

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Francisco de Assis Bertini Moraes**

**MODELO PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE**  
**MADEIRA E INSUMOS ENERGÉTICOS NO PROCESSO DE**  
**PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL**

Araraquara, SP – Brasil

2011

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DE ARARAQUARA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**Francisco de Assis Bertini Moraes**

**MODELO PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE**  
**MADEIRA E INSUMOS ENERGÉTICOS NO PROCESSO DE**  
**PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Engenharia de Produção do Centro Universitário de Araraquara – UNIARA – como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Estratégica e Operacional da Produção.

**Prof. Dr. Claudio Luis Piratelli**  
**Orientador**

**Araraquara, SP – Brasil**  
**2011**

## FICHA CATALOGRÁFICA

M82 Moraes, Francisco de Assis Bertini

Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel/Francisco de Assis Bertini Moraes.- Araraquara: Centro Universitário de Araraquara, 2011.

209f.

Dissertação (Mestrado) - Mestrado Profissional em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Claudio Luis Piratelli

1. Celulose e papel. 2. Cogeração. 3. Energia. 4. Eucalipto.  
5. Modelagem matemática. I. Título.

CDU 62-1

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAES, F A B. **Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel**. 2011. 209f. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Centro Universitário de Araraquara, Araraquara-SP.

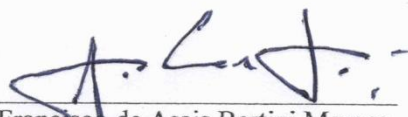
## ATESTADO DE AUTORIA E CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Francisco de Assis Bertini Moraes

TÍTULO DO TRABALHO: Modelo para avaliação do consumo específico de madeira e insumos energéticos no processo de produção de celulose e papel.

TIPO DO TRABALHO/ANO: Dissertação / 2011

Conforme LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998, o autor declara ser integralmente responsável pelo conteúdo desta dissertação e concede ao Centro Universitário de Araraquara permissão para reproduzi-la, bem como emprestá-la ou ainda vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação pode ser reproduzida sem a sua autorização.



Francisco de Assis Bertini Moraes  
Av. Dr. João Pires de Camargo, 254  
14802-402 – Araraquara - SP  
franciscobertini@terra.com.br

# **MODELO PARA AVALIAÇÃO DO CONSUMO ESPECÍFICO DE MADEIRA E INSUMOS ENERGÉTICOS NO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE CELULOSE E PAPEL**

**Francisco de Assis Bertini Moraes**

Dissertação aprovada em sua versão final pelos membros da banca examinadora:

Prof. Dr. Claudio Luis Piratelli  
Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar  
Prof. Dr. Walther Azzolini Junior

Orientador - Uniara  
USP – Ribeirão Preto  
Uniara

**UNIARA**



Centro Universitário de Araraquara

Rua Voluntários da Pátria, 1309 - Centro - Araraquara - SP  
CEP 14801-320 - Caixa Postal 68 - Fone/Fax: (16) 3301-7100

[www.uniara.com.br](http://www.uniara.com.br)

BANCA DE DEFESA

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'J. Achcar', written above a horizontal line.

Prof. Dr. Jorge Alberto Achcar  
USP – Ribeirão Preto

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'W. Azzolini', written above a horizontal line.

Prof. Dr. Walther Azzolini Júnior  
UNIARA – Araraquara

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'C. Piratelli', written above a horizontal line.

Prof. Dr. Claudio Luis Piratelli  
UNIARA - Araraquara

Dedico este trabalho a toda a minha família e aos amigos.

## AGRADECIMENTOS

- À minha família, que tanto me incentivou para a conclusão deste trabalho.
- Ao Orientador e Coordenador do Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção da UNIARA, professor Dr. Claudio Luis Piratelli, pela preciosa contribuição ao meu desenvolvimento.
- Ao Professor Dr. Walther Azzolini Junior, pela sua dedicação ao programa e presença nas nossas dificuldades.
- A todos os professores do Mestrado, que foram a base para a realização deste trabalho.
- Aos colegas do Mestrado, que foram companheiros e encararam a busca deste objetivo.
- Ao Centro Universitário de Araraquara – UNIARA, por oferecer esta oportunidade aos profissionais do setor industrial e acadêmico.
- Aos meus colegas de trabalho na *International Paper*, os quais, cada um em sua forma pessoal, me transferiram força e apoio nesta jornada, não se limitando em nenhum momento a prestar qualquer apoio solicitado.
- À *International Paper do Brasil*, por viabilizar o estudo de caso na sua unidade de Luiz Antonio-SP.

*Os processos empírico-analíticos são necessários como preliminares, embora não sejam suficientes como solução definitiva.*

*Albert Einstein*



## RESUMO

A indústria brasileira de celulose e papel é uma das mais fortes do setor florestal, tendo os mais baixos custos de produção do mundo. O custo de madeira para produção de celulose e o custo de insumos energéticos (madeira de energia, óleo combustível, gás natural e energia elétrica) são os dois principais componentes do custo variável de fabricação. Nos últimos anos, investimentos tecnológicos estão sendo direcionados para minimizar o consumo específico de madeira para celulose e maximizar o uso de biomassa e madeira para a produção de energia, propiciando menor dependência de grandes áreas florestais para plantio e de compra de insumos energéticos, cujos preços oscilam em função do cenário econômico brasileiro e do mundial. De forma geral, a literatura que aborda as pesquisas para a redução do consumo específico de madeira para celulose tem como foco o aumento do rendimento da madeira e suas variáveis de influência. Entretanto, pouca atenção tem sido dada para a análise do impacto no consumo de insumos energéticos em função dessas alterações nas variáveis operacionais dos processos industrial e florestal. O presente trabalho tem como objetivo, por meio de um estudo de caso na empresa *International Paper do Brasil*, apresentar um modelo matemático para permitir a análise de interação entre o consumo de madeira para produção de celulose e os insumos energéticos. Para isso, propõe-se o uso da técnica estatística de regressão linear múltipla. Essa técnica permite trabalhar com um grande número de variáveis dependentes e independentes, viabilizando realizar balanços econômicos para decisões estratégicas e operacionais de alterações de variáveis no processo produtivo. Os resultados mostram que a utilização da técnica de regressão linear múltipla é uma ferramenta válida e de fácil utilização para a avaliação de resultados econômicos quando ocorrem alterações de variáveis do processo industrial ou de preços da madeira de eucalipto e dos insumos energéticos.

**Palavras-chave :** celulose & papel, cogeração, energia, eucalipto, modelagem matemática.

## ABSTRACT

The Brazilian pulp and paper industry is one of the strongest in the forestry sector, which has the lowest production costs in the world. The cost of pulp wood and the cost of energy inputs (energy wood, fuel oil, natural gas and electricity) are the two main components of the variable cost of manufacturing. In recent years, technology investments has been directed to minimize the specific consumption of pulp wood and maximize the use of biomass and wood for energy production, providing less dependence on large forestry areas for planting and purchasing energy inputs, whose prices vary according to the Brazilian and global economic scenario. Overall, the literature that approaches the researches for the specific consumption of pulp wood reduction focuses on increasing the wood yield and its influence variables, however, little attention has been given to the analysis of the impact on the consumption of energy inputs to reflect these changes in industrial and forestry process operational variables. This work aims through a case study in Brazil's *International Paper* company, present a mathematical model to allow analysis of interaction between the consumption of pulp wood and energy inputs. Thus, it is proposed the use of multiple linear regression statistical technique. This technique allows to work with a large number of dependent and independent variables, enabling conducting economic balances for strategical decisions and operational changes of variables in the pulp production process. The results demonstrate that the use of multiple linear regression technique is effective and an easy to use tool for the evaluation of economic results, when industrial process variables or eucalyptus wood and energy inputs prices changes occurs.

**Key-words:** cogeneration, energy, eucalyptus, mathematical modeling, pulp & paper.

## LISTA DE FIGURAS

Figura-1.1	Evolução da produção de celulose no Brasil.....	18
Figura-2.1	Floresta plantada de <i>E. Urograndis</i> , oriundo de clones.....	26
Figura-2.2	Produtividade do eucalipto em diversos locais.....	27
Figura-2.3	Organização dos componentes da madeira.....	29
Figura-2.4	Estrutura da fibra vegetal (MEV da fibra de Eucalipto).....	30
Figura-2.5	Representação química entre celulose, hemicelulose e lignina.....	32
Figura-2.6	Rendimento da Madeira versus Carga de Álcali.....	34
Figura-2.7	Rendimento do <i>Eucalyptus grandis</i> para um processo com $\#kappa=16$ .....	36
Figura-2.8	Consumo específico de madeira e suas variáveis de influência.....	38
Figura-2.9	Efeito da densidade básica no consumo específico de madeira.....	39
Figura-2.10	Locais de perda de madeira na área de preparação de madeira.....	41
Figura-2.11	Efeito do rendimento no consumo específico de madeira.....	42
Figura-2.12	Composição química imediata do carvão vegetal x teor lignina na madeira.....	44
Figura-2.13	Umidade da madeira versus Umidade relativa e Temperatura ambiente.....	46
Figura-2.14	Poder calorífero superior e inferior e umidade da madeira de eucalipto.....	48
Figura-2.15	Consumo de óleo em função do teor seco da casca em cald. biomassa.....	49
Figura-2.16	A energia em 2007 e 2030.....	50
Figura-2.17	Matriz Energética da Indústria de Celulose e Papel.....	51
Figura-2.18	Produção de Celulose e Participação energética do licor preto e biomassa.....	52
Figura-2.19	Indústria de celulose, 1.200 t/d e cogeração com extração e contrapressão.....	53
Figura-2.20	Indústria de celulose, 1.200 t/d e cogeração com condensação (CEST).....	54
Figura-2.21	Indústria 1.200 t/d de celulose e 1.000 de papel, cogeração a contrapressão.....	55
Figura-2.22	Indústria 1.200 t/d de celulose e 1.000 de papel, cogeração a condensação.....	55
Figura-2.23	Indústria de papel, 1.000 t/dia sem cogeração.....	56
Figura-2.24	Indústria de papel, 1.000 t/dia com cogeração a extração e condensação.....	56
Figura-3.1	Visão Geral do processo Kraft de produção de celulose.....	58
Figura-3.2	Ilustração do processo de fabricação de celulose e papel.....	59
Figura-3.3	Ilustração do setor de preparação de madeira.....	60
Figura-3.4	Esquema da picagem e estocagem de cavacos.....	61
Figura-3.5	Ilustrações do digestor contínuo.....	62
Figura-3.6	Perfil do Cozimento em digestor contínuo.....	64
Figura-3.7	Ilustração do cozimento “Compact Cooking” e “Lo solids”.....	65
Figura-3.8	Processos de pré-lavagem, depuração, deslignificação O2 e pós-lavagem.....	66
Figura-3.9	Fluxograma de pré-lavagem, depuração, deslignificação O-O e pós-lavagem....	68
Figura-3.10	Ilustração de instalação de branqueamento.....	70
Figura-3.11	Fluxograma de instalação de branqueamento.....	70
Figura-3.12	Ilustração da máquina de secagem da polpa de celulose.....	72

Figura-3.13	Formato cíclico do processo de recuperação química.....	75
Figura-3.14	Comportamento reológico do licor preto de pinus.....	77
Figura-3.15	Evaporadores de Múltiplos Efeitos.....	78
Figura-3.16	Ilustração da caldeira de recuperação.....	79
Figura-3.17	Principais reações que ocorrem na caldeira de recuperação.....	81
Figura-3.18	Ilustração dos equipamentos auxiliares da caldeira de recuperação.....	82
Figura-3.19	Ilustração da caustificação e forno de cal.....	83
Figura-3.20	Eficiência de caustificação x Álcali Total x Sufidez.....	84
Figura-3.21	Fluxograma da caustificação e forno de cal.....	85
Figura-3.22	Efluentes típicos gerados na indústria de celulose.....	88
Figura-3.23	Ilustração de processo de lodo ativado.....	89
Figura-3.24	Ilustração da combustão em caldeira de biomassa.....	90
Figura-3.25	Diagrama do processo de combustão de sólidos.....	91
Figura-3.26	Evolução da pressão na base de um leito fluidizado com a vazão de ar.....	92
Figura-3.27	Ilustrações de caldeiras de biomassa com leito fluidizado.....	93
Figura-3.28	Ganho com aumento de pressão e temperatura do vapor de turbinas.....	94
Figura-3.29	Consumo específico de vapor em turbinas a vapor.....	94
Figura-3.30	Perfil de pressão e velocidade do vapor em turbinas de ação.....	95
Figura-3.31	Perfil de pressão e velocidade do vapor em turbinas de reação.....	96
Figura-3.32	Ilustração de cogeração com turbogerador de contrapressão.....	97
Figura-3.33	Geração de energia elétrica em turbina de contrapressão.....	98
Figura-3.34	Ilustração de instalação de turbogerador.....	98
Figura-4.1	Distribuição de vapor e energia elétrica.....	101
Figura-4.2	Distribuição de vapor em fábrica integrada de celulose e papel.....	104
Figura-4.3	Distribuição de energia elétrica em fábrica integrada de celulose e papel.....	107
Figura-5.1	Representação do diagrama de caminhos.....	111
Figura-5.2	Diagrama de caminhos e equações correspondentes.....	113
Figura-5.3	Área da função de probabilidade acumulada.....	120
Figura-5.4	Região para um modelo de regressão de duas variáveis.....	127
Figura-6.1	Cadeia de suprimentos de madeira e energia.....	135
Figura-6.2	Fluxograma de interdependências de variáveis.....	135
Figura-6.3	Gráficos de séries temporais das variáveis de objetivo do trabalho.....	137
Figura-6.4	Ilustração do Modelo Estrutural do estudo de caso.....	139
Figura-6.5	Diagrama de caminhos para o modelo estrutural do trabalho.....	140
Figura-6.6	Modelagem de equações para o consumo de madeira (CEM).....	141
Figura-6.7	Modelagem de equações para a relação sólidos / polpa (RSP).....	142
Figura-6.8	Modelagem de equações para o vapor e óleo combustível.....	144
Figura-6.9	Modelagem de equações para o consumo de celulose e produção acabada.....	145
Figura-6.10	Modelagem de equações para o consumo de energia elétrica.....	148

Figura-7.1	Análise de regressão para o teor seco da biomassa.....	154
Figura-7.2	Análise de regressão para o teor de resíduos gerados.....	155
Figura-7.3	Correlação múltipla para o consumo específico de madeira.....	156
Figura-7.4	Matriz de correlação entre as variáveis do consumo específico de madeira.....	157
Figura-7.5	Relação entre variável predita e variável medida para o consumo de madeira....	158
Figura-7.6	Correlação múltipla para a densidade aparente da madeira.....	159
Figura-7.7	Correlação múltipla para o consumo específico de madeira (alternativo).....	161
Figura-7.8	Comparação dos modelos de predição do consumo específico de madeira.....	162
Figura-7.9	Correlação múltipla para predição da relação sólidos/polpa.....	163
Figura-7.10	Matriz de correlação entre as variáveis da relação sólidos/polpa.....	164
Figura-7.11	Relação entre variável predita e variável medida para a relação sólidos/polpa....	165
Figura-7.12	Análise de regressão para a geração específica de vapor na CR.....	166
Figura-7.13	Relação entre variável predita e medida para geração esp. de vapor – CR.....	166
Figura-7.14	Análise de regressão para a produção de cal no forno de cal.....	168
Figura-7.15	Análise de regressão para o consumo de óleo no forno de cal.....	168
Figura-7.16	Análise de regressão para o % Celulose nos papéis da máquina-1.....	169
Figura-7.17	Análise de regressão para o % Celulose nos papéis da máquina-2.....	169
Figura-7.18	Correlações simples para consumo de vapor na Cel, Rec, Máq.1 e Máq.2.....	171
Figura-7.19	Correlações para consumo de vapor na Utilidades e Indeterminados.....	173
Figura-7.20	Análise de regressão para o consumo de óleo na caldeira de biomassa.....	174
Figura-7.21	Relação entre variável predita e medida para o consumo óleo combustível.....	175
Figura-7.22	Análise de regressão para consumo de biomassa na caldeira de biomassa.....	176
Figura-7.23	Análise de regressão para a geração de energia elétrica.....	178
Figura-7.24	Modelo estrutural para a Situação-1.....	181
Figura-7.25	Modelo estrutural para a Situação-2.....	181
Figura-8.1	Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Densidade Básica, Rendimento.....	183
Figura-8.2	Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Densidade Básica, Rendimento..... (Com e sem aumento da produção de celulose, produção de papel cte.).....	185
Figura-8.3	Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Teor Seco da Madeira.....	188
Figura-8.4	Custo da Madeira e Energéticos x Preço da EE e Consumo de Vapor.....	190
Figura-8.5	Custo da Madeira e Energéticos x Cons.Vapor, TS-Mad e Preço CEE.....	192
Figura-8.6	Custo da Madeira e Energéticos x Cons.Vapor, Preço CEE e TS-Biom.....	193

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Custo de Produção da Celulose.....	27
Tabela 2.2	Quadro comparativo de consumo de madeira.....	37
Tabela 2.3	Composição química da madeira ( <i>Eucalyptus grandis</i> ).....	44
Tabela 2.4	Consumo de energia nas categorias do setor de celulose e papel.....	57
Tabela 3.1	Composição química do licor de eucalipto.....	76
Tabela 5.1	Tradução de diagrama de caminhos para equações.....	112
Tabela 5.2	Análise de Variância para testar a significância de uma regressão.....	122
Tabela 6.1	Estatística básica das variáveis.....	136
Tabela 6.2	Dados de entrada para modelagem.....	151
Tabela 6.3	Resultados de consumos e custos de madeira e insumos energéticos.....	151
Tabela 7.1	Equações do estudo de caso para modelagem.....	179
Tabela 7.2	Exemplo de utilização do modelo elaborado.....	180
Tabela 8.1	Influência da densidade básica e rendimento com produção constante.....	182
Tabela 8.2	Influência da DB e REND com aumento de produção de celulose.....	184
Tabela 8.3	Influência do teor seco da madeira de celulose.....	187
Tabela 8.4	Influência do preço de energia elétrica e vapor.....	189
Tabela 8.5	Influência da redução do consumo total de vapor.....	191
Tabela 8.6	Influência de vvs. Redutoras, turbo-equipamentos e acumulador.....	194

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abraf	Associação Brasileira Florestal
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
ANEEL	Associação Nacional de Energia Elétrica
ADt	Air Dry ton (tsa : tonelada seca ao ar, 10% umidade)
BRACELPA	Associação Brasileira dos Produtores de Celulose e Papel
CCM	Centro de comando de motores
Cel	Área de produção de celulose
CENBIO	Centro Nacional de Utilização de Biomassa
CENIBRA	Celulose Nipo Brasileira
CFM	Pé cúbico por minuto
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DP	Desvio Padrão
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ECF	Elemental chlorine free, celulose sem o uso de cloro elementar
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESALQ	Escola Superior de Agricultura Luis de Queirós
FGV	Fundação Getúlio Vargas
HexA's	Ácidos hexanurônicos contidos na polpa
IPB	<i>International Paper do Brasil</i>
IPPC	<i>Institute of Pulp and Paper of Canada</i>
KPB	<i>Kvaerner Pulping Brasil</i>
KPG	<i>Kvaerner Pulping and Gotaverken</i>
Kraft	Tipo de processo de fabricação de celulose
MLR	Regressão linear múltipla.
PCA	Análise estatística de componentes principais
PCS	Poder calorífero superior
PIB	Produto interno bruto
PPPC	Pulp and Paper Products Council
tsa	toneladas de celulose seca ao ar (10% de umidade)
UFL	Universidade Federal de Lavras
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNESP	Universidade do Estado de São Paulo
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas
UTI	Área de utilidades.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	18
1.1 – Motivação para o tema abordado.....	19
1.2 – Objetivos do trabalho.....	21
1.3 – Justificativa da escolha do tema.....	22
1.4 – Metodologia.....	22
1.5 – Organização do trabalho.....	23
<b>2. CARACTERÍSTICAS E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO</b> .....	25
2.1 - Madeira de eucalipto.....	25
2.2 – Composição da madeira de eucalipto.....	29
2.3 – Qualidade da madeira para produção de celulose.....	32
2.4 – Rendimento da madeira de eucalipto para produção de celulose.....	36
2.5 – Consumo específico de madeira para produção de celulose.....	37
2.5.1- Densidade básica.....	38
2.5.2- Teor de resíduos.....	39
2.5.3- Rendimento.....	41
2.6 – Qualidade da madeira de eucalipto para energia.....	42
2.6.1- Composição química da madeira.....	43
2.6.2- Densidade básica.....	44
2.6.3- Teor de umidade.....	45
2.6.4- Poder calorífero.....	46
2.6.5- Teor de minerais.....	49
2.7 – Consumo de madeira de energia na indústria de celulose e papel.....	50
2.7.1- Cenário atual no segmento de celulose e papel.....	50
2.7.2- Consumo de madeira para energia na indústria de celulose e papel.....	52
<b>3. DESCRITIVO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE E PAPEL</b> .....	58
3.1 – Linha de Fibras.....	
3.1.1- Preparação de Madeira.....	59
3.1.2- Cozimento.....	61
3.1.3- Pré-Lavagem, Depuração, Deslignificação com O <sub>2</sub> e Pós-Lavagem.....	66
3.1.4- Branqueamento.....	68
3.1.5- Secadora de Celulose.....	72
3.1.6- Variáveis do processo da linha de fibras.....	73



3.2 – Recuperação Química.....	74
3.2.1- Licor Preto.....	75
3.2.2- Evaporação.....	77
3.2.3- Caldeira de Recuperação.....	78
3.2.4- Caustificação e Forno de Cal.....	82
3.2.5- Variáveis do processo da recuperação química.....	86
3.3 – Utilidades.....	87
3.3.1- Tratamento de Água.....	87
3.3.2- Tratamento de Efluentes.....	88
3.3.3- Caldeira de Biomassa.....	90
3.3.4- Turbogeneradores.....	93
3.3.5- Variáveis do processo de utilidades.....	99
<b>4. DISTRIBUIÇÃO VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA DE CELULOSE.....</b>	<b>101</b>
4.1 – Sistema de distribuição de vapor.....	102
4.2 – Sistema de distribuição de energia elétrica.....	105
<b>5. MODELAGEM MATEMÁTICA COM REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA.....</b>	<b>108</b>
5.1 – Modelagem com regressão linear múltipla.....	109
5.2 – Regressão linear múltipla.....	113
5.2.1 Introdução.....	113
5.2.2 Um breve histórico.....	113
5.2.3 Desenvolvimento matemático.....	114
5.2.4 Estimativa dos parâmetros do modelo.....	115
5.2.5 Teste de hipóteses em regressão linear.....	118
5.2.6 Intervalo de confiança sobre a resposta média.....	123
5.2.7 Predição de novas observações.....	124
5.2.8 Avaliação da eficiência do modelo de regressão.....	127
5.3 - Considerações finais sobre o capítulo.....	130
<b>6. MODELAGEM DO PROCESSO DE CELULOSE E PAPEL.....</b>	<b>131</b>
6.1 – Descrição da empresa do estudo de caso.....	
6.2 – Estatística básica e análise das variáveis.....	134
6.3 – Modelagem por meio de regressão linear múltipla.....	136
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>150</b>
7.1 – Predição do consumo específico de madeira para celulose.....	152
7.2 - Predição da relação sólidos/polpa e consumo de óleo no forno de cal.....	160

7.3 – Predição do consumo de celulose e produção nas máquinas de papel.....	166
7.4 - Predição do consumo de vapor, geração vapor e consumo de biomassa.....	168
7.5 – Predição da geração e compra de energia elétrica.....	175
7.6 – Tradução do diagrama de caminhos geral em equações estruturais.....	176
7.7 – Exemplo de utilização da modelagem.....	178
<b>8. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM O MODELO.....</b>	<b>180</b>
8.1 - Influência da densidade básica e rendimento com produção constante.....	180
8.2 - Influência da densidade básica e rendimento com aumento de produção.....	182
8.3 - Influência do teor seco da madeira de celulose e da biomassa.....	185
8.4 - Influência do preço de energia elétrica e consumo de vapor.....	187
8.5 – Influência da redução no Cons.Total.Vapor , TS-Mad e Preço de CEE.....	189
8.6- Influência de válvulas redutoras, turbo-equipamentos e tanque acumulador.....	192
<b>9. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>193</b>
9.1- Conclusões.....	193
9.2- Considerações Finais.....	193
9.3- Perspectivas futuras.....	195
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>196</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O mundo se curva diante da competitividade do setor florestal brasileiro, fruto das condições climáticas e da tecnologia desenvolvida pelas empresas e instituições de pesquisa do País. Os números apontam que o segmento, com 3,7 milhões de hectares de eucalipto em plantações é responsável por 3,5% do PIB, US\$ 4,8 bilhões em impostos e US\$ 6,1 bilhões em exportações. Para realizar essa movimentação, o setor emprega 4,6 milhões de pessoas, quase 5% da população economicamente ativa do Brasil (Conselho de Informações sobre Biotecnologia, 2008).

A indústria brasileira de celulose de eucalipto é uma das mais fortes do setor florestal, tendo os mais baixos custos de produção do mundo. Em comparação com alguns dos principais *players* desse mercado, o Brasil destaca-se pelo baixo custo da madeira produzida (VALVERDE, 2006).

A celulose de fibra curta, típica do eucalipto, vem conquistando também o mercado da fibra longa, derivada principalmente das coníferas (pinus). A demanda de celulose é alta, mas o interesse pela fibra curta tem sido ainda maior, o que faz com que o Brasil possua a maior taxa mundial de crescimento das exportações de celulose em relação a seus principais concorrentes, correspondente a 13,5% ao ano (Bracelpa e PPPC, 2008).

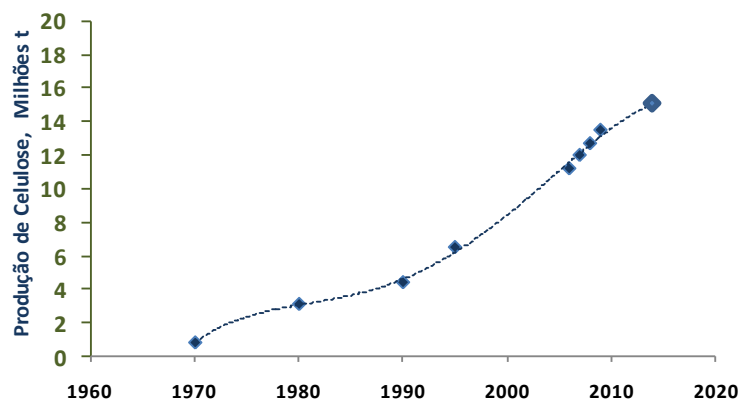


FIGURA 1.1 – Evolução da produção de celulose no Brasil

Fonte : BRACELPA, 2010

Conforme ilustrado na Figura 1.1, novas fábricas de celulose foram construídas ou expandidas no Brasil após o ano 2002 (VCP-Jacareí, 2002; Aracruz-Linha C, 2002; Veracel,

2004; Conpacel, 2005; Suzano Bahia, 2008; VCP-Três Lagoas, 2009; IP-Três Lagoas, 2009), promovendo o aumento da produção de celulose em mais de 50% (Bracelpa, 2009).

Nos últimos 30 anos, as empresas brasileiras têm investido significativamente no desenvolvimento genético da espécie de eucalipto e na tecnologia de polpação. Contando com o auxílio das universidades brasileiras, a produtividade florestal aumentou cerca de 50%, ou seja, de 25 para 40 a 60 m<sup>3</sup>-madeira/hectare ano, representando considerável redução no custo de produção da madeira. O aprimoramento genético do eucalipto em conjunto com a melhoria da tecnologia no processo de produção propiciou o aumento do rendimento da madeira para o processo industrial, ou seja, maior produção de celulose com menor quantidade de madeira, resultando em menor consumo específico de madeira (m<sup>3</sup> de madeira consumida por tonelada de celulose produzida).

O segmento de celulose e papel está incluído entre os mais energointensivos do setor industrial e entre os maiores consumidores de insumos energéticos (óleo combustível, gás natural, madeira para energia e energia elétrica). No entanto, apresenta perfil energético adequado aos processos mais eficientes de cogeração e viável tecnicamente para se aproximar da autosuficiência em consumo energético. Por este motivo, vem desenvolvendo diversas tecnologias para a utilização de biomassa e queima de licor negro em suas caldeiras, além de crescentes pesquisas e altos investimentos para ter uma indústria com alta eficiência na assimilação de carbono, gerando ganhos consideráveis do ponto de vista ambiental e de mercado.

Enquanto o eucalipto, amplamente utilizado no Brasil, possui um ciclo em torno de 7 anos entre plantio e corte em florestas plantadas, nos países do hemisfério norte, onde se concentra a maior parte da produção mundial de celulose, esse ciclo com madeiras típicas (coníferas) se situa na faixa média de 30 anos, com o agravante da exploração de florestas que se tornam nativas dado o longo tempo de crescimento. Portanto, associada à maior produtividade florestal no Brasil, a sustentabilidade ambiental, em função da utilização de florestas plantadas, continuará nos próximos anos viabilizando o crescimento da indústria de celulose e papel no Brasil.

## **1.1 – Motivação para o tema abordado**

Tradicionalmente, em função de sua complexidade, a indústria de produção de celulose e papel é gerida operacionalmente em três grandes áreas: Linha de Fibras,

Recuperação & Utilidades e Produção de Papel, não sendo incomum a prática da gestão operacional sem a suficiente análise de interação entre elas, o que, em função do alto nível de interdependência destas, pode representar benefícios para uma área e prejuízos para outra, sendo o resultado obtido nem sempre favorável ao negócio como um todo, dependendo da dimensão das decisões setoriais de gestão operacional.

A grande maioria dos estudos efetuados nas universidades brasileiras (UFV, ESALQ, UNESP, UFL, UFSM, UNICAMP e outras) foca no conhecimento das relações entre o consumo específico de madeira e energia e as suas respectivas variáveis de influência. Pouca atenção tem sido dada à avaliação mais abrangente da inter-relação entre essas variáveis, interagindo, simultaneamente no consumo específico de madeira e no consumo de energia dentro do processo industrial.

Para a redução do consumo específico de madeira para produção de celulose, o aumento do rendimento da madeira no processo de polpação tem sido o foco de várias pesquisas nos últimos anos (BARRICHELO, 1985; FOELKEL, 1990; GARCIA, 1995; COLODETTE ET AL., 2002; TRUGILHO ET AL., 2004; GOMIDE ET AL., 2005; SANSIGOLO ET AL., 2007; SILVA ET AL., 2007; SACON ET AL., 2007; RIBEIRO, 2007; POLOWSKI, 2009; MOKFIENSKI ET AL., 2008; SOUZA ET AL., 2009).

De forma geral, a literatura que aborda os desenvolvimentos no processo de polpação tem como foco o aumento do rendimento, a qualidade da polpa produzida e a redução no consumo de químicos no branqueamento; entretanto, pouca atenção tem sido dada para a análise do impacto no consumo de insumos energéticos em função de variações nas temperaturas utilizadas ou na energia elétrica demandada.

Os estudos disponíveis na literatura para redução do custo de insumos energéticos são específicos a cada área e inerentes à eficiência dos processos de recuperação química e utilidades. Também se encontra pesquisas nos setores da linha de fibras e produção de papel para ações de redução no consumo de vapor, sem, no entanto, analisar o impacto no processo como um todo (BARRICHELO, 1978; MURAMOTO ET AL., 1983; COELHO ET AL., 1996; CARDOSO, 1998; CGEE – SECRETÁRIA TÉCNICA DE ENERGIA, 2001; SILVA, 2002; QUIRINO ET AL., 2004; BARCELLOS ET AL., 2005; MULLER ET AL., 2006; VELÁZQUEZ, 2006; BRAND, 2007; RENDEIRO ET AL., 2008; BERNI ET AL., 2008; FRANCIS ET AL., 2008; BAJAY ET AL., 2010).

Identifica-se, portanto, a oportunidade de elaboração de um modelo matemático para o estudo e a avaliação do impacto econômico na utilização da madeira de eucalipto como fonte

de matéria prima e energia na indústria de celulose e papel e das influências das inúmeras variáveis que estão correlacionadas nos setores da linha de fibras, recuperação & utilidades e produção de papel no processo industrial.

## 1.2– Objetivos do trabalho

O presente trabalho propõe um modelo matemático para analisar a interação entre o consumo de madeira para produção de celulose e papel e o consumo de energia comprada (energia elétrica, madeira de energia e óleo combustível) no processo industrial da *International Paper do Brasil* – Luiz Antonio/SP. O objeto de estudo produz 1.200 t/d de celulose e 1.000 t/d de papel destinado ao setor de imprimir e escrever nos mercados brasileiro e externo.

Para isso, utiliza-se a técnica de regressão linear múltipla para avaliação da influência das inúmeras variáveis na produtividade industrial. Essa técnica permite trabalhar com um grande número de variáveis dependentes e independentes e suas inter-relações, viabilizando realizar balanços econômicos para decisões estratégicas e operacionais de alterações de variáveis no processo produtivo de celulose e papel

Portanto, nesta dissertação, pretende-se:

- a.) construir um modelo matemático, por meio da regressão linear múltipla, que correlacione as diversas variáveis que influenciam no consumo específico de madeira para celulose e no consumo de insumos energéticos comprados (madeira para energia, óleo combustível e energia elétrica) pelo objeto de estudo.
- b.) Apresentar aos profissionais do setor acadêmico e do industrial do segmento de celulose e papel, uma visão mais abrangente e crítica de inter-relação das variáveis de influência nos custos de produção pela técnica de regressão linear múltipla aplicada à construção de modelos de previsão para um caso real (*este é o maior aporte desta dissertação*).
- c.) Fornecer subsídios à *International Paper do Brasil* para melhorias no seu processo industrial, no que diz respeito ao consumo específico de madeira e de insumos energéticos, direcionando melhor seus recursos para ações de redução de custos, tanto para iniciativas de ações com baixo ou nenhum investimento como para viabilizar projetos de dispêndio de capital.

### 1.3– Justificativa da escolha do tema

Considerando que o custo de madeira para celulose e o custo de energia (madeira de energia, óleo combustível, gás natural e energia elétrica) representam cerca de 40% a 60% do custo variável para produção de celulose (VALVERDE, 2006), esforços devem ser direcionados para minimizar o consumo específico de madeira e maximizar o uso de biomassa e madeira para a produção de energia, o que implica em menor dependência de grandes áreas florestais para plantio e da compra de insumos energéticos, cujos preços oscilam em função do cenário econômico brasileiro e do mundial. Assim, os custos são diretamente gerenciáveis pela produção de madeira, atuando-se diretamente na gestão florestal.

A utilização da modelagem matemática com a técnica estatística de regressão linear múltipla como alternativa aos modelos teóricos (com base fenomenológica) baseia-se na capacidade desta técnica permitir estimar uma série de equações separadas, mas interdependentes, simultaneamente, pela especificação do modelo estrutural previamente construído pelo pesquisador. O pesquisador baseia-se em teoria, experiência prévia e nos objetivos da pesquisa para distinguir quais variáveis independentes preveem cada variável dependente. Algumas variáveis dependentes se tornam independentes em relações subsequentes, dando origem à natureza interdependente do modelo estrutural. Além disso, muitas das mesmas variáveis afetam cada uma das variáveis dependentes, mas com diferentes efeitos.

### 1.4– Metodologia

De acordo com a classificação de Silva e Menezes (2001), do ponto de vista de sua natureza, a presente pesquisa é *aplicada*, pois objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos.

Do ponto de vista da forma de abordagem do problema, essa pesquisa é *quantitativa*, pois visa coletar e analisar variáveis dependentes e independentes por meio de técnicas estatísticas.

Com relação aos seus objetivos, esta pesquisa é classificada como *descritiva*, pois visa descrever relações entre variáveis através da construção de um modelo matemático.

Finalmente, do ponto de vista dos procedimentos técnicos, esta pesquisa caracteriza-se como *pesquisa bibliográfica e estudo de caso*, pois o conhecimento dos fenômenos é

articulado de forma teórica usando conceitos, modelos, experiência prévia e proposições bem definidos. Neste caso, o tratamento dos dados é conduzido com o objetivo específico de testar a adequação dos conceitos desenvolvidos e a validade das fronteiras dos modelos (modelo estrutural). É importante comentar que, nesta pesquisa, as informações são coletadas de uma fração da população, que deve necessariamente ser capaz de generalizar descobertas sobre a amostra que representa.

Esta análise exige habilidade e conhecimento conceitual do problema, normalmente formalizado com a construção de um modelo estrutural que permite testar uma série de relações que constituem o modelo em larga escala ou um conjunto de princípios fundamentais. Essas são tarefas para as quais a modelagem com regressão linear múltipla é bem adequada.

Dessa forma, a proposta de trabalho envolve os seguintes itens:

- a.) Técnicas: Modelagem de equações com regressão linear múltipla.
- b.) Processo: Produção de celulose, recuperação e utilidades da empresa *International Paper do Brasil* na unidade de Luiz Antonio-SP.
- c.) Variáveis a serem preditas: Custo específico de madeira e custo de insumos energéticos (biomassa, madeira, óleo combustível e energia elétrica).
- d.) Dados: Dados mensais do período de janeiro de 2004 a junho de 2009.
- e.) Programas e *Softwares*: Minitab-14 e Excel para construção dos modelos de regressão linear múltipla e Power Point para apresentação dos gráficos.

## 1.5– Organização do trabalho

No **Capítulo 2** são abordadas as características e a utilização da madeira de eucalipto no processo de celulose tipo *kraft*, tanto como matéria-prima para a fabricação de celulose quanto para sua utilização como fonte de energia em processos de cogeração.

No **Capítulo 3** é apresentado o estado da arte do processo de fabricação de celulose tipo *Kraft*, incluindo as áreas da linha de fibras, recuperação química e utilidades.

No **Capítulo 4**, para melhor entendimento de um processo de cogeração na indústria de celulose e papel, são apresentados os principais conceitos de um sistema de distribuição de vapor e energia elétrica.



No **Capítulo 5** são abordados conceitos relativos à modelagem com regressão linear múltipla, em que são mostradas as deduções matemáticas e como interpretar os resultados de predição com as proporções de variabilidades associadas.

No **Capítulo 6** é apresentado o estudo de caso, ilustrando a construção do modelo estrutural e seu diagrama de caminhos com as equações estimadas por regressão linear múltipla, base de sustentação da pesquisa realizada.

No **Capítulo 7** é detalhada a construção, por regressão linear múltipla, das equações do modelo e são mostrados os resultados das variabilidades encontradas com os dados disponibilizados pela *International Paper do Brasil*.

No **Capítulo 8** é ilustrada a utilidade do modelo, sendo concebidos seis cenários de simulação para avaliação dos resultados.

No **Capítulo 9** são apresentadas as considerações finais e conclusões deste trabalho, além de sugestões para futuras pesquisas.

E, finalmente, as referências bibliográficas empregadas são listadas.

## 2. CARACTERÍSTICAS E UTILIZAÇÃO DA MADEIRA DE EUCALIPTO

A revisão bibliográfica apresentada neste capítulo tem como objetivo apresentar os principais conceitos sobre a madeira de eucalipto, tanto como matéria-prima para a fabricação de celulose quanto para sua utilização como fonte de energia em processos de cogeração. Esses conceitos são recomendados para o entendimento do modelo matemático proposto no Capítulo 6.

### 2.1 - Madeira de eucalipto

O eucalipto é uma árvore nativa da Austrália, do Timor e da Indonésia, sendo exótico em todas as outras partes do mundo. A cronologia abaixo ilustra o histórico do cultivo do eucalipto no Brasil (FERREIRA, 2006):

1868 – Primeiros plantios de mudas começam no Rio Grande do Sul.

1903 – Edmundo Navarro de Andrade dá início às pesquisas com o eucalipto na Cia. Paulista de Estradas de Ferro.

1950 – Início de plantações de eucalipto para abastecimento das fábricas de celulose e papel.

1967 – Nasce o programa de incentivos fiscais ao reflorestamento.

1980 – Desenvolvimento de clonagem, ou propagação vegetativa, ganha escala comercial.

1990 – O Brasil torna-se referência mundial na eucaliptocultura

As principais espécies cultivadas atualmente no Brasil incluem o *Eucalyptus grandis*, o *Eucalyptus camaldulensis*, o *Eucalyptus saligna* e o *Eucalyptus urophila*, entre outras. Além disso, foram desenvolvidos cruzamentos entre espécies, resultando em híbridos, como é o caso do *Eucalyptus urograndis* (*E. grandis* X *E. urophila*), mais conhecido e utilizado no Brasil. Essa hibridação reúne as melhores características do *E. grandis* (crescimento e qualidade da madeira) e do *E. urophila* (adaptação e resistência a doenças, particularmente ao fungo causador do cancro do eucalipto) (FERREIRA, 2008).

Além de ter experimentado as vantagens da hibridação, o setor florestal brasileiro foi igualmente beneficiado pela possibilidade de propagação vegetativa, ou clonagem, das melhores árvores de eucalipto. A clonagem de árvores “superiores”, provenientes de cruzamentos, e a utilização em larga escala dessa tecnologia foram dois dos principais fatores que levaram o Brasil a alcançar reputação mundial na produção de eucalipto de alta qualidade

e de baixo custo. Esse processo trouxe os benefícios listados abaixo e ilustrados na Figura 2.1 *a e b* :

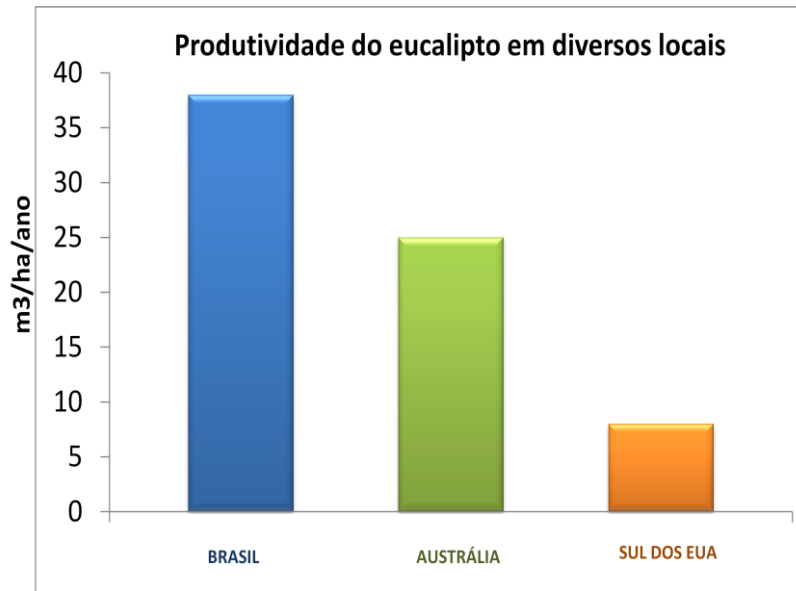
- aumento da produtividade total da floresta;
- melhor qualidade da madeira (densidade, tipo de fibra, teor de lignina e celulose);
- maior homogeneidade da matéria-prima para a indústria;
- melhores rendimentos de operações (florestais e industriais);
- melhor aproveitamento de áreas de valor marginal (menos produtivas);
- melhor planejamento e prognóstico da produção;
- redução significativa dos custos de produção e do impacto ambiental do processo industrial de produção de celulose;



FIGURA 2.1 – Floresta plantada de *E. Urograndis*, oriundo de clones

Fonte : Universidade Federal de Viçosa, ENF 551- Estrutura Anatômica e Qualidade da Madeira, 2009

Como resultado, as taxas nacionais de crescimento do eucalipto são bastante superiores às observadas em outros países, como mostra a Figura 2.2:



Fonte : Abraf, 2006

FIGURA 2.2 – Produtividade do eucalipto em diversos locais

Fonte : Abraf, 2006

A indústria brasileira de celulose é uma das mais fortes do setor florestal, tendo os mais baixos custos de produção do mundo. Conforme ilustrado na Tabela 2.1, o Brasil destaca-se pela produção de madeira de menor custo por tonelada de celulose produzida (VALVERDE et al., 2006).

**Tabela 2.1 - Custo de Produção da Celulose - US\$/tonelada**

Países	Madeira	Energia	Químicos 88-90 ISO	Trabalho	Outros	Custo Total
Brasil	85	31	25	16	40	197
Portugal	139	6	44	43	45	277
Canadá	120	21	32	50	49	272
Espanha	154	7	30	43	43	277
EUA	106	21	40	58	79	304

Fonte : Valverde et al., 2006

O novo desafio para o melhoramento do eucalipto está na integração da Biotecnologia ao seu cultivo, o que compreende a identificação de genes controladores das características de importância econômica e ambiental e a transferência desses genes entre árvores por meio de cruzamento controlado ou modificação direcionada. Essas características, a exemplo do maior rendimento industrial, estabelecem a realidade recente da produção florestal brasileira. As características de interesse são obtidas por melhorias introduzidas nas fibras, nas composições químicas e nas propriedades físicas da madeira, favorecendo o crescimento volumétrico, a tolerância a estresses ambientais (frio, salinidade, estresse hídrico, etc), a resistência a pragas e doenças e o uso racional dos recursos naturais, com redução da extensão da área plantada e plantios em áreas de baixa produtividade agrícola (Conselho de Informações sobre Biotecnologia, 2008).

## 2.2 – Composição da madeira de eucalipto

A Figura 2.3 ilustra a organização dos componentes constituintes da madeira, incluindo as fibras (células), os vasos lenhosos, os poros e as células de parênquima formando os raios.

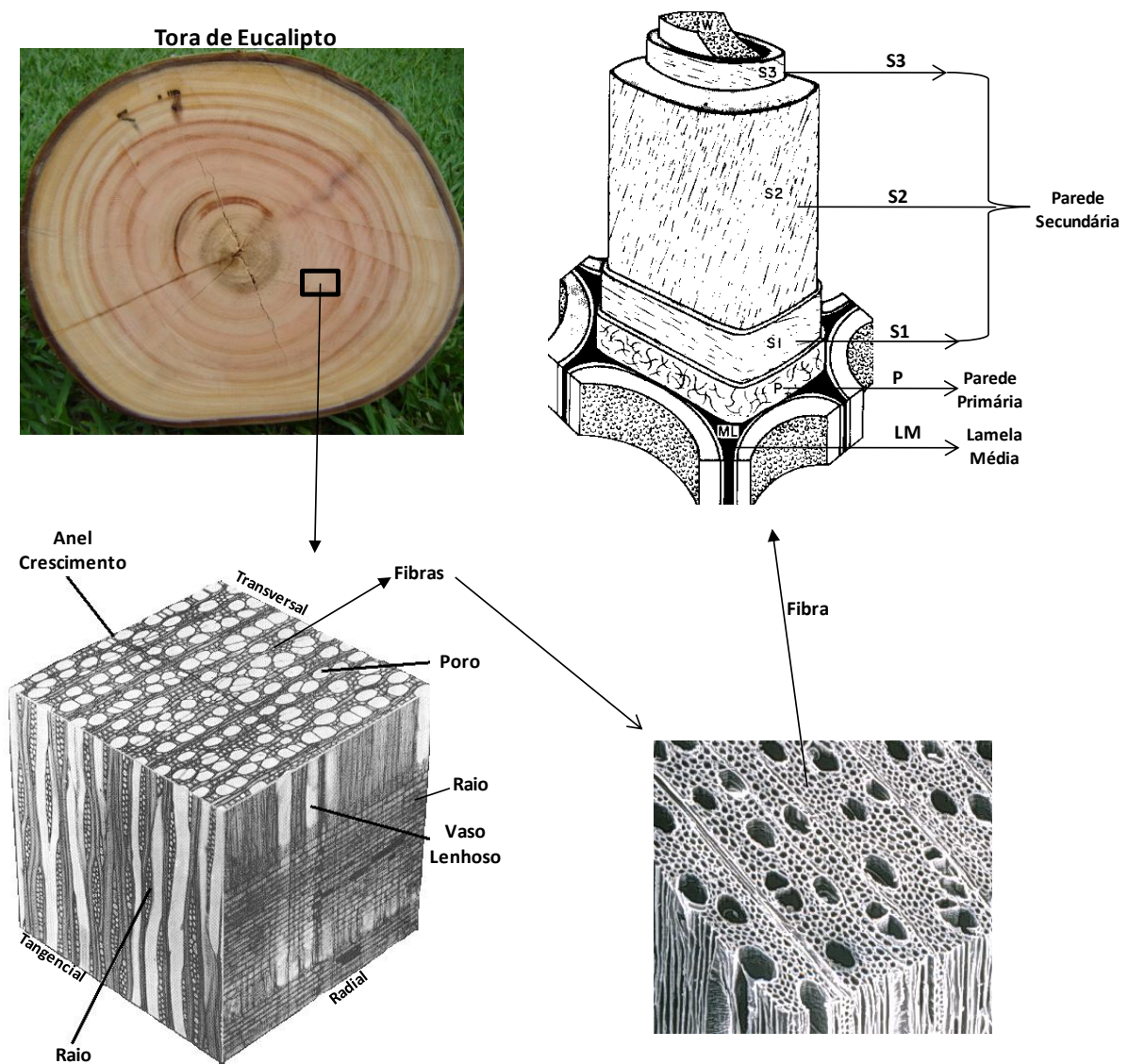


FIGURA 2.3- Organização dos componentes da madeira

Fonte : UFV, 2009

A união entre duas células adjacentes é efetuada por meio da lamela média (LM), que é constituída principalmente por lignina (KOGA, 1988, p. 33). A parede primária (P) é mais espessada que a lamela média e geralmente se mostra bem mais fina em comparação à parede secundária. A parede primária P possui cerca de 65% de água, e o restante, de matéria seca, é

composto de 90% de polissacarídeos (30% celulose, 30% hemicelulose e 30% pectina) e 10% de proteínas. A parede secundária possui um teor de água reduzido devido à deposição de lignina, que é um polímero hidrofóbico. A matéria seca é constituída de 65% a 85% de polissacarídeos (50% a 80% de celulose e 5% a 30% de hemicelulose) e 15% a 35% de lignina. É interessante observar que a maior concentração de lignina encontra-se na lamela média e a de celulose na parede secundária; no entanto, apesar de corresponder a menor concentração, a maior quantidade de lignina encontra-se também na parede secundária, existindo uma forte interação entre lignina-hemicelulose-celulose, como mostra a Figura 2.4.

