J, K).  $MR(J, K) = E = \text{EXP}(VR(J, K))$ ;

CUSTF.  $Z1 = E = \text{SUM}((J, K), CF(J) * Y(J, K))$ ;

CUSTP.  $Z2 = E = \text{SUM}((I, K), CP(I, K) * X(I, K))$ ;

CUSTS.  $Z3 = E = \text{SUM}((I, K), CS(I, K) * MA(I, K)) - \text{SUM}((I, K), CS(I, K) * US(I) * A(I) * X(I, K))$ ;

CUSTO.  $Z = E = Z1 + Z2 + Z3$ ;

MODEL PAPEL /ALL/ ;

PAPEL.OPTFILE = 1 ;

OPTION MINLP = SBB;

OPTION NLP = CONOPT;

OPTION OPTCR = 0.0 ;

---

OPTION OPTCA = 0.0 ;

OPTION ITERLIM = 90000000.0 ;

OPTION RESLIM = 90000000.0 ;

OPTION DOMLIM = 1000000.00;

OPTION SOLPRINT = OFF ;

OPTION LIMCOL = 0 ;

OPTION LIMROW = 0 ;

SOLVE PAPEL USING MINLP MINIMIZING Z ;

DISPLAY X.L, Y.L;

DISPLAY TA.L, TE.L, T1.L, T2.L, TM.L;

DISPLAY MA.L, M1.L, M2.L, U.L, V.L, MR.L;

DISPLAY Z.L, Z1.L, Z2.L, Z3.L ;

## **APÊNDICE 3**

## Tabelas Auxiliares

*Tabela A3. 1: Resultados GAMS - Modelo*

Programa	Tempo (h)	Blocks of Equations	Blocks of Variables	Non zero elements	Derivative Pool	Code Length	Single Equation	Single Variable	Non linear n-z	Constant Pool	Discrete Variable
1	5:30	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	73
2	20:42	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	73
3	2:23	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	92
4	4:24	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	92
5	17:10	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	73
6	9:40	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	73
7	7:11	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	73
8	15:04	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	73
9	9:41	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	23	56
10	9:44	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	23	56
11	1:13	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	23	56
12	0:05	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	24	56
13	4;15	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	92
14	5:21	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	92
15	3:26	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	92
16	3:51	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	92
17	6:52	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	73
18	6:23	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	73
19	12:02	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	73
20	4:59	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	73
21	14:04	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	73
22	0:00	21	18	0	10	898	144	143	57	23	17

Tabela A3.2: Resultados GAMS - Industrial

Programa	Tempo (min)	Blocks of Equations	Blocks of Variables	Non zero elements	Derivative Pool	Code Length	Single Equation	Single Variable	Non linear n-z	Constant Pool	Discrete Variable
1	86	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	66
2	19	21	18	2,141	10	2,318	464	452	161	23	66
3	27	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	84
4	19	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	84
5	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	66
6	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	66
7	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	66
8	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	66
9	0	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	23	50
10	0	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	23	50
11	0	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	23	50
12	0	21	18	1,639	10	1,939	372	362	132	24	50
13	0	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	84
14	0	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	84
15	3	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	84
16	3	21	18	2,707	10	2,713	564	548	192	24	84
17	6	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	66
18	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	66
19	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	24	66
20	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	66
21	0	21	18	2,141	10	2,318	464	451	161	23	66
22	0	21	18	517	10	898	144	143	57	23	14