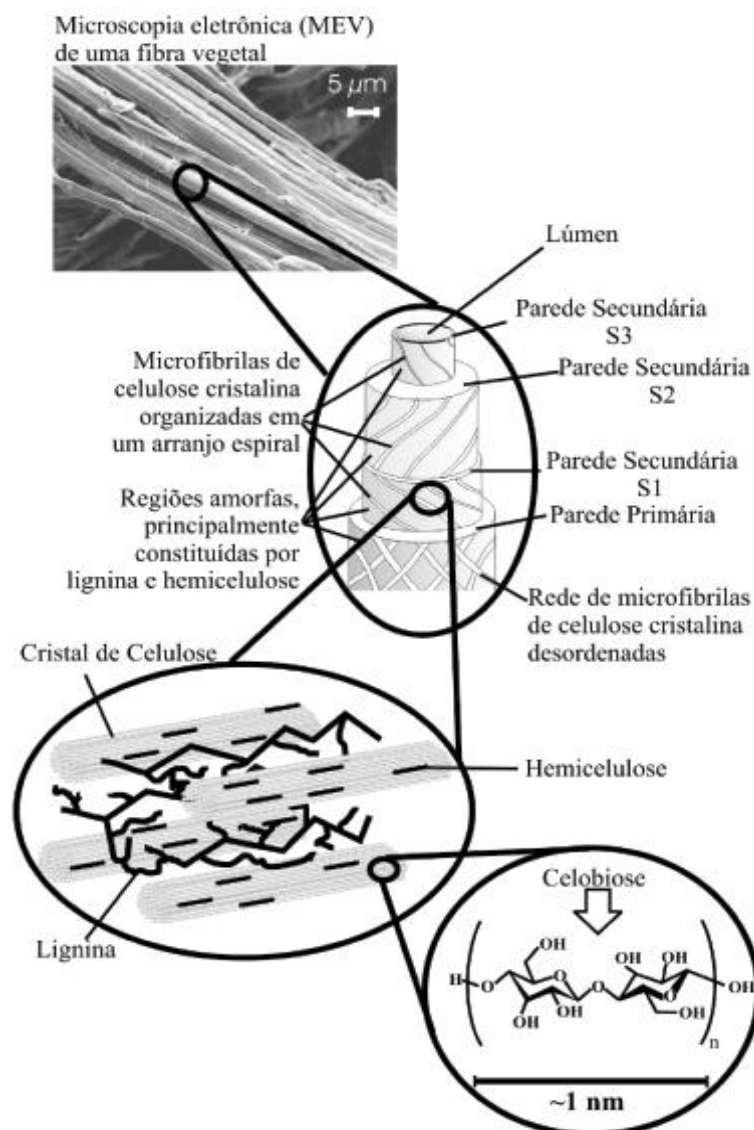


FIGURA 2.4 – Estrutura da fibra vegetal (MEV da fibra de Eucalipto)

Fonte : Silva, R. ; *Química Nova* 2009, vol.32, No.3

O processo de fabricação de celulose, o qual será tratado em maiores detalhes no Capítulo 3, tem como função dissolver a lignina, agente ligante das fibras na madeira, com o objetivo de liberar as fibras com o mínimo de degradação dos carboidratos (celulose e hemicelulose), principalmente dos constituintes da parede secundária, como já exposto.

Para efeitos práticos, neste trabalho adotam-se as seguintes definições dos principais constituintes da madeira (SILVA, HARAGUCHI, MUNIZ E RUBIRA, 2009), conforme ilustrações das Figuras 2.4 e 2.5.

**Lignina** : É uma substância química que confere rigidez à parede da célula e que, nas partes da madeira, age como um agente permanente de ligação entre as células, gerando uma estrutura resistente a impacto, compressão e dobra. Está associada com a celulose e a hemicelulose na composição de materiais lignocelulósicos, sendo hidrofóbica com estrutura tridimensional, altamente ramificada, podendo ser classificada como um polifenol, o qual é constituído por um arranjo irregular de várias unidades de fenilpropano que se une a grupos hidroxila e metoxila como substituintes no grupo fenil. Esta resina amorfa atua como um cimento entre as fibrilas e como um agente enrijecedor no interior das fibras. A força de adesão entre as fibras de celulose e a lignina é ampliada pela existência de ligações covalentes entre as cadeias de lignina e os constituintes da celulose e hemicelulose.

**Celulose**: É um polissacarídeo formado por unidades do monossacarídeo  $\beta$ -D-glucose, que se ligam entre si através dos carbonos 1 e 4, dando origem a um polímero linear. Portanto, a unidade repetitiva da celulose é composta por duas moléculas de glicose eterificadas  $\beta$ -1,4-glicosídicas. Esta unidade repetitiva, conhecida como celobiose, contém seis grupos hidrogenados que estabelecem interações do tipo ligações de hidrogênio intra e intermolecular. Devido a essas ligações de hidrogênio, há uma forte tendência de a celulose formar cristais que a tornam completamente insolúvel em água e na maioria dos solventes orgânicos.

**Hemicelulose**: É uma mistura de polímeros polissacarídeos de baixa massa molecular, os quais estão intimamente associados com a celulose no tecido das plantas ou paredes celulares. A hemicelulose consiste de vários monossacarídeos polimerizados, incluindo o de cinco carbonos (como xilose e arabinose) e carboidratos de seis carbonos (como galactose, ácido 4-O-metil glucurônico e resíduos de ácido galactorônico), sendo a unidade mais abundante a



xilose, que se une por ligações glicosídicas nas posições 1 e 4. É hidrofílica, com considerável grau de ramificação entre suas cadeias e grau de polimerização variando de 100 a 200.

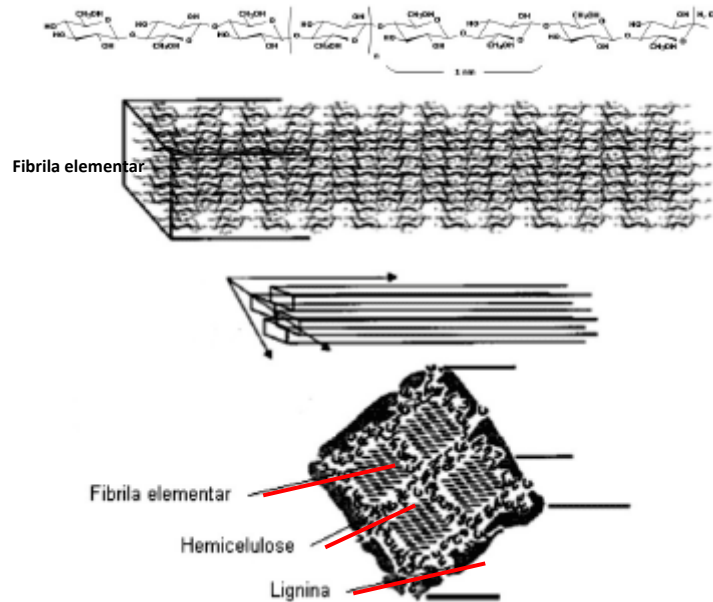


FIGURA 2.5 – Representação das associações químicas entre celulose, hemicelulose e lignina

Fonte : Ramos, L. P. ; *Quimica Nova* 2003, 26, 863

### 2.3 – Qualidade da madeira para produção de celulose

Variações na qualidade da madeira de eucalipto ocorrem em níveis de estrutura anatômica, composição química e propriedades físicas, podendo ser detectadas significativas diferenças inter e intraespecíficas (TOMAZELLO FILHO, 1994). Desde a década de 80, inúmeros trabalhos de classificação e seleção de clones foram e ainda estão sendo desenvolvidos por meio de melhoramento genético tradicional ou da biotecnologia, possibilitando que as empresas produzam florestas altamente produtivas em termos de volume e com qualidade da madeira ideal para a produção de celulose e papel (BASSA ET AL.,2005). Variáveis relativas à madeira e ao processo de obtenção da polpa devem ser avaliadas.

Vários estudos têm sido realizados visando avaliar os efeitos das propriedades químicas e físicas da madeira no processo de polpação e na qualidade da polpa de eucalipto, especialmente pelo processo *Kraft* (FONSECA ET AL.,1996). Uma característica física que

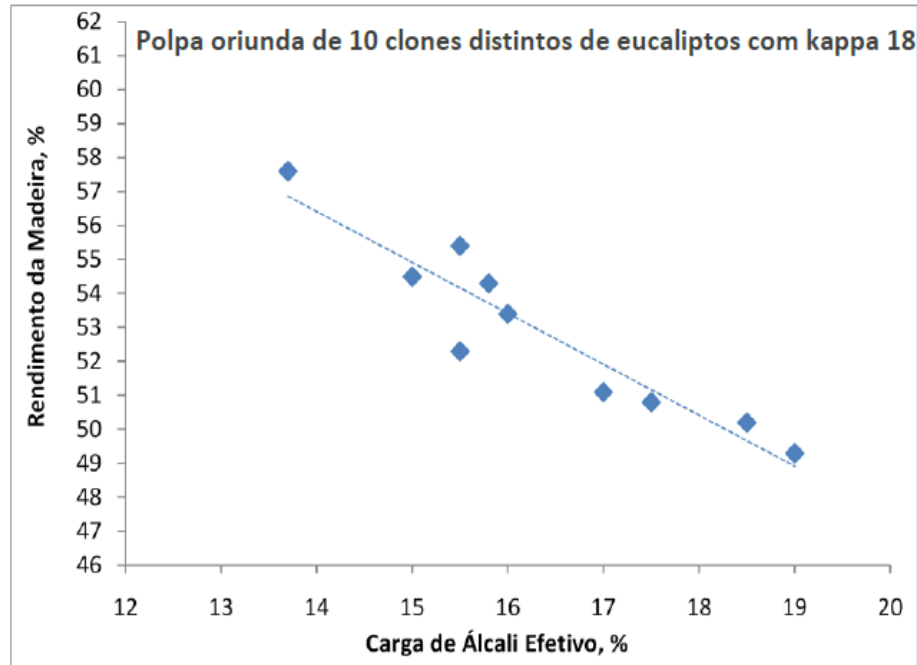
sempre foi utilizada para a classificação e seleção de material superior é a densidade básica da madeira (Kg-seco/m<sup>3</sup>-sólido), a qual se tornou um índice de qualidade. Com relação ao processo e à qualidade da polpa celulósica, variáveis como o álcali ativo aplicado, o rendimento depurado e a viscosidade são muito importantes. O teor de álcali ativo aplicado depende, entre outras características, da densidade básica da madeira (VASCONCELOS E SILVA JR.,1985). Logicamente, a variação no teor de álcali ativo aplicado (soda cáustica e sulfeto de sódio utilizados para dissolver a lignina no processo de cozimento) sobre a madeira levará a diferentes rendimentos e viscosidades da polpa produzida.

Estudo recente —“Clones de Excelência do Brasil” — realizado por Gomide et al.(2009) na Universidade Federal de Viçosa, pelo qual foram analisados dez clones de uso comercial nas indústrias de celulose, mostrou:

**Densidade Básica:** Tendência de uso em valores de  $\geq 500 \text{ kg/m}^3$ , a qual proporciona menor consumo específico de madeira (m<sup>3</sup>-sólido/tonelada.celulose), devido a maior quantidade mássica de madeira por unidade de volume e maior capacidade de alimentação de cavacos de madeira ao digestor, favorecendo assim a maior capacidade de produção de celulose, uma vez que a produção é obtida em peso e a alimentação de cavacos dos digestores é em volume. Apesar de densidades básicas mais baixas ( $< 475 \text{ kg/m}^3$ ) favorecerem o rendimento da madeira (massa de celulose, base seca obtida por massa de madeira base seca) e também a viscosidade da celulose (medida do grau de polimerização) em função do menor requerimento de álcali ativo sobre a madeira de menor densidade, clones de maiores densidades com menores teores de lignina e extrativos, que propiciam maiores rendimentos e viscosidades, estão sendo desenvolvidos por melhoramento genético, atendendo assim a maioria dos requisitos do processo de produção de celulose.

**Constituição química:** Baixos teores de extrativos (Alc/Tol  $< 3,0\%$ ) e de lignina insolúvel+solúvel ( $< 28,0\%$ ) favorecem o menor consumo de álcali que, por sua vez, proporcionam maiores rendimentos e viscosidades da celulose produzida além de propiciarem menor aparecimento de incrustações de resinas no processo (“pitch”), que prejudica significativamente a qualidade da celulose.

**Carga de Álcali, Rendimento e Viscosidade:** Rendimentos maiores que 53,5% são obtidos com carga de álcali efetivo menor que 16% sobre a massa de madeira, conforme ilustrado na Figura 2.6 e em trabalho realizado por Gomide et al.(2008).



Kappa : Medição indireta do teor de lignina contida nas fibras de celulose após o processo de polpação

FIGURA 2.6 – Rendimento da madeira versus carga de álcali

Fonte : Gomide et al.,2008

Ganhos extraordinários em produtividade e qualidade das florestas industriais de eucalipto têm sido obtidos nas últimas décadas no Brasil aplicando-se os métodos da genética quantitativa e da seleção direcional aliados a uma revolução nos procedimentos silviculturais, com destaque para a hibridação e a clonagem em larga escala de árvores elite (SILVA, 2010)

A seleção de árvores superiores em qualidade para a produção de celulose iniciou-se na década de 80, quando várias empresas no Brasil, incluindo Aracruz, *International Paper*, VCP, Cenibra, Suzano, Riocel em conjunto com universidades, com destaque a Universidade Federal de Viçosa, iniciaram a seleção de árvores com superior produção de madeira em m<sup>3</sup>/ha/ano. A partir dessas árvores, foram realizados testes de laboratório, caracterizando-se a densidade básica, os teores de carboidratos, a lignina e resinas e a polpação dessas madeiras em cozimentos laboratoriais, para um número kappa (medição laboratorial do teor de lignina contida nas fibras de celulose, utilizando-se de uma titulação química com permanganato de potássio como agente oxidante) próximo de 18 (economicamente mais vantajoso) e avaliando-se rendimento e a viscosidade da polpa conforme a variação da carga de álcali. Com base

nesses testes, as melhores árvores foram selecionadas para os primeiros plantios clonais que iniciaram o consumo industrial na década de 90. A partir dos resultados industriais em conjunto com resultados de laboratório, continuou-se com o desenvolvimento de melhoramento genético. Como exemplo, na *International Paper do Brasil*, os clones de plantios atuais pertencem a 5ª geração de clones, ou correspondem a cerca de 30 anos de desenvolvimento de clones de eucalipto para a produção de celulose.

Nas próximas décadas, incrementos de produtividade e principalmente qualidade das florestas via melhoramento genético tornar-se-ão cada vez mais estratégicos para o crescimento sustentado e a manutenção da vantagem competitiva dos países plantadores para a produção de celulose e energia e produtos sólidos de madeira.

O projeto Genolyptus, lançado em 20 de fevereiro de 2002, baseia-se em uma parceria entre o governo federal, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia (Fundo Setorial Verde Amarelo), o setor acadêmico e de pesquisa, representado por 7 universidades e 3 centros da Embrapa, e o setor privado, com 14 empresas florestais, sendo 13 brasileiras e uma empresa portuguesa. Esse projeto, com o desenvolvimento das ciências genômicas, integradas às estratégias da genética clássica, abre perspectivas de enorme potencial para desvendar as relações complexas entre a variabilidade genética na sequência de DNA e a diversidade observada entre árvores para produtividade, qualidade e tolerância a doenças e estresse ambientais. O que se espera da genômica é outro salto equivalente que permitirá, por exemplo, a seleção precisa de árvores elite em idade precoce com base na identificação direta da constituição genômica superior para características físico-químicas da madeira (SILVA, 2010).

## 2.4 – Rendimento da madeira de eucalipto para produção de celulose

A Figura 2.7 ilustra a composição da madeira e da polpa após o processo de cozimento para  $\#kappa$  de 16 e com rendimento de 50%. Observa-se uma queda significativa de carboidratos, ou seja, 18% celulose e 62% de hemicelulose, que se dissolveram e se incorporaram no licor preto (solução de álcali com lignina e carboidratos dissolvidos), que será queimado na caldeira de recuperação para produção de energia e recuperação de químicos. Aumentos de rendimento, em função de melhorias na qualidade da madeira ou no processo de cozimento, implicam em maior preservação de celulose e hemicelulose, a qual propicia aumento de produção de celulose no processo industrial ou redução no consumo específico de madeira para a mesma produção de celulose.

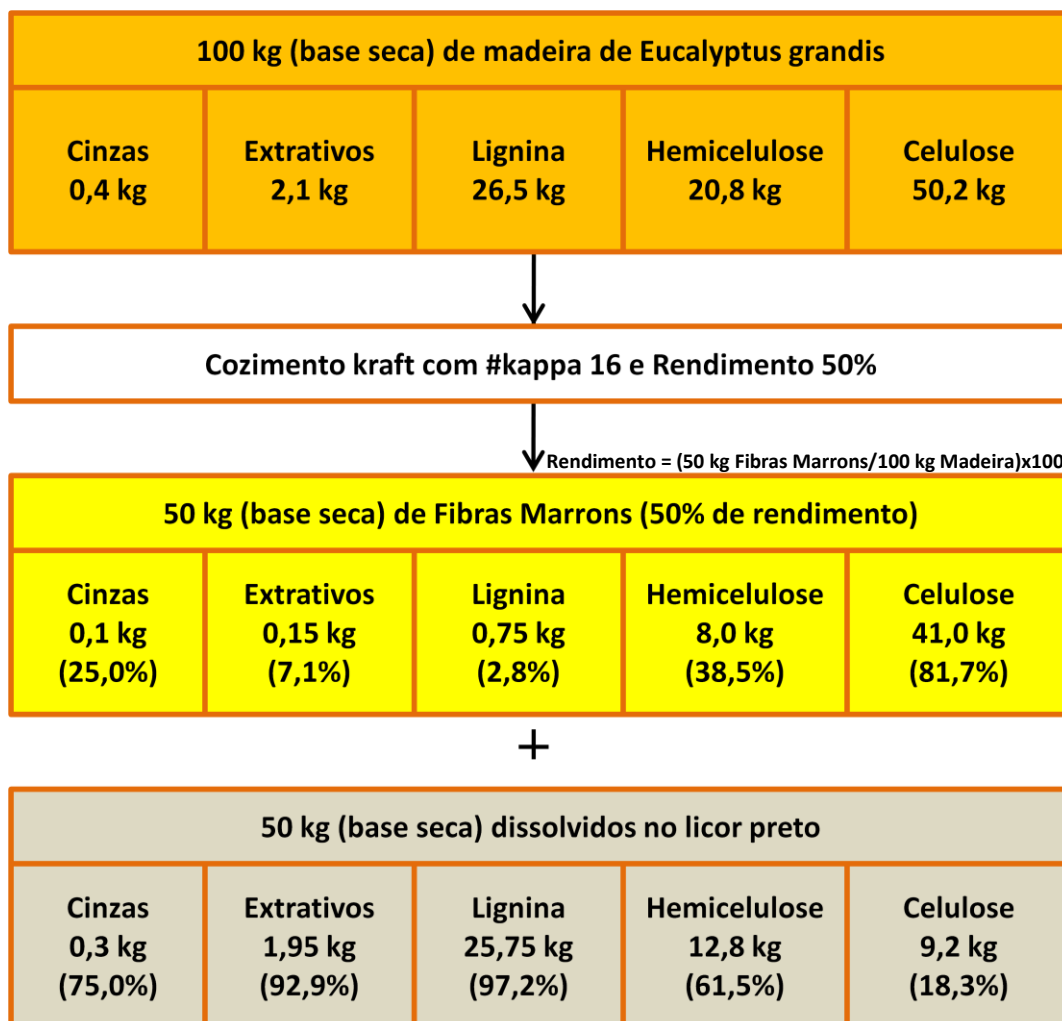


FIGURA 2.7 – Rendimento do *Eucalyptus grandis* para um processo em produção com  $\#kappa=16$

Fonte : UFV, Colodette, 2004

## 2.5 – Consumo específico de madeira para produção de celulose

O consumo específico de madeira na indústria de celulose, expresso em volume, normalmente  $m^3$  de madeira sólida necessária para a produção de uma tonelada de celulose, é dependente de diversos fatores. Os mais preponderantes são: a densidade básica da madeira recebida, o rendimento da madeira no processo de polpação e branqueamento e as perdas de madeira que ocorrem no setor de preparação de madeira. Outros fatores que se incluem nos três já citados podem também ser mencionados: a dilatação ou contração da madeira em função de sua umidade, o teor de casca contida na madeira recebida e a perda de fibras para o efluente no processo de lavagem da polpação e branqueamento. É normalmente medido numa base de tempo mensal, em função dos longos tempos de retenção entre a entrada de madeira na área de preparação de madeira e a saída de celulose após o branqueamento, além dos inventários formados em toras no pátio de madeira, cavacos na pilha de cavacos e polpa nas torres de branqueamento e estocagem que devem ser levados em consideração na apuração do consumo. No Brasil, a variação desse consumo nas diversas indústrias instaladas varia de 3,55  $m^3$  a 4,5  $m^3$ -sólido por tonelada de celulose branqueada produzida (ABTCP, 2009), e é de fundamental importância econômica o seu controle, pois este influi significativamente no custo de produção da celulose e na necessidade de terras e florestas para a sustentabilidade da produção em alta escala.

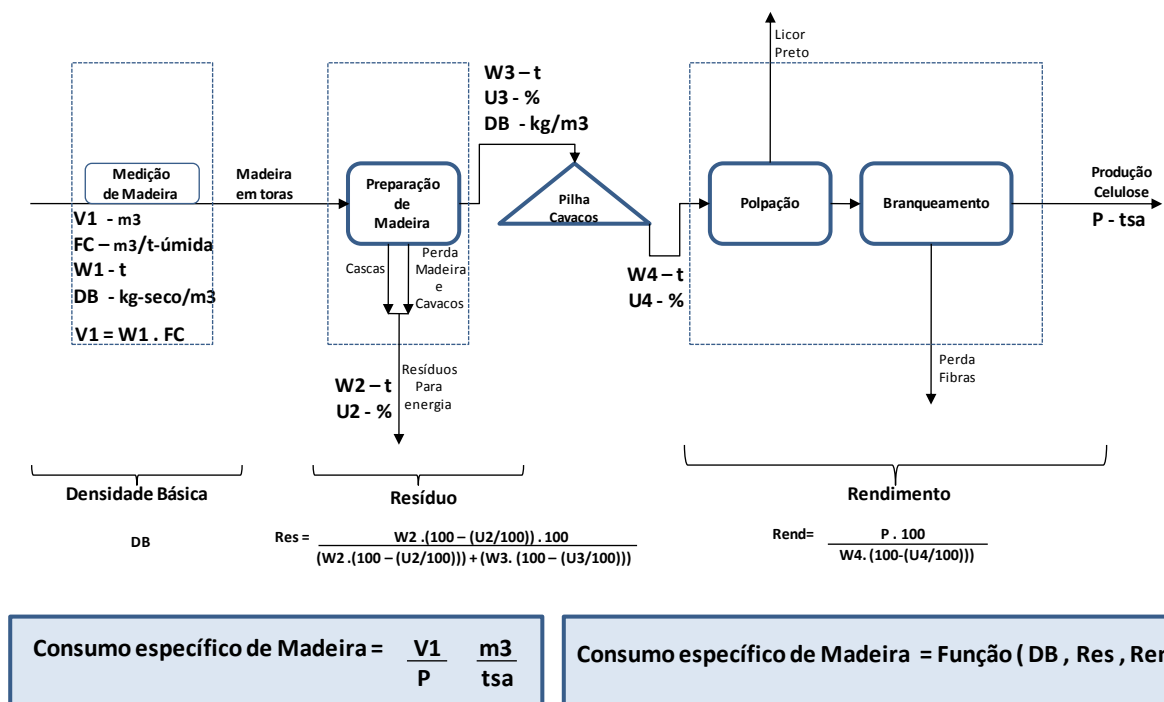
A Tabela 2.2 ilustra as diferenças em custo de dispêndio de madeira e área florestal necessária para manter uma produção anual de um milhão de toneladas de celulose. Comparando o caso-1 de alta eficiência com o caso-2 de baixa eficiência, encontra-se diferenças de + 28% no dispêndio de custo de madeira e + 70% de área necessária para as florestas plantadas.

**Tabela 2.2 – Quadro comparativo de consumo de madeira**

CASO	CONSUMO ESPECÍFICO ( $m^3/t.Cel$ )	PREÇO MADEIRA ( $R\$/m^3$ )	CUSTO ESPECÍFICO ( $R\$/t.Cel$ )	PRODUÇÃO CELULOSE ( $t.Cel/ano$ )	DISPÊNDIO MADEIRA ( $MMR\$/ano$ )	PRODUTIVIDADE FLORESTAL ( $m^3/ha.ano$ )	ÁREA FLORESTAL ( $ha$ )
1	3,5	60	210	1000000	210	40	87500
2	4,5	60	270	1000000	270	30	150000

Fonte : Autor, 2010

Dada a grande influência do consumo específico de madeira no negócio de produção de celulose, abaixo são descritas as principais variáveis de influência nesse consumo e como atuar para minimizá-lo. A Figura 2.8 ilustra essas variáveis no processo da linha de fibras da fábrica de celulose.



$V1$  → Medição de volume de madeira em  $m^3$ , por fator em imersão de toras em água ou fator de cubicagem por medição de volume e peso de toras ou Logmeter  
 $FC$  → Fator de cubicagem ou volume aparente, tal qual, da madeira em  $m^3/t-úmida$   
 $W1, W2, W3, W4$  → Medição de peso por balanças totalizadoras em toneladas, t  
 $U2, U3, U4$  → Medição amostral de umidade em % em peso  
 $P$  → Produção de celulose em toneladas, t  
 $tsa$  → tonelada seca ao ar (10% umidade)

FIGURA 2.8 – Consumo específico de madeira e suas variáveis de influência

Fonte : Autor, 2010

### 2.5.1- Densidade Básica

Tradicionalmente na área florestal, a unidade de medida para madeira é em volume ( $m^3$ -sólido), tanto para quantificação de inventário florestal como para comercialização e transporte de madeira. No entanto, a produção de celulose é mensurada em unidade de peso (tsa, tonelada seca ao ar), que demanda quantidade de madeira também em peso (t-seca, tonelada seca), criando assim a necessidade de conhecimento da densidade básica ( $kg-seco/m^3$ -sólido), para verificação do nível de influência no consumo específico de madeira, em volume. Salienta-se que, se o consumo específico de madeira fosse expresso em peso, ou seja, t-madeira seca por tsa de celulose, não ocorreria influência dessa variável no consumo

específico de madeira, a não ser pela influência no processo de produção de celulose, ou seja, na geração de resíduo, por afetar as perdas de madeira, e no rendimento, por afetar a seletividade do processo de cozimento ou demanda de carga de álcali, como já mencionado no item 2.3. O desenvolvimento de florestas com árvores de densidade  $\geq 500 \text{ kg-seco/m}^3\text{-sólido}$  e que apresentam o máximo de rendimento no processo de polpação é a tendência atual de hibridação e clonagem em larga escala de árvores elite. A Figura 2.9 mostra a correlação do consumo específico de madeira em função da densidade básica em valores mensais, no período de janeiro de 2004 a junho de 2009, na *International Paper do Brasil*, unidade de Luiz Antonio, SP, sem, no entanto, estarem padronizados os efeitos do teor de resíduos e rendimento, que obviamente estão também influenciando nos dados.

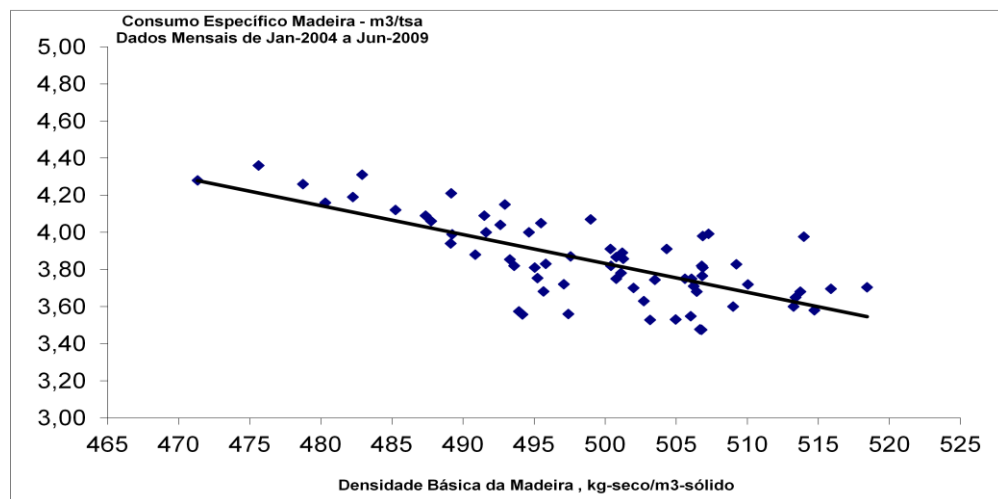


FIGURA 2.9 – Efeito da densidade básica no consumo específico de madeira

Fonte : IP Brasil

### 2.5.2- Teor de Resíduos

Além da casca, resíduo indesejável no processo de produção de celulose, há de se considerar perdas de madeira no processo de produção de celulose devido a quebras das toras no tambor descascador, o que gera toretos que se direcionam aos resíduos pelas fendas de retirada de casca do tambor descascador e pelas aberturas entre os rolos aceleradores após o tambor descascador. Também ocorrem perdas de madeira na forma de cavacos, principalmente na peneiragem quando se perde cavacos fora da especificação que são rejeitados pela peneira e se incorporam aos resíduos, ou devido ao excesso de alimentação de cavacos para a peneira que provoca transbordo de cavacos bons ao rejeito.



Normalmente, o total de resíduos gerados varia de 10% a 18% em peso, base seca, do total de madeira com casca consumida, sendo, deste total, 8% a 12% representado pelas cascas, ou seja, as perdas de madeira no seu processamento podem variar de 2% a 8%, dependendo de como estão sendo efetuadas as operações em termos de geração de toretes no descascamento e rejeição de cavacos na peneiragem.

Vale salientar que é nesta variável, em muitas indústrias de celulose, que se encontra o maior potencial de redução no consumo específico de madeira, principalmente devido à falta de medição e controle dessas perdas. Algumas ações são altamente recomendadas na operação de preparação de madeira, tais como:

- ➔ Identificar as principais causas de geração de toretes (quebras de toras) no tambor descascador, como, por exemplo, controle do tempo após corte da madeira na floresta (teor de umidade da madeira), comprimento ideal da tora em relação às dimensões do tambor descascador, nível adequado de toras na operação do tambor descascador, rotação adequada do tambor descascador e controle do desgaste da abertura das fendas do tambor descascador.
- ➔ Manter no mínimo de distância a abertura entre rolos aceleradores e, se possível, instalar rolinhos de 50 mm de diâmetro entre as maiores aberturas para servir de apoio aos toretes sem afetar a retirada de cascas, além do correto posicionamento de rolos tracionadores e espalhadores, sendo o mais comum a instalação de rolos tracionadores após aberturas maiores e, em seguida, em espaçamento menor, a instalação de rolo espalhador, como ilustrado na Figura 2.10-b.
- ➔ Controle adequado do tempo de uso das facas do picador a fim de evitar a formação excessiva de cavacos grandes e de lascas, que certamente serão rejeitados na peneira de cavacos.
- ➔ Instalação de silo equalizador com rosca de velocidade variável, na sua saída, para a alimentação da peneira de cavacos, proporcionando maior uniformidade de fluxo de cavacos para a peneira e evitando transbordos de cavacos bons ao rejeito, conforme ilustra a Figura 2.10-a.

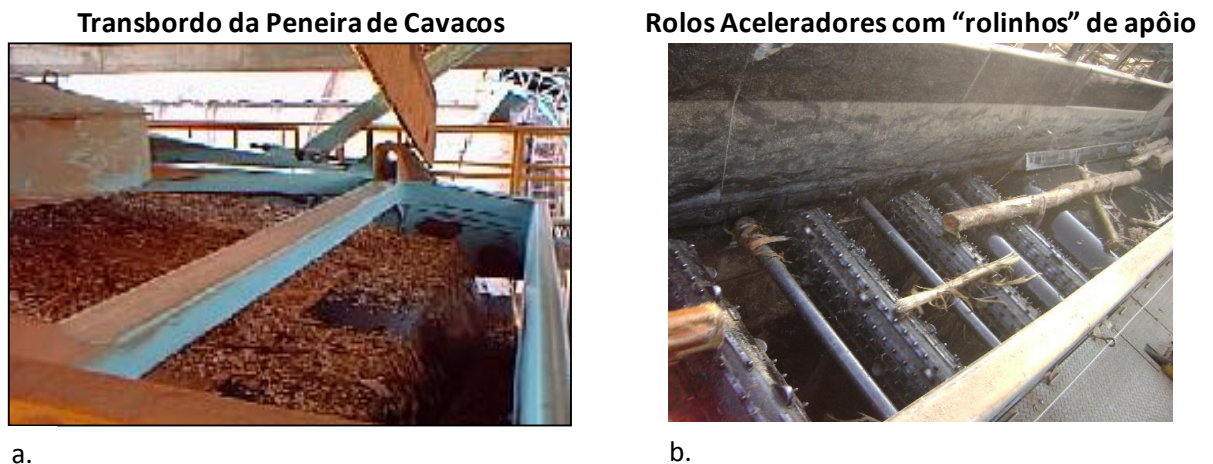


FIGURA 2.10 – Locais de perda de madeira na área de preparação de madeira

*Fonte : IP Brasil*

Todo o remanescente será utilizado para a geração de energia nas caldeiras de biomassa — dessa forma, a madeira vinda na forma de resíduos tende a substituir o consumo da madeira destinada à energia caso a casca não seja suficiente, como é o caso na maioria das indústrias de celulose. Conforme será apresentado adiante, a madeira para energia possui características diferentes e de menor valor agregado, o que encarece a exploração da madeira de celulose, obviamente mais custosa que a de energia, além de se ter grande descontrole das operações no processo industrial. De qualquer forma, grandes investimentos são feitos para o desenvolvimento de clones de árvores elite, na aquisição de terras para o reflorestamento e no desenvolvimento de equipamentos e químicos para a obtenção de maior rendimento, não justificando assim manter altos níveis de perdas de madeira no processamento.

### 2.5.3- Rendimento

Como já discutido no item 2.4, dos cerca de 70% de celulose e hemicelulose contidos na madeira, somente 49% a 56% serão transformados em celulose branqueada, considerando também a perda de fibras ao efluente que ocorre principalmente nos equipamentos de lavagem da polpa em cada estágio do branqueamento e no rejeito de processo final de depuração para retirada de impurezas da celulose branqueada, que representa entre 0,1% a 0,5% da produção, dependendo do tipo de equipamento e das condições de manutenção empregada. Sendo assim, muitos esforços foram desenvolvidos nos últimos anos para o aumento do rendimento no processo de polpação além dos ganhos obtidos com o aprimoramento genético do eucalipto — também novas tecnologias de polpação, como o cozimento “*lo solids*” da tecnologia Andritz

ou o “compact cooking” de tecnologia Metso, bem como duplo estágio de deslignificação com oxigênio e branqueamento ECF estão em implantação nas indústrias, assim como a utilização de aditivos no processo de cozimento, como antraquinona, surfactantes e polisulfetos, utilizados no processo para aumento no rendimento com o intuito de redução no consumo específico de madeira ou aumento de produção. A Figura 2.11 ilustra a ordem de grandeza da influência do rendimento do processo de polpação e branqueamento.

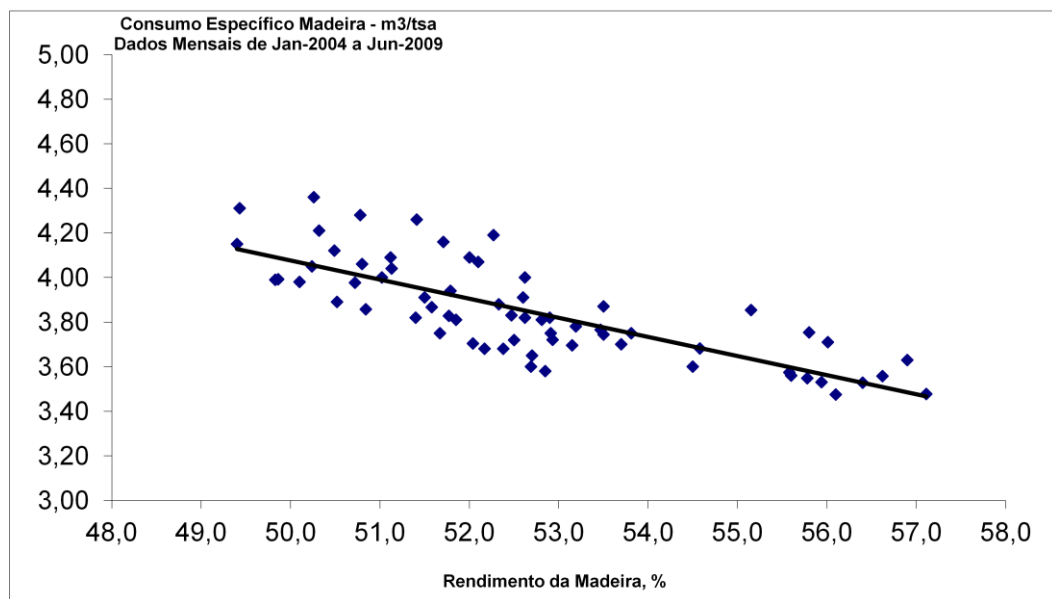


FIGURA 2.11 – Efeito do rendimento no consumo específico de madeira

Fonte : IP Brasil

## 2.6 – Qualidade da madeira de eucalipto para energia

É de fundamental importância, tanto do ponto de vista técnico como do econômico, o controle das variáveis de qualidade da madeira para a produção de energia, desde os aspectos silviculturais como também a manipulação das toras de madeira após o corte. Ressalta-se ainda que os requisitos de qualidade para a madeira de energia não são os mesmos, já discutidos no item 2.3, da madeira de celulose; aliás, a maioria deles é oposta em tendências numéricas. Daí a necessidade de desenvolvimentos separados, inclusive os aspectos silviculturais, que, no caso de florestas para madeira de energia, encontram-se outras espécies de eucalipto plantadas em florestas com menor espaçamento e exploradas muitas vezes com menor idade, requerendo menores áreas de plantio quando comparadas as necessidades de quantidade de energia por hectare (QUIRINO ET AL.,2004)

Dentre as variáveis de maior importância para a madeira de energia, podem ser destacadas:

- composição química da madeira;
- densidade básica;
- teor de umidade;
- poder calorífico;
- teor de minerais

### 2.6.1- Composição química da madeira

A lignina natural das madeiras das árvores tem maior proporção de carbono que a celulose. Em geral o teor de C na lignina é de 65% e na holocelulose (celulose + hemicelulose) é de 48%, enquanto a lignina possui em sua fórmula molecular 33% de oxigênio e a holocelulose 47%. Como maior teor de carbono proporciona maior poder calorífico e o de oxigênio não agrega poder calorífico ao combustível, pelo contrário reduz, quanto maior o teor de lignina na madeira, maior é o seu poder calorífico (FOELKEL, 2005).

Normalmente se expressa a composição química da madeira para energia em composição química elementar e composição química imediata.

*Composição química elementar* corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa, referidos à matéria seca. São normalmente apresentados valores para carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas (A) (NOGUEIRA ET AL., 2000). As fórmulas de Dulong ( $PCS=81,7C+340(H-O/8)$ ) e de Laut ( $PCS=81,7+342,5H-36,6O$ ) mostram que o poder calorífico superior da madeira (PCS) é função da sua composição química elementar, em uma relação direta com o teor de carbono e de hidrogênio e inversa com o teor de oxigênio (VALE ET AL., 2000).

*Composição química imediata* fornece a porcentagem de material volátil, carbono fixo e cinza. Em outras palavras, ela fornece a porcentagem do material que se queima no estado gasoso (material volátil - V) e no estado sólido (carbono fixo - F), bem como dá uma indicação do material residual (cinzas - A) (BRITO ET AL., 1978).

Tabela – 2.3 – Composição química da madeira (*Eucalyptus grandis*)

Composição Elementar		Composição Volátil	
Elementos	Composição (%)	Componentes	Composição (%)
C	49	Voláteis	81,42
H	4,87	Carbono Fixo	17,82
O	43,79	Cinzas	0,79
N	0,3		
S	0,01		
A	0,72		

Fonte : Lora, 1997

Brito e Barrichelo (1977), em estudo correlacionando as características de dez espécies de eucalipto, encontraram correspondência entre a composição química imediata do carvão vegetal com o teor de lignina dessas madeiras, conforme mostra a Figura 2.12 *a* e *b*.

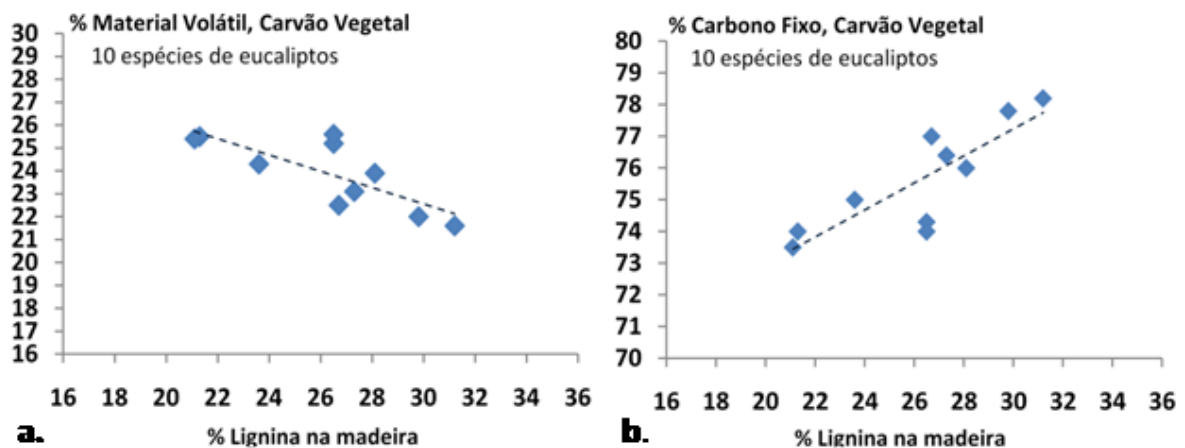


FIGURA 2.12 – Composição química imediata do carvão vegetal x teor lignina na madeira

Fonte : Brito e Barrichelo, 1977

## 2.6.2- Densidade Básica

Brito e Barrichelo (1977), avaliando dez espécies de eucalipto, não encontraram correlação entre a densidade básica, na faixa de 510 a 770 kg-seco/m<sup>3</sup>-sólido, e as características de qualidade requeridas para a madeira de energia, como o carbono fixo, voláteis e cinzas e com o teor de lignina da madeira. No entanto, é de se esperar que, quanto maior a densidade básica da madeira, maior é a massa ou matéria seca de biomassa a ser alimentada como cavacos na caldeira de biomassa para a combustão e produção de vapor, ou seja, como a madeira para energia é comercializada em volume (m<sup>3</sup>) e a produção de vapor da

caldeira depende da matéria seca de biomassa alimentada, quanto maior a densidade básica, menor será a quantidade volumétrica de madeira necessária à produção de vapor, ou, numa mesma base de volume, maior sua massa e conseqüentemente maior a sua quantidade calórica.

Oliveira (1988), por sua vez, em trabalho desenvolvido com a madeira de eucalipto, correlacionou a densidade com alguns parâmetros anatômicos e químicos. Quanto maior a densidade básica da madeira, maior o teor de lignina e extrativos, maior a espessura e comprimento das fibras e menor o teor de holocelulose.

De qualquer forma, valores de densidade acima de  $530 \text{ kg/m}^3$  são desejáveis para a madeira de energia pelos motivos acima descritos.

### **2.6.3- Teor de Umidade**

O teor de umidade é um dos parâmetros de maior influência na eficiência de combustão da madeira nas caldeiras de biomassa. A presença de água na madeira representa a redução do poder calorífico líquido em razão da energia necessária para evaporá-la nas fornalhas das caldeiras de biomassa. Além disso, se o teor de umidade for muito variável, o controle do processo de combustão pode se tornar difícil e conseqüentemente variar o processo de cogeração ou produção de energia elétrica em função da variação na produção de vapor (BARCELLOS et al.,2005).

Quando do corte da madeira, dependendo da época do ano, seu teor de umidade pode variar de 50% a 60%, o que é demasiadamente alto para o consumo nas caldeiras de biomassa. Sendo assim, é necessário que a madeira permaneça estocada em pilhas para que ocorra sua secagem naturalmente. A eficiência da secagem dependerá das condições atmosféricas, principalmente temperatura e umidade relativa do meio ambiente de secagem.

A Figura 2.13 ilustra o processo de secagem da madeira no meio ambiente, relacionando-se a umidade absoluta da madeira com a umidade relativa e temperatura do meio ambiente, desde o corte da árvore até 6 meses de estocagem em diversas épocas do ano, utilizando-se dos dados de estudo desenvolvido na região de Lages-SC, por Brand em 2007:

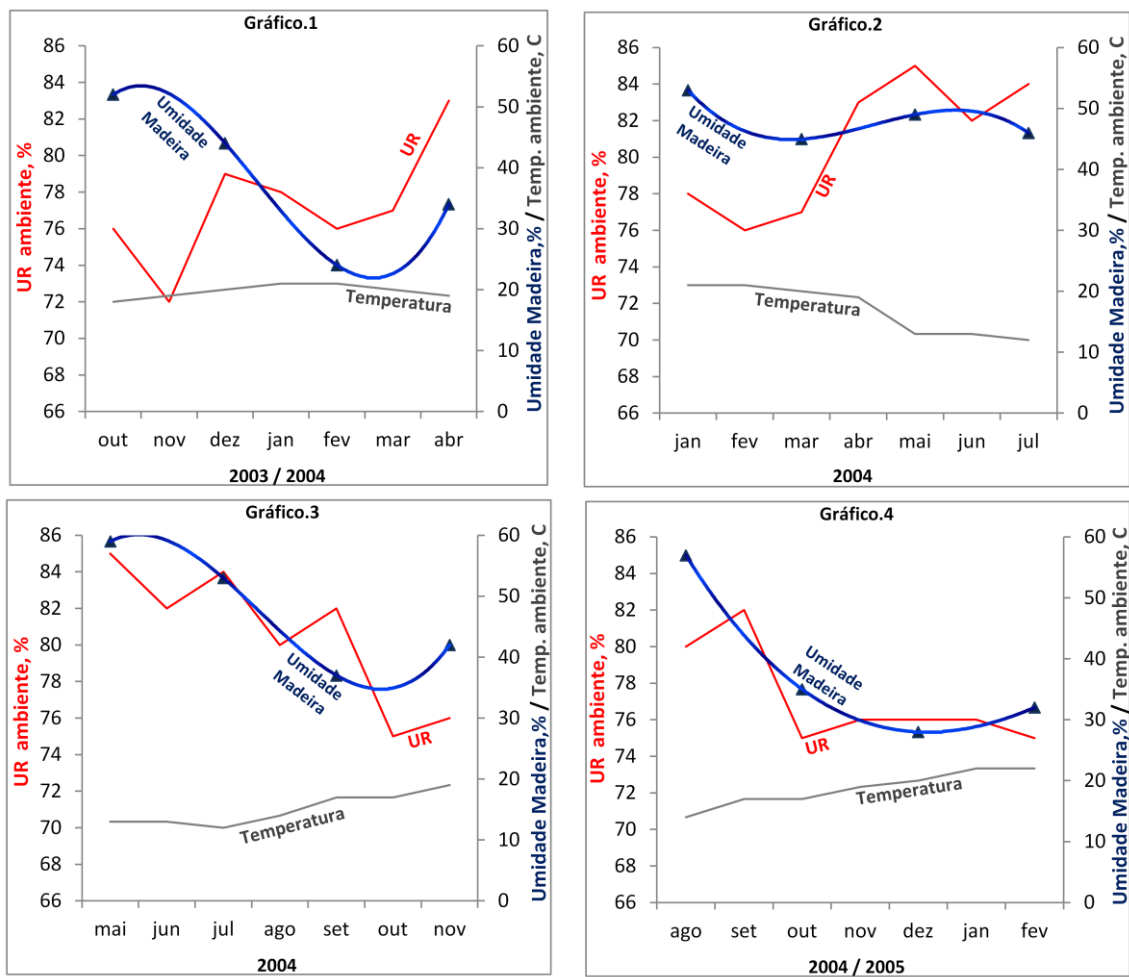


FIGURA 2.13 – Umidade da madeira versus Umidade relativa e Temperatura ambiente

Fonte : Brand, 2007

Pode-se observar na Figura 2.13 que a umidade inicial da madeira é tanto maior quanto maior a umidade relativa e menor a temperatura do meio ambiente. Com exceção do Gráfico 2, em que se observa que após 2 meses de estocagem a umidade relativa do meio ambiente aumenta e a temperatura diminui, o que dificulta a secagem da madeira no meio ambiente, os Gráficos 1, 3 e 4 mostram que, após 4 meses de estocagem, ocorre uma tendência de a umidade da madeira se estabilizar, e até voltar a aumentar principalmente se ocorrer um aumento na umidade relativa e redução na temperatura do ar ambiente.

#### 2.6.4- Poder calorífero

O poder calorífero é definido como a quantidade de energia na forma de calor liberada pela combustão de uma unidade de massa da madeira (JARA, 1989). Normalmente é expresso

em quilocalorias por quilo ou no Sistema Internacional como joules por grama ou quilojoules por kilograma.

O poder calorífero divide-se em superior e inferior. O *poder calorífero superior* é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação é recuperado. O *poder calorífero inferior* é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água (JARA,1989). É comum encontrar o termo poder calorífero líquido para expressar o poder calorífero inferior.

O poder calorífero da madeira depende do teor de umidade, da composição química (lignina, cinzas e extrativos, por ex.), do tempo de estocagem (perda de extrativos), da época da estocagem e da espécie da madeira utilizada. Para uma mesma espécie utilizada, o poder calorífero superior não é consideravelmente afetado pelas variações físicas na madeira, sendo o poder calorífero inferior fortemente afetado pelas variações na umidade, tempo de estocagem e condições de estocagem (BRAND, 2007).

O teor de umidade da madeira afeta diretamente o poder calorífero inferior e, como já comentado, a presença de água na madeira representa a redução do poder calorífero inferior em razão da energia necessária para evaporá-la. Sendo assim, ocorre redução na disponibilidade de calor para geração de vapor nas caldeiras de biomassa, prejudicando de forma significativa a estabilidade de geração de vapor e conseqüentemente trazendo instabilidade em todo o processo de cogeração e no processo consumidor de vapor.

A Figura 2.14 ilustra a variação no poder calorífero superior e inferior em função do teor de umidade da madeira:



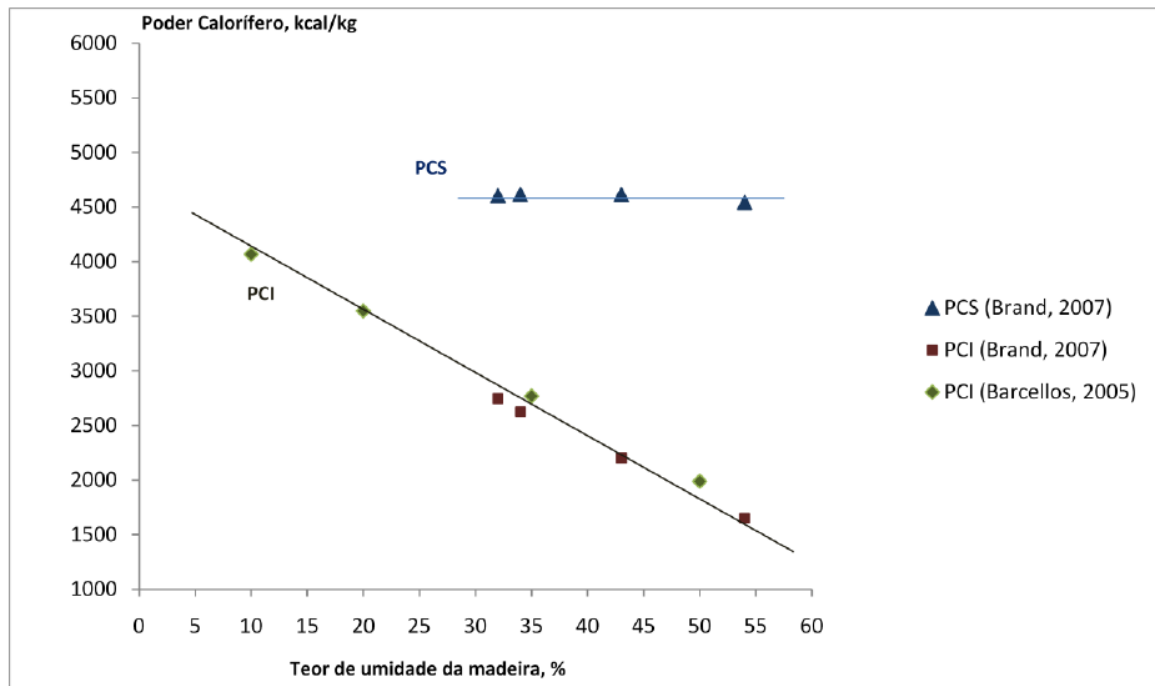


FIGURA 2.14 – Poder calorífero superior e inferior em função da umidade da madeira de eucalipto

Fonte :Brand, 2007 e Barcellos, 2005

Muitas instalações, onde a biomassa é resíduo ou subproduto de uma instalação principal, como é o caso da casca e dos resíduos na indústria de celulose, o teor de umidade pode chegar a 60% face à necessidade de lavagem da madeira de celulose para remoção de impurezas, o que acaba por umedecer demasiadamente a casca. Neste caso, muitas vezes, para se manter a carga de produção de vapor na caldeira de biomassa em regime constante, é necessária a utilização de um combustível complementar, normalmente por maçaricos de óleo combustível, o que encarece consideravelmente o custo do vapor e da energia elétrica gerada. Portanto, manter o teor de umidade da biomassa menor que 40% é de fundamental importância técnica e econômica no processo de cogeração. Atualmente, face aos aumentos nas tarifas de combustíveis fósseis e da energia elétrica, justificam-se os investimentos para eliminação de adição de água na linha de descascamento e picagem de madeira para celulose ou de secagem da casca, destinada à queima como combustível, com o aproveitamento dos gases residuais da caldeira de biomassa. A Figura 2.15 ilustra a necessidade de queima de óleo combustível em uma caldeira de biomassa, queimando casca com alto teor de umidade:

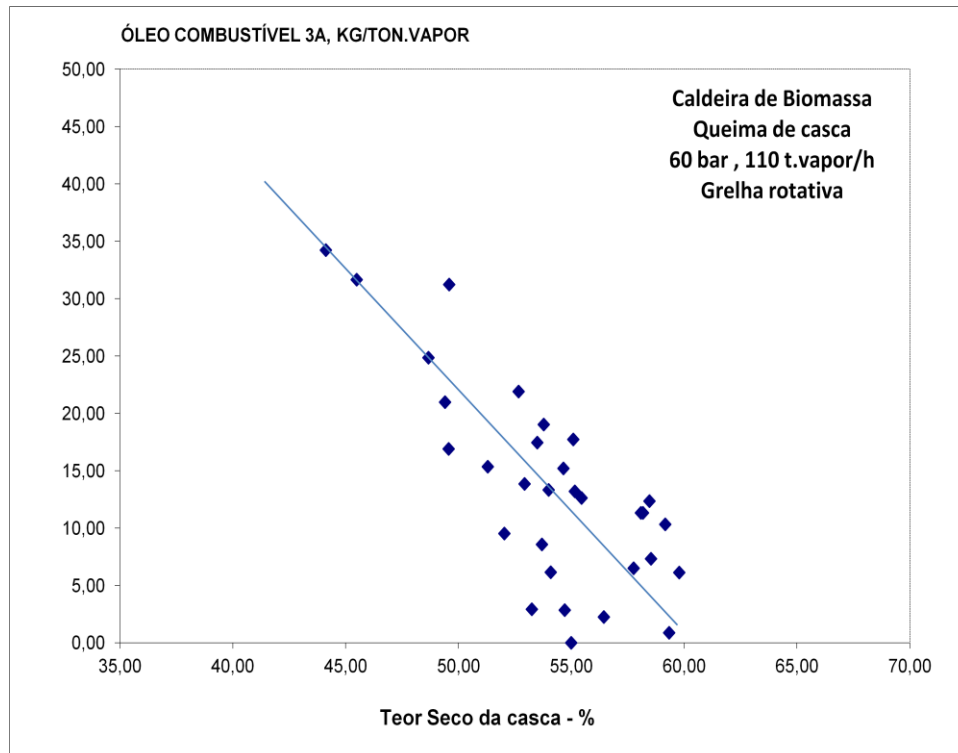


FIGURA 2.15 – Consumo de óleo combustível em função do teor seco da casca em caldeira de biomassa

Fonte : IP Brasil

### 2.6.5- Teor de Minerais

Os minerais presentes na madeira são importantes do ponto de vista energético, pois podem, quando queimados em fornalhas das caldeiras de biomassa, formar incrustações nas paredes e tubos do superaquecedor, banco de tubos ascendentes e descendentes, economizador e pré-aquecedores de ar a gás, o que reduz a eficiência térmica do processo, provocando paradas na caldeira para limpeza manual, mecânica por jato de limalha ou areia ou por hidrojato.

O teor de minerais da madeira, usualmente expresso como teor de cinzas, corresponde, em geral, a menos de 1% da madeira em base seca. Esses minerais, em combinação com compostos orgânicos, formam complexos que desempenham funções fisiológicas na árvore. Os principais minerais encontrados são cálcio, magnésio, fósforo e silício.

## 2.7 – Consumo de madeira de energia na indústria de celulose e papel

### 2.7.1- Cenário atual no segmento de celulose e papel

Em uma época com um cenário de instabilidade dos preços do petróleo e com uma busca crescente por alternativas sustentáveis para manter o crescimento econômico, cada vez mais os biocombustíveis despontam como solução lucrativa e limpa para os desafios da geração de energia no mundo todo. O Brasil tem vocação no segmento, com sua grande extensão de terras cultiváveis e a produção em larga escala de etanol utilizando cana de açúcar (FALEIROS, 2009). De acordo com o relatório *Brasil sustentável, desafio do mercado de energia*, publicado pela consultoria Ernst & Young, o Brasil vai passar da 11ª posição entre os maiores consumidores de energia no mundo para o 7º lugar em 2030, um crescimento anual médio de 3,3%. Nesta situação, a busca por carvão e biocombustíveis deverá aumentar 3,6% ao ano, como mostra a Figura 2.16, abaixo :

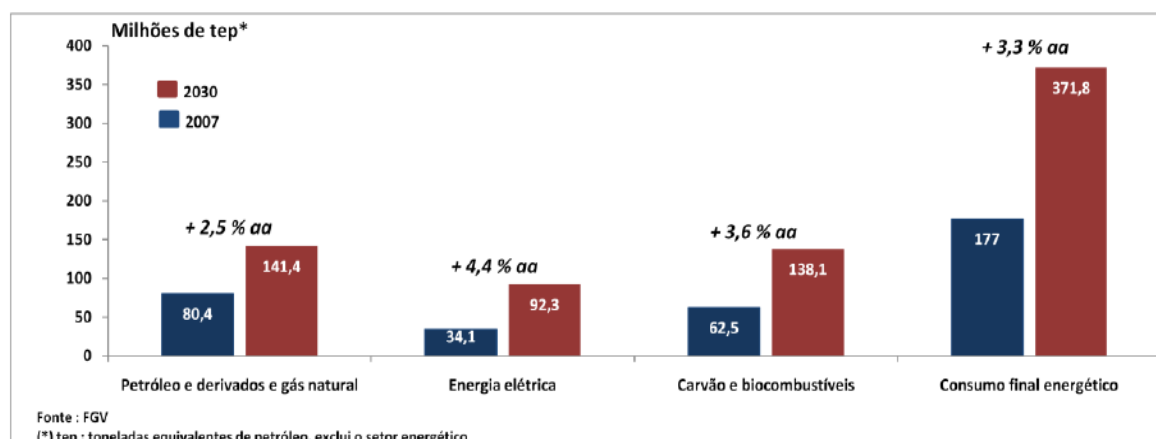


FIGURA 2.16 – A energia em 2007 e 2030

Fonte : FGV, 2008

O setor de celulose e papel, apesar de não atuar diretamente com a venda de energia, depende dela para ser mais competitivo. Por esse motivo, desenvolveu diversas tecnologias para a utilização de biomassa e queima de licor negro em suas caldeiras, além de crescentes pesquisas e altos investimentos para ter uma indústria com alta eficiência na assimilação de carbono, gerando ganhos consideráveis do ponto de vista ambiental e de mercado, sendo um dos caminhos também a produção de biocombustíveis, que podem ser etanol, biodiesel e butanol, como estratégia do conceito de biorefinaria (LABATE, 2009; COLODETTE, 2008).

O segmento de celulose e papel está incluído entre os mais energointensivos do setor industrial e entre os maiores consumidores de biomassa, apresentando perfil energético adequado aos processos mais eficientes de cogeração e adequado tecnicamente para implementar a autossuficiência em consumo energético, apesar da timidez nas medidas governamentais de incentivo para a autossuficiência (VELÁZQUEZ, 2008).

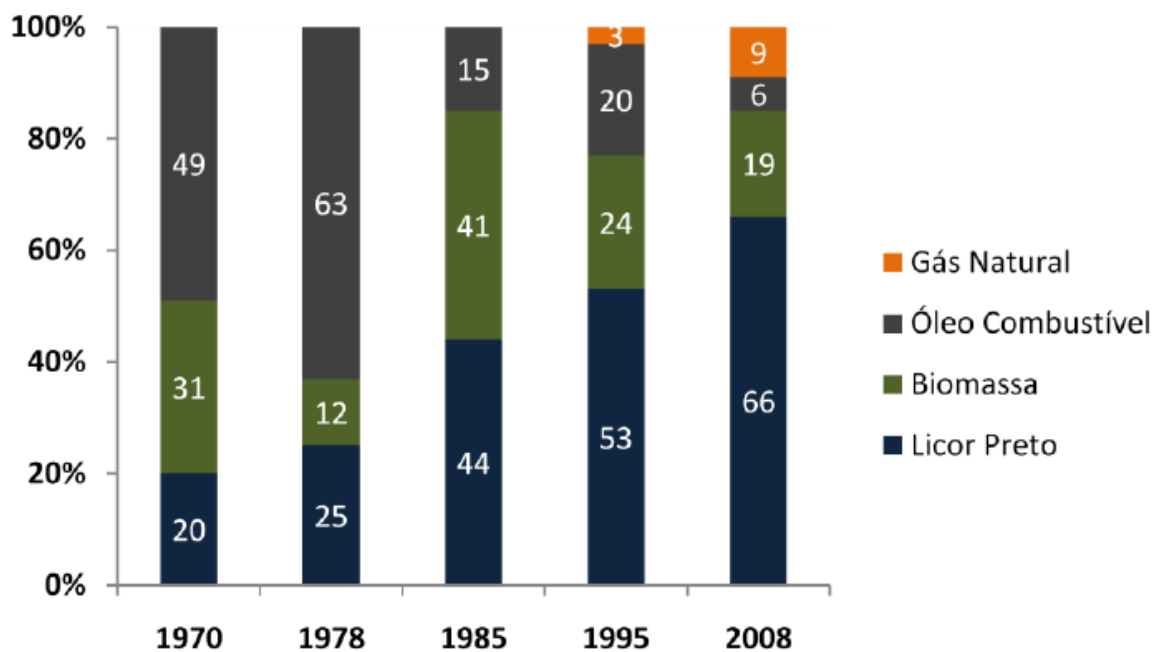


FIGURA 2.17 – Matriz Energética da Indústria de Celulose e Papel

Fonte: Balanço Energético Nacional, 2008

As indústrias de celulose e as integradas utilizam como combustível nas caldeiras, para geração de vapor, lenha e óleo combustível, além dos subprodutos de processo (licor preto e biomassa), o que, como mostra a Figura 2.17 acima, indica o aumento significativo da autossuficiência em energia à medida que cresce a produção de celulose no Brasil. Os novos investimentos em tecnologias modernas — como exemplo, as caldeiras de recuperação para queima de licor preto a alto teor de sólidos (75% de concentração), além da instalação de economizador e painel de tubos de “screen” na fornalha — aliados a maiores pressões de trabalho, na faixa de 60 bar a 100 bar, atendem 100% a demanda térmica e, com cogeração, a demanda elétrica. No caso de fábricas integradas de celulose e papel são necessárias a produção de vapor e a cogeração de energia elétrica, com caldeiras de biomassa queimando a casca, os resíduos da madeira do processo de celulose e a madeira de energia para atender as instalações das máquinas de papel. Um consumo de óleo combustível ou gás natural é

necessário para a produção de cal, utilizado no processo de caustificação no ciclo de recuperação de químicos. A Figura 2.18 ilustra o crescimento na produção de celulose acompanhado do aumento da participação do licor preto e da biomassa na matriz energética do setor de celulose e papel.

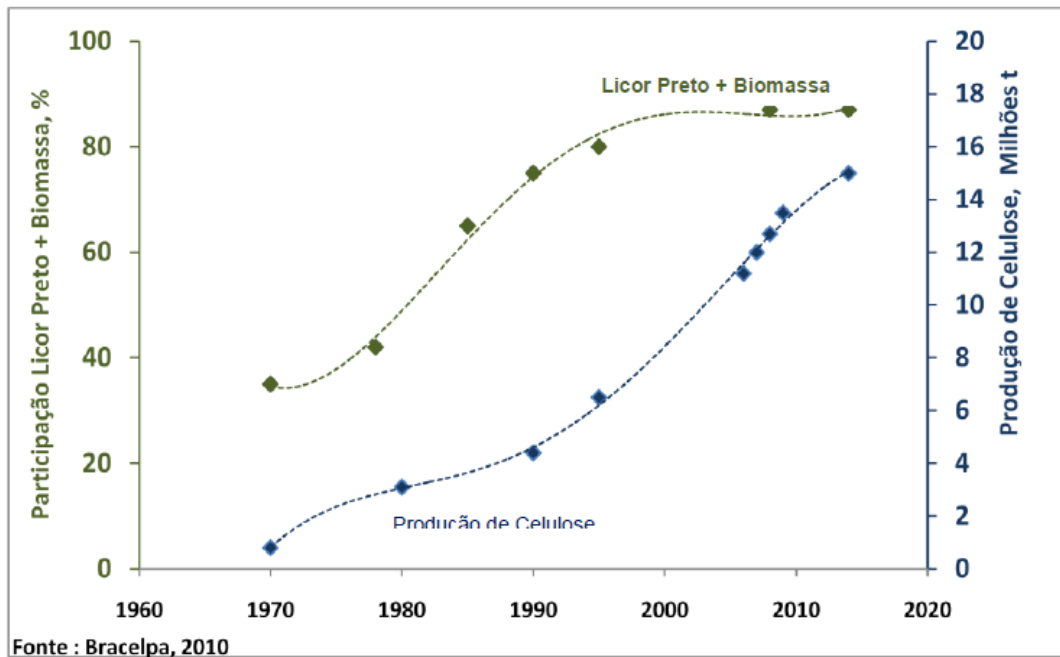


FIGURA 2.18 - Produção de celulose e participação energética do licor preto e da biomassa

Fonte : Bracelpa, 2010

### 2.7.2- Consumo de madeira para energia na indústria de celulose e papel

Segundo a BRACELPA (2008), as indústrias do segmento estão divididas em quatro categorias, a saber:

- **Categoria A** : Indústrias de celulose;
- **Categoria B** : Indústrias de papel;
- **Categoria C** : Indústrias de papel para fins sanitários;
- **Categoria D** : Indústrias Integradas – fabricantes de papel e celulose

As indústrias de celulose (**Categoria "A"**), pela disponibilidade de combustíveis (licor preto e biomassa), tendem a ser autossuficientes em energia elétrica (gerando de 90% a 100% da eletricidade consumida), e as maiores, que respondem por 80% da produção brasileira de celulose do mercado, chegam a produzir e vender excedente de energia elétrica

para as redes locais. O vapor produzido com licor preto nas caldeiras de recuperação responde por cerca de 80% a 100% do consumo na fábrica de celulose, havendo necessidade de complementação em caldeiras convencionais que utilizam biomassa (cascas, resíduos e cavacos gerados de madeira para energia) (VELÁZQUEZ, 2006). O óleo combustível ou gás natural é amplamente utilizado para os fornos de cal, apesar de pesquisas, nos últimos 10 anos, estarem em desenvolvimento para uso de gás proveniente da gaseificação da madeira destinada à produção de energia (STORA CELL SUÉCIA, 2008).

A Figura 2.19, mostra a autossuficiência em vapor com combustíveis oriundos totalmente da madeira de celulose (licor preto, cascas e resíduos de madeira), não sendo, no entanto, autossuficiente em energia elétrica, utilizando cogeração com turbina a extração e contrapressão:

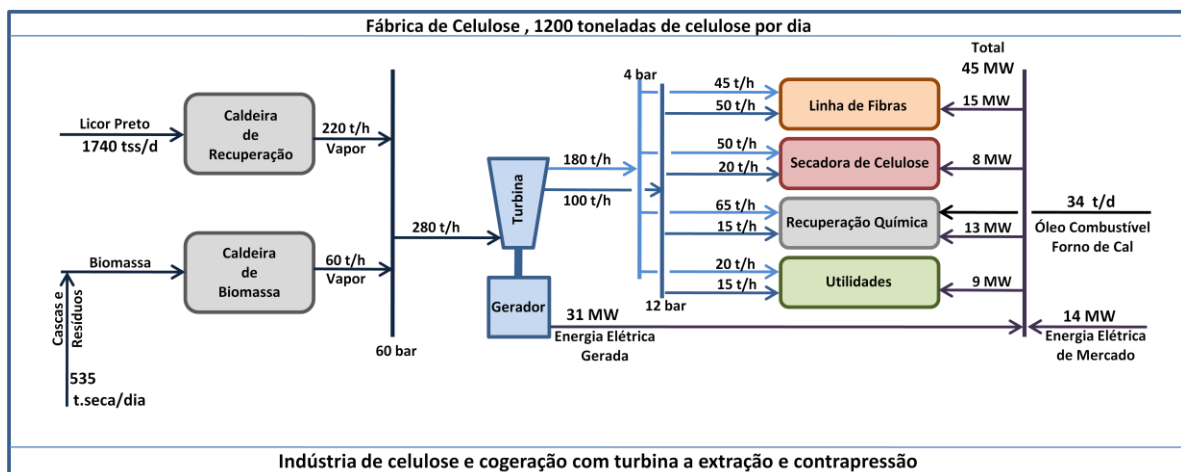


FIGURA 2.19 – Indústria de celulose, 1.200 t/d e cogeração com extração e contrapressão

Fonte : Autor, 2010

A Figura 2.20 ilustra a cogeração com turbina a extração e condensação (CEST), utilizando como combustível complementar a madeira de energia na caldeira de biomassa, tornando a instalação autossuficiente em energia elétrica. A demanda adicional de madeira de energia seria de 1000 m<sup>3</sup>-sólido/dia (25% do volume consumido para a produção de celulose) versus a economia de 14 MW de energia elétrica. Considerando a situação atual das tarifas de energia elétrica, que vêm ultrapassando os R\$ 200,00 por MWh, quando contratado de concessionárias, e o preço de madeira de energia na ordem de R\$ 60,00 por m<sup>3</sup>-sólido, a situação mostra-se satisfatória para o investimento, que poderá levar em consideração a possibilidade de produção adicional de energia elétrica para venda ao mercado, como já

ocorre em indústrias de celulose de maior porte como, por exemplos, nas unidades da Fábria em Aracruz(ES) e Três Lagoas(MS) e da Cenibra em Belo Oriente(MG) :

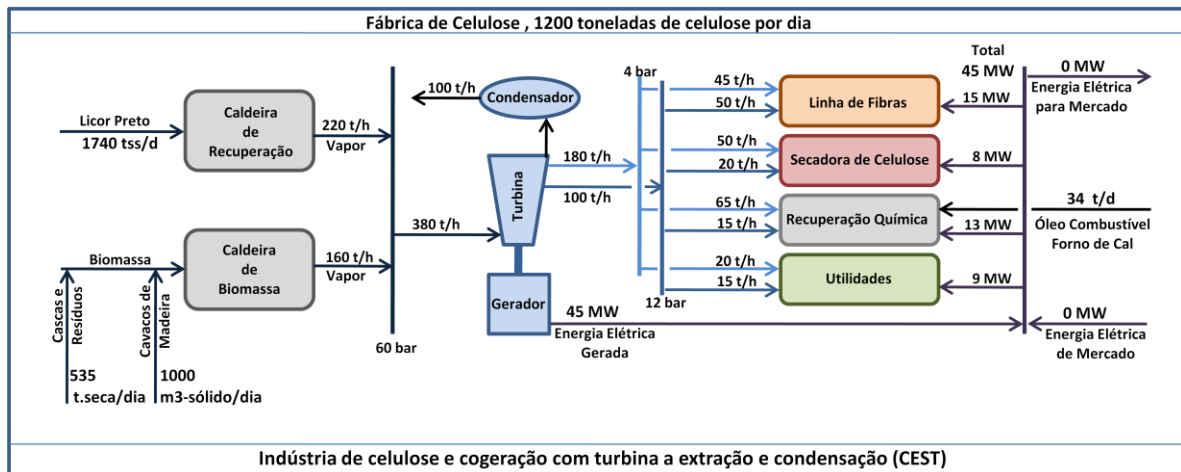


FIGURA 2.20 – Indústria de celulose, 1.200 t/d e cogeração com extração e condensação (CEST)

Fonte : Autor, 2010

Nas indústrias integradas (*Categoria “D”*), em função de a maior parte da celulose ser destinada às máquinas de papel, que exigem cerca de 30% a 40% do consumo total de vapor, as caldeiras de biomassa ou de óleo combustível ou de gás natural complementam de forma mais significativa a demanda de vapor e, em processo de cogeração de energia elétrica com a caldeira de recuperação, respondem por cerca de 50% a 60% do consumo total de energia elétrica das fábricas. Nesta categoria, a das indústrias integradas de celulose e papel, com o crescente aumento das tarifas de suprimento de energia elétrica no mercado, encontra-se o maior potencial de uso da madeira de energia para a instalação de sistemas de cogeração pela substituição total das caldeiras com combustível fóssil por caldeiras de biomassa à alta pressão que em processo do ciclo de condensação e extração de vapor (CEST), podem propiciar a autossuficiência em energia elétrica, além de também poderem utilizar gás proveniente da gaseificação da madeira nos fornos de cal.

A Figura 2.21 abaixo ilustra a distribuição de vapor e energia elétrica para uma fábrica integrada de celulose e papel. Neste caso, a queima de madeira de energia na forma de cavacos é necessária para complementar a produção de vapor na caldeira de biomassa, e cerca de 40% da energia elétrica total consumida é adquirida no mercado, considerando o sistema de cogeração com extração e contrapressão ou, como mostra a Figura 2.22, considerando a instalação de caldeiras de biomassa complementar para o restabelecimento de cogeração com extração e condensação a fim de obter a autossuficiência em energia elétrica, estimando um

adicional de 1.500 m<sup>3</sup>-sólido de madeira para o aumento de geração de energia elétrica em 22 MW:

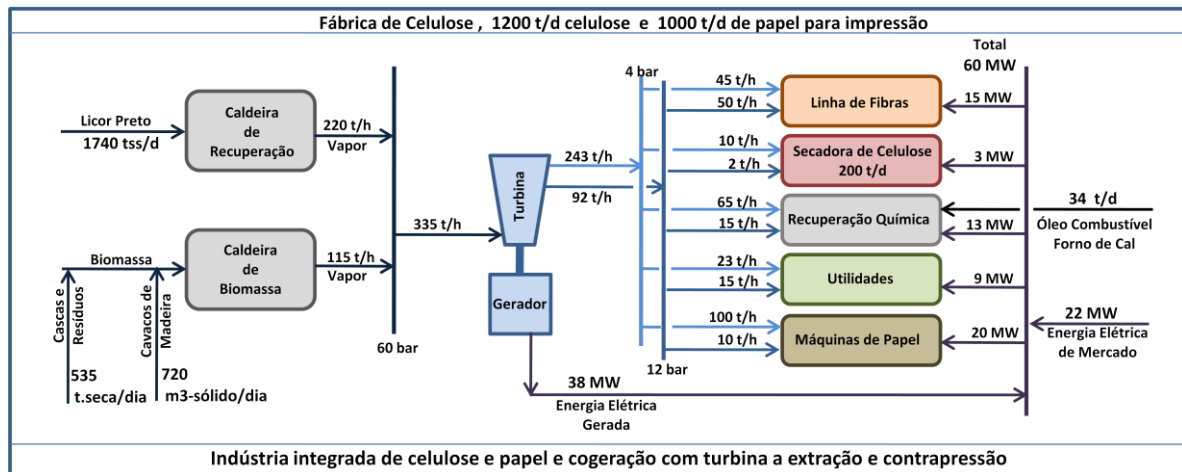


FIGURA 2.21 – Indústria integrada de celulose e papel com 1.200 t/d de celulose e 1.000 t/d de papel, e cogeração com extração e contrapressão.

Fonte : Autor, 2010

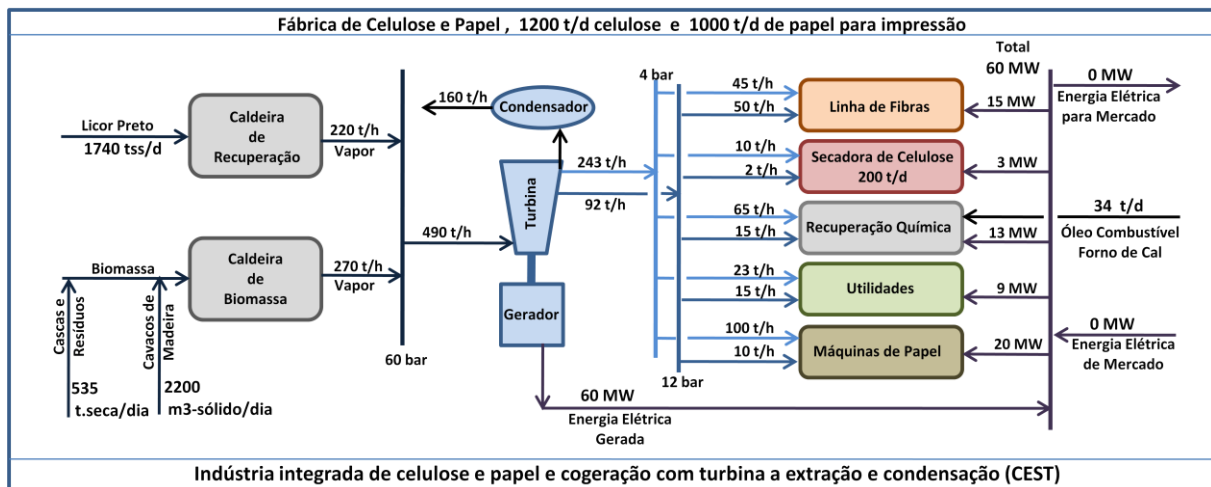


FIGURA 2.22 – Indústria integrada de celulose e papel com 1.200 t/d de celulose e 1.000 t/d de papel, e cogeração com extração e condensação (CEST)

Fonte : Autor, 2010

Nas indústrias de papel (*Categorias “B” e “C”*), a celulose é comprada no mercado e desagregada para uso nas máquinas de papel que, por não possuírem combustível próprio, ainda utilizam, na sua maioria, óleo combustível, gás natural ou lenha em caldeiras de baixa pressão, ou seja, na pressão de utilização da energia térmica, principalmente na etapa de processo de secagem da folha de papel (Figura 2.23). Também, nesta categoria, devido ao aumento das tarifas de aquisição de energia elétrica no mercado, ocorre potencial de



cogeração com a utilização do ciclo de condensação e extração de vapor (CEST). Através da turbina de extração e condensação, ocorre o fornecimento, para a máquina de papel, de energia térmica (vapor) pela extração e o excedente de vapor condensado para realimentar a caldeira, proporcionando a autossuficiência em energia elétrica (Figura 2.24):

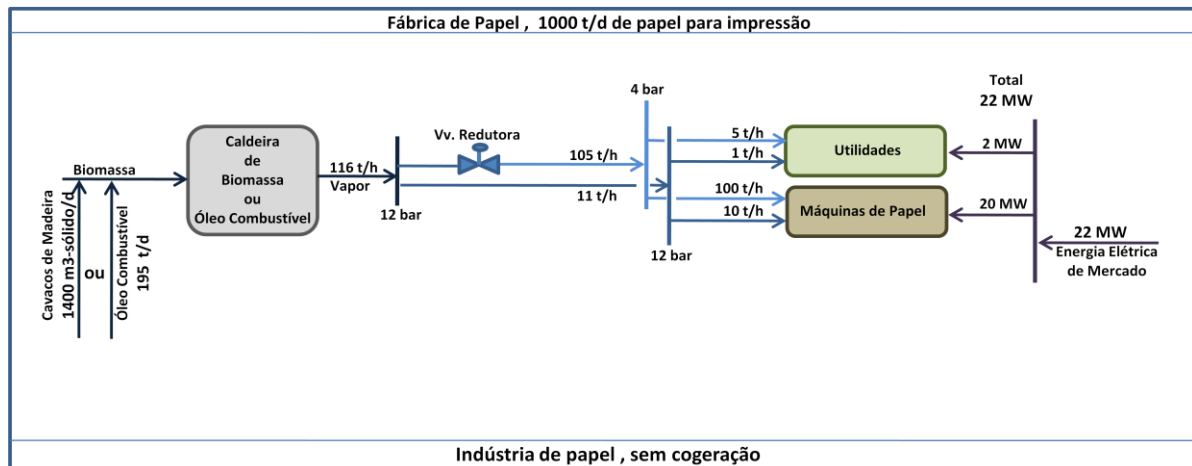


FIGURA 2.23 – Indústria de papel, 1.000 t/dia sem cogeração

Fonte : Autor, 2010

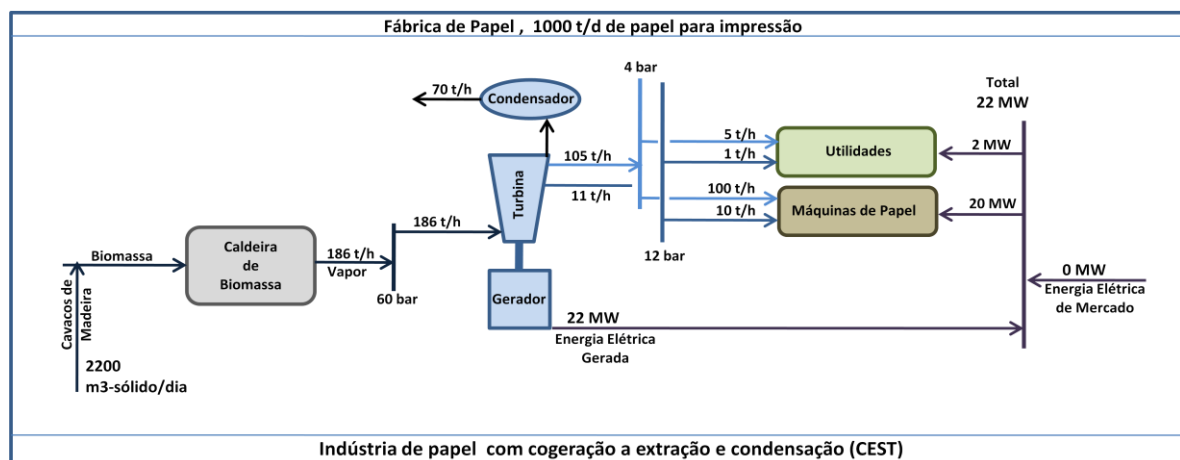


FIGURA 2.24 – Indústria de papel, 1.000 t/dia com cogeração a extração e condensação

Fonte : Autor, 2010

A Tabela 2.4, abaixo, resume a necessidade de consumo de madeira de energia nas diversas categorias do setor de celulose e papel, considerando dois tipos de cogeração, sendo uma com extração e contrapressão e outra com extração e condensação:

Tabela 2.4 – Consumo de madeira de energia nas categorias do setor de celulose e papel

Categoria *	Tipo de Cogeração	Vapor a 60 bar **			Consumo Casca+Resíduos t.seca/d	Consumo Madeira Energia m <sup>3</sup> -sólido/d	Energia Elétrica			
		Consumido t/h	Condensado t/h	Total t/h			Gerada MW	Comprada MW	Total MW	Autosuficiência %
"A" - Ind. Celulose	Cogeração :Extração e Contrapressão	280	0	280	535	0	31	14	45	69
"A" - Ind. Celulose	Cogeração : Extração e Condensação (CEST)	280	100	380	535	1000	45	0	45	100
"D" - Ind. Celulose e Papel	Cogeração :Extração e Contrapressão	335	0	335	535	720	38	22	60	63
"D" - Ind. Celulose e Papel	Cogeração : Extração e Condensação (CEST)	335	160	490	535	2200	60	0	60	100
"B" - Ind. de Papel	Sem cogeração (pressão vapor a 12 bar)	116	0	116	0	1400	0	22	22	0
"B" - Ind. de Papel	Cogeração : Extração e Condensação (CEST)	116	70	286	0	2200	22	0	22	100

\* Produção de 1200 t/d de celulose e 1000 t/d de papel

\*\* Caldeira de recuperação queimando 1720 tss/d e gerando 220 t/h de vapor

Fonte : Autor, 2010

Para fins de cálculos de estimativas de retorno do investimento, compara-se o acréscimo de consumo de madeira de energia com a redução de compra de energia elétrica ao longo do tempo. Com o valor do investimento, normalmente na caldeira de biomassa à alta pressão e na turbina de extração e condensação, calcula-se, no valor atual, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno do investimento. Com base nessas informações e no fluxo de caixa disponível ao programa capital anual da empresa, decide-se pela implantação ou não do projeto.

Atualmente, dois grandes fatores determinam a sustentabilidade das decisões no âmbito energético para as instituições. O primeiro deles, **segurança energética**, relacionado a uma conjunção de oferta e fornecimento confiáveis, que envolve a diversidade tanto de fontes como de fornecedores, além da autonomia no acesso aos recursos. O segundo grande ponto é representado pelas forças de reação à **agressão ambiental** ou contra a mudança climática e implica a redução das emissões de gases de efeito estufa, bem como a implantação de sistemas eficientes de produção de energia. A ampliação da oferta de biocombustíveis e a utilização de “energias limpas”, como a nuclear, para suprir a demanda de eletricidade atendem a esse critério, incluindo segurança energética e utilização de alternativas com baixo conteúdo de carbono (ERNST & YOUNG, 2008).

### 3. DESCRITIVO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CELULOSE E PAPEL

Para um melhor entendimento do modelo estrutural, base do modelo matemático desenvolvido no Capítulo 6, neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre o estado da arte do processo de fabricação de celulose tipo *Kraft*, incluindo as áreas da Linha de Fibras, Recuperação Química e Utilidades.

O processo *Kraft* de produção de celulose tem como função dissolver e extrair a lignina da madeira, com o objetivo de liberar as fibras com o mínimo de degradação dos carboidratos (celulose e hemicelulose).

O processo, como mostram as Figuras 3.1 e 3.2, pode ser dividido em:

- ➔ **Linha de Fibras**
- ➔ **Recuperação**
- ➔ **Utilidades**
- ➔ **Máquina de Papel**

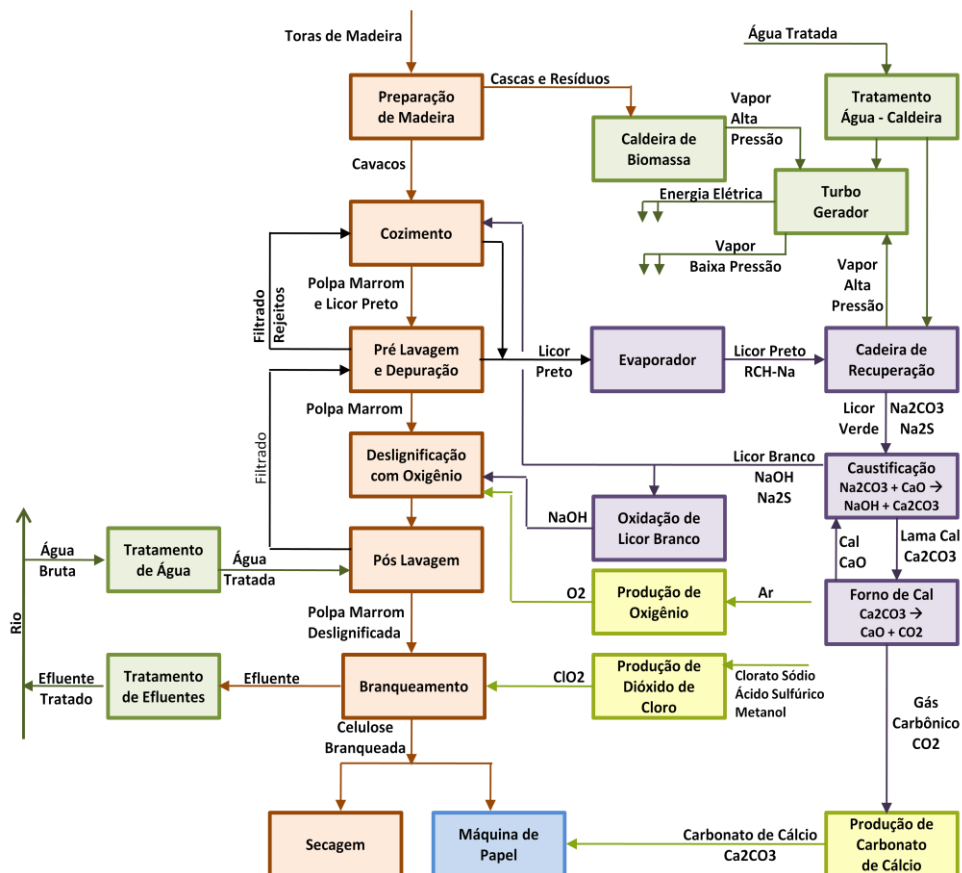


FIGURA 3.1 – Visão Geral do processo Kraft de produção de celulose

Fonte : IPT, 1988 ; Autor, 2010

A **linha de fibras** é composta dos processos: preparação da madeira, cozimento, pré-lavagem e depuração, deslignificação com O<sub>2</sub> e pós-lavagem, branqueamento e secagem e enfardamento da celulose. Também possui a planta química de produção de dióxido de cloro e armazenagem de peróxido de hidrogênio e soda cáustica para utilização no branqueamento.

O **processo de recuperação química** compõe-se de: evaporação e *stripping*, caldeira de recuperação, caustificação e forno de cal fornecendo CO<sub>2</sub> para produção de carbonato de cálcio destinado à utilização no papel. Possui também armazenagem e preparação de enxofre e soda cáustica *rayon* para reposição das perdas de sódio e enxofre no ciclo de recuperação química.

Na área de **utilidades** tem-se as seguintes divisões: tratamento de água, tratamento de efluentes, desmineralização de água para caldeiras, caldeira de biomassa, caldeira a óleo, turbinas e geradores, compressores e distribuição de ar comprimido e distribuição de energia elétrica e vapor.

A área de **máquina de papel** consome as fibras para formação do papel com a energia produzida nas áreas de utilidades e de recuperação. Como este setor não se relaciona diretamente com este trabalho, esta seção não será detalhada.

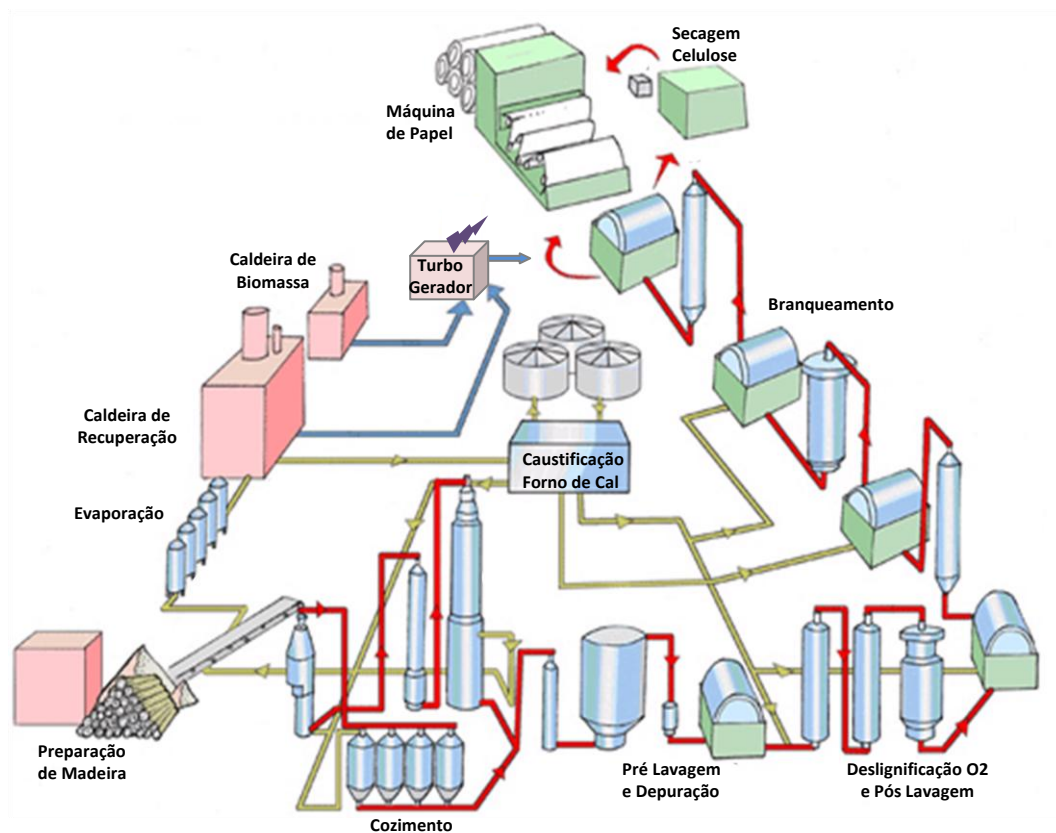


FIGURA 3.2 – Ilustração do processo de fabricação de celulose e papel.

Fonte :KPB Sweden, 2004

### 3.1 – Linha de Fibras

#### 3.1.1- Preparação de Madeira

O setor de preparação de madeira, ilustrado na Figura 3.3, tem como função receber as toras de madeira, normalmente com 2 a 4 metros de comprimento, efetuar o descascamento das toras com cerca de 90% a 95% de eficiência de descasque, cuja operação é realizada no tambor rotativo descascador, onde, com a fricção entre as toras, ocorre o **descascamento**. As cascas são retiradas por fendas no tambor descascador e nos rolos aceleradores, instalados entre as correias transportadoras após o tambor e antes do picador. As cascas são direcionadas a uma correia transportadora que se dirige ao picador de cascas, as quais, depois de trituradas, são encaminhadas à pilha ou ao silo de cascas, para serem utilizadas na queima na caldeira de biomassa.



FIGURA 3.3 – Ilustração do setor de preparação de madeira

*Fonte : Andritz, 2008*

As toras descascadas são encaminhadas por correia transportadora ao picador, que produz cavacos com espessura de 4 mm a 6 mm e tamanho de 24 mm a 26 mm, especificações necessárias para promover a adequada penetração de licor branco para impregnação dos cavacos no setor de cozimento. A **picagem** é realizada em picador com conjunto de 8 a 16 facas rotativas, cuja duração é de 8 a 12 horas, onde a altura da faca e o ângulo de corte determinam o tamanho predominante dos cavacos. Após a picagem, em processo contínuo, os cavacos são transportados em correias para a **peneiragem** de cavacos, onde são rejeitados os finos, lascas e os cavacos grandes (> 12 mm de espessura), sendo estes encaminhados a correia de cascas. Os cavacos aceitos, com espessura de 4 a 8 mm, são encaminhados à pilha de cavacos, normalmente com tamanho correspondente à **estocagem** de

3 a 8 dias de suprimento da fábrica de celulose. Da pilha de cavacos, estes são alimentados ao processo de cozimento por roscas dosadoras, que tem por função manter constante o tamanho do silo de cavacos do digestor conforme a demanda de produção. A Figura 3.4 ilustra a picagem e o armazenamento de cavacos:



FIGURA 3.4 – Esquema da picagem e da estocagem de cavacos

Fonte : Andritz, 2008

### 3.1.2- Cozimento

No processo Kraft, os cavacos são tratados em vasos de pressão, denominados **digestores** (Figura 3.5), para possibilitar atingir temperaturas da ordem de 145° a 180°C, dependendo do tamanho do digestor e da produção de celulose pretendida (tempo de retenção ou tempo de cozimento de 1 a 5 horas, Fator H), em processo batelada ou contínuo. O objetivo deste processo químico é dissolver a lignina da lamela média e da parede da fibra, com um mínimo de degradação dos carboidratos, ou seja, da celulose e hemicelulose. Para atuar na dissolução da lignina durante o cozimento, é utilizado o licor branco, tendo-se como álcali total a constituição de soda cáustica-NaOH (60%), sulfeto de sódio-Na<sub>2</sub>S (25%) e carbonato de sódio-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (15%). A parte ativa no cozimento, ou seja, o álcali ativo do licor branco é composto da soda cáustica e do sulfeto de sódio, que efetivamente reagem com a lignina, sendo o carbonato de sódio remanescente da reação incompleta do licor verde a licor branco no processo de caustificação (item 3.2.4). A razão álcali ativo/álcali total é denominada atividade do licor branco e corresponde a 82% a 86%. Quanto maior a atividade do licor branco, menor a quantidade de carbonato de sódio que é inerte no licor branco para a reação de deslignificação durante o cozimento. A função do sulfeto de sódio é evitar uma alta concentração de soda cáustica na fase de impregnação e inicial do cozimento, o que levaria a uma maior degradação inicial dos carboidratos. O teor de sulfeto de sódio no licor branco é

denominado sulfidez e esta, por sua vez, varia de 20% a 25% no álcali total. Sendo assim, à medida que a soda cáustica vai sendo consumida e sua concentração vai se reduzindo, o sulfeto de sódio vai se dissociando e se transformando em soda cáustica, promovendo um cozimento mais uniforme e menos drástico para os carboidratos, conforme a reação 3.1.



Portanto, quanto maior a sulfidez, menor a degradação da celulose e hemicelulose, pois o cozimento tende a ocorrer de forma mais amena e uniforme. Em contrapartida, a formação de ácido sulfídrico-H<sub>2</sub>S associado com mercaptanas da madeira provoca forte odor no ambiente, e esses gases devem ser coletados e tratados com destino final de queima na caldeira, no forno de cal ou incinerador.

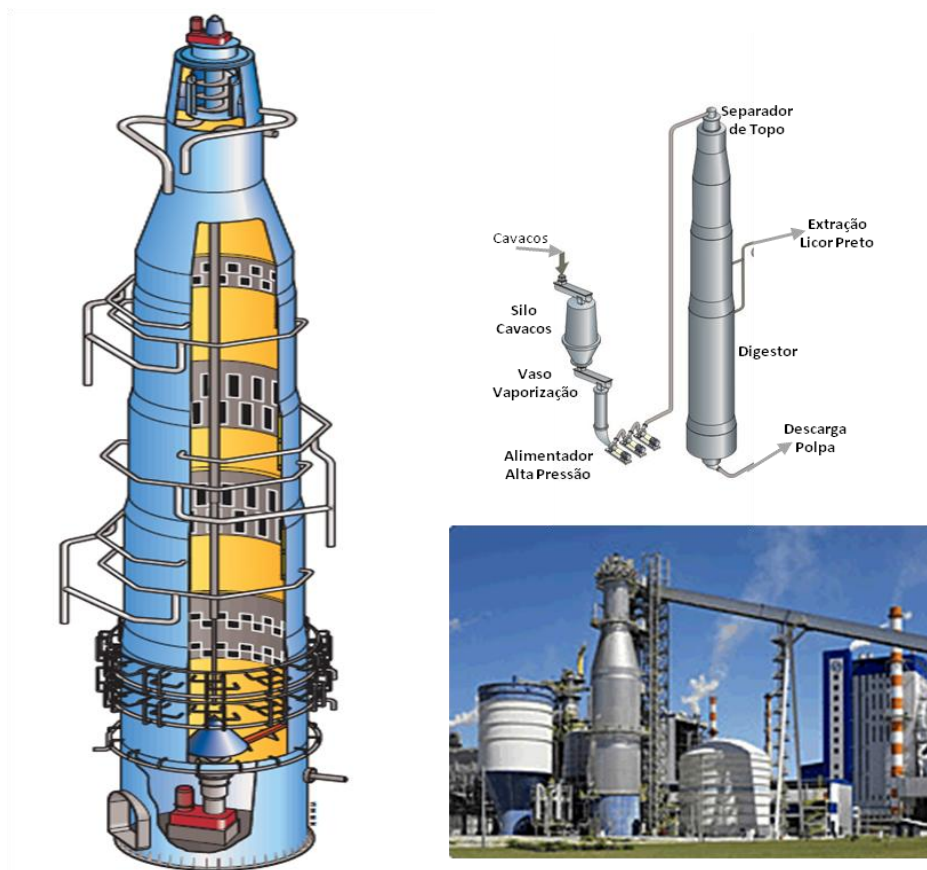


FIGURA 3.5 – Ilustrações do digester contínuo

Fonte : Kvaerner, 2003

O cozimento, ou seja, o processo de deslignificação ocorre em três fases distintas. Etapa Inicial (*Holding time*), como uma etapa rápida com baixa solubilização da lignina (20% a 25%), grande dissolução das hemiceluloses, durante a qual cerca de 50% do álcali ativo é consumido em reações de neutralização dos ácidos da madeira (ácido acético). Etapa Principal (*Bulk phase*), durante a qual cerca de 70% a 80% da lignina se dissolve em função das

concentrações de íons  $\text{OH}^-$  e  $\text{HS}^-$  e da temperatura, com aumento considerável na concentração de sólidos no licor preto (lignina dissolvida), o que implica em redução na velocidade de deslignificação. Etapa Residual, quando ocorre grande decréscimo nos carboidratos, alto consumo de álcali ativo e baixa taxa de deslignificação, o que não é desejável. É uma etapa lenta, pouco seletiva e ocorre diminuição da viscosidade (degradação da celulose) em função da alta concentração de sólidos no licor de cozimento. Após esta etapa, atinge-se um grau de cozimento, medido através do nº Kappa (teste de titulação com permanganato de potássio), da ordem de 17 a 20, com um residual de álcali ativo de 5 g/l a 10 g/l para evitar reprecipitação de lignina na superfície das fibras. Ao final do cozimento, no fundo do digestor, ocorre a diluição com licor preto fraco, oriundo da pré-lavagem e da descarga da polpa no tanque de descarga, onde, com a despressurização da polpa, as fibras se separam umas das outras e ficam suspensas na solução de licor preto fraco, normalmente em consistências de 10% a 12% em peso.

As etapas descritas devem ser cuidadosamente controladas para se obter o máximo de rendimento no processo para o nº Kappa desejado, o que se consegue com as novas tecnologias de digestores (*losolids, compact cooking, superbatches, RDH, etc*), que permitem a adequada distribuição de licor branco e a substituição de licor preto concentrado por diluído em baixas temperaturas (menores que  $150^\circ\text{C}$ ) e longos tempos de cozimento (4 a 6 horas), maximizando o rendimento (maior que 52%) e a viscosidade da polpa (maior que 70 cp) para o nº Kappa especificado, normalmente na ordem de 17 a 19, que permitirá menor consumo de químicos com a lignina residual das fibras nos processos subsequentes de deslignificação com  $\text{O}_2$  e branqueamento com  $\text{ClO}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Esses processos permitem, ainda, obter uma polpa com menor teor de ácidos hexenurônicos que também está contido na medição do nº Kappa, dificultando as reações de deslignificação com oxigênio, ou seja, aumentando a branqueabilidade da polpa.

Do ponto de vista de consumo de energia, é importante o *flasheamento* do licor preto extraído das peneiras de extração de licor preto do digestor, de onde, com temperaturas da ordem de  $150^\circ\text{C}$  ou mais, esse licor, antes de ser enviado aos tanques de armazenagem que alimentam o processo de evaporação, é enviado aos tanques de *flash*, onde o vapor recuperado por despressurização é utilizado na vaporização dos cavacos no silo e no vaso de vaporização do digestor para substituição do ar contido nos cavacos por água, facilitando a penetração do licor branco neles.



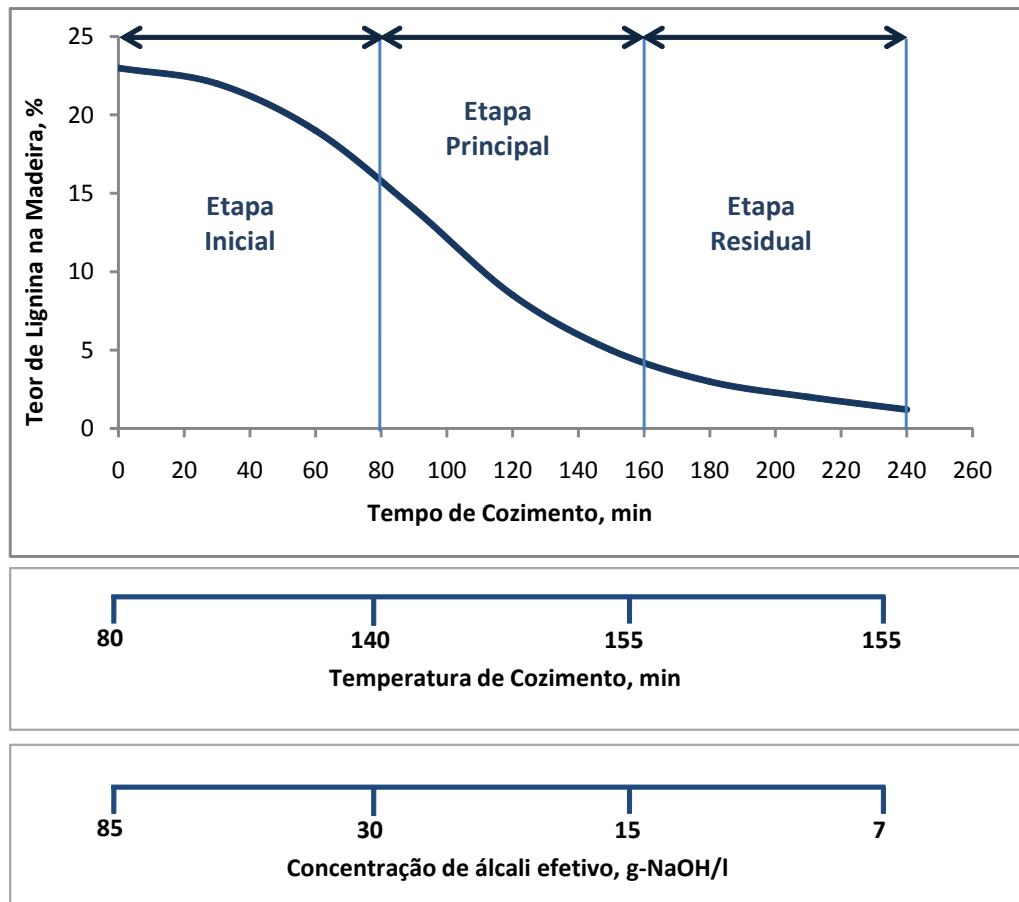


FIGURA 3.6 – Perfil do cozimento em digestor contínuo

Fonte : Autor, 2008

A Figura 3.6 ilustra o perfil da cinética de deslignificação, em termos de redução teor de lignina na madeira (ou nº Kappa da polpa) em função do tempo de reação, da temperatura e do perfil de álcali efetivo (proporcional ao álcali ativo). O perfil de sólidos contidos no licor preto ao longo do cozimento também é de interesse, pois afeta a cinética de reação e a seletividade do processo de deslignificação.

De forma geral, alguns princípios estão desenvolvidos para se obter o máximo de rendimento no processo de cozimento, no projeto das novas tecnologias (GOMIDE, 2002), ilustrado na Figura 3.7.

- A concentração de íons hidróxido deveria ser menor no começo do estágio inicial do cozimento, e estabilizada durante o cozimento.
- A concentração de íons hidrossulfeto deveria ser tão alta quanto possível inicialmente e ao começar o processo de deslignificação principal.
- A temperatura deveria ser mantida baixa, especialmente próximo do início e término da fase de deslignificação principal.
- As concentrações de lignina dissolvida e de sódio deveriam ser baixas, especialmente na proximidade da fase de deslignificação residual.

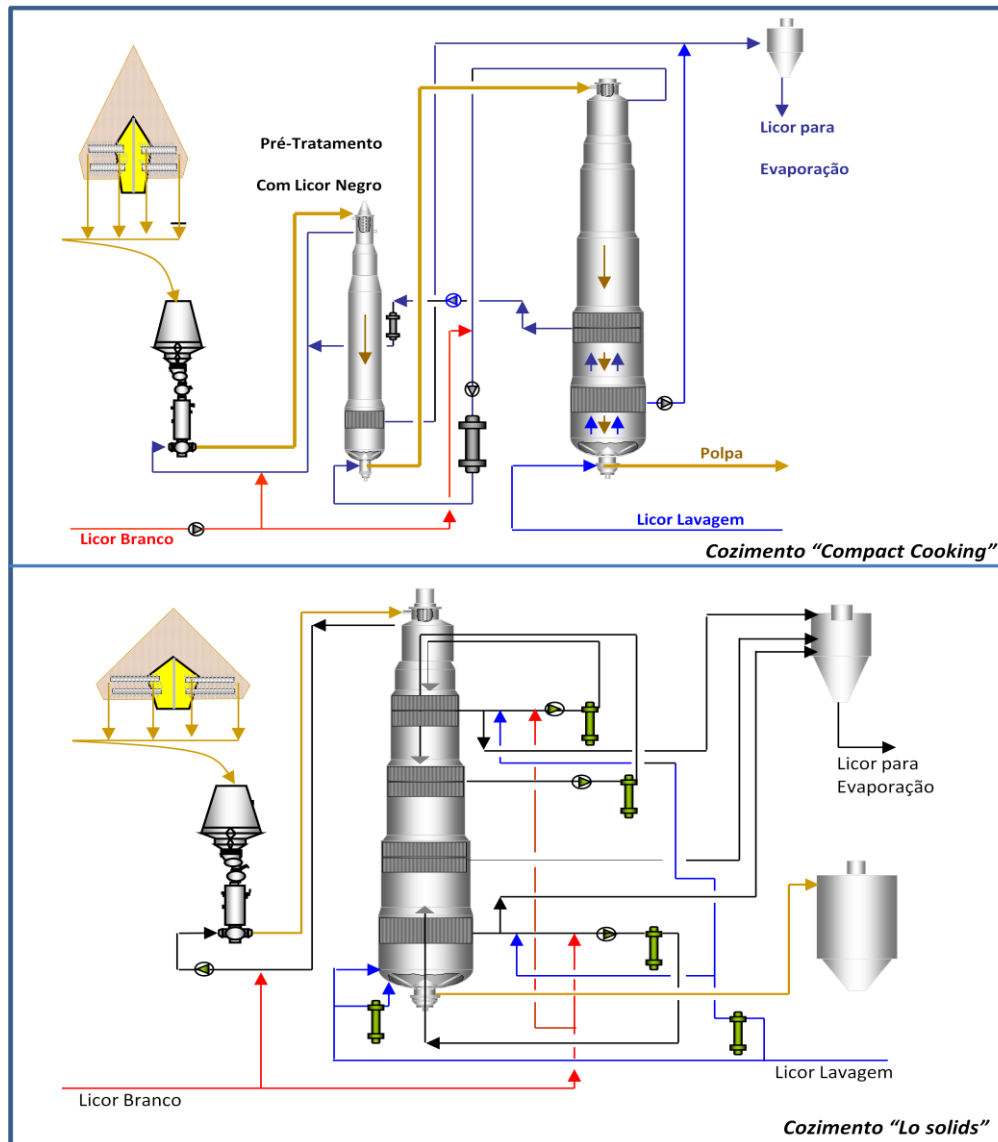


FIGURA 3.7 – Ilustração do cozimento “Compact Cooking” e “Lo solids”

Fonte : Metso e Andritz, 2002

### 3.1.3- Pré-Lavagem, Depuração, Deslignificação com O<sub>2</sub> e Pós-Lavagem

Apesar de grande parte de o licor preto ser extraído diretamente do digestor, uma porção desse licor é descarregado no tanque de descarga do digestor, com aproximadamente 10% de sólidos com a polpa em suspensão na consistência também de 10%. Esses sólidos contidos no licor preto “fraco” em contato com a suspensão de polpa deverão, pelo processo de pré-lavagem, ou seja, antes de a polpa alimentar a deslignificação com O<sub>2</sub>, ser reduzidos para a ordem de 2,5% a 3,0%, a fim de permitir a reação de deslignificação com soda cáustica e oxigênio com os constituintes do n° Kappa, por cerca de uma hora a 95°C. Caso a polpa não seja pré-lavada, a soda cáustica e o oxigênio adicionados, de 15 kg a 25 kg/t.celulose, serão consumidos pelos sólidos não oxidados do licor preto, com consequente perda de eficiência na reação de deslignificação com esses elementos.

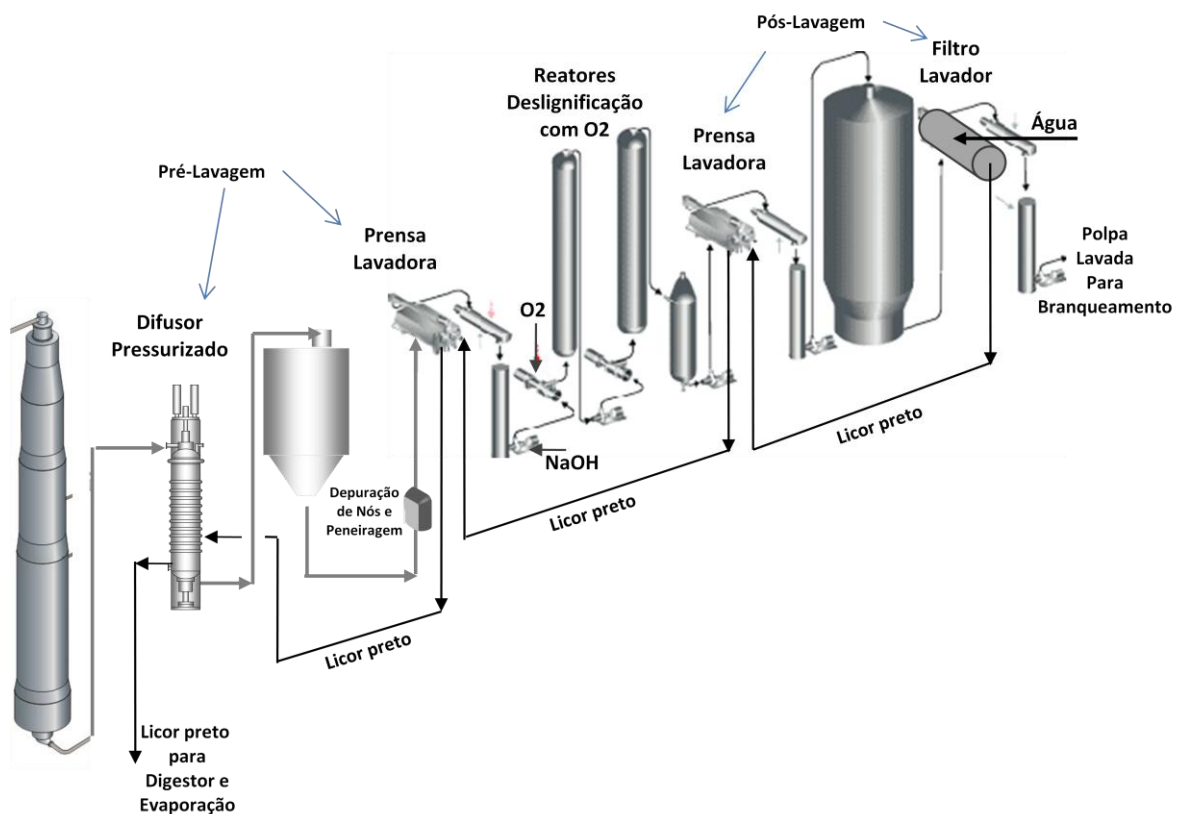


FIGURA 3.8 – Processos de pré-lavagem, depuração, deslignificação com O<sub>2</sub> e pós-lavagem

Fonte : Metso e Andritz, 2005

A redução do n° Kappa (constituído de lignina e ácidos hexenurônicos) é de 35% a 45%, sendo mais efetivo quanto maior o teor de lignina em relação ao teor de ácidos hexenurônicos, que praticamente não são removidos nesta etapa. Para um n° Kappa 17, sendo 9,5 de lignina e 7,5 de HexA's, saindo do cozimento, atingirá um n° Kappa 11, sendo 4 de

lignina e 7 de HexA's após a reação de deslignificação com soda cáustica e oxigênio. Nota-se a pouca efetividade da deslignificação com O<sub>2</sub> na redução de HexA's. Para o caso de polpas com alto teor de lignina como componente do Kappa, recomenda-se a utilização de dois estágios em série de deslignificação com O<sub>2</sub>, pois, neste caso, pode-se atingir até 48% de redução no n° Kappa, proporcionando economia de químicos no processo de branqueamento. Também, o aumento de n° Kappa no digestor de 17 para 19 aumenta o rendimento pelo processo de cozimento, passando a redução do n° Kappa para o processo de deslignificação com O<sub>2</sub>, mais seletivo e mais eficiente quanto maior for o n° Kappa na sua entrada (COLODETTE, 2006).

Após o processo de deslignificação com oxigênio, a polpa é encaminhada ao processo de pós-lavagem a fim de separar o licor preto fraco da polpa, quando se atinge concentrações menores que 0,1% no filtrado do estágio final de lavagem, ou, para melhor controle da qualidade de lavagem, se mede a condutividade do licor contido na polpa, que deve estar no máximo em 1.000 uS/cm, ou a carga de DQO do filtrado contido na polpa da ordem de 5 kg-DQO/t.celulose, para evitar excesso de consumo de químicos no processo de branqueamento pela lignina dissolvida no licor carregado junto com a polpa. Para cada acréscimo de 5 kg-DQO/t.celulose contido no filtrado da polpa ao branqueamento, acrescenta-se cerca de 5 kg-cloro-ativo/t.celulose no consumo de químicos do branqueamento (COLODETTE, 2006).

Equipamentos de lavagem que promovem a lavagem por deslocamento, como difusores, filtros rotativos e prensas lavadoras, são normalmente utilizados.

No último estágio de lavagem, adiciona-se a água de lavagem que, por processo de lavagem por deslocamento, substitui o licor "sujo" por água limpa de fábrica que, em processo contracorrente, é utilizada nos estágios anteriores. Normalmente, adiciona-se cerca de 1,0 m<sup>3</sup> a 2,5 m<sup>3</sup>-água/t.celulose (fator de diluição), observando-se que quanto maior o fator de diluição melhor a qualidade da lavagem (menor condutividade). No entanto, menor será a concentração de sólidos no primeiro estágio de lavagem, provocando maior consumo de vapor no processo de evaporação do licor preto. Portanto, deve-se encontrar o ponto ótimo de fator de diluição considerando os custos de consumo de químicos no branqueamento e de energia térmica (vapor) na evaporação.

As Figuras 3.8 e 3.9 ilustram as etapas desse processo.

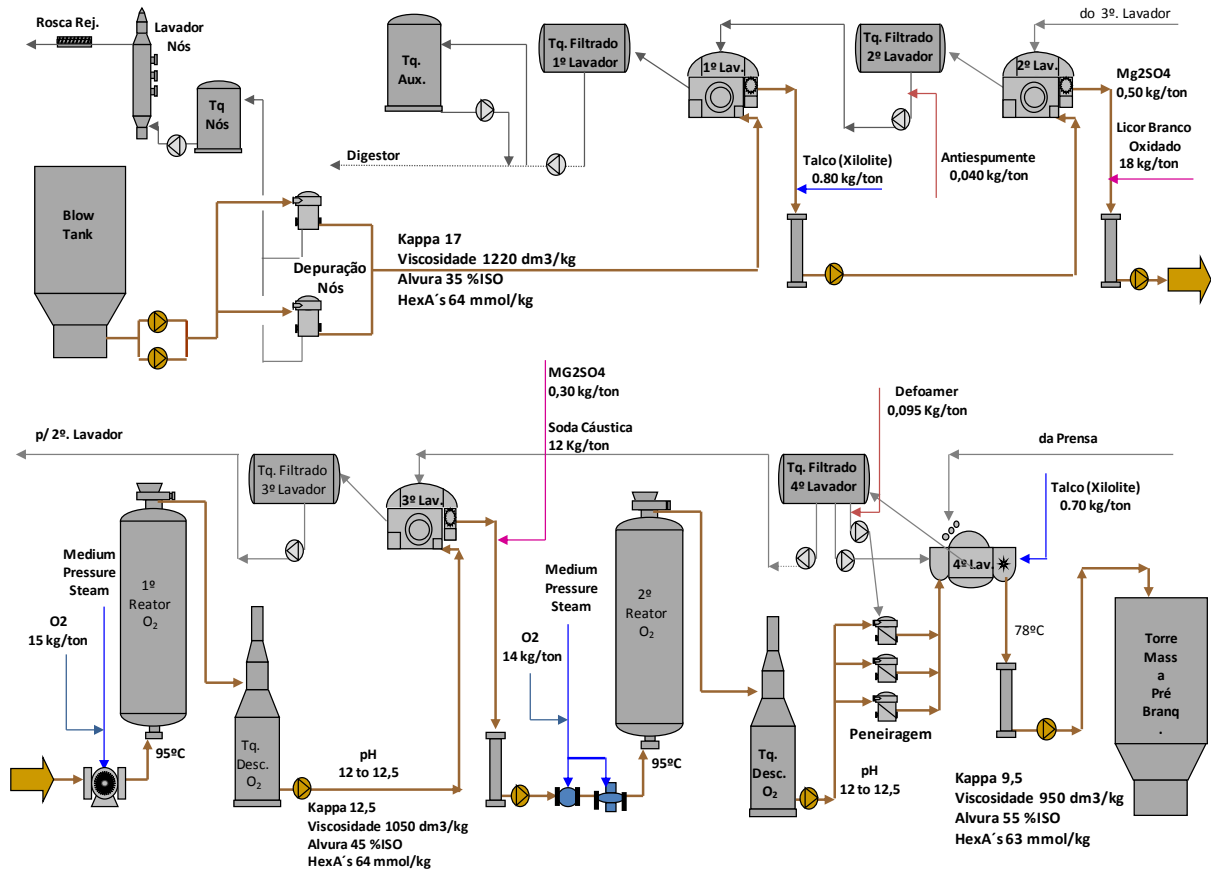


FIGURA 3.9 – Fluxograma de instalação de pré-lavagem, depuração, deslignificação O-O e pós-lavagem

Fonte : IP Brasil, 2008

### 3.1.4- Branqueamento

O objetivo do branqueamento é branquear e limpar a polpa pela remoção de substâncias que absorvem luz. Em polpas químicas, o branqueamento dá-se por remoção de cromóforos, que são os compostos orgânicos que conferem a cor escura à polpa. Os grupos cromóforos originam-se da lignina modificada e de produtos da degradação da lignina, de carboidratos (ácidos hexenurônicos, carbonilas, etc.) e de extrativos da madeira (ácidos resinosos, polifenóis, etc.) e íons metálicos (Fe, Cu, Mn, etc.). Em relação aos componentes da polpa, é desejável que a celulose e as hemiceluloses sejam preservadas; a lignina, que confere cor, seja removida ou descolorida; os extrativos sejam dissolvidos e removidos; e as partículas de madeira (*shives*) sejam eliminadas (COLODETTE, 2002).

A qualidade da polpa branqueada é medida pelas propriedades óticas da, relacionadas com a absorção ou reflexão de luz: cor, alvura, reversão de alvura e opacidade, além de com o nível de degradação dos carboidratos, mensurável pela viscosidade da polpa. Essas propriedades de qualidade da polpa são comparadas com o consumo de químicos dispendido, normalmente expresso em cloro ativo total, onde os químicos utilizados, como o dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ), o ozônio ( $\text{O}_3$ ) e o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ), são convertidos e somados em cloro equivalente e que, juntamente com a soda cáustica ( $\text{NaOH}$ ), compõem o custo de químicos do branqueamento. Este custo e o de energia (vapor e eletricidade), em conjunto, representam a maior parte do custo de branqueamento. A eficiência de branqueamento é mensurada comparando as propriedades de qualidade com o custo de químicos e energia dispendido.

O branqueamento é efetuado normalmente em sequências de três a cinco estágios, dependendo do nível de alvura desejado (90% a 92% ISO) e dos químicos utilizados (ácido sulfúrico ou clorídrico, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, oxigênio e ozônio). **Cada estágio** compõe-se de **misturador de vapor** para atingir a temperatura especificada, **misturador de químico** para promover a homogeneização e contato das fibras com o reagente, **torre de reação** para propiciar o tempo necessário para os reagentes atuarem e **lavador** para remover o material já oxidado e expor novas superfícies das fibras à ação dos químicos.

Cada estágio de branqueamento é identificado por uma notação característica, apresentada a seguir:

**A** : Estágio Ácido , ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ou clorídrico ( $\text{HCl}$ )

**O** : Estágio Oxigênio , oxigênio ( $\text{O}$ )

**D<sub>0</sub>** : Estágio Inicial Dióxido , dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ )

**D<sub>HT</sub>** : Estágio Dióxido a quente

**D** : Estágio Dióxido , dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ )

**Z** : Estágio Ozônio , ozônio ( $\text{O}_3$ )

**P** : Estágio Peróxido , peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ )

**E** : Estágio Extração , soda cáustica ( $\text{NaOH}$ )

**EOP** : Estágio Extração com Oxigênio e Peróxido

**PO** : Estágio Peróxido Pressurizado

Várias sequências estão atualmente instaladas na indústria de celulose no Brasil, sendo possível citar:

**O-O-ZD-EOP-D; O-A-Z-D-P; O-D<sub>HT</sub>-EOP-D; O-A/D-EOP-D-P; OO-A/D-EOP-D-D; D<sub>HT</sub>-EOP-D<sub>N</sub>D; O-D-EOP-D; O-D<sub>HT</sub>-EOP-D-P .**

As Figuras 3.10 e 3.11 ilustram duas instalações de branqueamento.

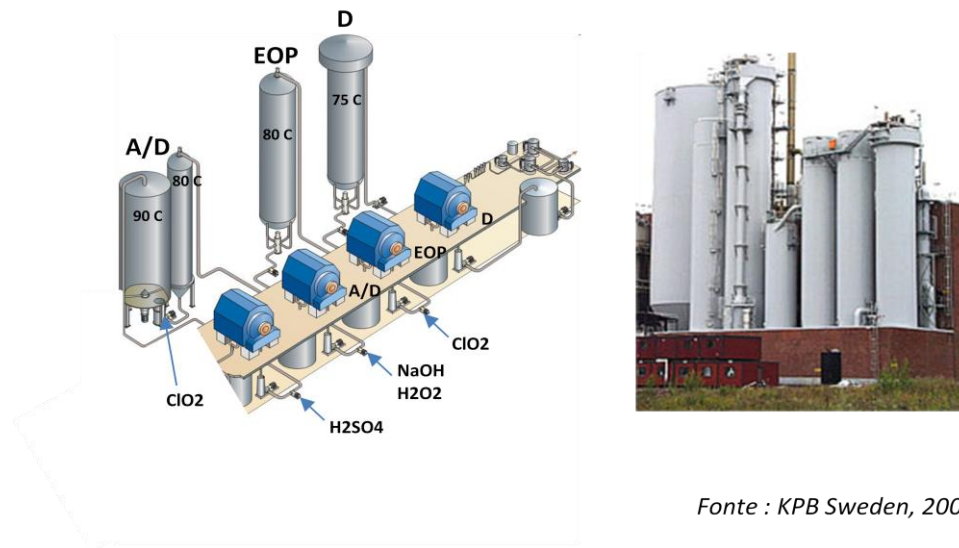


FIGURA 3.10 – Ilustração de instalação de branqueamento

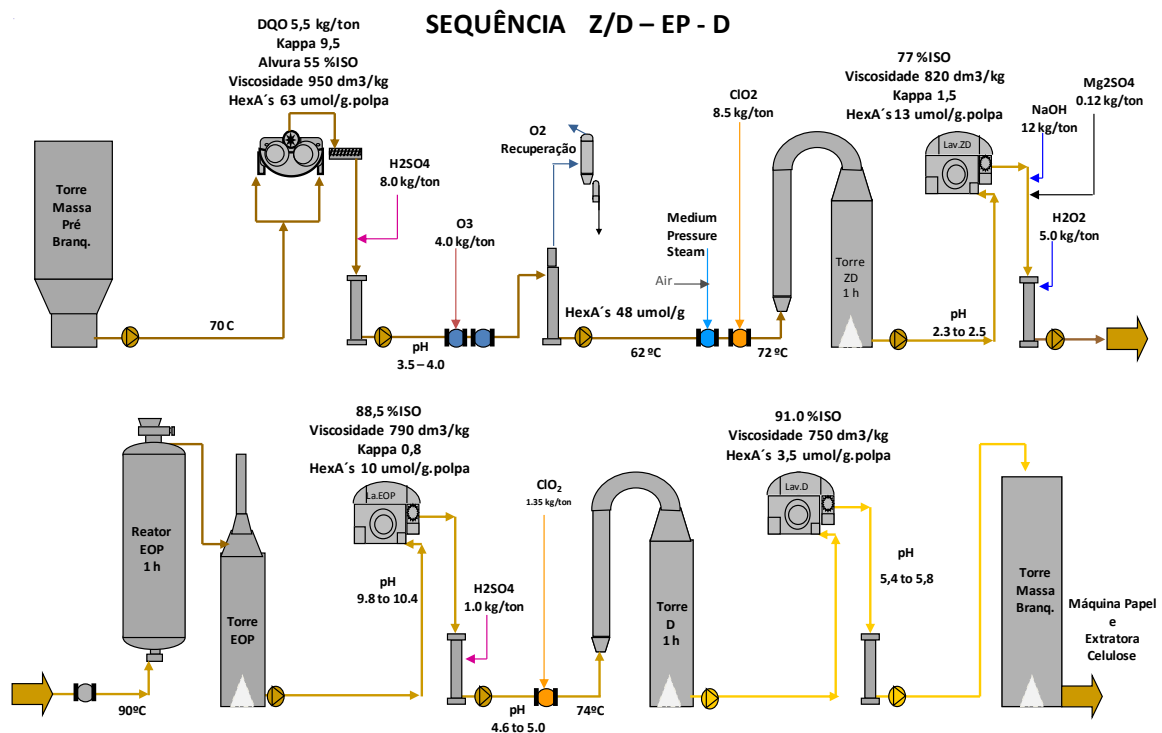


FIGURA 3.11 – Fluxograma de instalação de branqueamento.

*Fonte : IP Brasil, 2008*

Segundo Colodette et al. (2006), para a seleção da melhor tecnologia de branqueamento, os fatores determinantes são o consumo de produtos de químicos e energia, o rendimento, o nível e a estabilidade da alvura, a resistência e a refinabilidade da celulose, a carga e a tratabilidade do efluente gerado, o consumo de água e o teor de organoclorados. O branqueamento ECF (*Elemental Chlorine Free*) é dominante nas instalações no Brasil, mas há variações consideráveis pela qual o branqueamento ECF é praticado para polpa *Kraft* de eucalipto. A sequência OD(EOP)DD parece predominar, mas há variações, particularmente no modo de aplicação de dióxido de cloro no primeiro estágio. Em plantas mais antigas, o primeiro estágio de cloro têm sido substituído por dióxido de cloro ou ozônio, apesar de o uso de ozônio estar em questionamento dado o alto consumo de energia elétrica requerida. Quanto ao tipo de tecnologia para uso de dióxido de cloro no primeiro estágio, observa-se atualmente pouca diferença entre elas (D<sub>0</sub>, 70°C, 30 min; A/D, 90/80°C; 60/30 min; D<sub>HT</sub>, 85°C, 60 min) no consumo de cloro ativo total, sendo que a utilização de dióxido a quente a mais efetiva em polpas com maior branqueabilidade. A extração alcalina reforçada com peróxido de hidrogênio (EP), sem o uso de oxigênio, é suficiente dado o baixo n° Kappa neste estágio (1,0 a 3,0) e basicamente composto de HexA's, não reagente com oxigênio.

Colodette também comenta que uma sequência de três estágios D(EP)D é suficiente para branquear polpas de eucalipto à alvura de 89% a 90%ISO. A inclusão de um quarto estágio é desejável para polpas de alta alvura, > 91%ISO, destinadas a fabricação de papel para impressão, sendo o mais comum um estágio adicional D ou P para maior estabilidade de alvura após armazenagem e no papel produzido (reversão de alvura menor que 2%ISO).

A branqueabilidade da polpa de eucalipto, medida pelo consumo de cloro ativo total por unidade de n° Kappa (Fator Kappa), ainda é motivo de muita discussão e pesquisas e ainda não estão claramente esclarecidas as causas das diferenças no consumo de cloro ativo, que varia desde 3,2% a 6,0% para um n° Kappa de 10,0 e DQO de 5,0 kg/t.celulose no filtrado da polpa. As diferenças na madeira e na tecnologia de polpação que podem atuar nas diferenças da estrutura da lignina residual na polpa parecem estar influenciando na branqueabilidade mais que o próprio teor de HexA's, conforme estudos de laboratório e comparação entre fábricas de celulose (COLODETTE ET AL., 2006).



### 3.1.5- Secadora de Celulose

Nesta etapa, o objetivo é formação, secagem, corte e embalagem de folhas de polpa de celulose, configurando os fardos de celulose.

A polpa armazenada na torre de estocagem após o branqueamento é bombeada para o setor de secagem, passando primeiramente por um sistema de depuração pressurizada, que tem como função a remoção de eventuais impurezas ainda presentes na polpa, tais como resinas, incrustações, ferrugens, etc. A Linha de Secagem, propriamente dita, começa com a seção de formação e sistemas de prensagem, a qual atinge um teor seco de 55% antes de entrar no túnel secador, onde troca calor com o ar quente soprado, atingindo teor seco da ordem de 90%. De 0,5 a 1,0 ton.vapor/t.polpa é dispendido no processo de secagem da celulose. Na saída do secador, a folha é cortada em folhas de 67 cm x 92 cm com gramatura da ordem de 600 g/m<sup>2</sup> a 1.000 g/m<sup>2</sup>. Após o corte, as folhas são empilhadas para formar fardos de 250 kg, que são transportados por esteiras até a linha de embalagem, onde serão prensados e embrulhados com folhas maiores (capas) e amarrados individualmente com arames após receberem a identificação de lote por sistema *ink jet*. Um bloco de oito fardos é amarrado para formar uma unidade de movimentação de 2 toneladas. Os blocos são, então, encaminhados para armazenagem e expedição. A Figura 3.12 ilustra o *lay-out* da instalação de uma máquina secadora de celulose.

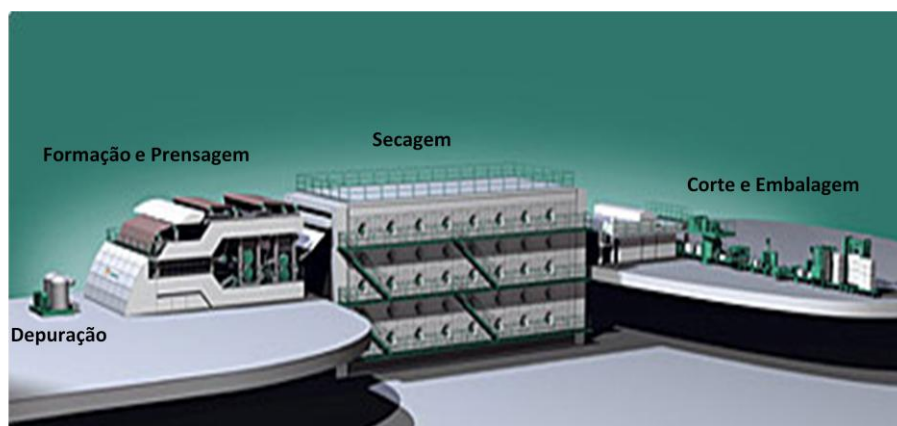


FIGURA 3.12 – Ilustração da máquina de secagem da polpa de celulose

Fonte : Metso, 2007

### 3.1.6- Variáveis do processo da linha de fibras

Após exposição do Capítulo-2 e dos itens 3.1.1 a 3.1.5 do Capítulo 3, são apresentadas abaixo as principais variáveis da área da Linha de Fibras que influem no consumo específico de madeira e insumos energéticos.

<i>TS-Biom</i>	<i>Teor seco da biomassa ou resíduo</i>
<i>TS-Cav</i>	<i>Teor seco dos cavacos após o processo de picagem</i>
<i>TS-Mad</i>	<i>Teor seco da madeira recebida</i>
<i>TR-Úmido</i>	<i>Teor de resíduos, base úmida</i>
<i>TR-Seco</i>	<i>Teor de resíduos, base seca</i>
<i>CEM</i>	<i>Consumo específico de madeira</i>
<i>DB</i>	<i>Densidade básica da madeira</i>
<i>DA</i>	<i>Densidade aparente da madeira</i>
<i>Res.Ger</i>	<i>Geração específica de resíduos</i>
<i>DESC</i>	<i>Eficiência de descascamento</i>
<i>CAE</i>	<i>Porcentagem de álcali efetivo sobre madeira base seca</i>
<i>ESPCAV</i>	<i>Espessura média do cavaco produzido</i>
<i>CAA</i>	<i>Carga de álcali ativo sobre madeira seca</i>
<i>Res.Alc</i>	<i>Residual de álcali na extração de licor preto</i>
<i>Kg.AA-NaOH/ADt</i>	<i>Carga de álcali ativo ao cozimento</i>
<i>KPADIG</i>	<i>Nº kappa do digestor</i>
<i>TACHEX</i>	<i>Teor de ácidos hexenurônicos</i>
<i>Kg.Na2CO3/ADt</i>	<i>Carga de carbonato de sódio ao cozimento</i>
<i>Prod.Cel</i>	<i>Taxa diária de produção de celulose</i>
<i>REND</i>	<i>Rendimento do processo de polpação e branqueamento</i>
<i>RENDT</i>	<i>Rendimento total do processo de linha de fibras</i>
<i>KPADESL</i>	<i>Nº kappa da deslignificação com O<sub>2</sub></i>
<i>DQOLAV</i>	<i>Carga de DQO ao branqueamento</i>
<i>O2DESL</i>	<i>Carga de O<sub>2</sub> na deslignificação com O<sub>2</sub></i>
<i>NaOHDESL</i>	<i>Carga de NaOH na deslignificação com O<sub>2</sub></i>
<i>CAT</i>	<i>Total de cloro ativo aplicado</i>
<i>CACIO2</i>	<i>Carga de dióxido de cloro no branqueamento</i>
<i>CAH2O2</i>	<i>Carga de peróxido de hidrogênio no branqueamento</i>
<i>NaOHBRAQ</i>	<i>Carga de NaOH no branqueamento</i>
<i>ALV</i>	<i>Alvura da celulose produzida</i>
<i>VISC</i>	<i>Viscosidade da celulose produzida</i>
<i>SUJ</i>	<i>Teor de sujidade ou impurezas na celulose</i>
<i>Prod.Bruta-1</i>	<i>Produção de papel bruta da máquina de papel – 1</i>

<i>Prod.Bruta-2</i>	<i>Produção de papel bruta da máquina de papel – 2</i>
<i>Prod.Bruta-T</i>	<i>Produção de papel bruta total</i>
<i>Prod.Acab</i>	<i>Produção de papel acabada</i>
<i>Veloc-1</i>	<i>Velocidade da máquina de papel – 1</i>
<i>Veloc-2</i>	<i>Velocidade da máquina de papel – 2</i>
<i>g/m2-1</i>	<i>Gramatura do papel na máquina – 1</i>
<i>g/m2-2</i>	<i>Gramatura do papel na máquina – 2</i>
<i>%Cel-1</i>	<i>Teor de celulose nos papéis da máquina – 1</i>
<i>%Cel-2</i>	<i>Teor de celulose nos papéis da máquina – 2</i>
<i>Cons.Cel-1</i>	<i>Consumo de celulose na máquina – 1</i>
<i>Cons.Cel-2</i>	<i>Consumo de celulose na máquina – 2</i>
<i>Cons.Cel-T</i>	<i>Consumo total de celulose nas máquinas de papel</i>
<i>Prod.Acab.Cel</i>	<i>Produção acabada de celulose</i>
<i>Prod.Vend</i>	<i>Produção de celulose e papel vendável</i>
<i>VBP-Cel</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão na área de celulose</i>
<i>VMP-Cel</i>	<i>Consumo de vapor de média pressão na área de celulose</i>

### 3.2 – Recuperação Química

O processo de recuperação química é uma das partes essenciais no processo *Kraft* e tem como objetivos (CARDOSO, 1998):

- ➔ recuperar, com o mínimo de perdas, os compostos inorgânicos na forma de licor branco para ser reutilizado no digestor;
- ➔ gerar energia térmica (vapor superaquecido) e energia elétrica para o processo industrial, minimizando seus custos.

A concentração do **licor preto** nos evaporadores de múltiplo efeito, a oxidação e a redução dos constituintes desse licor por meio da combustão do mesmo na caldeira de recuperação e a caustificação do **licor verde** em circuito com o forno de cal para a obtenção do **licor branco** são as etapas envolvidas no processo cíclico de recuperação química, conforme Figura 3.13 :

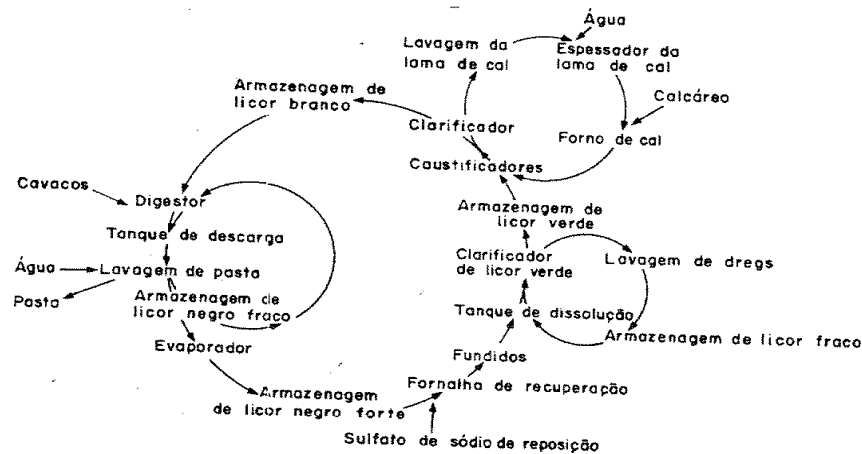


FIGURA 3.13 – Formato cíclico do processo de recuperação química

Fonte : Bonomi, 1985

### 3.2.1- Licor Preto

O licor preto é uma solução aquosa complexa constituída de vários componentes orgânicos (fragmentos de lignina de baixo e alto peso molecular, carboidratos degradados, ácidos orgânicos de baixa massa molecular – ácido fórmico e acético e materiais extrativos) e sais inorgânicos (hidróxido de sódio- $\text{NaOH}$ , sulfeto de sódio- $\text{Na}_2\text{S}$ , carbonato de sódio- $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , sulfato de sódio- $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , tiosulfato de sódio- $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , cloreto de sódio- $\text{NaCl}$  e sódio ligado a compostos orgânicos), cuja composição é alterada de acordo com a espécie e o local da madeira processada e das condições de polpação ( $\text{N}^\circ$  Kappa, rendimento, carga de álcali, sulfidez, atividade do licor branco, residual de álcali, perda alcalina, tipo de make-up, etc.), as quais em conjunto com a concentração de sólidos, afeta as propriedades físicas (elevação do ponto de ebulição-EPE, capacidade calorífica, poder calorífico e reologia-viscosidade). Essas propriedades físicas determinam o comportamento do licor nas unidades industriais de recuperação química, incluindo a evaporação, o escoamento, a combustão, a estabilidade operacional da caldeira de recuperação, a caustificação e o forno de cal (CARDOSO, 1998). A Tabela 3.1 ilustra a composição química elementar do licor preto de eucalipto.

Tabela 3.1 – Composição química do licor de eucalipto

No. Kappa	Composição química elementar do licor preto de eucalipto, %peso						
	C	H	N	Na	K	S	Cl
17	33,4	3,7	0,06	21,4	2	2,4	1,5

Fonte : Cardoso, 1998

A elevação do ponto de ebulição-EPE ( $\Delta T$  ebulição entre licor preto e água a mesma pressão) influi significativamente na evaporação, pois quanto maior a diferença entre a temperatura do vapor a ser condensado e o licor preto a ser evaporado menor a transferência de calor nos evaporadores. O EPE aumenta com o aumento na concentração de sólidos, sendo exponencial a partir de 50% sólidos.

A capacidade calorífica do licor preto ( $C_p$ ) é importante para estimar a troca de calor requerida durante a evaporação do licor e é dependente da concentração de sólidos e da temperatura — entre 1,25 kJ e 2,10 kJ/kg.K (CARDOSO, 1998).

O poder calorífico (calor de combustão) do licor é importante para o desenvolvimento de balanços de massa e energia na caldeira de recuperação e para acompanhamento e entendimento da influência de alterações na qualidade da madeira e nas variáveis da polpação. Cardoso (1998) determinou que, para o eucalipto, o poder calorífico do licor preto utilizado da empresa CENIBRA segue a equação linear  $\Delta H_{liq} (kJ/kg) = 14593 \cdot X$ , sendo X a fração mássica de sólidos secos. Como forma prática de monitoramento do poder calorífico do licor negro nas indústrias em conjunto com a eficiência térmica da caldeira de recuperação, monitorar a razão de vapor-produzido por sólidos secos-queimados, que varia desde 2,65 t.vapor/t.sólidos, para caldeiras de menor pressão (30 bar) com evaporador de contato direto queimando 65% de sólidos, a 3,30 t.vapor/t.sólidos, para caldeiras de maior pressão (85 bar) com evaporador concentrador queimando 75% de sólidos. Normalmente, encontra-se correlação entre a relação sólidos-gerados por polpa-produzida e a relação vapor-produzido por sólidos-gerados e queimados, numa mesma empresa.

O comportamento reológico do licor preto afeta a transferência de calor e as taxas de evaporação nos evaporadores de múltiplo efeito, o tamanho e a distribuição das “gotas” pulverizadas para queima, a estabilidade da combustão, as emissões de  $SO_2$  e o escoamento do licor nas tubulações e equipamentos. A Figura 3.14 mostra as alterações reológicas do licor preto em função da concentração de sólidos e temperatura (CARDOSO, 1998):

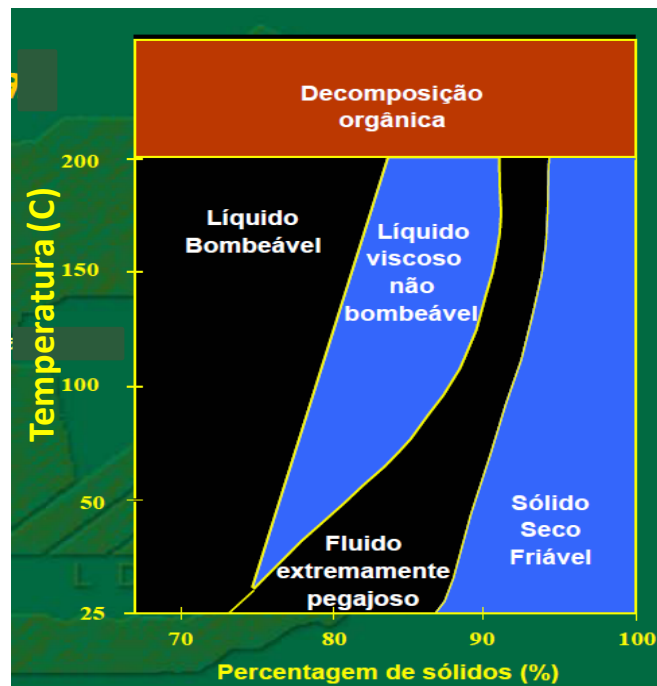


FIGURA 3.14 – Comportamento reológico do licor preto de pinus

Fonte : Green e Hough, 1992

### 3.2.2- Evaporação

A função dos evaporadores é a de concentrar o licor preto obtido nas peneiras do digestor e do sistema de lavagem da polpa com 15% de sólidos para 65% a 75%, para que, quando injetado na fornalha da caldeira de recuperação, ignifique e continue a queimar por força da matéria orgânica que contém (POLOWSKI, 2004).

A evaporação, conforme Figura 3.15, é configurada em múltiplos estágios, normalmente em contracorrente, por razões econômicas (aumento da economia de vapor –  $t.vapor/t.água-evaporada$  na ordem de 5,0) e por razões técnicas em função do aumento na capacidade de produção. O número de efeitos utilizados é da ordem de 4 a 6 na maioria das plantas, sendo os evaporadores do tipo de filme descendente atualmente, os mais utilizados (*falling film*).

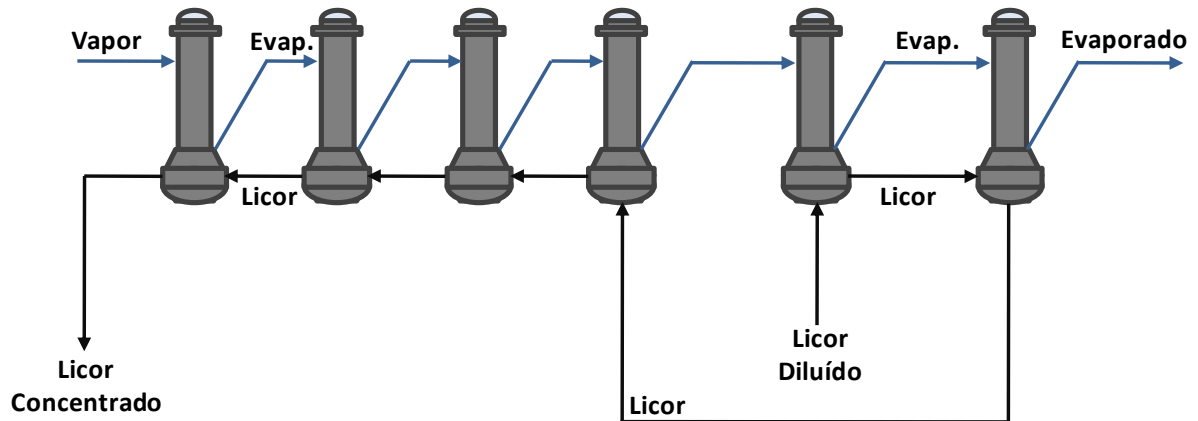


FIGURA 3.15 – Evaporadores de múltiplos efeitos

Fonte : Autor, 2010

As novas unidades industriais, no Brasil, estão adotando evaporadores de filme descendentes (*falling film*) para concentrar o licor preto, tendo a energia térmica dos gases de combustão, antes utilizada em evaporadores de contato direto (tipo ciclone ou cascata) após passarem em evaporadores LTV (filme ascendente de tubos longos), passado a ser utilizada na produção de vapor, exigindo um redimensionamento da fornalha de recuperação. Com essa tecnologia, as indústrias modernas aumentaram a economia de vapor nos evaporadores (de 4,0 t/t para 5,0 t/t), reduzindo em 25% o consumo de vapor no evaporador e aumentando a geração de vapor na caldeira de recuperação de 2,7 t para 3,1 t.vapor/t.sólidos-queimados (CARDOSO, 1998).

### 3.2.3- Caldeira de Recuperação

A caldeira de recuperação, conforme ilustração da Figura 3.16, possui três funções básicas: recuperar os reagentes inorgânicos em forma apropriada para reuso; recuperar a energia, em forma de vapor; abater ou eliminar a poluição, tanto do ar como da águas (POLOWSKI, 2004).

Da caldeira de recuperação tem-se a geração de *smelt*, que é o produto fundido que se obtém no fundo da fornalha, a qual escoar para o tanque de fundido, onde é adicionada lavagem fraca, oriunda da caustificação. Ela o transforma em licor verde, composto de carbonato de sódio- $\text{Na}_2\text{CO}_3$  e sulfeto de sódio- $\text{Na}_2\text{S}$ .

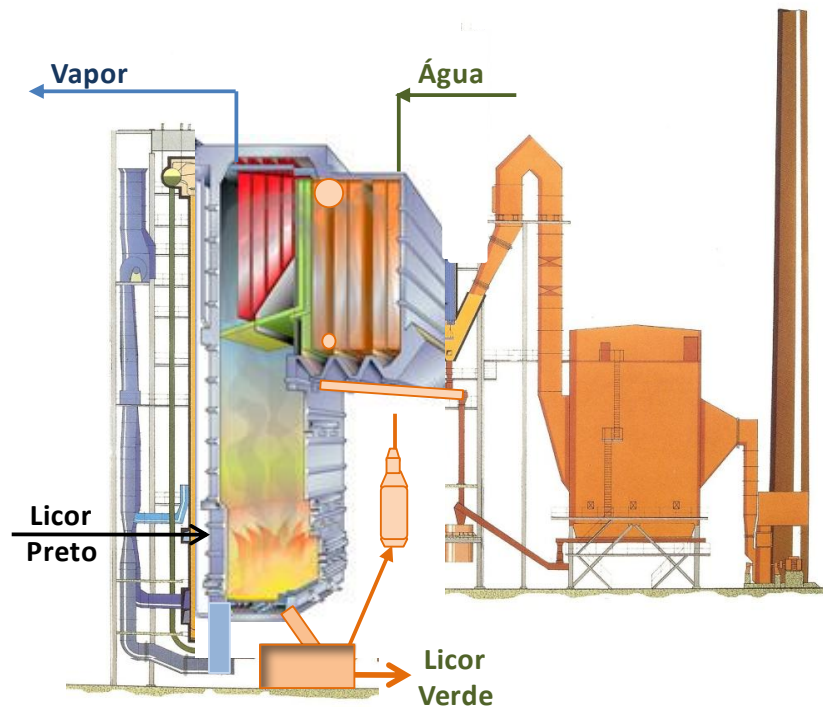


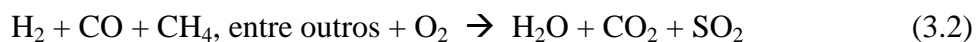
FIGURA 3.16 – Ilustração da caldeira de recuperação

Fonte : KPG, 2008

Basicamente, existem três regiões distintas na caldeira de recuperação :

- ➔ Região de oxidação, onde ocorre a queima de voláteis;
- ➔ Região de secagem e pirólise;
- ➔ Região de redução dos compostos inorgânicos, onde ocorre a formação do leito carbonizado (*char bed*) e a fusão do leito.

A **região de oxidação** localiza-se na parte superior da fornalha, acima da pulverização de licor, onde ocorre a combustão dos gases combustíveis produzidos na pirólise do licor preto, ocorrendo a oxidação do monóxido de carbono-CO e dos gases de enxofre para a formação de dióxido de carbono e dióxido de enxofre, conforme as reações químicas 3.2 a 3.6.



Ocorrem as reações,



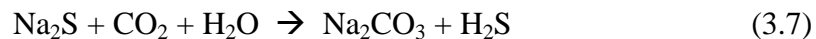


Essas reações ocorrem a altas temperaturas (1400° – 1500°C) e são relativamente rápidas. A injeção de ar em excesso e a altas velocidades nessa região vem assegurar a completa queima dos gases combustíveis.

A **região de secagem** está localizada ao redor da pulverização do licor preto que é injetado na forma de gotas na caldeira, com conteúdo de umidade entre 25% a 35%, sendo o tamanho dessas gotas de importância na queima de licor. Gotas grandes e com teor elevado de água umedecem o leito carbonizado, localizado na parte inferior da caldeira, causando o apagamento e/ou explosão desse leito. A secagem do licor preto utiliza-se do calor liberado nas reações de combustão, que ocorrem acima e abaixo dessa região. As reações de pirólise, que ocorrem nesta reação de secagem, são irreversíveis e concernentes com a degradação térmica de sólidos contidos no licor preto em temperaturas acima de 200°C, produzindo gases combustíveis e sólidos expandidos e porosos com diâmetro da ordem de 12 mm. As reações químicas estão ilustradas nas Figuras 3.7 a 3.9.

Sólidos do Licor Preto → Gases Combustíveis + Sólidos

Ocorrem as reações,

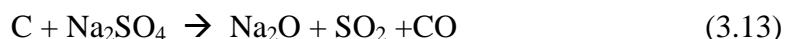


Na **região de redução**, o carbono residual retido no material sólido particulado, obtido na etapa de pirólise, inicia sua queima na camada inferior da caldeira (reações de conversão do carbono fixo para CO e CO<sub>2</sub>), fornecendo o calor necessário para as reações de redução dos compostos inorgânicos.

Nela, ocorrem as reações de carbono fixo (Figura 3.10).



e as reações de redução conforme Figuras 3.11 a 3.13.



Nessa região de redução, recupera-se o Na<sub>2</sub>S.

As cinzas formadas, contendo carbonato de sódio e sulfeto de sódio, ou são arrastadas pelos produtos gaseificados para a parte superior da caldeira ou são derretidas e fluem para o tanque de dissolução pela camada inferior da caldeira por meio de bicas resfriadas. Neste

tanque de dissolução, o qual é provido de agitação, o material é dissolvido pelo licor fraco de lavagem (lavagem fraca) oriundo da etapa de caustificação, resultando no licor verde.

A Figura 3.17 ilustra as principais reações químicas que ocorrem na caldeira de recuperação:

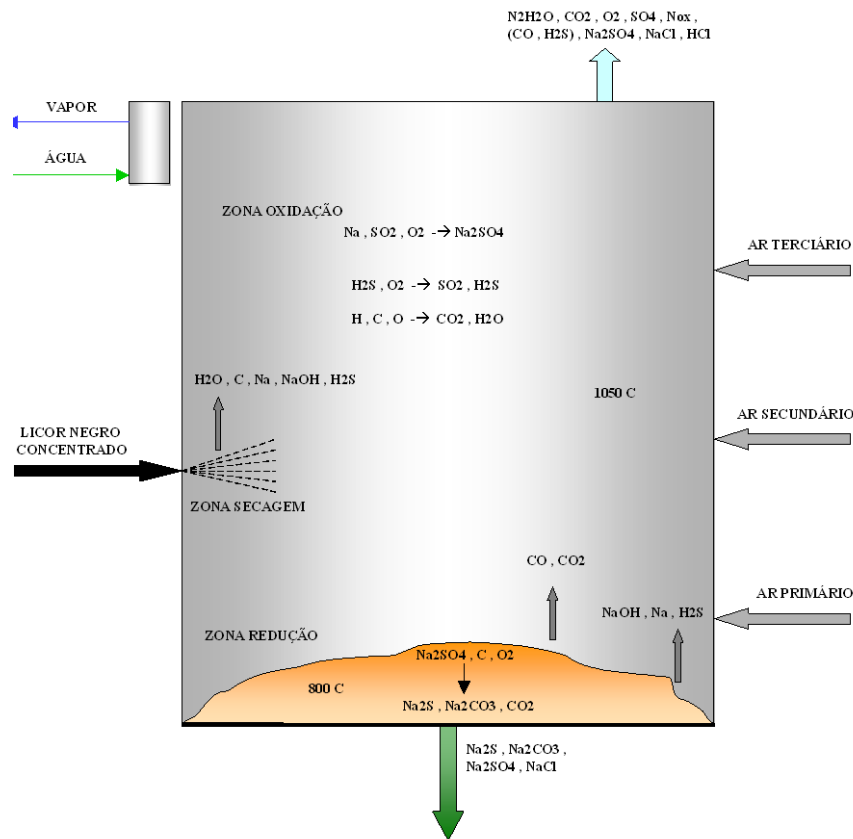


FIGURA 3.17 – Principais reações que ocorrem na caldeira de recuperação

Fonte : Royal Institute, 1994

A adição de ar na fornalha ocorre em três níveis distintos (primário, secundário e terciário), os quais proporcionam o nível adequado de temperatura nas três regiões e assegura a completa combustão da matéria orgânica. A taxa de calor liberada na combustão (13.500 kJ a 15.500 kJ/kg) é utilizada para a obtenção do vapor superaquecido (2,7 t a 3,2 t.vapor/t.sólidos), evaporar a água do licor alimentado, reduzir os sulfatos a sulfetos, fornecer o calor sensível dos inorgânicos fundidos e perdas usuais da caldeira. O contato do calor produzido é transferido por meio dos gases provenientes da combustão e cinzas de forma indireta aos diversos equipamentos auxiliares da caldeira, como mostra a Figura 3.18.

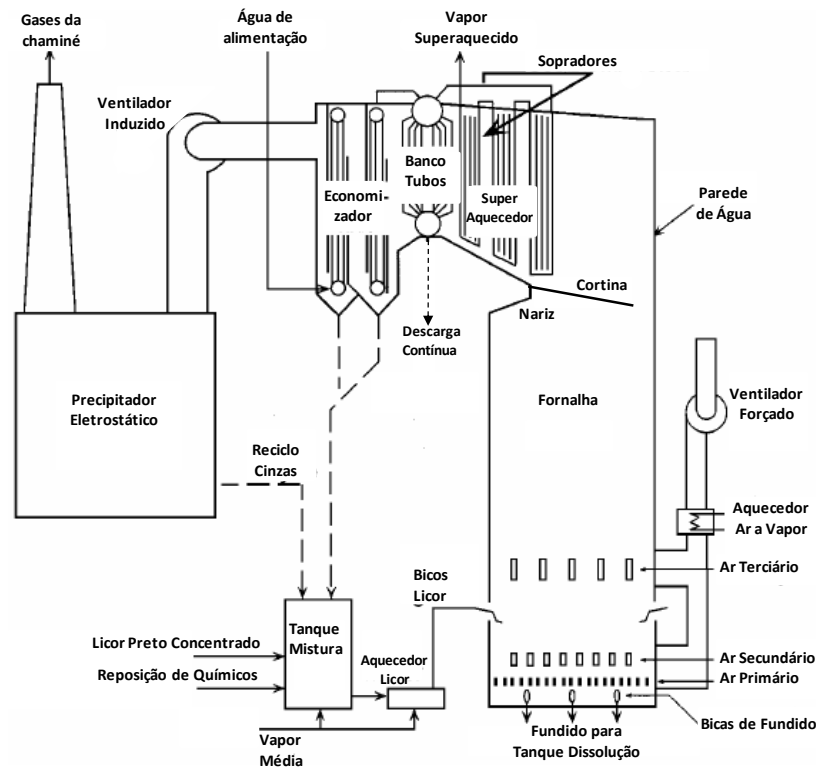


FIGURA 3.18 – Ilustração dos equipamentos auxiliares da caldeira de recuperação

Fonte : Autor, 2010

As caldeiras de recuperação, na atualidade, queimam licor de 75% a 80% de sólidos, em relação aos 65% de sólidos comuns em caldeiras antigas, o que proporciona um aumento na temperatura da camada de fundido de cerca de 1.010°C para 1.080°C (de 65% para 75% de sólidos) em função do aumento nas taxas de redução dos compostos inorgânicos, favorecendo as reações dos gases de enxofre com o sódio, os quais são responsáveis pela formação de um precipitado de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Essas reações explicam a redução de gases de enxofre na chaminé, além de o aumento de temperatura incrementar a produção de vapor e consequentemente a eficiência térmica da caldeira ( $\sim + 5\%$  a  $7\%$ ) (CARDOSO,1998).

### 3.2.4- Caustificação e Forno de Cal

O licor verde oriundo do tanque de dissolução de fundido é enviado ao tanque de homogeneização, com o intuito de acertar a concentração de álcali total e absorver variações de fluxo para a próxima etapa, que é a clarificação em decantador ou filtragem em filtro de discos pressurizados. O licor verde é clarificado ou filtrado para remover substâncias em suspensão, conhecidas como borra ou *dregs*. A concentração de borra no licor verde bruto está na faixa de 800 ppm a 1.200 ppm e é constituída de material com carbono acompanhado

de ferro, sílica, sulfetos metálicos e outros compostos sólidos oriundos da caldeira de recuperação. A remoção da borra, além de melhorar a eficiência de caustificação e forno de cal, evita o efeito acumulativo no ciclo de licores. A borra ou *dregs* concentrada é então encaminhada ao filtro de borra, a fim de aumentar seu teor de sólidos para ser encaminhada ao páteo de compostagem, e o filtrado encaminhado ao tanque de licor ou lavagem fraca, recuperando o álcali nele contido anteriormente.

O licor verde clarificado ou filtrado, constituído principalmente de sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ , ativo no cozimento e representado pela % de sulfidez do licor) e de carbonato de sódio, que é um reagente inativo no cozimento, é enviado à etapa final do ciclo de recuperação, conhecida como caustificação, que envolve a adição de óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) ao licor verde para converter o carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) em hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), produzindo o licor branco, conforme Figura 3.19.

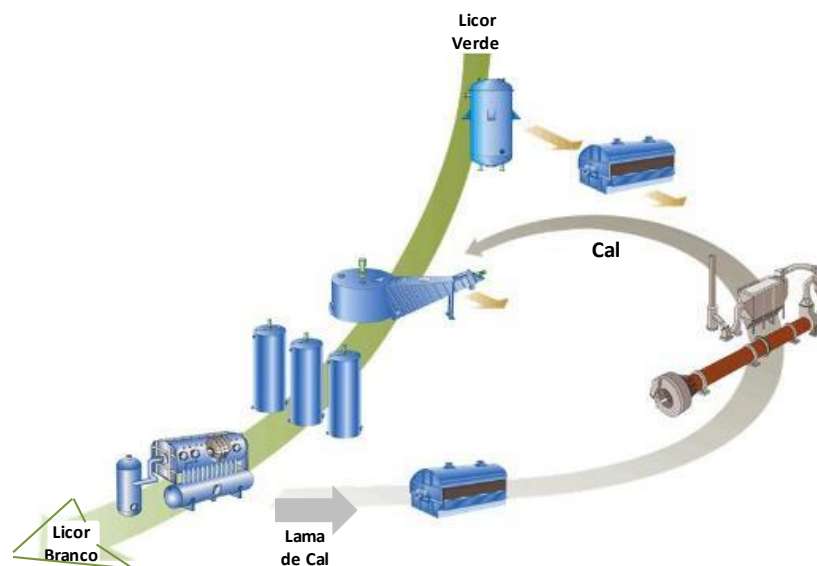
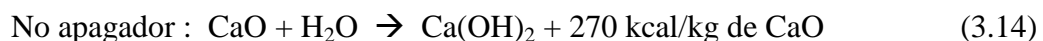


FIGURA 3.19 – Ilustração da caustificação e forno de cal

Fonte : KPG, 2008

As reações 3.14 e 3.15 ilustram o processo de caustificação em duas etapas:



Embora apresentada em duas etapas, as reações, na realidade, sobrepõem-se e parte da caustificação ocorre, simultaneamente, com a hidratação da cal, porém, sendo a reação de caustificação reversível, não é possível converter todo o carbonato de sódio, mesmo com grandes excessos de cal adicionada. Máximas conversões são desejadas, pois o hidróxido de sódio é o reagente ativo de cozimento e não o carbonato de sódio.

Conforme a Figura 3.20, a eficiência de caustificação ( $\text{NaOH}/\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) depende da concentração dos compostos de sódio no licor verde, observando-se que soluções mais diluídas promovem conversões relativas maiores, isto devido ao fato de que maiores concentrações diminuem a solubilidade do hidróxido de cálcio, em função da maior concentração do hidróxido de sódio em solução, até o ponto que não haja íons de cálcio suficientes para excederem o limite de solubilidade do carbonato de cálcio. A presença de sulfeto de sódio também contribui para a redução da eficiência de caustificação, pois o sulfeto de sódio é hidrolisado a hidróxido e hidrosulfeto de sódio, sendo a redução de eficiência proporcional ao aumento da sulfidez ou à quantidade de hidróxido de sódio formada na hidrólise.

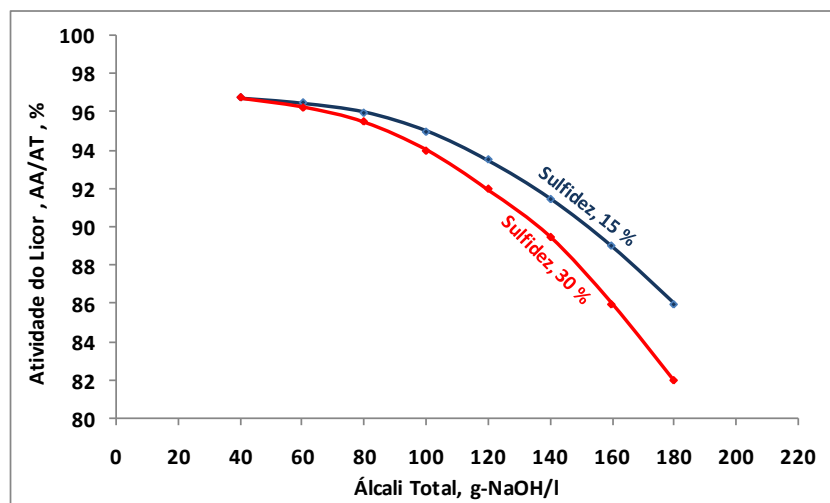


FIGURA 3.20 – Eficiência de caustificação x Álcali Total x Sufidez

Fonte :Whitney, 2008

Dos caustificadores, o licor branco bruto ( $\text{NaOH} + \text{Ca}_2\text{CO}_3 \downarrow + \text{Na}_2\text{S}$ ) é enviado para a clarificação ou filtragem para a separação do carbonato de cálcio (lama de cal) precipitado do licor, agora chamado de licor branco. Este, clarificado ou filtrado, é bombeado para o tanque de armazenagem de licor branco para ser utilizado no digestor. Quanto maior a atividade do licor branco (álcali ativo por total), menor a quantidade de inertes ao digestor e para a caldeira de recuperação, reduzindo o teor de inorgânicos no licor preto, o que, numa mesma carga de sólidos à caldeira de recuperação, pode significar maior produção de celulose.

A lama de cal é retirada do fundo do clarificador ou do filtro com 30% a 40% de sólidos e encaminhada ao filtro de lama, onde será lavada para recuperação do sódio contido no filtrado ou licor fraco que é bombeado ao tanque de licor fraco. A lama de cal é espessada

para 65% a 75% de sólidos no filtro de lama e, em seguida, encaminhada por correias e rosca transportadora ao forno de cal. No forno de cal, a lama passa pelas zonas de secagem, de aquecimento e de calcinação propriamente dita ( $\text{Ca}_2\text{CO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ ), onde o calor necessário para reação é fornecido por óleo combustível ou gás natural. O óxido de cálcio é então transportado para o silo de armazenagem, que realimentará o apagador para as reações de caustificação. Os gases quentes contendo dióxido de carbono e material particulado de cal são lavados em lavadores de gases e é comum a utilização de precipitador eletrostático para evitar a emissão de partículas para atmosfera.

A Figura-3.21 ilustra o processo de caustificação e forno de cal:

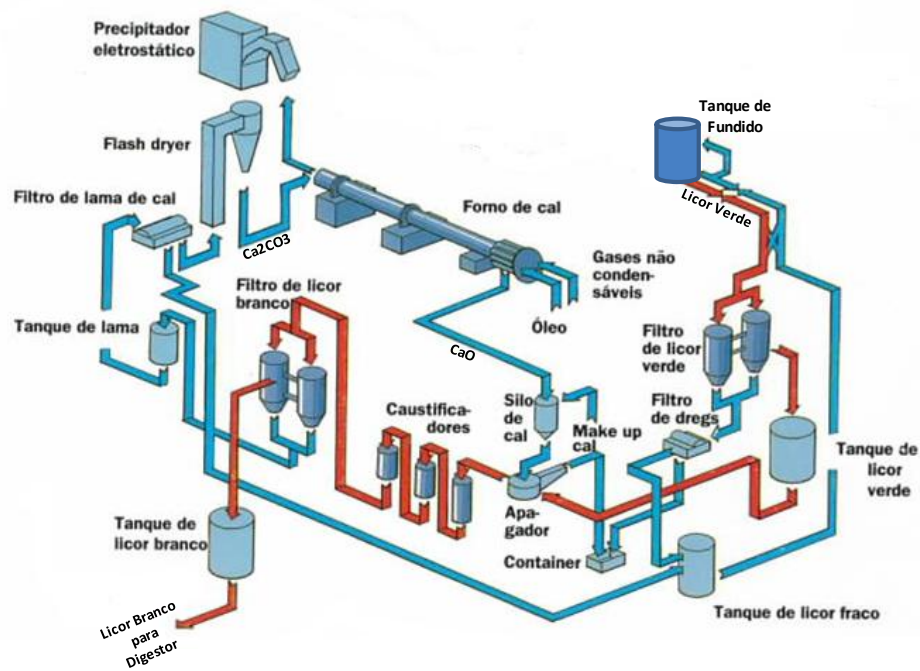


FIGURA 3.21 – Fluxograma da caustificação e forno de cal

(Fonte : KPB, 1994)

### 3.2.5- Variáveis do processo da recuperação química

Após exposição dos itens 3.2.1 a 3.2.4, são apresentadas abaixo as principais variáveis da área de recuperação química :

<i>AA</i>	<i>Concentração de álcali ativo LB</i>
<i>AT.LV</i>	<i>Concentração de álcali total LB</i>
<i>AA.LV</i>	<i>Concentração de álcali ativo LV</i>
<i>AT</i>	<i>Concentração de álcali total LV</i>
<i>SULF</i>	<i>Sulfidez do licor branco</i>
<i>ATIV</i>	<i>Atividade do licor branco</i>
<i>COLPD</i>	<i>Concentração do licor preto diluído, entrada da evaporação</i>
<i>COLPC</i>	<i>Concentração do licor preto concentrado, saída da evaporação</i>
<i>COLPQ</i>	<i>Concentração do licor preto para queima na CR</i>
<i>PHLP</i>	<i>pH do licor preto diluído</i>
<i>RSP</i>	<i>Relação sólidos queimados por celulose produzida</i>
<i>TSS</i>	<i>Taxa diária de sólidos queimados na caldeira de recuperação</i>
<i>ERD</i>	<i>Eficiência de redução na caldeira de recuperação</i>
<i>Ger.Esp.Vapor</i>	<i>Geração específica de vapor na caldeira de recuperação</i>
<i>Vapor.Rec</i>	<i>Produção de vapor na caldeira de recuperação</i>
<i>ARPR</i>	<i>Consumo de ar primário na CR</i>
<i>ARSEC</i>	<i>Consumo de ar secundário na CR</i>
<i>ARTER</i>	<i>Consumo de ar terciário na CR</i>
<i>RCIK</i>	<i>Razão de cloreto e potássio nas cinzas da CR</i>
<i>TCNa2CO3</i>	<i>Teor de carbonato de sódio nas cinzas recirculadas</i>
<i>TCNa2SO4</i>	<i>Teor de sulfato de sódio nas cinzas recirculadas</i>
<i>AAC</i>	<i>Álcali ativo convertido na caustificação</i>
<i>ATCaO</i>	<i>Atividade da cal produzida</i>
<i>CaON</i>	<i>Make-up de cal nova na caustificação</i>
<i>NaOHMK</i>	<i>Make-up de NaOH na caustificação</i>
<i>Na2SO4MK</i>	<i>Make-up de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> no licor preto</i>
<i>Kg.CaO/ADt</i>	<i>Produção específica de cal no forno de cal</i>
<i>Kg.CaO/d</i>	<i>Taxa de produção de cal no forno de cal</i>
<i>Kg.Óleo-7A/t.CaO</i>	<i>Consumo específico de óleo-7A no forno de cal</i>
<i>Kg.Óleo-7A/d</i>	<i>Taxa de consumo de óleo-7A no forno de cal</i>
<i>EFCAU</i>	<i>Eficiência de conversão na caustificação</i>
<i>VBP-Rec</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão na área de recuperação</i>
<i>VBP-Strip</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão no stripper</i>
<i>VBP-Evap</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão na evapor. de licor preto</i>

### **3.3 – Utilidades**

A área de utilidades tem como funções o fornecimento de água tratada para a fábrica e de água desmineralizada para as caldeiras, o tratamento dos efluentes líquidos, a compressão e distribuição de ar comprimido, a geração e distribuição de energia elétrica e vapor. Como característica importante da área de utilidades, por razões técnicas e econômicas, é de fundamental importância ter-se um alto nível de eficiência e confiabilidade em seu funcionamento, desejável 100%, se considerarmos que as paradas para manutenção devem ser realizadas em conjunto com as paradas programadas das linhas de produção de celulose e papel.

#### **3.3.1- Tratamento de Água**

A estação de tratamento de água de uma fábrica de celulose é dimensionada para suprir um consumo de 35 m<sup>3</sup> a 45 m<sup>3</sup>/t.celulose, dependendo do nível de fechamento do circuito de água e filtrados do processo de fabricação, a qual inclui equipamentos de lavagem mais eficientes, reciclagem de filtrados no branqueamento, purificação e reutilização de condensados e retorno de água de refrigeração e condensado, utilizando-os diretamente no processo ou por meio de torres de resfriamento para reuso. A correta reciclagem de água ou filtrados tem uma contribuição significativa na redução do consumo de vapor, pois normalmente essas águas possuem temperaturas na faixa de 40° a 90°C.

O tratamento de água é realizado de acordo com a tecnologia usual que inclui a captação de água bruta do rio, seguida de cloração, coagulação normalmente com sulfato de alumínio, floculação com polímero, decantação gravimétrica, filtração por carvão, areia e pedras e, quando necessário, correção de pH com cal hidratada para amenizar seu efeito corrosivo e cloração para efeito de desinfecção. A qualidade da água para consumo no processo industrial de celulose e papel normalmente apresenta como qualidade turbidez menor que 1,0 NTU e pH de 6,7 a 7,4 e é armazenada em um tanque para suprimento de cerca de 8 horas, caso ocorra uma interrupção no seu tratamento da água. Uma rede de distribuição na fábrica é suprida com bombas que mantém a pressão em aproximadamente 2,5 bar. Na maioria dos casos, é consumida com essa pressão mínima, no caso de requerer maior pressão, como para a selagem de bombas e equipamentos, é utilizada uma rede específica com bombas de recalque para a rede de água de selagem que requer cerca de 10 bar.



### 3.3.2- Tratamento de efluentes

O volume de água utilizado tem relação direta com a geração/emissão de efluentes; entretanto, o potencial poluidor é dependente da operação da fábrica e do grau de fechamento dos circuitos de águas, filtrados e condensados (PIOTTO, 2003).

As principais fontes de emissão de uma fábrica de celulose são apresentadas na Figura 3.22.

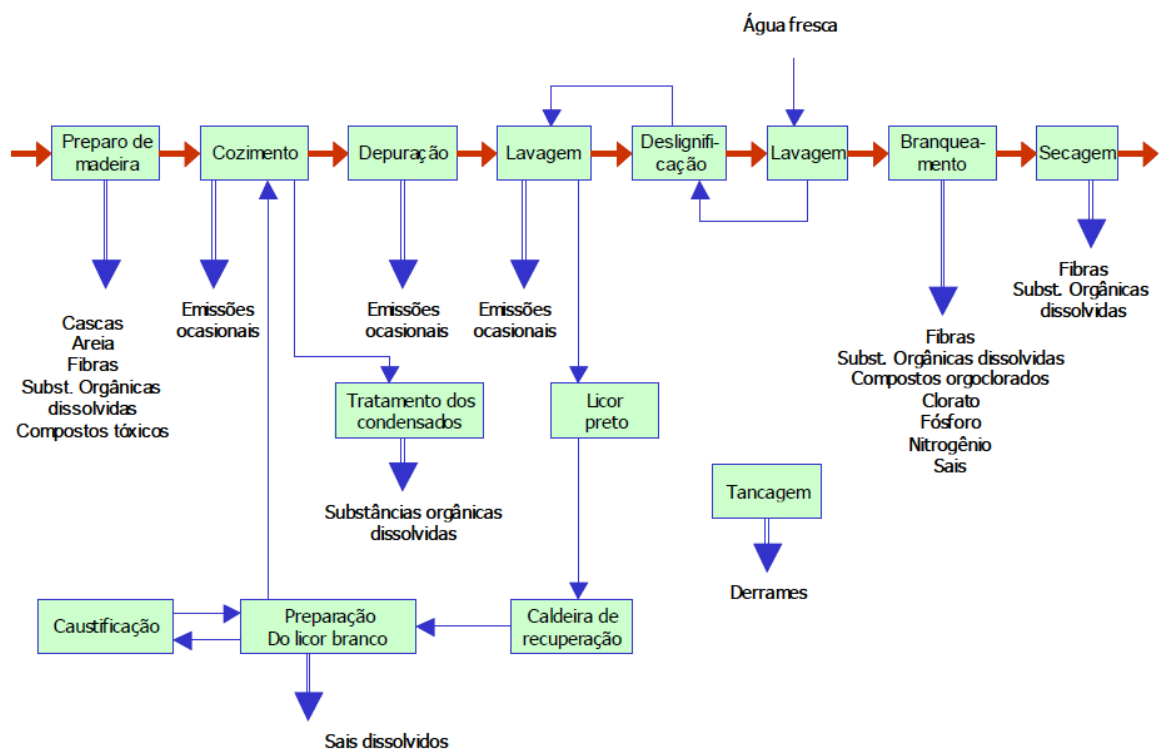


FIGURA 3.22 – Efluentes típicos gerados na indústria de celulose

Fonte : IPCC, 2000

O tratamento de efluentes inicia-se pelo gradeamento para a retirada de contaminantes como papéis, madeiras, etc. e, em seguida, segue para o tratamento primário, cuja principal função é a remoção de sólidos em suspensão, por meio de decantadores circulares, cujo lodo decantado é espessado em prensas para consistências da ordem de 30% a 40%, que são dispostos em caçambas e encaminhados para o pátio de compostagem. Uma boa prática é separar o efluente da máquina de secagem de celulose e máquinas de papel do efluente da planta de fabricação de celulose e encaminhá-los a dois decantadores independentes, permitindo assim recuperar as fibras branqueadas e comercializá-las com fábricas de papel que utilizam papel reciclado.



FIGURA 3.23 – Ilustração de processo de lodo ativado

*Fonte : KPB, 2006*

O efluente clarificado, se necessário, tem corrigido o pH com hidróxido de cálcio ou ácido sulfúrico e encaminhado à torre de resfriamento para redução da temperatura de cerca de 45° a 50°C para cerca de 35° a 38°C. Em seguida, encaminha-se para lagoas de aeração ou tanques de aeração de sistema de lodo ativado, conforme ilustração da Figura 3.23, iniciando o tratamento secundário, que tem como principal objetivo reduzir a DBO (demanda bioquímica de oxigênio) do material solúvel, utilizando os processos de oxidação biológica. No caso do lodo ativado, nutrientes (nitrogênio e fósforo) são adicionados aos tanques de aeração que também recebem uma recirculação do lodo microbiológico, decantado em decantadores que recebem o efluente tratado dos tanques de aeração. O lodo excedente é espessado em centrifugas ou prensas e encaminhado a caçambas que serão transportadas para a compostagem.

O efluente tratado em lagoa de aeração ou lodo ativado comumente é encaminhado para a lagoa de estabilização ou polimento para homogeneização do efluente e pequena remoção adicional de DBO e daí para a descarga no rio receptor.

A carga de DBO na entrada do tratamento de efluentes para as grandes empresas produtoras de celulose e papel varia desde 10.000 kg/d até 50.000 kg/dia, reduzida para cerca de 100 kg a 2.500 kg/d de carga ao meio receptor, representando cerca de 3 mg a 60 mg/l de concentração de DBO. O teor de sólidos suspensos não deve ultrapassar 1 ml/l no efluente final. A descarga do efluente, em fábricas modernas, é realizada acima da captação de água e não deve provocar queda do oxigênio dissolvido para menos que 5 mg/l no meio receptor. Os padrões de emissões devem seguir, no mínimo, o recomendado pelo CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente) conforme a classe do meio receptor. Normalmente os valores especificados estão em comum acordo com as agências ambientais estaduais ou municipais e

devem estar abaixo do especificado pelo CONAMA, com o intuito de promover a melhoria ambiental.

O controle adequado deve ser realizado pelas áreas emissoras de efluentes na fábrica de celulose, fechando o circuito para reaproveitamento de filtrados e reduzindo a carga volumétrica e de DBO ao tratamento de efluentes.

### 3.3.3- Caldeira de Biomassa

Biomassa, assim como petróleo, é um hidrocarboneto, mas, diferentemente dos combustíveis fósseis, ela possui átomos de oxigênio na sua composição química. A presença desse átomo de oxigênio faz com que a biomassa requeira menos oxigênio do ar e, conseqüentemente seja menos poluente, porém também reduz a quantidade de energia a ser liberada, reduzindo o seu PCS. Madeira, de maneira geral, possui a seguinte fórmula química empírica:  $C_{3,3-4,9} H_{5,1-7,2} O_{2,0-3,1}$ .



FIGURA 3.24 – Ilustração da combustão em caldeira de biomassa

*Fonte :Pereira e Fernandes, 2004*

O processo de combustão da biomassa sólida em caldeira, conforme ilustração na Figura 3.24, consiste em quatro fases distintas, mas que podem acontecer simultaneamente em diferentes regiões da biomassa em reação. Elas são descritas a seguir e ilustradas na Figura 3.25 (NOGUEIRA E RENDEIRO, 2008):

- ➔ **Aquecimento e Secagem:** É o processo de retirada da umidade contida no combustível sólido pela adição de calor, que provoca a evaporação da água.
- ➔ **Pirólise:** Após a secagem do combustível sólido, se sua temperatura for elevada a níveis adequados, acontecerá a liberação dos gases inflamáveis contidos no sólido. Esta fase também é denominada de volatilização. Os gases liberados nesta fase,

quando misturados com o oxigênio do ar em proporções adequadas, tornam-se uma mistura inflamável.

- ➔ **Combustão:** Nesta fase, os gases formados no processo de pirólise reagem com o oxigênio numa reação exotérmica, tendo como produtos  $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{Calor}$  (produtos hipotéticos para uma reação ideal estequiométrica). O fogo normalmente é visível nesta fase.
- ➔ **Pós-Combustão:** Ao final da pirólise, a biomassa tornou-se uma massa sólida composta de carvão e cinza. As partículas de menores dimensões são arrastadas pelos gases e saem pela chaminé com a denominação de particulados. Uma fração do carbono e cinzas consegue gasificar e entra no escoamento na forma de  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$  e  $\text{H}_2$  e outros gases. O restante do carvão e das cinzas é removido da câmara de combustão na forma de resíduos.



FIGURA 3.25 – Diagrama do processo de combustão de sólidos

Fonte :Nogueira e Rendeiro, 2008

O processo de combustão, portanto, libera calor e tem como produto final gases e sólidos inertes como  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e cinzas. O calor liberado é então utilizado para a geração de vapor na caldeira de biomassa que, na indústria de celulose e papel, opera em pressões que variam desde 30 bar nas mais antigas até 105 bar nas mais modernas, com produção de vapor desde 30 t/h até 300 t/h ou mais, que, num processo de cogeração, são suficientes para suprir a turbogeradores para produção de energia elétrica e vapor de baixa pressão para o processo em conjunto com a caldeira de recuperação.

Normalmente, na indústria de celulose e papel, ocorre a utilização de dois tipos de caldeiras de biomassa, a de combustão com grelha móvel e a de leito fluidizado, esta última

podendo ser de leito borbulhante ou de leito circulante, que possuem maior eficiência de combustão e comumente utilizadas para maiores capacidades de produção (> 100 t/h) e com flexibilidade para queimar biomassa com umidade de até 60% sem grandes variações de carga.

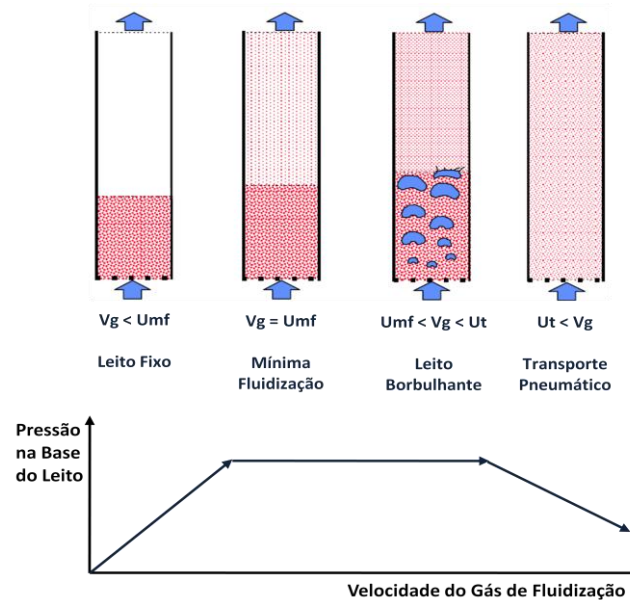


FIGURA 3.26 – Evolução da pressão na base de um leito fluidizado com o aumento da vazão de ar

Fonte : CENBIO, 2002

Ao passar um gás através de um leito de material particulado, como indicado na Figura 3.26, observa-se somente uma elevação de pressão na grelha. Ao elevar-se continuamente a vazão do gás (velocidade do gás –  $V_g$ ), obter-se-á uma elevação também contínua da pressão até atingir uma velocidade, denominada velocidade de mínima fluidização ( $U_{mf}$ ), na qual a força peso das partículas se iguala à força de arraste do gás. Neste ponto, as partículas começam a se descolar uma das outras e ficam suspensas, passando a se comportar como um líquido. Incrementos adicionais de velocidade provocam o surgimento de bolhas de gás no interior da suspensão, criando duas fases. Uma constituída somente de gás, na forma de bolhas, e outra, denominada emulsão, composta de gás e material particulado fluidizado. As bolhas, ao subirem, aumentam de tamanho, por redução de pressão e coalescimento com outras bolhas, arrastando grande quantidade de material particulado na sua subida. São elas as responsáveis pela grande taxa de circulação de sólidos no leito. A elevação continuada da vazão, nesta condição, provoca somente o aumento do número e do tamanho das bolhas, sem elevar a pressão na base da grelha. Quando a velocidade do gás atinge a velocidade terminal das partículas ( $U_t$ ), começa a haver um arraste do material mais fino, diminuindo a altura do leito e a pressão na sua base. No caso dessas

partículas arrastadas serem coletadas em um ciclone (ou outro dispositivo semelhante) e serem retornadas ao leito, têm-se um leito fluidizado circulante. Quando não há esse retorno, tem-se um leito de arraste. A Figura 3.27 ilustra ambos os conceitos.

Combustão de biomassa em leito fluidizado tem sido largamente utilizado devido à sua característica de poder operar com combustível com umidade elevada (até 65% de umidade). Para formar a base de suporte de um leito fluidizado, normalmente se utiliza areia, que representa um grande reservatório térmico capaz de atenuar grandes variações de umidade, por períodos relativamente longos, no combustível alimentado, ao contrário de caldeiras de grelha.

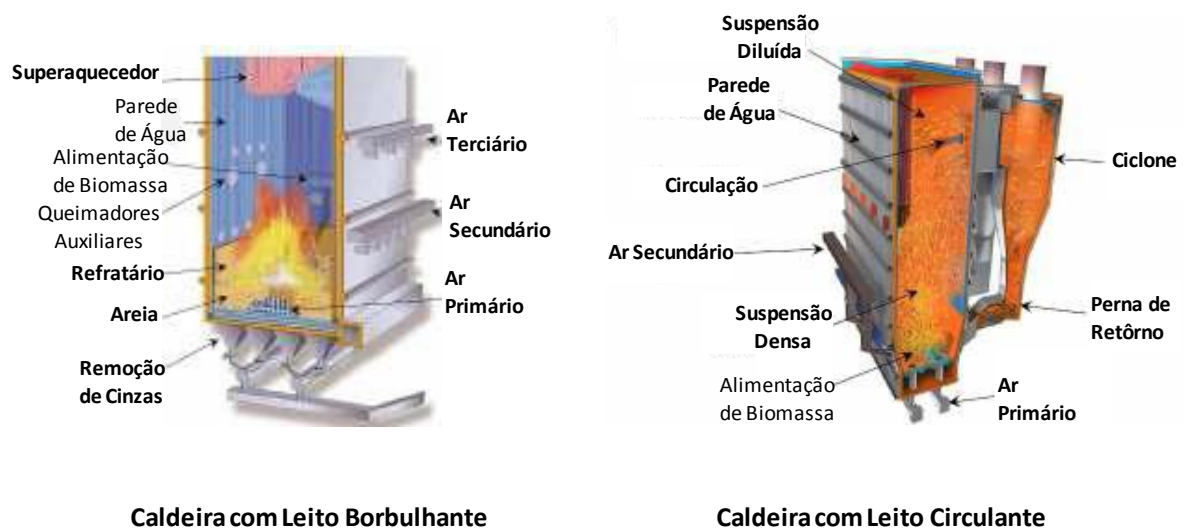


FIGURA 3.27 – Ilustrações de caldeiras de biomassa com leito fluidizado

Fonte : Pereira e Fernandes, 2004

### 3.3.4- Turbo Geradores

As pressões de operação de turbinas a vapor, nos últimos 40 anos, têm sido elevadas consideravelmente, de 30 kgf/cm<sup>2</sup> na década de 70 para 120 kgf/cm<sup>2</sup> nesta década, aumentando cerca de 30% o ganho energético obtido na geração de energia elétrica, conforme Figura 3.28 (AZZOLINI TGM, 2007):

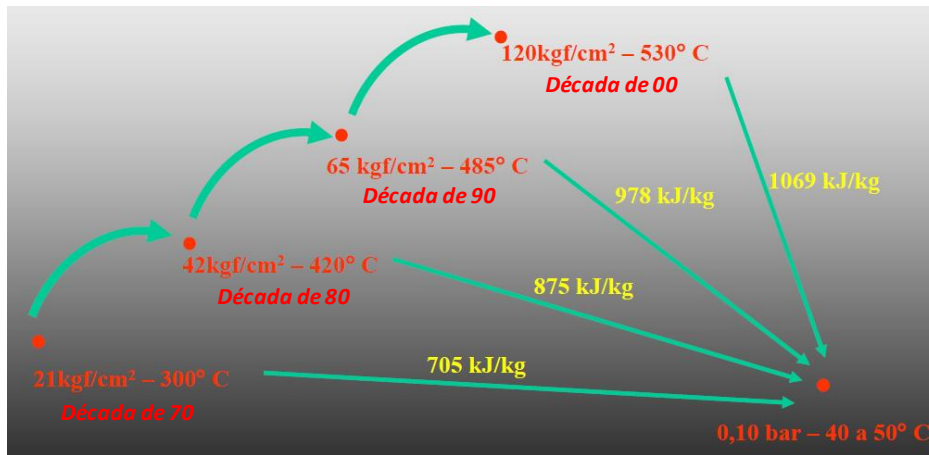


FIGURA 3.28 – Ganho energético com o aumento de pressão e temperatura do vapor de operação de turbinas a vapor

Fonte :Azzolini, 2007

O ganho energético obtido com o aumento de pressão e temperatura do vapor também é expresso no consumo específico de vapor (t.vapor/MW) para a geração de energia elétrica, como mostra a Figura 3.29:

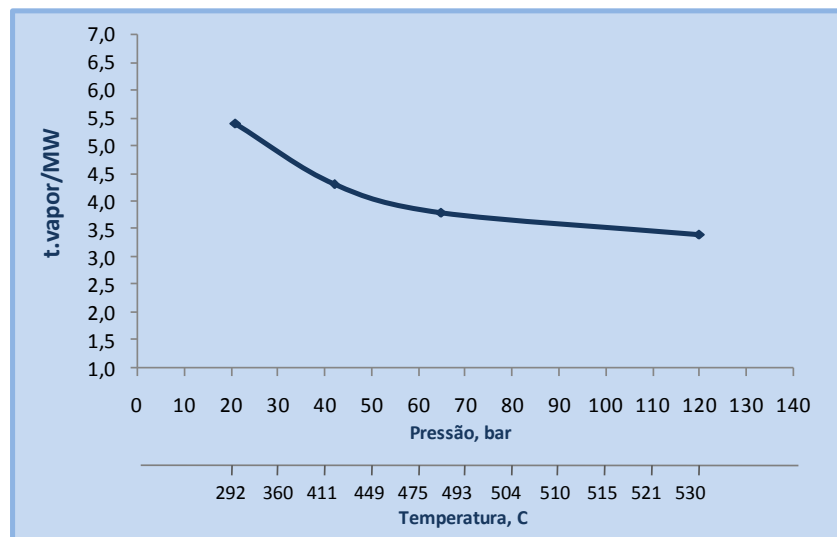


FIGURA 3.29 – Consumo específico de vapor em turbinas a vapor

Fonte : Azzolini, 2007

Quanto às características construtivas de turbinas a vapor, pode-se classificá-las em turbinas de ação ou turbinas de reação, conforme Figuras 3.30 e 3.31.

Nas turbinas de ação, as palhetas fixas e bocais, com incidência de vapor em alta velocidade, convertem a energia térmica em energia cinética (transformação da variação de entalpia em energia cinética) e redirecionam o fluxo de vapor para as palhetas móveis, onde o vapor atravessa à pressão constante, atuando sobre elas em razão da sua velocidade, convertendo a energia cinética em trabalho (MARQUES, 1998):

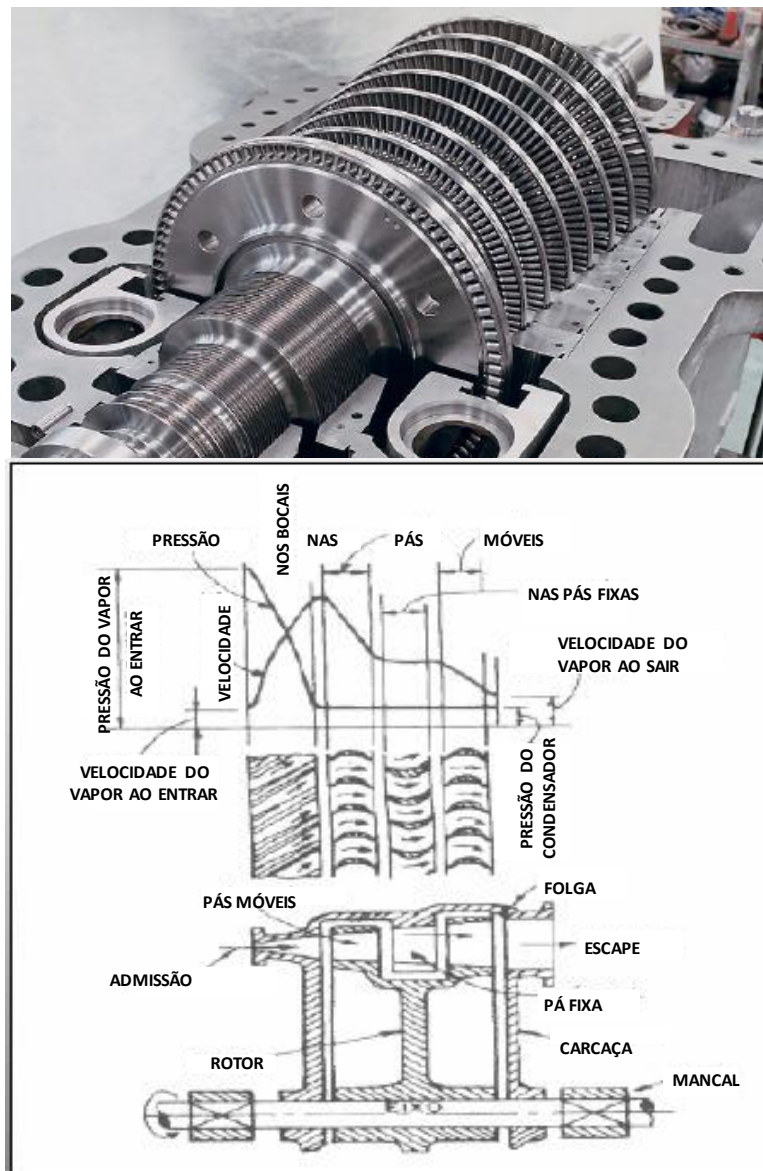


FIGURA 3.30 – Perfil de pressão e velocidade do vapor em turbinas de ação

Fonte : Marques, 1998



Nas turbinas de reação, as palhetas fixas, com incidência de vapor em alta velocidade, convertem parte da energia térmica em energia cinética (transformação de parte da variação de entalpia em energia cinética) e redirecionam o fluxo de vapor para as palhetas móveis, onde o vapor atravessa com redução de pressão, atuando sobre elas, convertendo o restante da energia térmica e a energia cinética em trabalho (MARQUES, 1998). Portanto, utilizam a pressão de vapor e a sua expansão nas rodas móveis e o vapor se expande nas palhetas fixas e móveis:

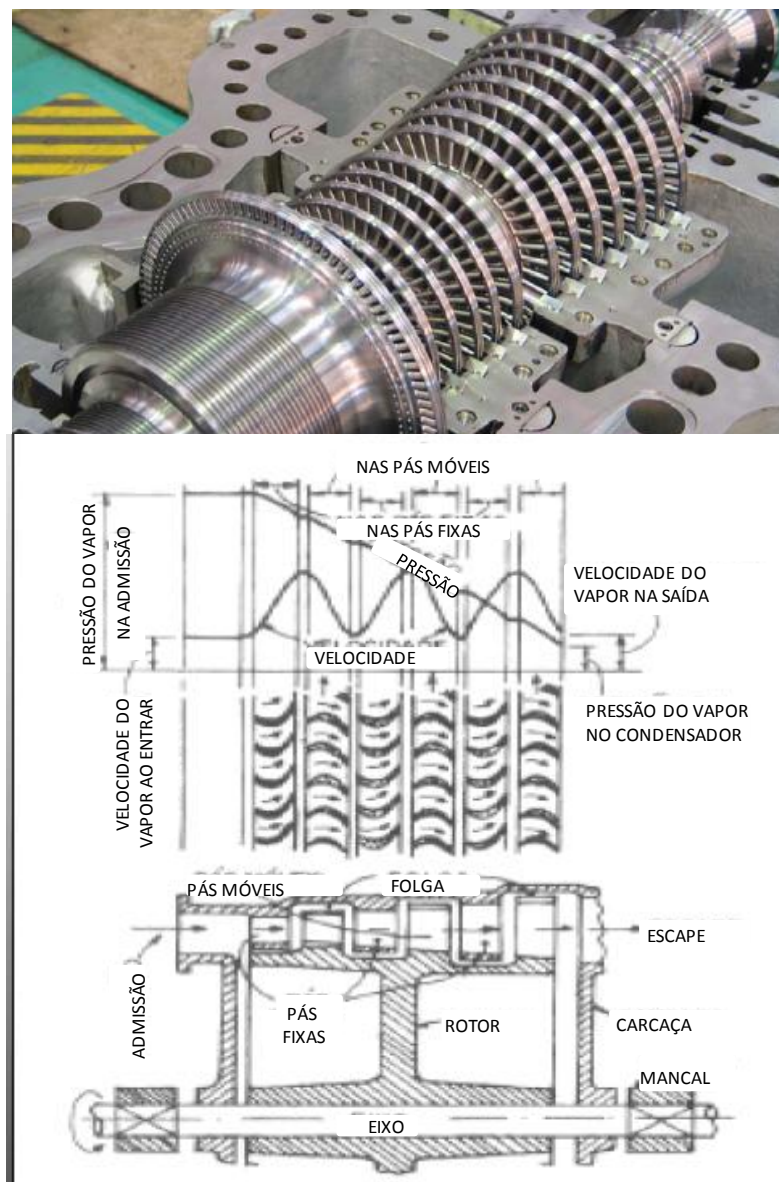


FIGURA 3.31 – Perfil de pressão e velocidade do vapor em turbinas de **reação**

Fonte : Marques, 1998

Na indústria de celulose e papel, em função do alto consumo de vapor no processo da linha de fibras e evaporação, secadora de celulose e máquina de papel, é usual a utilização de turbinas de contrapressão, com extração de vapor a 12 kgf/cm<sup>2</sup> para aquecimento da polpa de celulose no digestor, deslignificação com O<sub>2</sub>, branqueamento, e outros locais onde a pressão do local de aquecimento é da ordem de 6 kgf a 11 kgf/cm<sup>2</sup> e vapor de contrapressão a 4,5 kgf/cm<sup>2</sup> para uso no digestor, evaporação do licor preto, branqueamento, secadora de celulose, máquina de papel, utilidades e outros locais onde a pressão é da ordem de 1 kgf a 3,5 kgf/cm<sup>2</sup>. Na linha de fibras, a maioria do aquecimento é realizada em contato direto, enquanto na evaporação, máquina secadora e máquina de papel, o aquecimento é indireto, possibilitando a reutilização do condensado gerado nas caldeiras para geração de vapor, ou seja, o reaproveitamento da água desmineralizada e a temperatura nele contida. A Figura 3.32 ilustra o conceito de turbina de contrapressão:

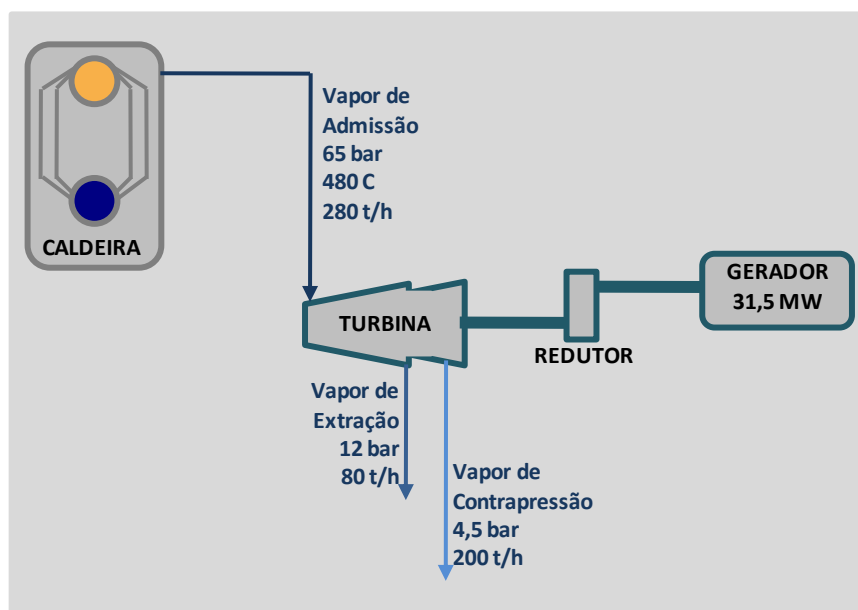


FIGURA 3.32 – Ilustração de cogeração com turbogerador de contrapressão

Fonte : Autor, 2010

A geração de energia elétrica é função do consumo de vapor de média pressão a 12 kgf/cm<sup>2</sup> e de vapor de baixa pressão a 4,5 kgf/cm<sup>2</sup>, tendo-se que substituir o consumo de vapor de média pressão por baixa pressão implica em aumentar a geração de energia elétrica, como mostra a Figura 3.33.

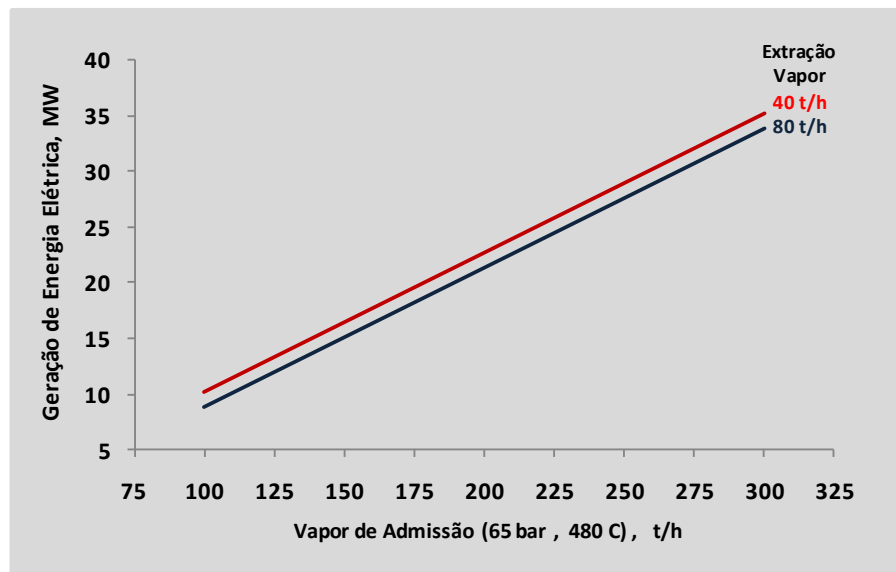


FIGURA 3.33 – Geração de energia elétrica em turbina de contrapressão

Fonte : Autor, 2010

A turbina com eixo de rotação de 8.000 rpm é conectada a um redutor e este conectado ao eixo do rotor do gerador elétrico com rotação de 1.800 rpm. Desta forma, o trabalho ou a energia mecânica é utilizado para fazer girar o rotor do gerador, o qual induz uma tensão nos terminais dos enrolamentos que, ao serem conectados a cargas, levam a circulação de correntes elétricas pelos enrolamentos e pela carga.

A Figura 3.34 ilustra o conjunto de turbina, redutor e gerador ou turbogerador, comumente utilizado na indústria de celulose e papel:



FIGURA 3.34 – Ilustração de instalação de turbogerador

Fonte : Siemens e TGM, 2007

### 3.3.5- Variáveis do processo de utilidades

Após exposição dos itens 3.3.1 a 3.3.4, são apresentadas abaixo as principais variáveis da área de utilidades que influem no consumo específico de madeira e insumos energéticos.

<i>VBP-UTI</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão na área de utilidades</i>
<i>VBP-Des</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão no desaerador</i>
<i>VMP-UTI</i>	<i>Consumo de vapor de média pressão na área de utilidades</i>
<i>VBP-Maq1</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão na máquina-1</i>
<i>VBP-Maq2</i>	<i>Consumo de vapor de baixa pressão na máquina-2</i>
<i>VMP-Maq1</i>	<i>Consumo de vapor de média pressão na máquina-1</i>
<i>VMP-Maq2</i>	<i>Consumo de vapor de média pressão na máquina-2</i>
<i>VBP-Outr</i>	<i>Consumos de vapor de baixa pressão em indeterminados</i>
<i>VMP-Outr</i>	<i>Consumo de vapor de média pressão em indeterminados</i>
<i>VBP-Tot</i>	<i>Consumo total de vapor de baixa pressão</i>
<i>VMP-Tot</i>	<i>Consumo total de vapor de média pressão</i>
<i>V.Cons.Cel</i>	<i>Consumo total de vapor</i>
<i>V.Cons.Rec</i>	<i>Consumo total de vapor na área de recuperação</i>
<i>V.Cons.Util</i>	<i>Consumo total de vapor na área de utilidades</i>
<i>V.Cons.Máqs</i>	<i>Consumo total de vapor nas máquinas de papel</i>
<i>V.Cons.Indet</i>	<i>Consumo total de vapor em indeterminados</i>
<i>VAP</i>	<i>Vapor de alta pressão produzido pelas caldeiras</i>
<i>V.Cald.Biom</i>	<i>Vapor produzido pela caldeira de biomassa</i>
<i>Cons.Mad.Ene</i>	<i>Consumo de madeira para energia</i>
<i>Óleo-3A</i>	<i>Consumo de óleo-3A na caldeira de biomassa</i>
<i>Kg.Biom.Seca/t.vapor</i>	<i>Consumo de biomassa base seca na caldeira de biomassa</i>
<i>DES-VBP</i>	<i>Dessuperaquecedor para o vapor de baixa pressão</i>
<i>RED-VBP</i>	<i>Vapor p/ a válvula redutora vapor de alta p/ baixa pressão</i>
<i>VCE-VBP</i>	<i>Vapor de alta pressão para o evaporador VCE</i>
<i>TB-VBP</i>	<i>Vapor de alta pressão para a turbina da bomba de água</i>
<i>TAC-VBP</i>	<i>Vapor de alta pressão para o tanque acumulador de vapor</i>
<i>CALD3-VBP</i>	<i>Vapor de baixa pressão produzido pela caldeira-3</i>
<i>VBP-CPR</i>	<i>Vapor de contrapressão saindo da turbina</i>
<i>DES.VMP</i>	<i>Dessuperaquecedor para o vapor de média pressão</i>
<i>RED.VMP</i>	<i>Vapor p/ a válvula redutora vapor de alta p/ média pressão</i>
<i>VMP-EXTR</i>	<i>Vapor de extração saindo da turbina</i>
<i>VAP-ADM</i>	<i>Vapor de admissão entrando na turbina</i>
<i>GEE</i>	<i>Geração de energia elétrica</i>

<i>CEE</i>	<i>Energia elétrica comprada</i>
<i>CEE</i>	<i>Consumo total de energia elétrica</i>
<i>PVAP</i>	<i>Pressão do vapor de alta pressão</i>
<i>PVMP</i>	<i>Pressão do vapor de média pressão</i>
<i>PVBP</i>	<i>Pressão do vapor de baixa pressão</i>
<i>TVAP</i>	<i>Temperatura do vapor de alta pressão</i>
<i>TVMP</i>	<i>Temperatura do vapor de média pressão</i>

#### 4. DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR E ENERGIA ELÉTRICA NA INDÚSTRIA DE CELULOSE E PAPEL

Para o melhor entendimento de um processo de cogeração na indústria de celulose e papel, são apresentados os principais conceitos de um sistema de distribuição de vapor e energia elétrica para esse tipo de indústria. Esses conceitos são utilizados na construção do modelo estrutural, base de elaboração do modelo matemático proposto no Capítulo 6. Em face da pouca literatura disponível sobre o assunto, este capítulo foi elaborado baseado na experiência prévia do autor e de acordo com as instalações existentes no setor.

A Figura 4.1 ilustra o sistema de geração de vapor e de energia elétrica na área de utilidades (cogeração).

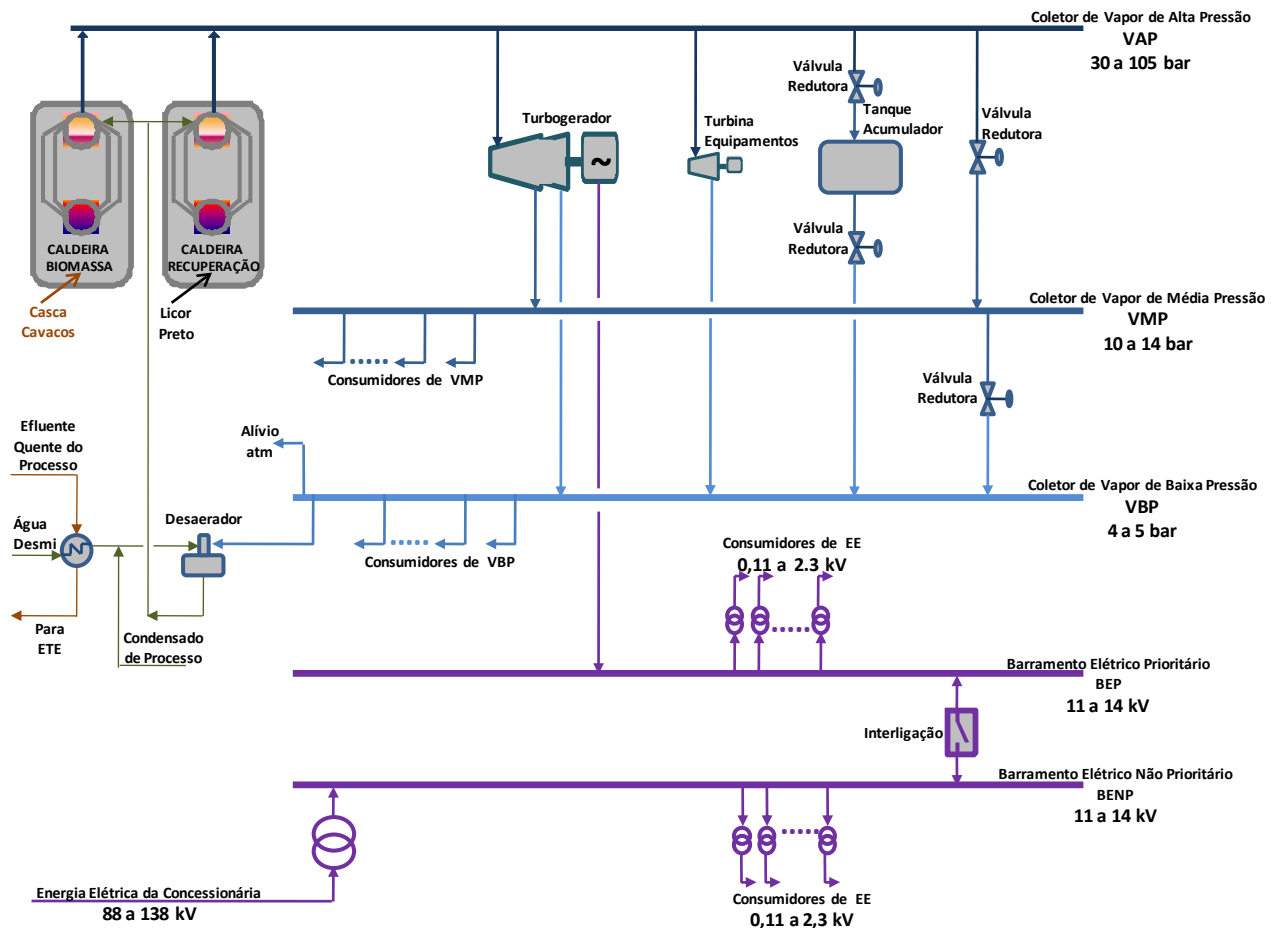


FIGURA 4.1 – Distribuição de vapor e energia elétrica

Fonte : Autor, 2010

O sistema termoeletrico de uma indústria de celulose e papel opera interligado com a concessionária de fornecimento de energia elétrica, operando com paridade térmica, ou seja, a

energia elétrica é produzida como uma consequência da demanda de energia térmica sob a forma de vapor, nas diversas etapas do processo de fabricação de celulose e papel. A energia elétrica adquirida da concessionária é utilizada para completar a demanda de carga total requerida.

#### **4.1 – Sistema de distribuição de vapor**

O sistema de distribuição de vapor é normalmente composto de três níveis de pressão: VAP (vapor de alta pressão), VMP (vapor de média pressão) e VBP (vapor de baixa pressão), em que a geração primária de vapor ocorre na pressão mais elevada, VAP variando de 30 bar a 105 bar, sendo gerada nas caldeiras de recuperação, biomassa e a combustível fóssil (óleo combustível ou gás natural).

Do coletor de VAP, cerca de 80% a 95% do vapor alimentam o turbogerador com extração de VMP variando de 10 bar a 14 bar e contrapressão de VBP variando de 4 bar a 5 bar. O vapor restante – cerca de 5% a 20% do vapor gerado nas caldeiras – é destinado a turbinas de acionamento de equipamentos (bombas de água, ventiladores, compressores, etc) e para válvulas redutoras para os coletores de VMP e de VBP, incluindo o tanque acumulador de vapor, que tem por função manter a pressão do coletor de VBP constante em casos de flutuações de carga das caldeiras e dos consumidores de VBP. Essas válvulas redutoras somente devem ser utilizadas em regime contínuo quando houver restrições de carga nos turbogeradores, pois elas representam menor geração de energia elétrica. Também, as turbinas de acionamento, face aos aumentos no preço de energia elétrica da concessionária, estão em desuso, priorizando-se assim a utilização de VAP nos turbogeradores, o que maximiza a geração de energia elétrica.

Cerca de 20% a 30% do VAP, principalmente oriundo da extração do turbogerador, alimentam o coletor de VMP, que tem como função principal a utilização de aquecimento em contato direto da polpa de celulose, amido na máquina de papel, atomização de combustível nas caldeiras, etc. Com média pressão da ordem de 10 bar a 14 bar, consegue-se sobrepor as pressões utilizadas na fabricação de celulose e papel e no cozimento da madeira quando as temperaturas requeridas estão na faixa de 140° a 170°C, que não se atinge com VBP em pressão de 4,5 bar.

O VBP, oriundo da contrapressão do turbogerador – cerca de 70% a 80% do vapor gerado nas caldeiras – é utilizado principalmente no pré-aquecimento dos cavacos no digestor, na evaporação do licor preto, no branqueamento em pontos de aquecimento direto à baixa

pressão, na secagem da polpa e do papel nas máquinas de secagem da polpa e na máquina de papel e também no desaerador de água de alimentação das caldeiras, além de outros consumos.

O pré-aquecimento da água desmineralizada, por contato indireto, com efluente quente do processo, assim como a reutilização do condensado oriundo dos processos de aquecimento ou secagem por contato indireto no processo de fabricação, minimizam o consumo de vapor para a desaeração da água e conseqüentemente o consumo de combustíveis.

Visando preservar a segurança e a estabilidade operacional do sistema de geração e distribuição de vapor, existem válvulas redutoras entre os níveis de pressão desse sistema. Essas válvulas são utilizadas para rebaixar a pressão dos coletores de VAP e VMP em caso de falha dos turgeradores ou em condições especiais de operação. Também uma válvula de alívio, com capacidade da ordem de 25% a 35% da geração de vapor, está instalada no coletor de VBP para alívio imediato de VBP para a atmosfera em caso de interrupção de consumo em alguma área do processo produtivo, evitando pressurização em cascata dos coletores de VBP, VMP e VAP, provendo tempo suficiente para redução de carga nas caldeiras quando de interrupções de consumo por tempo mais prolongado. Essa válvula de alívio deve ser dimensionada para uso somente em casos de necessidade, pois pode representar, se utilizada em regime contínuo, grande desperdício de combustível no sistema de cogeração. Válvulas de segurança, calibradas com pressões menores que as das válvulas de segurança das caldeiras, devem ser instaladas para preservar a integridade do sistema de distribuição de vapor e evitar paradas das caldeiras por abertura de suas válvulas de segurança. Ressalta-se, assim, a importância de um conjunto de medidas de segurança dimensionadas de forma a constituir um sistema de seletividade automática por pressão nos coletores de VBP, VMP e VAP, visando a confiabilidade e a continuidade operacional desse sistema, evitando paradas abruptas das caldeiras e do turbogerador e conseqüentemente do sistema produtivo.

A Figura 4.2 ilustra um exemplo de sistema de distribuição de vapor numa fábrica integrada de celulose e papel com produção de 1.200 t e 1.000 t/d, respectivamente, cujas instalações possuem uma caldeira de recuperação e uma caldeira de biomassa gerando 315 t/h de vapor a 65 bar de pressão no coletor de VAP e uma caldeira a óleo combustível gerando vapor a 12 bar de pressão para o coletor de VMP, utilizada para emergências. Um turbogerador com capacidade de 35 MW absorve cerca de 290 t/h de vapor, restando aproximadamente 25 t/h para acionamento de equipamentos por turbina e para uso no tanque acumulador e nas válvulas redutoras. Cerca de 50% da geração de vapor retorna ao desaerador



na forma de condensado que, com água desmineralizada aquecida por efluente do processo, completa a necessidade de alimentação de água desmineralizada das caldeiras.

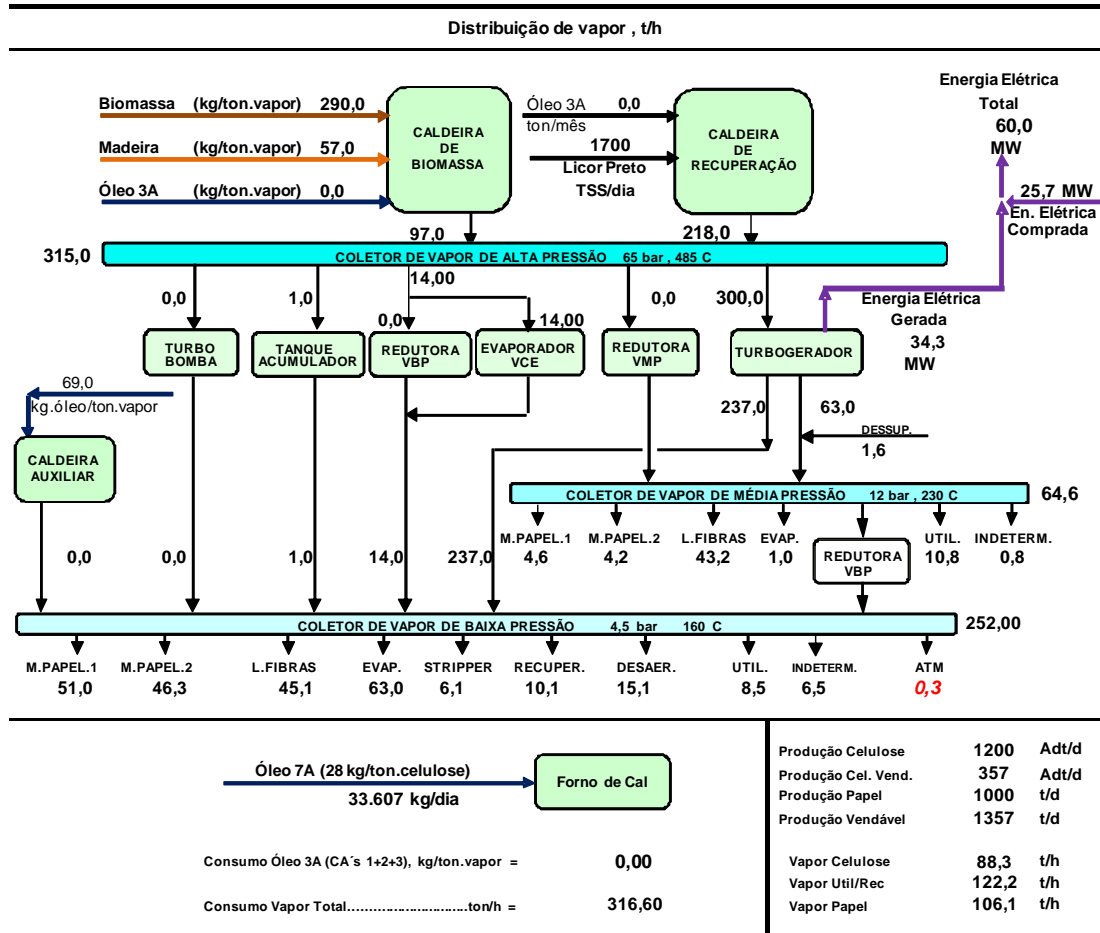


FIGURA 4.2 – Distribuição de vapor em fábrica integrada de celulose e papel

Fonte : IP Brasil, 2009

O sistema de vapor é composto por três coletores de 65 bar, 12 bar e 4,5 bar, sendo o coletor de 65 bar (VAP) alimentado diretamente a partir da geração de vapor das caldeiras. A alimentação dos demais coletores é feita a partir do vapor de extração, 12 bar (VMP) e contrapressão, 4,5 bar (VBP) do turbogerador que tem como função produzir energia elétrica, conforme a demanda de consumo de vapor dos diversos consumidores. Cada coletor possui um sistema próprio de controle de pressão que obedece ao princípio de fechamento do balanço de massa entre a alimentação e o consumo, sendo as válvulas redutoras e o tanque acumulador utilizados somente quando o turbogerador não supre as necessidades de consumo.

## 4.2 – Sistema de distribuição de energia elétrica

A energia elétrica comprada da concessionária é normalmente fornecida com 88 kV a 138 kV de tensão (subgrupo A2 conforme ANEEL 456/2000) que, por meio de transformadores, é reduzida para 11 kV a 14 kV, cuja energia-ativa e energia-reativa irão completar a energia-ativa total e energia-reativa total consumida, descontada a geração dessas energias pelo turbogerador, que variam em função da demanda de energia térmica da fábrica. Normalmente, a relação entre a energia-ativa e a reativa (fator de potência), adquiridas da concessionária, deve permanecer acima de 0,92.

A distribuição de energia elétrica normalmente é dividida para dois barramentos, denominados prioritário (alimentado pelo turbogerador) e não-prioritário (alimentado pela concessionária), os quais são interligados por um disjuntor seletivo a variações de frequência e tensão na energia elétrica fornecida pela concessionária. No barramento prioritário, estão instalados os cubículos com os disjuntores que alimentam os circuitos elétricos de setores prioritários da fábrica que são os da Utilidades e Recuperação (caldeiras de força e recuperação, tratamento de água e efluentes, compressores, evaporação, etc), os quais são responsáveis pelo fornecimento de energia e insumos aos processos e o restante conforme disponibilidade de energia elétrica gerada para processos de maior consumo de vapor e menor de energia elétrica, como o digestor e evaporação e, se possível, a máquina de secagem de celulose ou a máquina de papel. Garante-se assim a continuidade de funcionamento das caldeiras (vapor) e do turbogerador (energia elétrica para água, efluentes e ar comprimido) em caso de perda ou variações de frequência e tensão da energia elétrica da concessionária, a qual, por atuação de relés de segurança, abre instantaneamente o disjuntor de interligação (paralelo) entre os barramentos. No barramento não-prioritário, estão instalados os cubículos com os disjuntores que alimentam os circuitos elétricos dos diversos setores produtivos e administrativos da fábrica, com maior consumo de energia elétrica e menor ou nenhum consumo de vapor, como a preparação de madeira, branqueamento, acabamento do papel e de apoio, como oficinas e administrativo. Também no barramento não-prioritário, consta o cubículo para ligação com um banco de capacitores, responsável por suprir e amenizar as variações de consumo de energia-reativa para melhor controle do fator de potência.

Os circuitos elétricos, oriundos dos cubículos interligados nos barramentos prioritário e não-prioritário, alimentam as diversas subestações da fábrica que, por transformadores, reduzem a tensão de 11 kV a 14 kV para 0,11 kV; 0,22 kV; 0,38 kV; 0,44 kV e 2,3 kV, que são as tensões utilizadas nos diversos pontos de consumo. Em cada subestação, estão ligados

os diversos CCM's que alimentam os diversos motores do processo produtivo. Toda a instalação elétrica é dotada de um amplo sistema de segurança, desde relés de sobrecorrente para proteção contra curto-circuitos até modernos sistemas de rejeição de cargas não críticas para atuação após perdas de geração de energia elétrica ou de interligações com a concessionária. A Figura 4.3 ilustra resumidamente um sistema de distribuição de energia elétrica na indústria de celulose e papel.

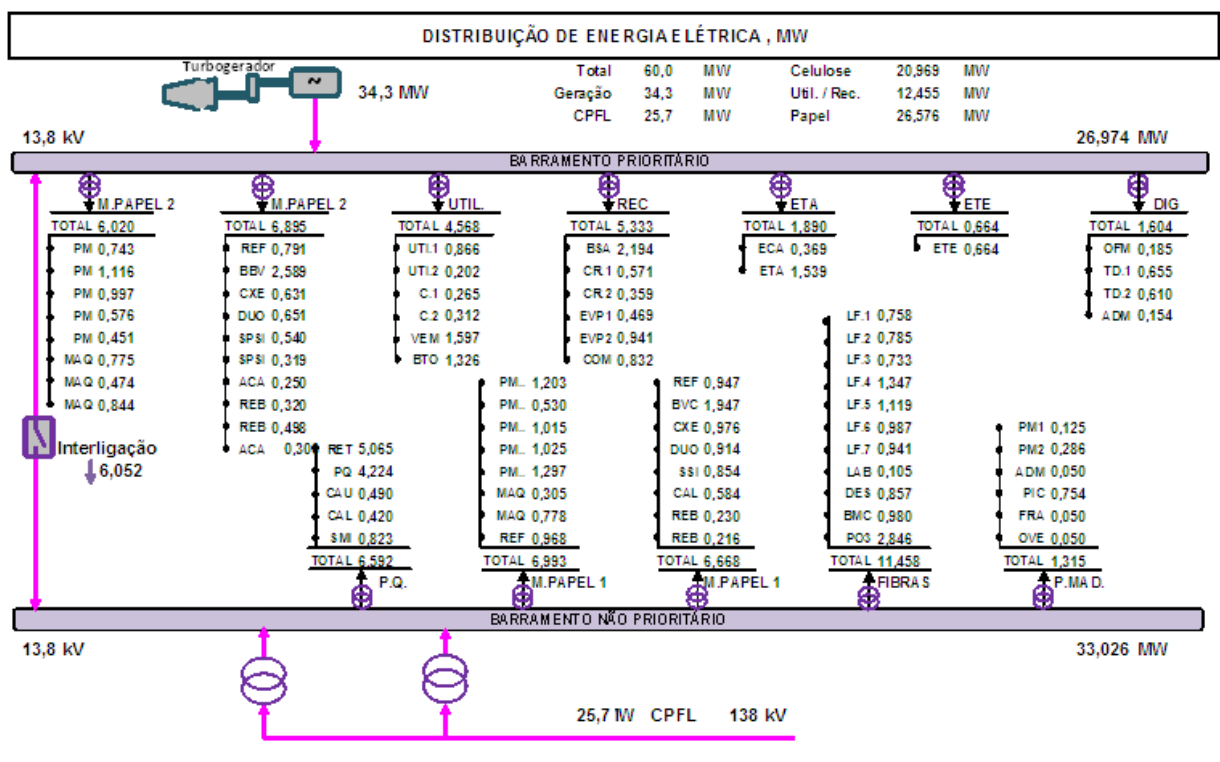


FIGURA 4.3 – Distribuição de energia elétrica em fábrica integrada de celulose e papel

Fonte : IP Brasil, 2009

No caso de parada do turbogerador, o vapor é automaticamente desviado para as válvulas redutoras, que se abrem instantaneamente para a posição correspondente à produção de vapor das caldeiras, a fim de garantir o funcionamento das caldeiras e o suprimento de vapor aos consumidores que terão prioridade de funcionamento. Nesse caso, ocorre um aumento repentino de carga adquirida da concessionária, cujo valor de demanda contratada, ao ser atingido, aciona um sistema de rejeição de carga dos consumidores não críticos, selecionados em grupos de prioridade, mantendo assim o funcionamento da área de utilidades e recuperação, bem como setores produtivos selecionados conforme a prioridade de rejeição de carga e a demanda contratada disponível.

No caso de perda das caldeiras, e conseqüentemente do turbogerador, ocorrerá parada dos setores por falta de vapor e por atuação do sistema de rejeição de carga já descrito, paralisando praticamente todo o processo produtivo, a não ser os processos de tratamento de água, efluentes, compressão de ar, iluminação, etc., processos estes que não consomem vapor e estão em última prioridade de parada no sistema de rejeição de carga.

Como já comentado no item 4.1, também uma válvula de alívio, com capacidade da ordem de 25% a 35% da geração de vapor, está instalada no coletor de VBP para alívio imediato de VBP para a atmosfera em caso de interrupção de consumo de vapor em alguma área do processo produtivo, evitando pressurização em cascata dos coletores de VBP, VMP e VAP e provendo tempo suficiente para redução de carga nas caldeiras quando de interrupções de consumo por tempo mais prolongado. O VBP desviado para a atmosfera proporciona manter a geração de energia elétrica inalterada, pois, na maioria das vezes, o corte no consumo de vapor por um consumidor nem sempre é acompanhado de corte no consumo de energia elétrica, o que permite manter estabilidade no sistema de distribuição de energia elétrica. Essa válvula de alívio deve ser dimensionada para uso somente em casos de necessidade, pois pode representar, se utilizada em regime contínuo, grande desperdício de combustível no sistema de cogeração.

## 5. MODELAGEM MATEMÁTICA COM REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

Neste capítulo, são abordados conceitos relativos à modelagem com a utilização da técnica estatística de regressão linear múltipla, em que são mostradas as deduções matemáticas e como interpretar os resultados de predição com as proporções de variabilidades associadas. Esses conceitos são utilizados no Capítulo 7 para a construção das equações do modelo matemático proposto, com o auxílio do software estatístico Minitab-14.

A análise de regressão múltipla é de longe a técnica de dependência mais amplamente usada e versátil, aplicável em cada faceta da tomada de decisões em negócios. Seus usos variam desde os problemas mais gerais até os mais específicos, e, em cada caso, relaciona um fator (ou fatores) a um resultado específico (HAIR et al., 2007).

A engenharia de produção atua sobre a concepção, viabilização e operação de sistemas de produção de bens e serviços. Como componente de gestão, emprega métodos de organização da produção, e, para a otimização dos recursos produtivos, utiliza-se de várias técnicas, muitas delas de cunho estatístico para modelar sistemas de produção e auxiliar na tomada de decisões. Os modelos matemáticos construídos são, na grande maioria, dependentes de inúmeras variáveis, e a técnica de regressão linear múltipla é a mais utilizada (ABEPRO, 2008).

Na engenharia de qualidade pode atuar para a redução do número de itens produzidos com defeitos, correlacionando-os com as possíveis causas (ou variáveis) de influência, como, por exemplo, a taxa de produção, o turno de trabalho, o tempo decorrido de manutenção da máquina de produção, etc. (CHARNET et al., 1999).

Na pesquisa operacional de um processo químico, pode-se verificar o efeito de variações de temperaturas e concentrações de reagentes na taxa de produção de um produto, possibilitando melhor controle do processo químico e maximizando a produção (FONSECA et al., 2006).

No estudo de viabilidade de implantação de um novo negócio, como, por exemplo, uma fábrica, a correlação de demanda do produto com a taxa de crescimento populacional e renda per capita, pode ajudar a justificar o investimento e tomadas de financiamento junto a instituições financeiras (FONSECA et al., 2006).

Na pesquisa de mercado, o nível previsto de uso de um produto se correlaciona, em diferentes intensidades, com a velocidade de entrega, o nível de preço, a flexibilidade de preço, a imagem do fabricante, a qualidade do produto, etc. A quantificação dessas

intensidades pode ajudar nas estratégias adotadas para o melhor controle da demanda ou uso desse produto (HAIR et al., 2007).

Na área de ergonomia e segurança no trabalho, pode-se relacionar as condições ambientais no trabalho, como temperatura, umidade relativa e velocidade do ar ambiente, com a sensação térmica dos funcionários, podendo-se implementar o nível de segurança no ambiente de trabalho, a redução de absenteísmo e a produtividade dos funcionários (OLIVEIRA et al., 2008).

Na engenharia de avaliações, o preço de um imóvel pode ser correlacionado com as condições da área a que pertence, como urbanização, infraestrutura, renda per-capita da população e nível de demanda e oferta (STEINER et al., 2008)

Na engenharia de operações de uma cadeia de abastecimento, o entendimento (ou modelagem) da variabilidade da demanda é fundamental para a quantificação de sua intensidade, ajudando a reduzir seus impactos negativos sobre o nível de serviço e sobre os estoques. A variabilidade no *lead time* de entrega de pedidos e dos excessos de estoque, assim como outras variáveis pode ser correlacionada com a variabilidade de demanda e proporcionar a redução deste efeito conhecido como *efeito chicote* (FIORIO, 2007).

## 5.1 - Modelagem com regressão linear múltipla

Modelagem com regressão linear múltipla é uma técnica que permite separar relações para cada conjunto de variáveis dependentes. Em seu sentido mais simples, essa técnica permite a estimação apropriada e mais eficiente para uma série de equações de regressão linear múltipla, separadas, estimadas simultaneamente (HAIR, 2007). Recomenda-se a utilização de dois componentes básicos: (1) o modelo estrutural e (2) o modelo de mensuração.

O *modelo estrutural* é o modelo de “caminhos”, que relaciona variáveis independentes com dependentes. Em tais situações, teoria, experiência prévia ou outras orientações permitem ao pesquisador distinguir quais variáveis independentes preveem cada variável dependente.

O *modelo de mensuração* permite ao pesquisador examinar uma série de relações de dependência simultaneamente, sendo particularmente útil quando uma variável dependente se torna independente em subseqüentes relações de dependência. Esse conjunto de relações, cada uma com variáveis dependentes e independentes, é a base da modelagem. A formulação básica em termos de equações é:



exógena pode estar causalmente relacionada apenas com variáveis endógenas. Portanto, a diferença entre exógenas e endógenas (ou independentes e dependentes) é determinada exclusivamente pelo pesquisador.

Desenvolvido o modelo estrutural e representado no diagrama de caminhos, o pesquisador está pronto para especificar o modelo em termos mais formais. Traduzir um diagrama de caminhos em uma série de equações é um procedimento direto. A Tabela 5.1 ilustra esse processo para o diagrama de caminhos representado na Figura 5.1.

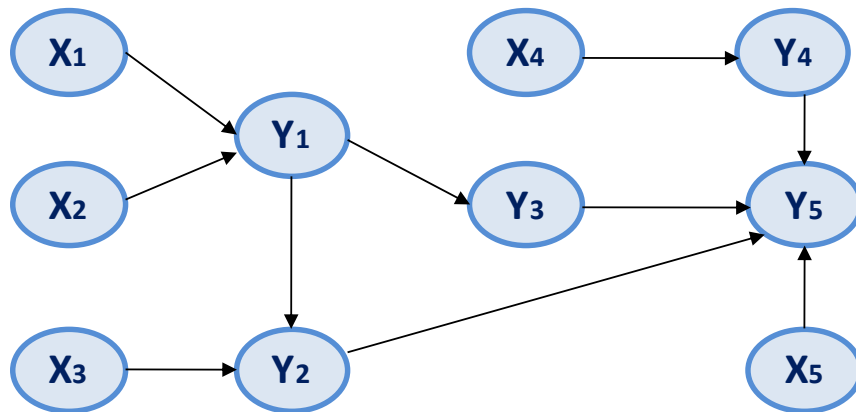
Tabela 5.1 – Tradução de diagrama de caminhos para equações

Variável Endógena	Variáveis Exógenas						Variáveis Endógena					Erro		
<b>Y1</b>	CTE	X1	X2	X3	X4	X5	+	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	+	ei
Y1	=	a1	+ a2 X1	+ a3 X2										+ e1
Y2	=	a4			+ a5 X3		+	a6 Y1						+ e2
Y3	=	a7					+	a8 Y1						+ e3
Y4	=	a9			+ a10 X4									+ e4
Y5	+	a11				+ a12 X5	+		a13 Y2+a14 Y3+a15Y4					+ e5

Fonte : Hair, 2007

A Figura 5.2 ilustra o diagrama de caminhos e as equações ajustadas pelo método de regressão linear múltipla.





$Y \rightarrow$  variáveis endógenas,  $X \rightarrow$  variáveis exógenas,  $\epsilon \rightarrow$  erro

$$Y_1 = a_1 + a_2 X_1 + a_3 X_2 + \epsilon_1$$

$$Y_2 = a_4 + a_5 X_3 + a_6 Y_1 + \epsilon_2$$

$$Y_3 = a_7 + a_8 Y_1 + \epsilon_3$$

$$Y_4 = a_9 + a_{10} X_4 + \epsilon_4$$

$$Y_5 = a_{11} + a_{12} X_5 + a_{13} Y_2 + a_{14} Y_3 + a_{15} Y_4 + \epsilon_5$$

FIGURA 5.2 – Diagrama de caminhos e equações correspondentes

Fonte : Hair, 2007

Como recomendação para a correta especificação do modelo, um processo de sete estágios pode ser utilizado (HAIR, 2007):

- a. desenvolvimento de um modelo teórico;
- b. construção de um diagrama de caminhos de relações casuais;
- c. conversão do diagrama de caminhos em um conjunto de modelos estrutural e de mensuração;
- d. escolha do tipo de matriz de dados e estimação do modelo proposto;
- e. avaliação da identificação do modelo estrutural;
- f. avaliação dos critérios de qualidade de ajuste e
- g. interpretação e modificação do modelo, se teoricamente justificadas.

Resumindo, modelagem matemática com a utilização da técnica estatística de **regressão linear múltipla** permite ao pesquisador avaliar inúmeras relações de dependência inter-relacionadas em diferentes níveis de complexidade

## 5.2 - Regressão linear múltipla

### 5.2.1 Introdução

O modelo de regressão que envolve mais de um regressor (variável independente) é chamado modelo de regressão linear múltipla (ou MLR do inglês *Multiple Linear Regression*). Por esse modelo é possível observar os efeitos das variáveis regressoras sobre as respostas.

Infelizmente, o nome regressão, selecionado a partir do título do primeiro artigo de Galton, de forma alguma reflete a importância ou profundidade de aplicação dessa metodologia. O objetivo da MLR é encontrar relações entre variáveis dependentes e combinações lineares de variáveis independentes que minimizem o erro na estimativa dessas propriedades de interesse. Os coeficientes do modelo MLR são calculados utilizando o critério dos mínimos quadrados.

As limitações da regressão linear múltipla concentram-se no número de amostras que não pode ser menor do que o número de variáveis e em realizar alguns cálculos matriciais quando as variáveis independentes possuem uma elevada correlação entre si.

### 5.2.2 Um breve histórico

A técnica de regressão linear múltipla é bastante antiga. Suas aplicações são numerosas e ocorrem em quase todos os campos, incluindo engenharia, física, economia, gerenciamento, etc.

O método de mínimos quadrados, também conhecido por análise de regressão, foi usado pela primeira vez por Sir Francis Galton, um dos pioneiros da Estatística, em um trabalho de 1885 intitulado *Regression toward mediocrity of hereditary stature*. Esse método pode ser considerado a técnica estatística mais utilizada até os dias de hoje (MONTGOMERY e PECK, 1992).

### 5.2.3 Desenvolvimento matemático

Em geral, a variável dependente, ou resposta  $y$ , está relacionada com  $k$  variáveis independentes ou regressoras. O modelo

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (5.1)$$

é chamado de modelo linear de regressão múltipla com  $k$  regressores. Os  $\beta_j, j=0, 1, \dots, k$ , são chamados de coeficientes de regressão. Esse modelo descreve um hiperplano no espaço de  $K$  dimensão das variáveis regressoras ( $x_i$ ) da variável dependente ( $y$ ). O parâmetro  $\beta_j$  representa a mudança esperada na resposta  $y$  por unidade de mudança em  $x_j$ , quando todos os demais regressores  $x_i$  ( $i \neq j$ ) são constantes. Se o domínio dos dados inclui  $x_1 = x_2 = \dots = x_k = 0$ , então  $\beta_0$  é a média de  $y$  quando  $x_1 = x_2 = \dots = x_k = 0$ . Caso contrário,  $\beta_0$  não tem interpretação física.

Modelos de regressão linear múltipla são geralmente usados como modelos empíricos. Ou seja, o modelo fenomenológico que relaciona  $y$  e  $x_1, x_2, \dots, x_k$  é desconhecido, mas, sobre certos domínios das variáveis independentes, o modelo de regressão linear é uma aproximação adequada.

Modelos que são mais complexos em estrutura que a Equação 5.1 podem geralmente ser analisados por técnicas de regressão linear múltipla. Neste caso termos quadráticos e cúbicos das variáveis dependentes podem ser adicionados.

Modelos que incluem efeitos de interação também podem ser analisados por métodos de regressão linear múltipla. Uma interação entre duas variáveis pode ser representada por um termo de produto cruzado no modelo, por exemplo,  $x_1 x_2$ .

Note-se que, apesar de os modelos de regressão linear poderem apresentar formas de superfícies não lineares, eles são lineares em seus parâmetros (os  $\beta$ 's), indiferentemente da forma da superfície que eles geram.

Na maioria dos problemas reais, os valores dos parâmetros (os coeficientes de regressão  $\beta_j$ ) e as variâncias  $\sigma^2$  não são conhecidos, e eles devem ser estimados a partir de uma amostra de dados. A análise de regressão consiste em uma coleção de ferramentas estatísticas para determinar estimativas dos parâmetros no modelo de regressão. Então, a equação de regressão, ou modelo, é tipicamente usada na predição de observações futuras de  $y$ , ou para estimar a resposta média em um nível particular de  $x$ .

### 5.2.4 Estimativa dos parâmetros do modelo

#### *Estimativa dos coeficientes de regressão por mínimos quadrados*

O método de mínimos quadrados é geralmente utilizado para estimar os coeficientes de regressão no modelo de regressão simples, assim como no de regressão múltipla. Supondo que  $n > k$  observações estão disponíveis, e que  $x_{ij}$  denota a  $i$ -ésima observação ou nível da variável  $x_j$ . as observações são:

$$(x_{i1}, x_{i2}, \dots, y_i), i = 1, 2, \dots, n \quad e \quad n > k \quad (5.2)$$

Cada observação  $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, y_i)$  satisfaz o modelo da Equação 5.1, ou

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.3)$$

No ajuste do modelo de regressão, é conveniente expressar as operações matemáticas usando notação de matriz, o que facilita o entendimento. Logo, o modelo da Equação 5.3 é um sistema de  $n$  equações que podem ser expressas em notação de matriz como,

$$y = X\beta + \varepsilon \quad (5.4)$$

onde,

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Em geral,  $y$  é um vetor ( $n \times 1$ ) das observações,  $X$  é uma matriz ( $n \times p$ ) dos níveis das variáveis independentes,  $\beta$  é um vetor ( $p \times 1$ ) dos coeficientes de regressão e  $\varepsilon$  é um vetor ( $n \times 1$ ) de erros aleatórios.

Deseja-se então encontrar o vetor de estimadores de mínimos quadrados,  $\hat{\beta}$ , que minimiza

$$L = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon = (y - X\hat{\beta})^T (y - X\hat{\beta}), \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.6)$$

onde  $(\cdot)^T$  representa a transposta. O estimador dos mínimos quadrados  $\hat{\beta}$  é a solução para  $\beta$  na Equação (5.7) que segue,

$$\frac{\partial \mathbf{L}}{\partial \hat{\boldsymbol{\beta}}} = 0 \quad (5.7)$$

Logo, as equações resultantes que devem ser resolvidas são representadas pela Equação 5.8,

$$\mathbf{X}^T \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} = \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.8)$$

A Equação 5.8 representa as equações normais de mínimos quadrados em forma de matriz. Para resolver as equações normais, multiplica-se ambos os lados da Equação 5.8 pelo inverso de  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ . Portanto, a estimativa dos mínimos quadrados de  $\boldsymbol{\beta}$  é

$$\hat{\boldsymbol{\beta}} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (5.9)$$

Nota-se então que existem  $p = k + 1$  equações normais em  $p = k + 1$  parâmetros desconhecidos (os valores de  $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ ). Escrevendo a Equação 5.8 em detalhes tem-se

$$\begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik} \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 & \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{ik} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} & \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i1} & \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i2} & \cdots & \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\beta}_0 \\ \hat{\beta}_1 \\ \vdots \\ \hat{\beta}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i \\ \vdots \\ \sum_{i=1}^n x_{ik} y_i \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

É fácil verificar que  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  é uma matriz simétrica ( $p \times p$ ) e  $\mathbf{X}^T \mathbf{y}$  é um vetor ( $p \times 1$ ). Nota-se a estrutura especial da matriz  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$ , onde os seus elementos diagonais são as somas dos quadrados dos elementos na coluna de X e os elementos de  $\mathbf{X}^T \mathbf{y}$  são as somas dos produtos cruzados de X e as observações  $y_i$ . Às vezes, a matriz  $\mathbf{X}^T \mathbf{X}$  é singular.

O modelo de regressão ajustado é então dado pela Equação 5.11, que segue:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \sum_{j=1}^k \hat{\beta}_j x_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \text{ou} \quad \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{X} \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (5.11)$$

Para a medida da precisão do modelo de regressão, é levada em consideração a linha ajustada, ou seja, a seguinte identidade:

$$y_i - \hat{y}_i = (y_i - \bar{y}) - (\hat{y}_i - \bar{y}) \quad (5.12)$$

O resíduo  $e_i = y_i - \hat{y}_i$  é a diferença entre duas quantidades:

- (i) o desvio dos valores observados  $y_i$  a partir da média total  $\bar{y}$
- (ii) o desvio dos valores ajustados  $\hat{y}_i$  a partir da média total  $\bar{y}$ .

O vetor ( $n \times 1$ ) de resíduos é denotado por

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (5.13)$$

### *Estimativa de $\sigma^2$*

A estimativa de  $\sigma^2$  é obtida a partir dos resíduos. A soma quadrática dos resíduos é dada por

$$\begin{aligned} SQ_E &= \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \\ &= \sum_{i=1}^n e_i^2 \end{aligned} \quad (5.14)$$

A soma quadrática residual tem  $n - p$  graus de liberdade associada a ela, desde que  $p$  parâmetros sejam estimados no modelo de regressão. Logo, a média quadrática do resíduo (ou erro quadrático médio) que representa uma estimativa de  $\sigma^2$  é dada por

$$s^2 = MQ_E = \frac{SQ_E}{n - p} \quad (5.15)$$

### 5.2.5 Teste de hipóteses em regressão linear

Os testes de hipóteses apresentados nesta sessão são úteis na medição da adequação dos modelos. Esses testes requerem que os termos de erro  $\varepsilon$  no modelo de regressão sejam distribuídos normalmente e independentemente, com média zero e variância  $\sigma^2$ .

Antes de discutir-se os testes de hipóteses, será apresentado um parâmetro de probabilidade, denominado p-valor, que auxilia na decisão de aceitação ou rejeição da hipótese nula,  $H_0$ .

#### *P-valor no teste de hipóteses*

É comum considerar o teste estatístico (e os dados significantes) quando a hipótese  $H_0$  é rejeitada, então se tem o p-valor como o menor nível de  $\alpha$  para que os dados sejam significantes.

Para o teste de distribuição normal, tem-se que, se  $Z_0$  é o valor estimado para o teste estatístico, então o p-valor é:

$$\begin{aligned} P &= 2 [ 1 - \varphi(z_0) ] , \text{ para testes de duas caudas (Fig. 5.1a)} \\ P &= 1 - \varphi(z_0) , \text{ para testes com cauda superior (Fig. 5.1b)} \\ P &= \varphi(z_0) , \text{ para testes com cauda inferior (Fig. 5.1c)} \end{aligned} \quad (5.16)$$

onde  $\varphi(z_0)$  é a função de distribuição cumulativa de probabilidade.

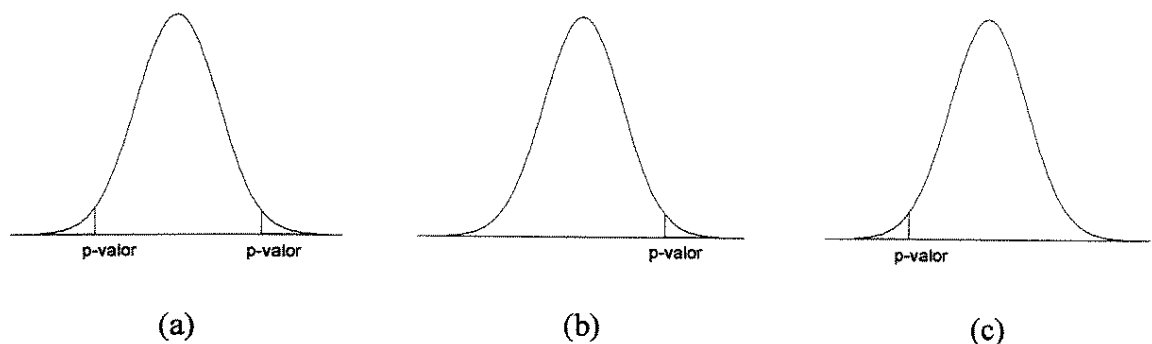


FIGURA 5.3 : Área da função de probabilidade acumulada

Em geral utiliza-se p-valor maior que 0,05, correspondente a um intervalo de confiança de 95%, para indicar a aceitação da hipótese nula  $H_0$ .

O p-valor tem sido bastante utilizado na prática (MONTGOMERY et al., 2002). Como pode ser observado, esse teste tem a vantagem de ser de fácil interpretação, sendo seu valor estimado e fornecido por programas estatísticos, como o Minitab e o Statistica.

### ***Teste para Significância de Regressão***

O teste para significância de regressão é utilizado para determinar se existe uma relação linear entre a variável resposta e um conjunto de variáveis regressoras  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ .

As hipóteses apropriadas são:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \quad (5.17)$$

$$H_1 : \beta_j \neq 0, \text{ para pelo menos um } j$$

A rejeição de  $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$  implica que pelo menos uma das variáveis regressoras  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$  contribui significativamente para o modelo. Entretanto, a aceitação da hipótese nula pode indicar tanto uma contribuição não significativa das variáveis regressoras para o modelo assim como a presença de relações não lineares entre as variáveis regressoras e a resposta.

Um método chamado análise de variância (ANOVA) pode ser usado para testar a significância da regressão. Esse procedimento divide a variabilidade total nas variáveis respostas em componentes significantes como base para o teste. A identidade de análise de variância é,

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5.18)$$

Os dois componentes do lado direito da Equação 5.18 medem, respectivamente, a quantidade de variabilidade em  $y_i$  considerado pela linha de regressão e a variação residual não explicada pela linha de regressão.

A Equação 5.18 pode ser escrita como

$$SQ_T = SQ_R + SQ_E \quad (5.19)$$

$SQ_T$  é a soma quadrática total de  $y$  dada por:



$$SQ_T = \sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

$SQ_R$  é a soma quadrática da regressão dada por:

$$SQ_R = \hat{\beta}Xy - \frac{(\sum y_i)^2}{n}$$

$SQ_E$  é o erro ou a soma quadrática dos resíduos dado por:

$$SQ_E = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$$

A soma quadrática total tem  $n - 1$  grau de liberdade. Se a hipótese nula  $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$  é verdadeira, então  $SQ_R / \sigma^2$  é uma variável aleatória qui-quadrada com  $k$  graus de liberdade. Observa-se que o número de graus de liberdade para essa variável aleatória qui-quadrada é igual ao número de variáveis regressoras no modelo.  $SQ_E / \sigma^2$ , é uma variável aleatória qui-quadrada com  $n - p$  graus de liberdade e que  $SQ_E$  e  $SQ_R$  são independentes.

O teste estatístico geralmente utilizado para é  $H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$  é

$$F_0 = \frac{SQ_R / k}{SQ_E / (n - p)} = \frac{MQ_R}{MQ_E} \quad (5.20)$$

A quantidade de  $MQ_R$  é chamada de média quadrática da regressão (ou do modelo). Pode-se rejeitar  $H_0$  se o valor calculado do teste estatístico,  $F_0$ , for maior que  $F$  tabelado ( $f_{\alpha, k, n-p}$ ). Desta forma, se a média quadrática residual for significativamente grande, diz-se que existe falta de ajuste no modelo e que o modelo não é adequado. O procedimento é usualmente resumido em uma tabela de análise de variância, como a Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Análise de Variância para testar a significância de uma regressão

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de liberdade	Média quadrática	$F_0$
Regressão	$SQ_R$	$k$	$MQ_R$	$MQ_R / MQ_E$
Erro ou resíduo	$SQ_E$	$n - p$	$MQ_E$	
Total	$SQ_T$	$n - 1$		

P-valor maior que 0,05 (intervalo de confiança de 95%) indica a aceitação da hipótese nula, ou seja, que a regressão não é significativa.

### ***Testes sobre os coeficientes individuais de regressão***

Geralmente, o conjunto das variáveis potencialmente importantes para o modelo não é conhecido; desta forma, dentre o universo de variáveis disponíveis, o subconjunto que efetivamente deve fazer parte do modelo deve ser determinado.

A aplicação de um teste de hipóteses sobre os coeficientes de regressão individuais auxilia na determinação do valor potencial de cada variável regressora no modelo de regressão. Por exemplo, o modelo pode ser mais eficiente com a inclusão de variáveis adicionais ou, talvez, com a exclusão de um ou mais regressores presentes no modelo.

As hipóteses para testar a significância de qualquer coeficiente de regressão, chamado de  $\beta_j$ , são :

$$\begin{aligned} H_0 : \beta_j &= 0 \\ H_0 : \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \quad (5.21)$$

Se  $H_0 : \beta_j = 0$  não é rejeitado, então este indica que o regressor  $x_j$  pode ser excluído do modelo. O teste estatístico para esta hipótese é:

$$T_0 = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 C_{jj}}} \quad (5.22)$$

onde :

$C_{jj}$  é o elemento diagonal de  $(X^T X)^{-1}$  correspondente a  $\beta_j$ . A hipótese nula  $H_0 : \beta_j = 0$  é rejeitada se  $|t_0| > t_{\alpha/2, n-p}$ . Observa-se que este é um teste parcial ou marginal, pois o coeficiente de regressão  $\hat{\beta}$  depende de todas as variáveis regressoras  $x_i$  ( $i \neq j$ ) que estão no modelo. Então, este é um teste da contribuição de  $x_j$  dado os outros regressores no modelo.

Assim como no teste de significância da regressão a análise de significância dos coeficientes de regressão pode ser realizada utilizando o p-valor, em vez do teste  $T_0$ , sendo que p-valor menor 0,05 indica que o coeficiente de regressão  $\hat{\beta}$  é significativo para o modelo. O uso da estatística p-valor oferece a vantagem de não requerer um valor tabelado para realizar o teste de hipóteses, como ocorre com a estatística  $T_0$ .

Um processo de seleção de variáveis pode ser usado para encontrar-se o subconjunto de variáveis que efetivamente deve fazer parte do modelo. Nesse processo é realizado o

procedimento de inclusão ou exclusão de variáveis uma a uma até que, por algum critério estabelecido, o processo termine.

Existem vários algoritmos na seleção de variáveis, e eles não conduzem necessariamente à mesma solução. Os principais são: a seleção *stepwise*, a seleção passo a frente (*forward*) e a eliminação passo para trás (*backward*).

A seleção *stepwise*, proposto por Eftoymsom, em 1960, é o método mais popular. Ele começa com a escolha da variável independente que melhor explica a variável dependente, ou seja, a que apresenta maior coeficiente de correlação ou de determinação múltipla,  $R^2$ -Equação (5.32). Um teste é feito para verificar se a variável escolhida é significativa. Caso seja, ela fica no modelo, e o próximo passo é escolher uma segunda variável que produza o maior aumento em  $R^2$  quando adicionada ao modelo. Um teste é feito para verificar se a contribuição dessa nova variável é significativa. Depois que a segunda variável entra no modelo, um teste é realizado para verificar se a primeira variável permanece no modelo. Caso permaneça, uma terceira variável é selecionada. Se uma terceira variável entra no modelo, testa-se para verificar se as duas primeiras continuam no modelo. Pode acontecer que uma delas, ou as duas sejam eliminadas. Tenta-se a inclusão de uma nova variável. Caso entre, tenta-se a eliminação das que já estão no modelo. O procedimento acaba quando não se consegue adicionar nem eliminar variáveis do modelo.

A seleção passo a frente começa da mesma forma que a *stepwise*; entretanto, uma vez que uma variável foi selecionada e admitida como significativa, ela fica no modelo. Dessa forma, o processo continua até que o teste rejeite como significativa a variável escolhida pelo critério de maior aumento de  $R^2$ , ou seja, quando nenhuma das variáveis candidatas tem um p-valor menor que o *alfa* de inclusão.

A eliminação passo para trás começa pelo ajuste de todas as variáveis independentes candidatas a ficar no modelo. As variáveis são então eliminadas uma de cada vez, da mesma forma que a seleção *stepwise*. Com o processo passo para trás, uma vez que a variável sai do modelo, ela não entra mais. Neste caso, o procedimento termina quando nenhuma variável incluída no modelo tem um p-valor maior que o *alfa* de exclusão.

Para a seleção *stepwise*, Draper e Smith (1981) sugerem o uso de  $\alpha = 0,05$  (nível de 95% de confiança) e  $\alpha = 0,10$  (nível de 90% de confiança) para os testes de inclusão e exclusão de variáveis, respectivamente. Essa diferença nos valores dos *alfas* tem o objetivo de dificultar a exclusão de variáveis, garantindo que pelo menos algumas variáveis preditoras sejam utilizadas na modelagem. Entretanto, Draper e Smith (1981) e Montgomery Peck

(1992) concordam que a escolha dos níveis de confiança deve ser de responsabilidade do analista.

Evidencia-se, portanto, a importância da experiência do analista, pois construir um modelo de regressão que inclua um subconjunto das variáveis potencialmente importantes envolve o seguinte paradigma: o modelo deve incluir tantos regressores possíveis de tal forma que a informação contida nessas variáveis possa ser um bom preditor da variável dependente, ao passo que o modelo deve incluir o menor número possível de regressores de forma a facilitar a sua interpretação e ainda minimizar o custo de coletar a informação e de manter o modelo.

### 5.2.6 Intervalo de confiança sobre a resposta média

Para estimar a resposta média em um ponto particular  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}$ , define-se o vetor

$$\mathbf{x}_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ x_{01} \\ x_{02} \\ \vdots \\ x_{0k} \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

A resposta média neste ponto é  $E(Y/x_0) = \mu_{y/x_0} = \mathbf{x}_0^T \boldsymbol{\beta}$ , que é estimado por

$$\hat{\mu}_{Y|x_0} = \mathbf{x}_0^T \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (5.24)$$

Pode-se demonstrar que a variância de  $\hat{\mu}_{Y|x_0}$  é (MONTGOMERY, 1998),

$$V(\hat{\mu}_{Y|x_0}) = \sigma^2 \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0 \quad (5.25)$$

Um intervalo de confiança percentual de  $100(1 - \alpha)$  sobre  $\mu_{y/x_0}$  pode ser construído a partir da estatística

$$\frac{\hat{\mu}_{Y|x_0} - \mu_{Y|x_0}}{\sqrt{\sigma^2 \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0}}, \quad (5.26)$$

ou seja,

$$\hat{\mu}_{Y|x_0} - t_{\alpha/2, n=p} \sqrt{\sigma^2 \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0} \leq \mu_{Y|x_0} \leq \hat{\mu}_{Y|x_0} + t_{\alpha/2, n=p} \sqrt{\sigma^2 \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0} \quad (5.27)$$

Os modelos obtidos neste trabalho têm por objetivo a predição de valores individuais e não médios; logo, encontra-se maior utilidade na determinação do intervalo de confiança de predição. A definição desses intervalos é apresentada na Seção 5.2.7, que segue.

### 5.2.7 Predição de novas observações

Um modelo de regressão pode ser usado para prever futuras observações da variável resposta correspondente a valores particulares das variáveis independentes,  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}$ . Se  $\mathbf{x}_0^T = [x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}]$ ; então uma estimativa pontual da observação futura  $Y_0$  no ponto  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}$  é

$$\hat{y}_0 = \mathbf{x}_0^T \hat{\boldsymbol{\beta}} \quad (5.28)$$

Portanto, em regressão linear múltipla, um intervalo de predição percentual de  $100(1 - \alpha)$  para a observação futura de  $Y$  no ponto  $x = x_0$  é

$$\hat{y}_0 - t_{\alpha/2, n=p} \sqrt{\sigma^2 \left(1 + \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0\right)} \leq y_0 \leq \hat{y}_0 + t_{\alpha/2, n=p} \sqrt{\sigma^2 \left(1 + \mathbf{x}_0^T (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{x}_0\right)} \quad (5.29)$$

Comparando-se o intervalo de predição, Equação 5.29, com a expressão para o intervalo de confiança Equação 5.27, observa-se que o intervalo de predição é sempre maior que o intervalo de confiança. O intervalo de confiança expressa o erro em estimar-se a média de uma distribuição, enquanto o intervalo de predição expressa o erro em prever-se uma observação futura a partir da distribuição do ponto  $x_0$ . Este último deve incluir o erro em estimar-se a média neste ponto, bem como a variabilidade inerente na variável aleatória  $y$  no mesmo valor  $x = x_0$ .

Na predição de novas observações e na estimativa da resposta média, dado um ponto  $x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0k}$ , deve-se ter o cuidado de não extrapolar além da região contendo as observações originais. É possível que um modelo que ajusta bem uma região dos dados originais não ajuste bem fora dessa região.

A Figura 5.4 ilustra a região contendo as observações para um modelo de regressão de duas variáveis. Nota-se que o ponto  $(x_{01}, x_{02})$  está dentro dos intervalos de ambas as variáveis regressoras,  $x_1$  e  $x_2$ , mas está fora da região que é realmente medida pelas observações originais.

Logo, embora este ponto  $y_0$  possa ser encontrado, deve-se ter em mente que essa predição é extremamente perigosa, principalmente neste caso em que o ponto  $(x_{01}, x_{02})$  está dentro dos intervalos de ambas as variáveis regressoras,  $x_1$  e  $x_2$ . Assim, o valor predito de uma nova observação ou a estimativa da resposta média nesse ponto é uma extrapolação do modelo de regressão original.

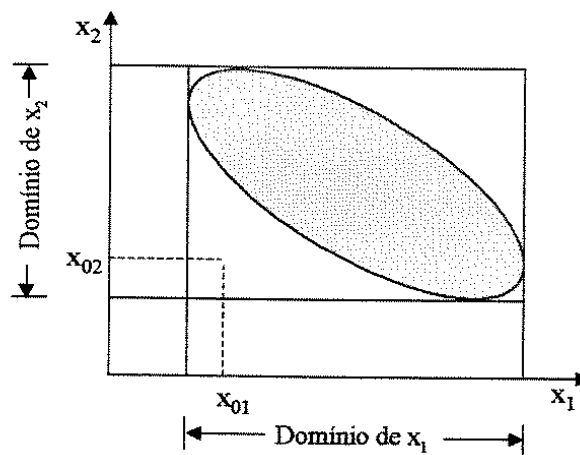


FIGURA 5.4 – Região contendo as observações para um modelo de regressão de duas variáveis

### ***Identificação de outliers através de gráficos de controle dos scores e $T^2$***

Um problema padrão em análise de regressão é testar a igualdade de um vetor da média desconhecida de uma população  $\mu$  e um vetor da média específico  $\mu_0$ . Neste caso tem-se o teste de um conjunto de validação desconhecido e o conjunto usado para construir o modelo. Esse teste pode ser conduzido por meio de gráficos de controle, tais como gráficos de controle dos *scores* dos componentes principais e da estatística  $T^2$  de Hotelling.

Os gráficos dos *scores* das componentes principais, obtidos pelas técnicas de análise de componentes principais (PCA), têm sido utilizados para identificar *outliers* no conjunto de validação e ainda amostras que, apesar de pertencerem ao conjunto de dados utilizados para construir os modelos, apresentam comportamento diferente das demais, sendo identificadas como possíveis *outliers*. Entretanto, não existe um consenso quanto ao uso das primeiras componentes ou últimas componentes para a identificação dessas amostras, dificultando assim as análises para sistemas de dimensões elevadas. O mesmo não acontece com os gráficos da estatística  $T^2$  de Hotelling, pela qual apenas um único gráfico é obtido por meio das variáveis originais ou das componentes.

O desenvolvimento de um procedimento para a estimativa da estatística  $T^2$  de Hotelling requer que as variáveis regressoras sejam normalmente distribuídas e a variância normal e independentemente distribuída com média zero e variância  $\sigma^2$ . Tem-se, portanto:

$$T^2 = n(\bar{\mathbf{X}} - \boldsymbol{\mu}_0)^T \mathbf{S}^{-1} (\bar{\mathbf{X}} - \boldsymbol{\mu}_0) \quad (5.30)$$

onde  $\bar{\mathbf{X}}$  e  $\mathbf{S}^{-1}$ , representam a média amostral e a matriz de covariância, respectivamente, sendo:

$$\bar{\mathbf{X}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{X}_i \quad \text{e} \quad \mathbf{S} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})(\mathbf{X}_i - \bar{\mathbf{X}})^T \quad (5.31)$$

A estatística  $(n-p)T^2/p(n-1)$  tem uma distribuição  $F$  com  $p$  e  $n-p$  graus de liberdade, sobre a hipótese nula  $\boldsymbol{\mu} = \boldsymbol{\mu}_0$ . O gráfico de  $T^2$  apresenta apenas limite superior de controle que é dado por  $F_{\alpha, p, n-p}$ .

Entre as técnicas mais importantes de decomposição da estatística  $T^2$  está a análise de componentes principais, pois a estimativa de  $T^2$  através das componentes principais é menos suscetível a influências de observações aberrantes provenientes de variáveis individuais (COLACIOPPO, 2001). Assim, mais uma vez, os *scores* das componentes principais podem ser utilizados em vez das observações originais.

A maioria dos autores, inclusive Jackson (1979; 1980; 1985), Kourti e MacGregor (1996) e Johnson e Wichern (1998), enfatizam aspectos de redução de dimensão e interpretação do corpo de dados colocando grande atenção às primeiras componentes

principais, que retem a maioria da variabilidade. Em Ortiz-Estarelles et al. (2001) e Morales et al. (1999), pode-se encontrar aplicações dessa metodologia.

Apesar de saber-se que casos de extrema não normalidade podem influenciar os resultados de  $T^2$ , não se conhece até que ponto a normalidade dos dados deve ser buscada. Os estudos de Monte Carlo indicam que, apesar de ser exigida a normalidade em diversas análises estatísticas, as consequências em violar-se a suposição de distribuição normal são menos severas do que se acredita (JOHNSON, 1987).

Os gráficos de  $T^2$  podem auxiliar na detecção de um evento não usual dentro do conjunto de dados, porém não fornecem informações das razões de ele ocorrer (COLACIOPPO, 2001). Dessa forma, observações suspeitas (pontos influentes e possíveis *outliers*) devem ser investigadas antes de serem excluídas do modelo.

### 5.2.8 Avaliação da eficiência do modelo de regressão

Análises devem ser conduzidas para examinar a eficiência e a adequação do modelo construído tendo em vista as diversas suposições feitas para a sua construção, tais como: a estimativa dos parâmetros requer a suposição de que os erros são variáveis aleatórias não correlacionadas com média zero e variância constante; testes de hipóteses e estimativa dos intervalos requerem que os erros sejam normalmente distribuídos e, além disso, assumir-se que a ordem do modelo está correta.

#### *Análise dos resíduos*

A análise dos resíduos é frequentemente útil para checar a suposição de que os erros são distribuídos normalmente com variância constante, bem como, para determinar se a adição de um termo adicional ao modelo é útil.

Os resíduos de um modelo de regressão são  $e_i = y_i - \hat{y}_i$ , onde  $y_i$  é uma observação real e  $\hat{y}_i$  é o correspondente valor ajustado a partir do modelo de regressão.

Para verificar a normalidade, pode-se construir um histograma de frequência dos resíduos ou um gráfico de probabilidade normal dos resíduos. Uma resposta numérica pode ser obtida utilizando-se o teste de Anderson-Darling, no qual, para p-valor menor que 0,05, o resíduo é considerado normal.

Frequentemente é útil fazer-se o gráfico dos resíduos em sequência temporal (se conhecida); dos resíduos *versus* a resposta predita, e dos resíduos *versus* as variáveis dependentes. Esses gráficos geralmente apresentam alguns padrões que podem sugerir a



presença de anormalidades no modelo. Como exemplo, tem-se que a presença de curvaturas no gráfico dos resíduos *versus* as variáveis dependentes pode indicar que o modelo é inadequado, ou seja, termos de ordem maior devem ser adicionados ao modelo, uma transformação sobre as variáveis  $x$  ou  $y$  (ou ambas) deve ser considerada, ou outros regressores devem ser considerados. Uma descrição detalhada sobre como analisar esses padrões pode ser encontrada em Montgomery e Peck (1992).

### ***Coefficiente de Determinação Múltipla***

O coeficiente de determinação múltipla  $R^2$  é definido como

$$R^2 = \frac{SQ_R}{SQ_T} = 1 - \frac{SQ_E}{SQ_T} \quad (5.32)$$

A raiz quadrada positiva de  $R^2$  é chamada de coeficiente de correlação múltipla entre  $y$  e o conjunto de variáveis regressoras  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ . Ou seja,  $R$  é uma medida da associação linear entre  $y$  e  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_k$ .

Na regressão linear simples tem-se  $0 \leq R^2 \leq 1$ . Entretanto, um valor alto de  $R^2$  não implica necessariamente que o modelo de regressão seja bom. Adicionando uma variável ao modelo, o valor de  $R^2$  sempre aumentará, indiferentemente se a variável adicionada é significativa ou não (MONTGOMERY e PECKY, 1992). Então, modelos que têm altos valores de  $R^2$  podem produzir pobres previsões de novas observações ou estimativas da resposta média.

Para tentar contornar esse problema, geralmente utiliza-se o coeficiente de determinação múltipla ajustado, dado por

$$R^2 \text{ ajustado} = 1 - \frac{SQ_E / (n - p)}{SQ_T / (n - 1)} \quad (5.33)$$

O  $R^2$  ajustado (ou  $R^2$  adj.) reflete melhor a proporção de variabilidade explicada pelo modelo de regressão pois ele leva em conta o número de variáveis regressoras. O  $R^2$  ajustado aumentará apenas se a adição de uma variável regressora produzir uma alta redução na soma quadrada dos resíduos para compensar a perda de um grau de liberdade residual. O

$R^2$  ajustado é útil na comparação de modelos de regressão, pois o modelo com menor média quadrada residual explica mais a variabilidade em  $y$ .

Partindo-se de um modelo composto por todas as variáveis, a exclusão de uma variável pode ser feita com base no seu coeficiente de regressão. Daí verifica-se se houve melhora ou não do  $R^2$  ajustado. Se todos os coeficientes da regressão são estimados independentemente, a exclusão pode ocasionar pouco dano ao modelo. Entretanto, se as variáveis regressoras são altamente correlacionadas, a exclusão de uma variável pode ser perigosa.

Uma diferença significativa entre  $R^2$  e  $R^2$  ajustado indica que o modelo foi sobreparametrizado, ou seja, termos que não contribuem significativamente ao ajuste foram incluídos.

Segundo Barros et al. (1996), a decisão de que modelo é mais adequado pode também ser baseada num teste  $F$ , comparando-se a redução na soma quadrática residual por unidade de parâmetros adicionados com a própria média quadrática do modelo contendo o maior número de parâmetros. Tem-se então a seguinte relação de interesse

$$F = \left( \frac{SQ_{E1} - SQ_{E2}}{d} \right) / MQ_{E2} \quad (5.34)$$

onde os sub-índices 1 e 2 representam o menor e o maior modelo, respectivamente, e  $d$  a diferença do número de parâmetros dos dois modelos.

Se o valor de  $F$  não for significativamente maior que  $F_{k1-k2, (n-p)2}$ , não há ganhos em se aumentar o número de parâmetros. Vale ressaltar que a adição de parâmetros pode ser devida à inclusão de termos quadráticos, cúbicos ou à inclusão de uma nova variável.

### 5.3 - Considerações finais sobre o capítulo

O objetivo principal deste capítulo foi apresentar uma base teórica necessária para o entendimento da técnica de modelagem com regressão linear múltipla - MLR utilizada neste trabalho para a construção de modelos de predição de variáveis no processo de celulose e papel.

A técnica MLR apresenta a vantagem de utilizar variáveis originais, sendo os modelos obtidos fáceis de serem interpretados. Importante ressaltar que, para um conjunto de variáveis, alguns pré-requisitos, já discutidos, devem ser atendidos, tais como:

- Análise de variância da regressão (ANOVA) ou de valor-p da regressão;
- Teste T ou de valor-p para os coeficientes das variáveis independentes;
- Comparação de  $R-Sq$ ,  $R-Sq_{adj}$ ,  $R-Sq_{pred}$
- Linearidade do fenômeno medido;
- Variância constante dos termos do erro (Homoscedasticidade);
- Normalidade dos erros;
- Ausência de colinearidade;
- Ausência de observações aberrantes (*Outliers*).

Neste trabalho, os modelos do diagrama de caminhos são construídos e apresentados no Capítulo 6, e, com a utilização do software *MINITAB*, os resultados das equações de predição dos MLR são apresentados e analisados de forma detalhada no Capítulo 7.

## 6. MODELAGEM DO PROCESSO DE CELULOSE E PAPEL

### 6.1 – Descrição da empresa do estudo de caso

A IP - *International Paper do Brasil Ltda.* possui três unidades produtivas no Brasil (Mogi Guaçu-SP, Luiz Antonio-SP e Três Lagoas-MS), com capacidade instalada de 820 mil toneladas/ano de celulose e 1 milhão de toneladas/ano de papel para imprimir e escrever. Cerca de 50% das vendas são destinadas ao mercado interno e as exportações destinadas a países de todos os continentes.

O estudo de caso refere-se à Unidade Luiz Antonio – adquirida pela IP em 2007 – que atualmente atua de forma integrada (Categoria D), com capacidade de produção de 1.200 t/d de celulose e 1.000 t/d de papel, com uma linha única de produção de celulose e duas máquinas de papel, sendo os principais processos de produção compostos de :

\* **Preparação de madeira**, 5.500 m<sup>3</sup>-sólido/d com 1 tambor descascador, 1 picador de celulose, 1 peneira de cavacos, 2 picadores de casca e resíduos, pilha de cavacos celulose com 4 dias de estocagem e 4 roscas extratoras e pilha de casca para 1 dia de estocagem com 2 roscas extratoras.

\* **Linha de Fibras**, 1.250 t/d com 1 digestor contínuo de 2,5 h de retenção, 2 depuradores de nós com lavador e retorno de nós ao cozimento, 2 filtros lavadores pressurizados na pré-lavagem, 2 reatores de deslignificação com 1 lavador entre os estágios e 2 estágios de pós-lavagem (filtro a vácuo e prensa) com 3 estágios de depuração de *shives* entre eles, sendo os *shives* lavados, prensados e destinados a compostagem. Branqueamento na sequência ZD-EP-D para alvura de 91%ISO e viscosidade de 750 dm<sup>3</sup>/kg e máquina desaguadora de celulose com capacidade de 500 t/d. Para suprimentos de químicos, 1 planta de dióxido de cloro para 12 t/d, 1 planta de oxigênio para 1.500 kg/h e uma planta de ozônio para 200 kg/h a 13% de concentração.

\* **Recuperação**, com 6 efeitos de evaporação e 3 concentradores para produção de licor a 75% de sólidos, *stripper* e coluna removedora de metanol do condensado, caldeira de recuperação para queima de 1.700 tss/d e 240 t/h de vapor a 65 bar e 485 C, caustificação com tanque de estabilização, 2 clarificadores de licor verde e 1 filtro de *dreg's*, 4 caustificadores e

2 clarificadores de licor branco, 1 tanque lavador de lama, 1 filtro de lama e 1 forno de cal com *flash-dryer* e precipitador eletrostático.

\* **Utilidades**, com tratamento de água para 60.000 m<sup>3</sup>/d, tratamento de efluentes com 2 estágios de lodo ativado e remoção de 98% de DBO, tratamento de água desmineralizada por osmose reversa para 200 m<sup>3</sup>/h e tratamento de condensado para 170 m<sup>3</sup>/h, 3 compressores centrífugos e secadores de ar para 7.000 CFM, 2 caldeiras de biomassa para 100 t/h de vapor a 65 bar e 485°C, 1 caldeira a óleo combustível para 35 t/h de vapor a 12 bar e 240°C, 2 turbogeradores de contrapressão para 35 MW e sistema de distribuição de vapor com 3 níveis de pressão 65, 12 e 4,5 bar e 2 barramentos de distribuição de 60 MW de energia elétrica.

Cerca de 90% do suprimento de madeira de eucalipto para produção de celulose e energia provêm de florestas plantadas de eucalipto (próprias) e o restante de eucalipto plantado vindo de fornecedores do programa de fomento, sendo, desde 2002, o abastecimento realizado com clones, com 80% da espécie híbrida *urograndis* e o restante da espécie *grandis*, A madeira é oriunda da região de Luiz Antonio-SP, num raio médio de 40 km, variando de 3 km a 90 km.

A Figura 6.1 ilustra a cadeia de suprimentos de madeira e energia para o processo de fabricação de celulose, caracterizando a importância da madeira como fonte de matéria-prima e energia, uma vez que o custo da madeira para produção de celulose e o custo de energia (madeira, óleo combustível e energia elétrica) são os dois principais componentes dos custos de fabricação dos produtos celulose e papel, representando cerca de 60% do custo operacional.

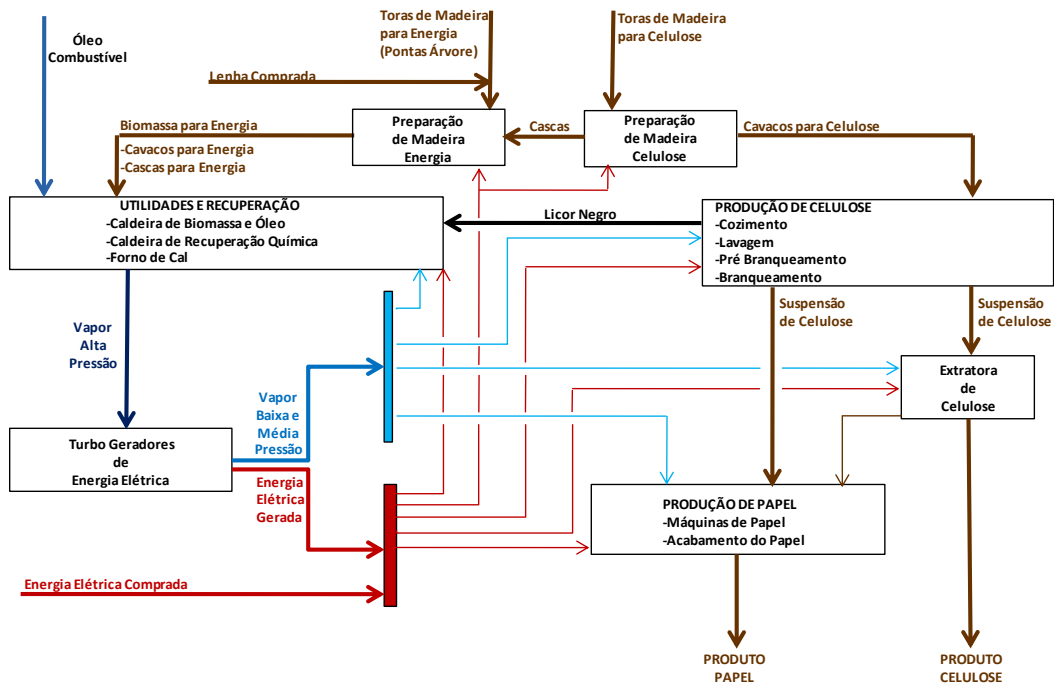


FIGURA 6.1 – Cadeia de suprimentos de madeira e energia

Fonte : Autor, 2010

A Figura 6.2 ilustra o modelo conceitual com as relações de dependência a serem examinadas para a obtenção da estimativa de custos com o consumo de madeira como matéria-prima para a fabricação de celulose e do consumo de insumos energéticos envolvidos na fabricação de celulose e papel.

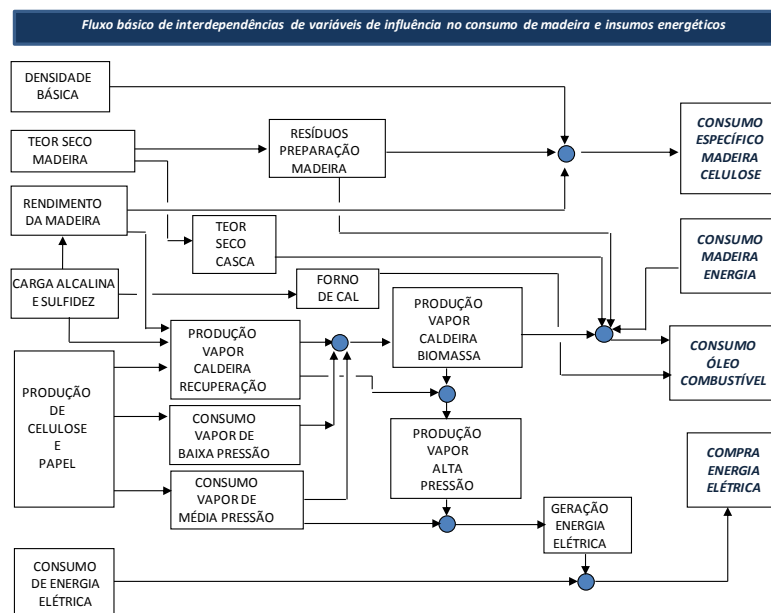


FIGURA 6.2 – Fluxograma de interdependências de variáveis

Fonte : Autor, 2010

## 6.2 – Estatística básica e análise das variáveis

As variáveis disponibilizadas pela IP-Luiz Antonio são referentes ao período de janeiro de 2004 a junho de 2009 em base mensal. Na Tabela 6.1 são apresentadas as estatísticas básicas das variáveis disponibilizadas pela empresa, a qual proporciona uma rápida análise da ordem de grandeza e variabilidade no período analisado.

Tabela-6.1 – Estatística básica das variáveis

Variável	Unidade	No. Amostras jan/04 a jun/09	Média Mensal	DP Mensal	Skewness	Kurtosis	Anderson-Darling Normality Test	
							A-Square	P-value
Densidade básica da madeira	kg.seco/m3	66	498,990	10,180	-0,466	-0,024	0,440	0,287
Densidade aparente da madeira	kg.úmido/m3	66	944,200	25,010	0,451	-0,267	0,560	0,142
Teor seco da biomassa	%	66	51,263	3,978	-0,131	-0,402	0,150	0,961
Teor seco dos cavacos	%	66	54,894	1,706	-0,245	-0,610	0,490	0,214
Teor de resíduo umido	%	66	15,695	2,122	0,167	-0,222	0,160	0,947
Teor de resíduo seco	%	66	14,756	1,778	0,225	-0,422	0,250	0,737
Rendimento da madeira	t.seca/Odt	66	52,664	1,998	0,589	-0,440	1,210	< 0,005
Consumo específico da madeira	m3/Adt	66	4,045	0,223	0,364	-0,596	0,430	0,295
Carga de álcali ativo	kg.NaOH/Adt	66	367,450	12,170	2,665	8,246	5,700	< 0,005
Atividade do licor branco	%	66	84,020	1,345	-0,250	-0,671	0,790	0,039
Sulfidez do licor branco	%	66	26,710	2,026	0,526	-0,436	7,920	< 0,005
Relação sólidos/polpa	tss/Adt	66	1,468	0,066	-0,129	-0,963	0,570	0,133
Produção de celulose	t/d	66	1185,700	111,500	-4,926	31,138	6,960	< 0,005
Geração de vapor na caldeira de recuperação	t/h	66	3,024	0,082	-0,024	-1,089	0,790	0,039
Produção de cal no forno de cal	kg.CaO/Adt	66	232,150	10,700	1,094	2,461	0,940	0,016
Consumo de óleo combustível no forno de cal	kg/Adt	66	30,179	1,391	1,112	2,227	0,890	0,282
Gramatura da máquina-1	g/m2	66	77,080	5,147	0,184	4,768	5,150	< 0,005
Gramatura da máquina-2	g/m2	66	67,184	8,726	-0,548	-1,526	7,130	< 0,005
Consumo de VBP na celulose	t/h	66	43,856	2,901	-4,249	25,627	4,750	< 0,005
Consumo de VBP na evaporação	t/h	66	59,991	5,373	-2,775	13,517	2,580	< 0,005
Consumo de VBP na recuperação	t/h	66	9,053	0,771	-4,747	29,728	6,450	< 0,005
Consumo de VBP no stripper	t/h	66	3,650	0,340	-4,303	26,195	4,320	< 0,005
Consumo de VBP na utilidades	t/h	66	7,984	0,979	-2,014	6,294	2,590	< 0,005
Consumo de VBP no desaerador	t/h	66	9,459	1,804	-0,692	0,517	1,400	< 0,005
Consumo de VBP na máquina-1	t/h	66	50,685	1,236	0,759	1,703	2,250	< 0,005
Consumo de VBP na máquina-2	t/h	66	44,791	2,977	-0,498	-1,428	4,860	< 0,005
Consumo de VMP na celulose	t/h	66	48,085	3,556	-2,537	11,618	1,960	< 0,005
Consumo de VMP na utilidades	t/h	66	9,697	1,161	-1,992	6,163	2,570	< 0,005
Consumo de VMP na máquina-1	t/h	66	3,914	0,123	0,247	5,063	6,840	< 0,005
Consumo de VMP na máquina-2	t/h	66	3,693	0,078	-0,127	0,105	1,010	0,011
Consumo de biomassa na caldeira de biomassa	kg.seco/t.vapor	41	241,470	33,160	-0,934	0,718	0,730	0,053
Consumo de madeira na caldeira de biomassa	kg.seco/t.vapor	41	64,883	22,630	0,315	0,848	0,360	0,423
Consumo de óleo combustível na cald. de biomassa	kg/t.vapor	41	15,188	11,370	1,123	1,003	1,240	< 0,005
Admissão de VAP no turbogerador	t/h	41	269,280	23,220	-1,899	3,897	2,450	< 0,005
Extração de VMP no turbogerador	t/h	41	58,496	18,493	-0,952	0,465	1,240	< 0,005
Geração de energia elétrica no turbogerador	MW	41	30,815	2,590	-2,109	4,604	3,320	< 0,005
Compra de energia elétrica	MW	41	28,950	2,190	1,494	4,423	1,000	0,011

Fonte : Autor, 2010

Pelo coeficiente de assimetria (*Skewness*), da forma como os dados se distribuem em torno da média (*Kurtosis*) e do *P-value*, é possível analisar quão próxima da gaussiana se apresenta a distribuição de cada variável. Observa-se que a maioria dos dados apresenta *P-value* menor que 0,05, baixa assimetria e com caudas mais pesadas que a normal, com exceção das variáveis referentes à madeira de celulose, que apresentam distribuição

praticamente normal. O restante das variáveis inerentes ao processo de produção de celulose, em face do longo período de análise (jan/2004 a jun/2009), mostra maior dispersão e assimetria, isto em razão da tendência de melhoria contínua no processo, com a otimização das variáveis, conforme gráficos de séries temporais do consumo específico de madeira e insumos energéticos no período, ilustrados pela Figura 6.3.

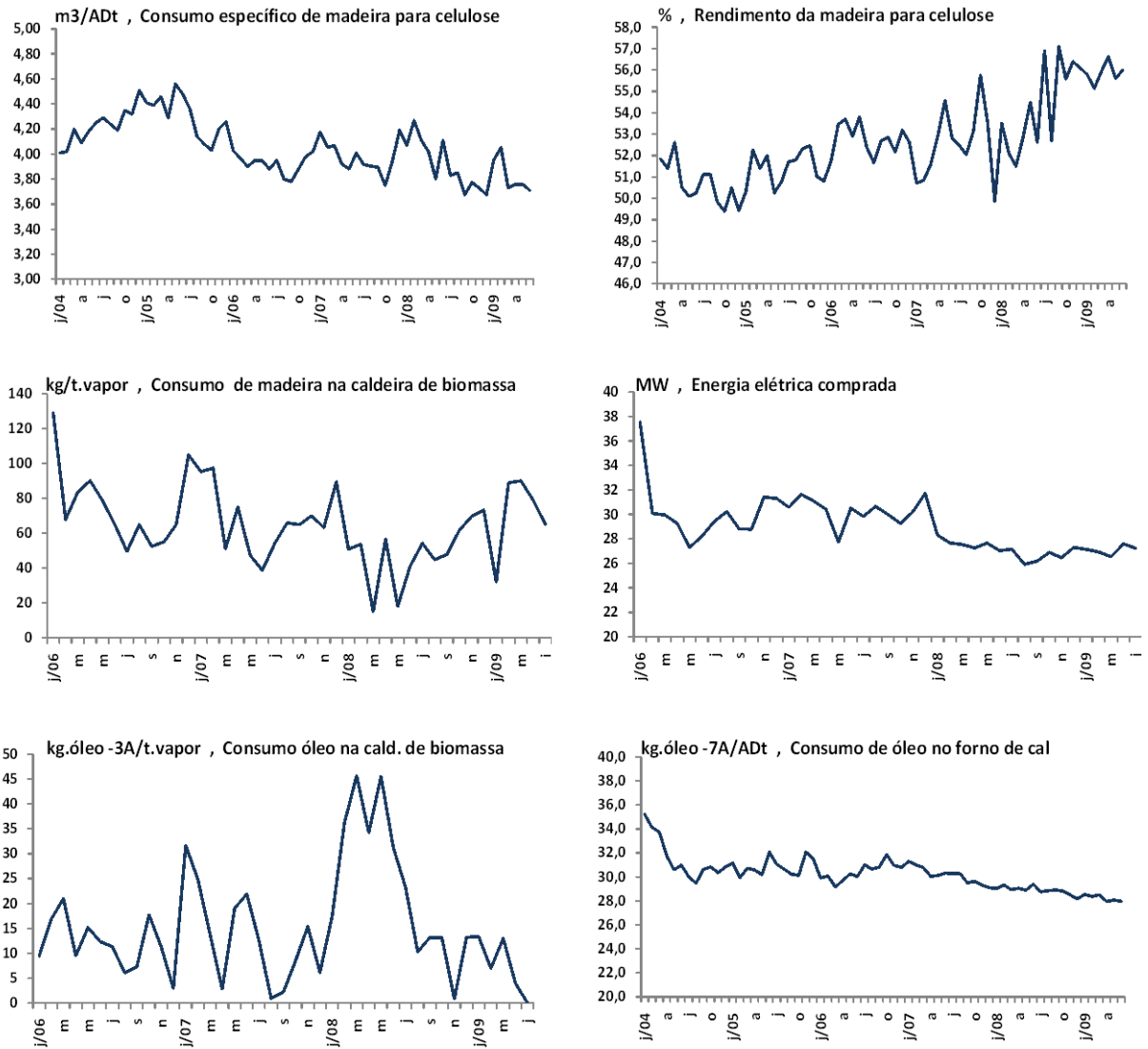


FIGURA 6.3 – Gráficos de séries temporais das variáveis de objetivo do trabalho

Fonte : Autor, 2010



### 6.3 – Modelagem por meio de regressão linear múltipla

Conforme descrito no Capítulo 5, a técnica estatística selecionada para estimação das relações de dependência baseia-se na modelagem por regressão linear múltipla. Essa técnica proporciona a análise de dependência em cada relação do modelo, formando uma série de relações de dependência simultaneamente, pois uma variável dependente se torna independente em subsequentes relações de dependência, possibilitando avaliar as relações em âmbito geral, conforme o modelo estrutural predefinido. Isso corresponde a maiores esforços na área de estudo com respeito a obter uma visão mais sistemática e holística dos problemas. Esse esforço exige habilidade e conhecimento conceitual do problema para testar uma série de relações que constituem um modelo em larga escala ou um conjunto de princípios fundamentais. A construção do modelo estrutural com o correspondente diagrama de caminhos tem por função atingir esse objetivo.

Em termos simples, a modelagem permite estimar uma série de equações de regressão múltipla (MLR) separadas, mas interdependentes, simultaneamente, pela especificação do modelo estrutural previamente construído pelo pesquisador. Primeiro o pesquisador baseia-se em teoria, experiência prévia e nos objetivos da pesquisa para distinguir quais variáveis independentes preveem cada variável dependente. Algumas variáveis dependentes se tornam independentes em relações subsequentes, dando origem à natureza interdependente do modelo estrutural. Além disso, muitas das mesmas variáveis afetam cada uma das variáveis dependentes, mas com diferentes efeitos. O modelo estrutural expressa essas relações entre variáveis independentes e dependentes, mesmo quando uma variável dependente se torna independente em outras relações. O **modelo estrutural (Figura 6.4)** pode ser representado por uma representação pictórica das relações, a qual é chamada de **diagramas de caminhos (Figura 6.5)**, que é a base para a construção do modelo, utilizando-se de regressões múltiplas e balanços de massa e/ou de energia entre as relações :

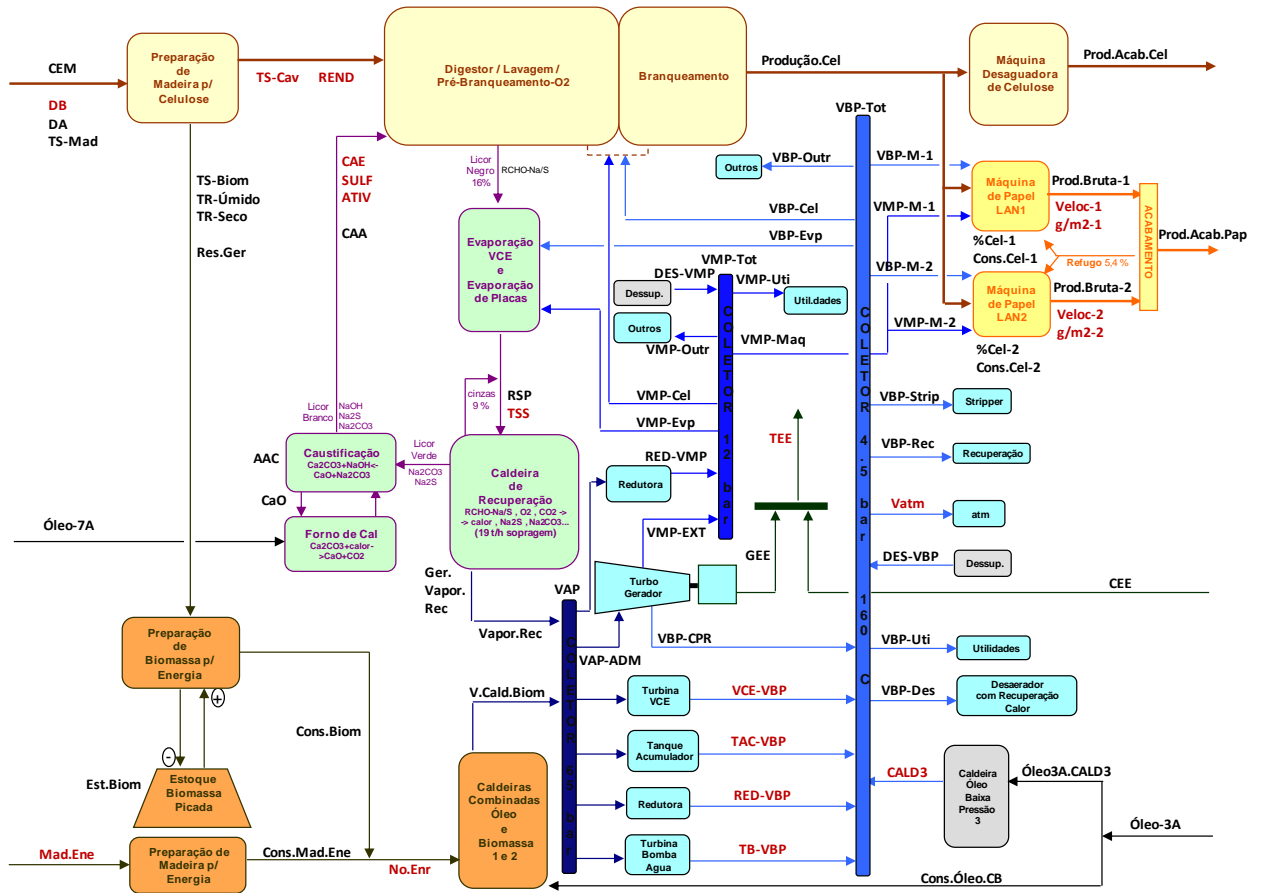


FIGURA 6.4 – Ilustração do Modelo Estrutural do estudo de caso

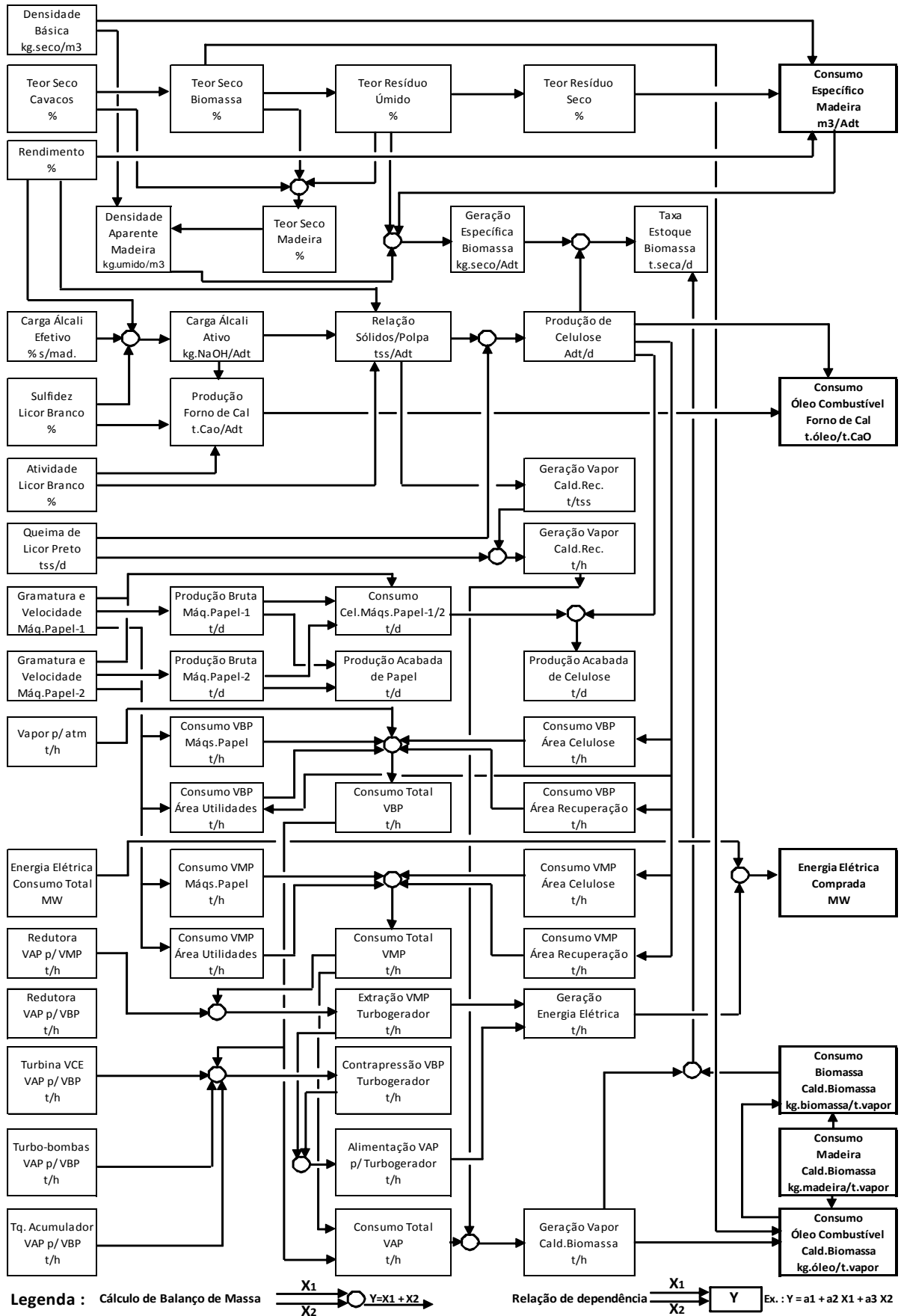


FIGURA 6.5 – Diagrama de caminhos para o modelo estrutural do trabalho do estudo de caso.

Fonte : Autor, 2010

As próximas etapas de construção das equações por regressão linear múltipla e por balanço de massa e energia estão ilustradas nas Figuras 6.6 a 6.10 e os cálculos de custo e resultados nas Tabelas 6.2 e 6.3.

Para cada equação desenvolvida, são mostradas três possibilidades:

- Regressão linear simples ( $y = a \cdot x + b$ )
- Regressão linear múltipla ( $y = a_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n$ )
- Balanço de massa e/ou energia entre as variáveis de entrada e saída

Desta forma, formaliza-se o modelo a ser estatisticamente ajustado no Capítulo 7, conforme dados disponibilizados pela IP-Brasil de jan/2004 a jul/2009.

### *Predição do consumo específico de madeira*

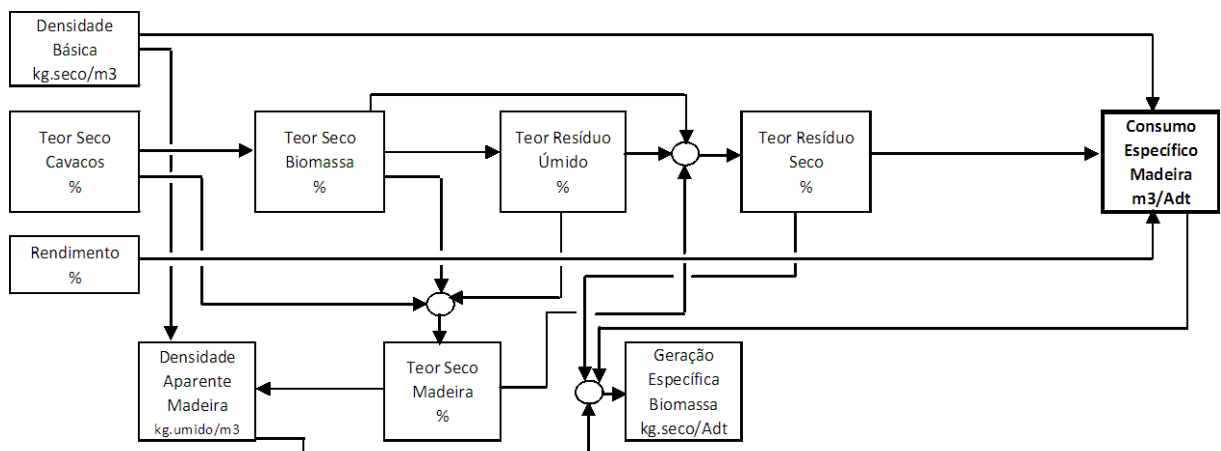


FIGURA 6.6 – Diagrama de caminhos para o consumo específico de madeira (CEM)

As equações para modelagem são :

$$\bullet \text{ TS-Biom (\%)} = a_1 + a_2 \cdot \text{TS-Cav} \quad (6.1)$$

$$\bullet \text{ TR-Úmido (\%)} = a_3 + a_4 \cdot \text{TS-Biom} \quad (6.2)$$

$$\bullet \text{ TR-Seco (\%)} = (\text{TR-Úmido} \cdot \text{TS-Biom})/\text{TS-Mad} \quad (6.3)$$

$$\bullet \text{ CEM (m}^3\text{/ADt)} = a_5 + a_6 \text{ DB} + a_7 \text{ TR-Seco} + a_8 \text{ REND} \quad (6.4)$$

$$\bullet \text{ DA (kg/m}^3\text{)} = a_9 + a_{10} \text{ DB} + a_{11} \text{ TS-Mad} \quad (6.5)$$

$$\bullet \text{ Res.Ger (kg.seco/ADt)} = \text{DA} \cdot \text{CEM} \cdot \text{TS-Mad} \cdot \text{TR-Seco} \quad (6.6)$$

Sendo,

TS-Biom : Teor seco da biomassa ou resíduo

TS-Cav : Teor seco dos cavacos após o processo de picagem

TS-Mad : Teor seco da madeira recebida

TR-Úmido : Teor de resíduos, base úmida

TR-Seco : Teor de resíduos, base seca

CEM : Consumo específico de madeira

DA : Densidade aparente

Res.Ger : Geração específica de resíduos

$a_1, a_2, \dots, a_{11}$  : Coeficientes das regressões lineares múltiplas

**Predição da relação sólidos/polpa e consumo de óleo no forno de cal**

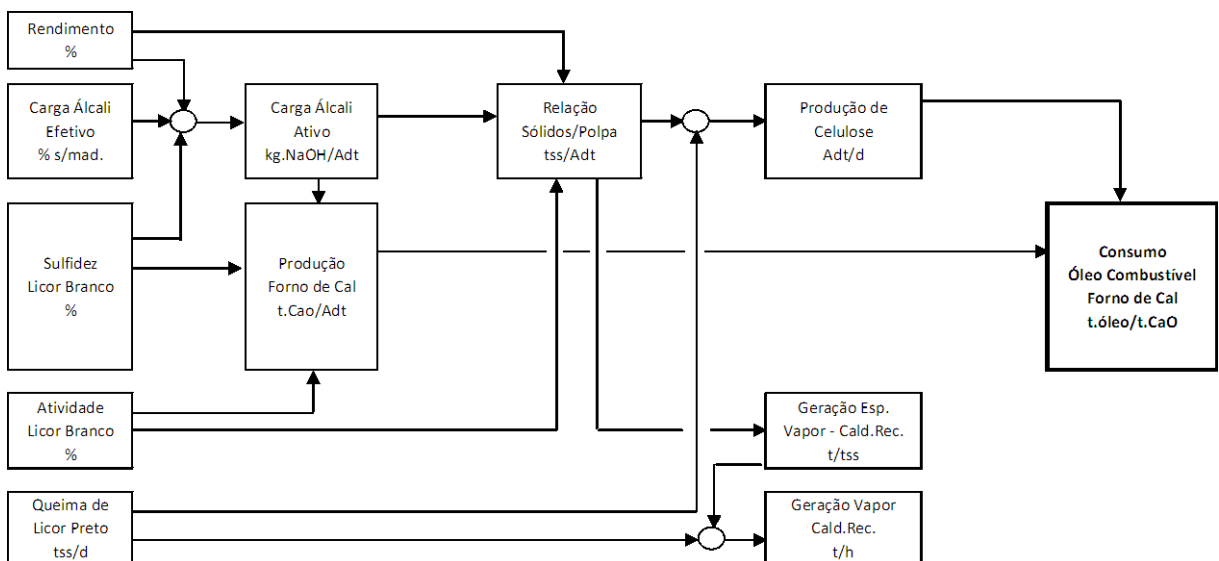


FIGURA 6.7 – Diagrama de caminhos para a relação sólidos / polpa (RSP)

As equações para modelagem são:

$$\bullet \text{ CAA (\%)} = (200 \text{ CAE}) / (200 - \text{SULF}) \quad (6.7)$$

$$\bullet \text{ Kg.AA-NaOH/ADt} = 900 \cdot \text{CAA} / \text{REND} \quad (6.8)$$

$$\bullet \text{ kg.Na}_2\text{CO}_3/\text{ADt} = ((100-\text{ATIV})/100) \cdot ((\text{CAA}/1000)/(\text{ATIV}/100)) \quad (6.9)$$

$$\bullet \text{ RSP (TSS/ADt)} = a_{12} + a_{13} (100-\text{REND})/\text{REND} + a_{14} \text{ kg.Na}_2\text{CO}_3/\text{ADt} \quad (6.9)$$

$$+ a_{15} \text{ kg.AA-NaOH/ADt} \quad (6.10)$$

$$\bullet \text{ Prod.Cel (ADT/d)} = \text{TSS} / \text{RSP} \quad (6.11)$$

$$\bullet \text{ Ger.Esp.Vapor (t/TSS)} = a_{16} + a_{17} \text{ RSP} \quad (6.12)$$

$$\bullet \text{ Vapor.Rec (t/h)} = \text{Ger.Esp.Vapor} \cdot \text{TSS} / 24 \quad (6.13)$$

$$\bullet \text{ AAC (kg.NaOH/ADt)} = \text{CAA} - (\text{CAA} \cdot \text{SULF}/100) \quad (6.14)$$

$$\bullet \text{ Kg.CaO/ADt} = a_{18} + a_{19} \text{ AAC} \quad (6.15)$$

$$\bullet \text{ Kg.CaO/d} = \text{Kg.CaO/ADt} \cdot \text{Prod.Cel} \quad (6.16)$$

$$\bullet \text{ Kg.Óleo-7A/t.CaO} = a_{20} + a_{21} \text{ Kg.CaO/ADt} \quad (6.17)$$

$$\bullet \text{ Kg.Óleo-7A/d} = \text{Kg.Óleo-7A/t.CaO} \cdot \text{Kg.CaO/d} \quad (6.18)$$

Sendo,

CAE : Porcentagem de álcali efetivo sobre madeira base seca

SULF : Sulfidez do licor branco

CAA : Carga de álcali ativo sobre madeira seca

ATIV : Atividade do licor branco

Kg.AA-NaOH/ADt = Carga de álcali ativo ao cozimento

Kg.Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ADt : Carga de carbonato de sódio ao cozimento

RSP : Relação sólidos queimados por celulose produzida

TSS : Taxa diária de sólidos queimados na caldeira de recuperação

Prod.Cel : Taxa diária de produção de celulose

Ger.Esp.Vapor : Geração específica de vapor na caldeira de recuperação

Vapor.Rec : Produção de vapor na caldeira de recuperação

AAC : Álcali ativo convertido na caustificação

Kg.CaO/ADt : Produção específica de cal no forno de cal

Kg.CaO/d : Taxa de produção de cal no forno de cal

Kg.Óleo-7A/t.CaO : Consumo específico de óleo-7A no forno de cal

Kg.Óleo-7A/d : Taxa de consumo de óleo-7A no forno de cal

a<sub>12</sub>, a<sub>13</sub>, ..., a<sub>21</sub> : Coeficientes das regressões lineares múltiplas

*Predição do consumo de celulose e produção acabada vendável*

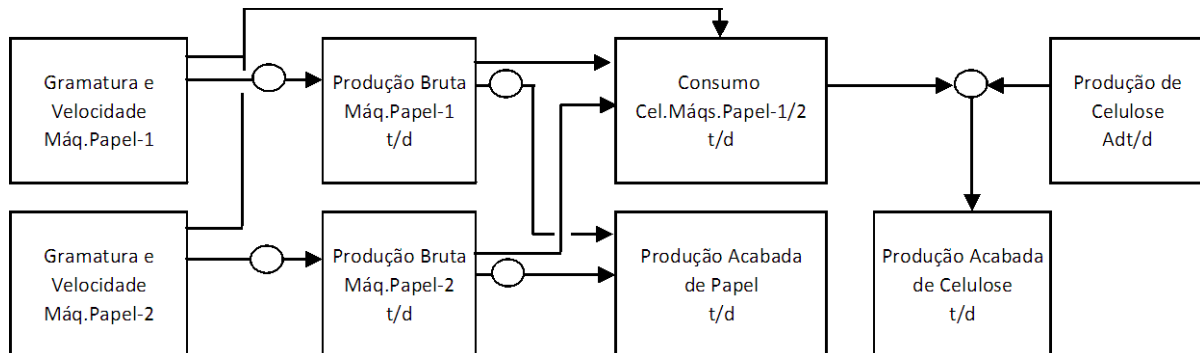


FIGURA 6.8 – Diagrama de caminhos para o consumo de celulose e produção acabada

As equações para modelagem são :

$$\bullet \text{ Prod.Bruta-1 (t/d) = (Veloc-1*4,45*g/m}^2\text{-1*1440)*0,965/(1000000)} \quad (6.19)$$

$$\bullet \text{ Prod.Bruta-2 (t/d) = (Veloc-2*4,45*g/m}^2\text{-2*1440)*0,965/(1000000)} \quad (6.20)$$

$$\bullet \text{ Prod.Bruta-T (t/d) = Prod.Bruta-1 + Prod.Bruta-2} \quad (6.21)$$

$$\bullet \text{ Prod.Acab (t/d) = 0,945 . Prod.Bruta-T}$$

$$\bullet \text{ \%Cel-1 = } a_{22} - a_{23} \text{ g/m}^2\text{-1} + a_{24} \text{ g/m}^2\text{-1}^2 - a_{25} \text{ g/m}^2\text{-1}^3 \quad (6.22)$$

$$\bullet \text{ \%Cel-2 = } a_{26} + a_{27} \text{ g/m}^2\text{-2} - a_{28} \text{ g/m}^2\text{-2}^2 + a_{29} \text{ g/m}^2\text{-2}^3 \quad (6.23)$$

$$\bullet \text{ Cons.Cel-1 (ADt/d) = \%Cel-1 . Prod.Bruta-1 / 100} \quad (6.24)$$

$$\bullet \text{ Cons.Cel-2 (ADt/d) = \%Cel-2 . Prod.Bruta-2 / 100} \quad (6.25)$$

$$\bullet \text{ Cons.Cel-T (ADt/d) = Cons.Cel-1 + Cons.Cel-2} \quad (6.26)$$

$$\bullet \text{ Prod.Acab.Cel (ADt/d) = Prod.Cel - Cons.Cel-T} \quad (6.27)$$

$$\bullet \text{ Prod.Vend (t/d) = Prod.Acab + Prod.Acab.Cel} \quad (6.28)$$

Sendo,

Prod.Bruta-1 : Produção de papel bruta da máquina de papel – 1

Prod.Bruta-2 : Produção de papel bruta da máquina de papel – 2

Prod.Bruta-T : Produção de papel bruta total

Prod.Acab : Produção de papel acabada

Veloc-1 : Velocidade da máquina de papel – 1

Veloc-2 : Velocidade da máquina de papel – 2

- $\text{g/m}^2\text{-1}$  : Gramatura do papel na máquina – 1  
 $\text{g/m}^2\text{-2}$  : Gramatura do papel na máquina – 2  
 %Cel-1 : Teor de celulose nos papéis da máquina – 1  
 %Cel-2 : Teor de celulose nos papéis da máquina – 2  
 Cons.Cel-1 : Consumo de celulose na máquina – 1  
 Cons.Cel-2 : Consumo de celulose na máquina – 2  
 Cons.Cel-T : Consumo total de celulose nas máquinas de papel  
 Prod.Acab.Cel : Produção acabada de celulose  
 Prod.Vend : Produção de celulose e papel vendável  
 $a_{22}, a_{23}, \dots, a_{29}$  : Coeficientes das regressões lineares múltiplas

**Predição do consumo de vapor, madeira de energia e óleo combustível 3A**

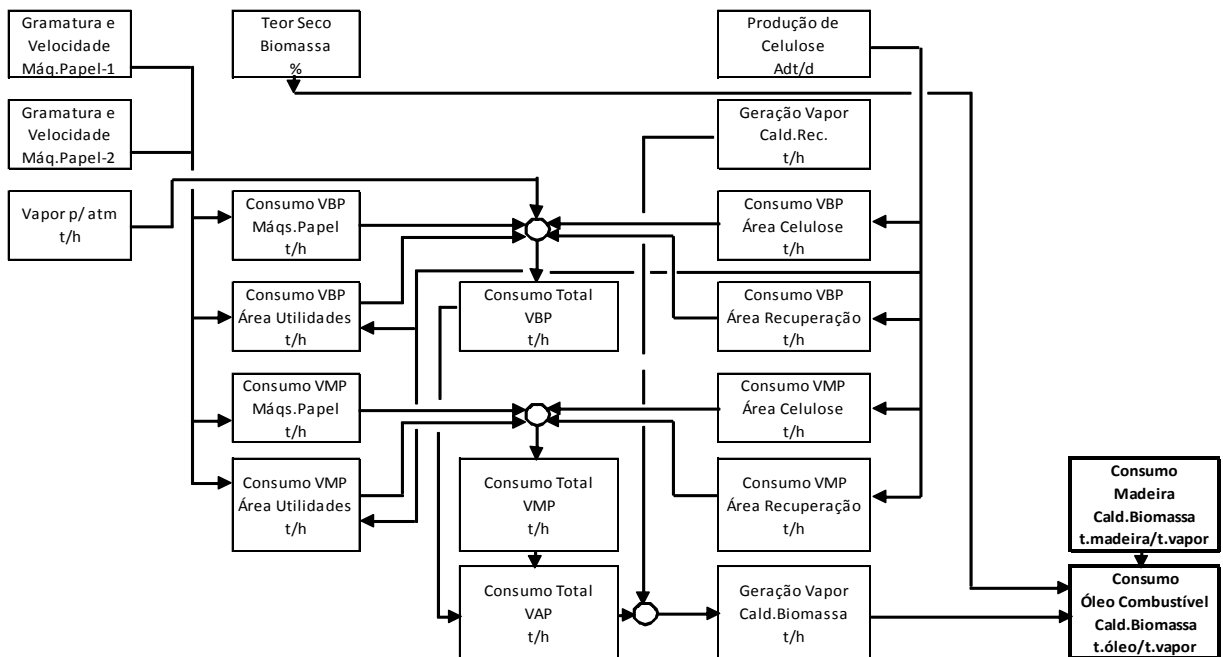


FIGURA 6.9 – Diagrama de caminhos para o consumo de vapor e óleo combustível 3A

As equações para modelagem são:

$$\bullet \text{ VBP-Cel (t/h) = } a_{30} + a_{31} \text{ Prod.Cel} \quad (6.29)$$

$$\bullet \text{ VMP-Cel (t/h) = } a_{32} + a_{33} \text{ Prod.Cel} \quad (6.30)$$

$$\bullet \text{ VBP-Rec (t/h) = } a_{34} + a_{35} \text{ Prod.Cel} \quad (6.31)$$

$$\bullet \text{ VBP-Strip (t/h) = } a_{36} + a_{37} \text{ Prod.Cel} \quad (6.32)$$

$$\bullet \text{ VBP-Evap (t/h) = } a_{38} + a_{39} \text{ Prod.Cel} \quad (6.33)$$



- $VMP-Rec (t/h) = 1,0$  (6.34)

- $VBP-UTI (t/h) = a_{40} + a_{41} \text{ Prod.Cel} + a_{42} \text{ g/m}^2\text{-1} + a_{43} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.35)

- $VBP-Des (t/h) = a_{44} + a_{45} \text{ Prod.Cel} + a_{46} \text{ g/m}^2\text{-1} + a_{47} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.36)

- $VMP-UTI (t/h) = a_{48} + a_{49} \text{ Prod.Cel} + a_{50} \text{ g/m}^2\text{-1} + a_{51} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.37)

- $VBP-Maq1 (t/h) = a_{52} + a_{53} \text{ g/m}^2\text{-1}$  (6.38)

- $VBP-Maq2 (t/h) = a_{54} + a_{55} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.39)

- $VMP-Maq1 (t/h) = a_{56} + a_{57} \text{ g/m}^2\text{-1}$  (6.40)

- $VMP-Maq2 (t/h) = a_{58} + a_{59} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.41)

- $VBP-Outr (t/h) = a_{60} + a_{61} \text{ Prod.Cel} + a_{62} \text{ g/m}^2\text{-1} + a_{63} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.42)

- $VMP-Outr (t/h) = a_{64} + a_{65} \text{ Prod.Cel} + a_{66} \text{ g/m}^2\text{-1} + a_{67} \text{ g/m}^2\text{-2}$  (6.43)

- $VBP-Tot (t/h) = VBP-Cel + VBP-Rec + VBP-Strip + VBP-Evp + VBP-Util$   
 $+ VBP-Des + VBP-Maq1 + VBP-Maq2 + VBP-Outr + V_{atm}$  (6.44)

- $VMP-Tot (t/h) = VMP-Cel + VMP-Rec + VMP-Util + VMP-Maq1$   
 $+ VMP-Maq2 + VMP-Outr$  (6.45)

- $V.Cons.Tot (t/h) = VBP-Tot + VMP-Tot$  (6.46)

- $V.Cons.Cel (t/h) = VBP-Cel + VMP-Cel$  (6.47)

- $V.Cons.Rec (t/h) = VBP-Rec + VBP-Strip + VBP-Evp + VMP-Rec$  (6.48)

- $V.Cons.Util (t/h) = VBP-Util + VBP-Des + VMP-Util$  (6.49)

- $V.Cons.Máqs (t/h) = VBP-Maq1 + VBP-Maq2 + VMP-Maq1 + VMP-Maq2$  (6.50)

- $V.Cons.Indet (t/h) = VBP-Outr + VMP-Outr$  (6.51)

- $VAP (t/h) = V.Cons - DES.VBP - DES.VMP$  (6.52)

- $V.Cald.Biom (t/h) = VAP - V.Cal.Rec$  (6.53)

- $Cons.Mad.Ene (kg/t.vapor) = Cons.Mad.Ene(m^3/dia) \cdot (100.24 \cdot V.Cald.Biom)$  (6.54)

- $Óleo-3A (kg/t.vapor) = a_{68} + a_{69} V.Cald.Biom - a_{70} TS-Biom$   
 $- a_{71} Cons.Mad.Ene + a_{72} No.Enr$  (6.55)

- $Kg.Biom.Seca/t.vapor = a_{73} - a_{74} Óleo-3A - a_{75} Cons.Mad.Ene$  (6.56)

Sendo,

VBP-Cel : Consumo de vapor de baixa pressão na área de celulose

VMP-Cel : Consumo de vapor de média pressão na área de celulose

VBP-Rec : Consumo de vapor de baixa pressão na área de recuperação

VBP-Strip : Consumo de vapor de baixa pressão no *stripper*  
VBP-Evap : Consumo de vapor de baixa pressão na evaporação de licor preto  
VMP-Rec : Consumo de vapor de média pressão na área de recuperação  
VBP-UTI : Consumo de vapor de baixa pressão na área de utilidades  
VBP-Des : Consumo de vapor de baixa pressão no desaerador  
VMP-UTI : Consumo de vapor de média pressão na área de utilidades  
VBP-Maq1 : Consumo de vapor de baixa pressão na máquina-1  
VBP-Maq2 : Consumo de vapor de baixa pressão na máquina-2  
VMP-Maq1 : Consumo de vapor de média pressão na máquina-1  
VMP-Maq2 : Consumo de vapor de média pressão na máquina-2  
VBP-Outr : Consumos de vapor de baixa pressão em indeterminados  
VMP-Outr : Consumo de vapor de média pressão em indeterminados  
VBP-Tot : Consumo total de vapor de baixa pressão  
VMP-Tot : Consumo total de vapor de média pressão  
V.Cons.Cel : Consumo total de vapor  
V.Cons.Rec : Consumo total de vapor na área de recuperação  
V.Cons.Util : Consumo total de vapor na área de utilidades  
V.Cons.Máqs : Consumo total de vapor nas máquinas de papel  
V.Cons.Indet : Consumo total de vapor em indeterminados  
VAP : Vapor de alta pressão produzido pelas caldeiras  
V.Cald.Biom : Vapor produzido pela caldeira de biomassa  
Cons.Mad.Ene : Consumo de madeira para energia  
Óleo-3A : Consumo de óleo-3A na caldeira de biomassa  
Kg.Biom.Seca/t.vapor : Consumo de biomassa base seca na caldeira de biomassa  
 $a_{30}, a_{31}, \dots, a_{75}$  : Coeficientes das regressões lineares múltiplas

### Predição da geração e compra de energia elétrica

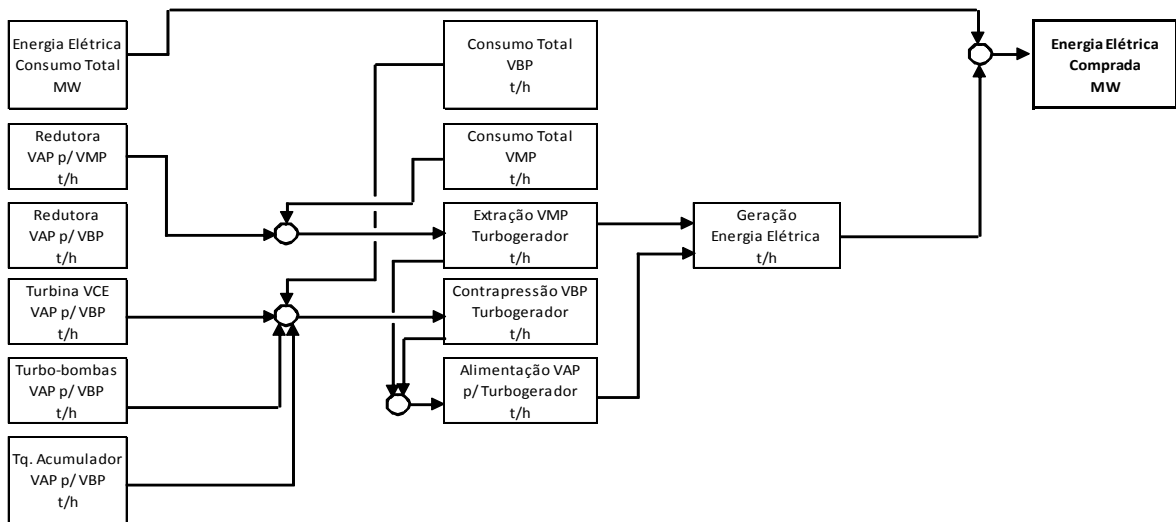


FIGURA 6.10 – Diagrama de caminhos para a geração e consumo de energia elétrica

As equações para modelagem são:

$$\begin{aligned} \bullet \text{ VBP-CPR (t/h)} &= \text{VBP-Tot} - \text{DES-VBP} - \text{RED-VBP} - \text{VCE-VBP} \\ &\quad - \text{TB-VBP} - \text{TAC-VBP} - \text{CALD3-VBP} \end{aligned} \quad (6.57)$$

$$\bullet \text{ VMP-EXTR} = \text{VMP-Tot} - \text{DES.VMP} - \text{RED.VMP} \quad (6.58)$$

$$\bullet \text{ VAP-ADM (t/h)} = \text{VMP-EXTR} + \text{VBP-CPR} \quad (6.59)$$

$$\bullet \text{ GEE(MW)} = a_{76} + a_{77} \text{ VAP-ADM (t/h)} - a_{78} \text{ VMP-EXT (t/h)} \quad (6.60)$$

$$\bullet \text{ CEE (MW)} = \text{TEE} - \text{GEE} \quad (6.61)$$

Sendo,

DES-VBP : Dessuperaquecedor para o vapor de baixa pressão

RED-VBP : Vapor para a válvula redutora do vapor de alta para baixa pressão

VCE-VBP : Vapor de alta pressão para o evaporador VCE

TB-VBP : Vapor de alta pressão para a turbina da bomba de água

TAC-VBP : Vapor de alta pressão para o tanque acumulador de vapor

CALD3-VBP : Vapor de baixa pressão produzido pela caldeira-3

VBP-CPR : Vapor de contrapressão saindo da turbina

DES.VMP : Dessuperaquecedor para o vapor de média pressão

RED.VMP : Vapor para a válvula redutora do vapor de alta para média pressão

VMP-EXTR : Vapor de extração saindo da turbina

VAP-ADM : Vapor de admissão entrando na turbina

GEE : Geração de energia elétrica

CEE : Energia elétrica comprada

$a_{76}$ ,  $a_{77}$ ,  $a_{78}$  : Coeficientes das regressões lineares múltiplas

### *Equações para cálculos de custos*

As equações para cálculos de custo são:

- $\text{Custo.Mad.Cel (R\$/d)} = \text{CEM(m}^3/\text{Adt)} \cdot \text{Prod.Cel(Adt/d)} \cdot \text{Preço.Mad.Cel(R\$/m}^3)$  (6.62)
- $\text{Custo.Esp.Mad.Cel (R\$/Adt)} = \text{CEM(m}^3/\text{Adt)} \cdot \text{Preço.Mad.Cel(R\$/m}^3)$  (6.63)
- $\text{Custo.Esp.Mad.VCel (R\$/t.vend)} = \text{Custo.Mad.Cel(R\$/d)} / \text{Prod.Vend(t/d)}$  (6.64)
- $\text{Custo.Óleo7A (R\$/d)} = \text{Kg.Óleo-7A/d(kg/d)} \cdot \text{Preço.Óleo7A(R\$/kg)}$  (6.65)
- $\text{Custo.Óleo3A (R\$/d)} = \text{Óleo-3A(kg/t.vapor)} \cdot \text{V.Cald.Biom(t/h)} \cdot 24(\text{h/d}) \cdot \text{Preço.Óleo3A (R\$/kg)}$  (6.66)
- $\text{Custo.Óleo3A.CALD3 (R\$/d)} = \text{CALD3(t/h)} \cdot 24(\text{h/d}) \cdot \text{Óleo3A.CALD3(kg/t.vapor)} \cdot \text{Preço.Óleo3A(R\$/kg)}$  (6.67)
- $\text{Custo.Mad.Ene (R\$/d)} = \text{Cons.Mad.Ene(kg/t.vapor)} \cdot \text{V.Cald.Biom(t/h)} \cdot 24(\text{h/d}) \cdot \text{Preço.Mad.Ene(R\$/m}^3)$  (6.68)
- $\text{Custo.CEE (R\$/d)} = \text{CEE(ME)} \cdot 24(\text{h/d}) \cdot \text{Preço.CEE(R\$/MWh)}$  (6.69)
- $\text{Custo.T.Ene (R\$/d)} = \text{Custo.Óleo7A (R\$/d)} + \text{Custo.Óleo3A (R\$/d)} + \text{Custo.CEE (R\$/d)} + \text{Custo.Óleo3A.CALD3 (R\$/d)} + \text{Preço.Mad.Ene(R\$/m}^3)$  (6.70)
- $\text{ENE.Óleo7A (MMBTU/d)} = \text{Kg.Óleo-7A/d} \cdot \text{PCS.ÓLEO7A(MMBTU/kg)}$  (6.71)
- $\text{ENE.Óleo3A (MMBTU/d)} = \text{Kg.Óleo-3A/d} \cdot \text{PCS.ÓLEO3A(MMBTU/kg)}$  (6.72)
- $\text{ENE.Óleo3A.CALD3 (MMBTU/d)} = \text{Kg.Óleo-3ACALD3/d} \cdot \text{PCS.ÓLEO3A(MMBTU/kg)}$  (6.73)
- $\text{ENE.Mad.Ene (MMBTU/d)} = \text{Mad.Ene(m}^3/\text{d)} \cdot \text{PCS.Mad.Ene(MMBTU/kg)}$  (6.74)
- $\text{ENE.CEE (MMBTU/d)} = \text{CEE(MWh/d)} \cdot \text{PCS.Mad.Ene(MMBTU/MWh)}$  (6.75)
- $\text{Total.ENE (MMBTU/d)} = \text{ENE.Óleo7A (MMBTU/d)} + \text{ENE.Óleo3A (MMBTU/d)} + \text{ENE.Óleo3A.CALD3 (MMBTU/d)} + \text{ENE.Mad.Ene (MMBTU/d)} + \text{ENE.CEE (MMBTU/d)}$  (6.76)
- $\text{Custo.ENE.Esp (R\$/MMBTU)} = \text{Custo.T.Ene(R\$/d)} / \text{Total.Ene(MMBTU/d)}$  (6.77)
- $\text{Custo.T.Ene.Esp (R\$/t.vend)} = \text{Custo.T.Ene(R\$/d)} / \text{Prod.Vend(t/d)}$  (6.78)
- $\text{Custo.Total (R\$/d)} = \text{Custo.Mad.Cel (R\$/d)} + \text{Custo.T.Ene (R\$/d)}$  (6.79)
- $\text{Custo.Total.Esp (R\$/t.vend)} = \text{Custo.Total(R\$/d)} / \text{Prod.Vend(t/d)}$  (6.80)

Sendo,

Custo.Mad.Cel : Custo diário da madeira de celulose

Custo.Esp.Mad.Cel : Custo específico da madeira de celulose por t celulose

Custo.Esp.Mad.VCel : Custo específico da madeira de celulose por t vendável

Custo.Óleo7A : Custo diário de óleo 7A no forno de cal

Custo.Óleo3A : Custo diário de óleo 3A na caldeira de biomassa

Custo.Óleo3A.CALD3 : Custo diário de óleo 3A na caldeira de força 3

Custo.Mad.Ene : Custo diário de madeira de energia na caldeira de biomassa

Custo.CEE : Custo diário de energia elétrica comprada

Custo.T.Ene : Custo diário total de insumos energéticos

ENE.Óleo7A : Energia diária do óleo 7A em MMBTU no forno de cal

ENE.Óleo3A : Energia diária do óleo 3A em MMBTU na caldeira de biomassa

ENE.Óleo3A.CALD3 : Energia diária do óleo 3A em MMBTU na caldeira 3

ENE.Mad.Ene : Energia diária da madeira de energia na caldeira de biomassa

ENE.CEE : Energia diária da energia elétrica comprada em MMBTU

Total.ENE : Energia total diária em MMBTU

Custo.ENE.Esp : Custo específico do total de insumos energéticos por MMBTU

Custo.T.Ene.Esp : Custo específico do total de insumos energéticos por t vendável

Custo.Total : Custo diário total de madeira para celulose e insumos energéticos

Custo.Total.Esp : Custo específico total por t vendável

TABELA 6.2 – Dados de entrada para modelagem

Dados de Entrada	Unidades	Valores-1	Valores-2
Queima de sólidos na Caldeira de Recuperação	TSS/dia	TSS	TSS
Rendimento da madeira (50 a 58%)	%	REND	REND
Densidade básica da madeira (460 a 530 kg/m3)	kg/m3	DB	DB
% Seco da madeira picada (50 a 64%)	%	TS-Cav	TS-Cav
Carga de álcali efetivo sobre madeira, 16,5-18,5%	%	CAE	CAE
Atividade do licor branco (81 a 87%)	%	ATIV	ATIV
Sulfidez do licor branco (29 a 32%)	%	SULF	SULF
Gramatura do papel - Máquina 1 (60 a 100 g/m2)	g/m2	g/m2-1	g/m2-1
Gramatura do papel - Máquina 2 (45 a 75 g/m2)	g/m2	g/m2-2	g/m2-2
Vapor para redutora de 65 p/ 12 bar	t/h	RED-VMP	RED-VMP
Vapor para redutora de 65 p/ 4,5 bar	t/h	RED-VBP	RED-VBP
Vapor para tanque acumulador de vapor	t/h	TAC-VBP	TAC-VBP
Vapor para turbina da bomba de água	t/h	TB-VBP	TB-VBP
Vapor de 4,5 bar para atmosfera	t/h	VBP-atm	VBP-atm
Produção de vapor da caldeira-3	t/h	CALD3	CALD3
Consumo madeira para energia-máx. 350 m3/d	m3/dia	Mad.Ene	Mad.Ene
Consumo cavacos para energia-máx. 200 ton/d	t/dia	Cav.Ene	Cav.Ene
Consumo total de energia elétrica (45 a 65 MW)	MW	TEE	TEE
Preço da madeira para celulose	R\$/m3	Preço.Mad.Cel	Preço.Mad.Cel
Preço da madeira para energia	R\$/m3	Preço.Mad.Ene	Preço.Mad.Ene
Preço dos cavacos para energia	R\$/t	Preço.Mad.Cav	Preço.Mad.Cav
Preço da energia elétrica	R\$/Mwh	Preço.CEE	Preço.CEE
Preço do óleo combustível 3A	R\$/t	Preço.Óleo3A	Preço.Óleo3A
Preço do óleo combustível 7A	R\$/t	Preço.Óleo7A	Preço.Óleo7A

TABELA 6.3 – Dados de saída : Resultados de custos

Dados de Saída	Unidades	Valores-1	Valores-2
Produção de Celulose	Adt/dia	Prod.Cel	Prod.Cel
Produção de Celulose Acabada	Adt/dia	Prod.Acab.Cel	Prod.Acab.Cel
Produção de Papel Acabado	t/dia	Prod.Acab	Prod.Acab
Produção de Produto Vendável (Papel+Celulose)	t/dia	Prod.Vend	Prod.Vend
Consumo de madeira para celulose	m3/dia	Mad.Cel	Mad.Cel
Consumo de óleo combustível 7A, fornos-cal	t/dia	Kg-Óleo-7A/d	Kg-Óleo-7A/d
Consumo de óleo combustível 3A, caldeiras1/2	t/dia	Kg-Óleo-3A/d	Kg-Óleo-3A/d
Consumo de óleo combustível 3A,caldeira 3	t/dia	kg-Óleo-3A.C3/d	kg-Óleo-3A.C3/d
Energia elétrica comprada	MWh/dia	CEE/d	CEE/d
Consumo total de energia comprada	MMBTU/dia	Total.ENE	Total.ENE
Custo de madeira para celulose	R\$/dia	Custo.Mad.Cel	Custo.Mad.Cel
Custo de madeira para celulose - específico	R\$/Adt	Custo.Esp.Mad.Cel	Custo.Esp.Mad.Cel
Custo de madeira para celulose - específico	R\$/t.vend	Custo.Esp.Mad.VCel	Custo.Esp.Mad.VCel
Custo de madeira para energia	R\$/dia	Custo.Mad.Ene	Custo.Mad.Ene
Custo de cavacos para energia	R\$/dia	Custo.Mad.Cav	Custo.Mad.Cav
Custo de óleo combustível 7A, fornos-cal	R\$/dia	Custo.Óleo7A	Custo.Óleo7A
Custo de óleo combustível 3A, caldeiras 1/2	R\$/dia	Custo.Óleo3A	Custo.Óleo3A
Custo de óleo combustível 3A, caldeira 3	R\$/dia	Custo.Óleo3A.CAD3	Custo.Óleo3A.CAD3
Custo da energia elétrica comprada	R\$/dia	Custo.CEE	Custo.CEE
Custo total da energia comprada	R\$/dia	Custo.T.Ene	Custo.T.Ene
Custo total da energia comprada - específico	R\$/MMBTU	Custo.ENE.Esp	Custo.ENE.Esp
Custo total da energia comprada - específico	R\$/t.vend	Custo.T.Ene.Esp	Custo.T.Ene.Esp
Custo total: madeira-celulose e energia comprada	R\$/dia	Custo.Total	Custo.Total
Custo total: madeira-celulose e energia comprada	R\$/t.vend	Custo.Total.Esp	Custo.Total.Esp

\*\*\* / \*\*\* --> O consumo de óleo nas calds. 1/2 não deve ser negativo, sendo necessário ajustar o consumo de madeira e/ou cavacos para energia, de forma a obter no mínimo zero em consumo de óleo.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As equações para desenvolvimento do modelo, definidas no Capítulo 6 com as Figuras 6.6 a 6.10, são neste capítulo estatisticamente ajustadas pelo método do MLR utilizando-se os dados reais disponibilizados pela empresa *International Paper do Brasil*.

A consistência dessas equações está diretamente relacionada aos testes de significância. Esses testes são analisados pela análise de variância, ou ANOVA, e coeficientes dos modelos calculados na MLR. Como já visto no Capítulo 5 e ilustrado no Quadro-7.1, as seguintes hipóteses são estabelecidas:

Quadro-7.1 – Testes de significância para regressão linear múltipla

Testes de Significância	Hipótese Nula (Ho)	Hipótese Alternativa (H1)
ANOVA	Não existe variável explicativa.	Existe pelo menos uma variável explicativa.
MLR (Coeficientes)	O modelo não é significativo.	O modelo é significativo.

Fonte : Montgomery e Peck, 1992

Essas hipóteses são confrontadas com o nível de significância de 5,0% e são analisadas seguindo os seguintes critérios (DRAPPER E SMITH, 1981; MONTGOMERY E PECK, 1992):

- Se na análise de **variância da regressão**,  $F > F_{p,n-p}$  ou **valor-p** < **0,05**, rejeita-se Ho e conclui-se que o modelo estimado pelo procedimento de regressão apresenta significância ao nível de  $\alpha = 0,05$ , isto indica que, no mínimo, um coeficiente do modelo é diferente de zero.
- Se os valores para os **coeficientes das variáveis independentes** apresentam **valor-p** < **0,05**, isto é um indicativo que elas são significamente relacionadas com a variável dependente. Também, um valor muito alto de soma sequencial de um preditor (**Seq-SS**) em relação aos demais mostra uma quantidade substancial de variância única para esse preditor, indicando que essa variável dependente não é significamente relacionada com a variável independente e deve ser analisada sua retirada do modelo.

- O coeficiente de determinação ajustado ( $R-Sq_{adj}$ ) pode ser interpretado como:

$$R-Sq_{adj} = 0 \quad \rightarrow \text{Relação nula}$$

$$0 < R-Sq_{adj} \leq 0,30 \quad \rightarrow \text{Relação fraca}$$

$$0,30 < R-Sq_{adj} \leq 0,70 \quad \rightarrow \text{Relação média}$$

$$0,70 < R-Sq_{adj} \leq 0,90 \quad \rightarrow \text{Relação forte}$$

$$0,90 < R-Sq_{adj} \leq 0,99 \quad \rightarrow \text{Relação fortíssima}$$

$$R-Sq_{adj} = 1 \quad \rightarrow \text{Relação perfeita}$$

- Nem sempre uma elevada correlação entre duas variáveis representa a existência de causa e efeito entre as mesmas. Uma indicação de que o coeficiente de determinação representa que o modelo tem uma adequada habilidade de predição é comparar os valores de  $R-Sq$ ,  $R-Sq_{adj}$  e  $R-Sq_{pred}$  e verificar se os seus valores não se diferem significativamente.
- Para avaliação da existência de colinearidade entre as variáveis independentes, dois métodos estatísticos são utilizados: o Fator de inflação de variância (**VIF**) e o Coeficiente de Durbin-Watson (**DW**). Para valores de **VIF** > 4 e **DW** < 0,5, a existência de **variáveis correlacionadas** deve ser investigada, utilizando-se como exemplo a matriz de correlações para análise.
- Para verificação da **normalidade dos resíduos** são utilizadas as observações dos gráficos de distribuição normal dos resíduos padronizados em escala logarítmica e do histograma dos resíduos padronizados, no qual é possível verificar se os resíduos padronizados apresentam-se linearizados com a distribuição normal.
- Na avaliação da variância constante dos termos do erro ou de resíduos (**Homoscedasticidade**), utiliza-se as observações dos gráficos dos resíduos em função dos valores preditos e das observações realizadas, verificando se os resíduos apresentam variância homogênea com média em torno de zero em toda a faixa de valores preditos e de observações e sem padrão definido.
- Para avaliação de pontos discriminantes (**outliers**), verifica-se o gráfico dos resíduos padronizados em função dos valores preditos, verificando os pontos que existem fora do intervalo entre -2 a +2. Divergência significativa desses limites indica violação potencial da suposição de normalidade e valores fora desse limite são chamados de *outliers* e são admitidos em, no **máximo, 5%** do total de observações.



## 7.1 – Predição do consumo específico de madeira para celulose

O modelo proposto (ver item 2.5 do Capítulo 2) utiliza-se de três variáveis independentes – densidade básica, teor de resíduo base seca e rendimento - todas elas mensuráveis no estudo de caso em questão. No entanto, em muitas indústrias, não ocorre a medição do teor de resíduos por falta de uma balança integradora na corrente de resíduo gerado (cascas e rejeitos de madeira), e, sendo assim, o modelo considera a possibilidade de correlação do resíduo gerado em base úmida com o teor seco da biomassa produzida, o que deve ser suprimido caso ocorra a medição do teor de resíduo.

### *Predição do Teor Seco da Biomassa (TS-Biom) e Teor de Resíduos (TR-Seco)*

O teor seco da biomassa é obtido em função do teor seco dos cavacos após o processo de picagem e o teor de resíduos úmido é obtido em função do teor seco da biomassa. Por cálculo de balanço de massa, obtém-se o teor de resíduos base seca em função do teor de resíduos base úmida.

As análises de regressão, realizadas com o auxílio do *MINITAB*, ao nível de confiança de 95% ou de significância  $\alpha = 5,0\%$ , seguem:

#### *Análise de Regressão : TS-Biomassa x TS-Cavacos*

Equação da regressão:

$$TS-Biomassa = -56,694 + 1,9661 TS-Cavacos$$

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	-56,694	7,3	-7,780	0,000
TS-Cavacos	1,966	0,1	14,810	0,000

S = 1,82591 R-Sq = 77,4% R-Sq(adj) = 77,1%  
PRESS = 227 R-Sq(pred) = 76%

Durbin-Watson statistic = 1,31590

#### *Análise de Variância*

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1,000	731,2	731,180	219,32	0,000
Residual Error	64,000	213,4	3,330		
Total	65,000	944,6			

#### *Outliers*

Total (3,07%): Obs 39: St Res = -2,00 ; Obs 59: St Res = 2,20 (Total 3,07%)

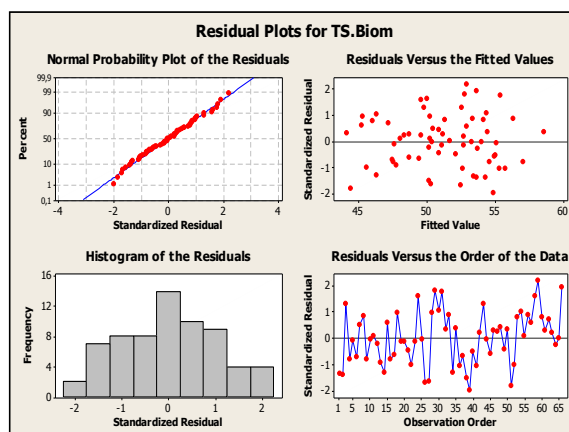


FIGURA 7.1 – Análise de regressão para o teor seco da biomassa

**Análise de Regressão : TR-Úmido x TS-Biomassa**

Equação da regressão:

TR-Úmido = 37,0076 - 0,40844 TS-Biomassa

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	37,00760	0,9739	38,0000	0,0000
TS-Cavacos	-0,40844	0,0190	-21,5400	0,0000

S = 0,582656 R-Sq = 87,9 % R-Sq(adj) = 87,7 %

PRESS = 23,19 R-Sq(pred) = 87,1 %

Durbin-Watson statistic = 2,28764

**Análise de Variância**

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1,000	157,6	157,570	464,14	0,000
Residual Error	64,000	21,7	0,340		
Total	65,000	179,3			

**Outliers**

Total (1,52%) : Obs 62 : St Res = 2,02

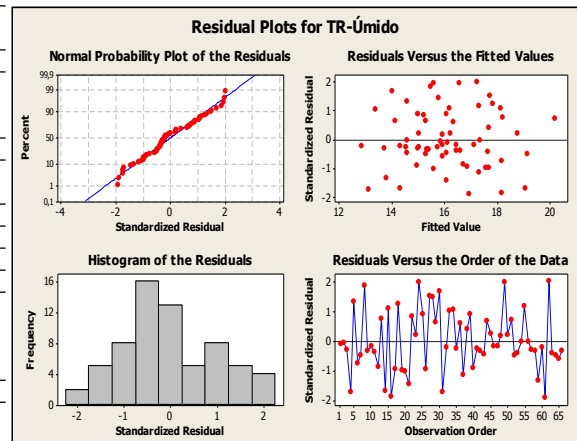


FIGURA 7.2 – Análise de regressão para o teor de resíduos gerados

Os valores de regressões lineares simples são ilustrados nas Figuras 7.1 e 7.2 e suas validades demonstradas:

- O valores de p (0,000) e de F significativamente altos nas análises de variância indicam que as relações tanto para o TS-Biomassa quanto para o TR-Úmido são estatisticamente significantes. Isto também é mostrado pelos valores de p das constantes e dos coeficientes das variáveis predictoras — todos 0,000.
- As análises de R-Sq , R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> apresentam valores muito próximos entre si, sendo de 76% a 77,4% para a estimativa do TS-Biomassa e de 87,1% a 87,9% para a predição do TR-Úmido, indicando que os modelos predizem os dados de forma satisfatória.
- Os gráficos de análise dos resíduos padronizados para a probabilidade normal apresentam linearidade com a curva normal para ambos os modelos, o que também é visualizado nos histogramas dos resíduos.
- Os gráficos dos resíduos em função dos valores preditos e do número de observações apresentam os pontos dispersos sem um padrão definido, o que leva a concluir que os erros têm variância homogênea. Nota-se incidência de 1,5% a 3,0% de *outliers* para os dois modelos de regressão linear simples.

Ressalta-se mais uma vez a importância da medição do teor seco da biomassa e do teor de resíduos, investimentos de controle do processo que permitem uma atuação direta nessas variáveis com maior precisão que se estimadas por outra variável.

### Predição do Consumo específico da madeira (CEM)

A Figura 7.3 ilustra a regressão linear múltipla para a predição do consumo específico de madeira (CEM) em função da densidade básica (DB), do teor de resíduos em base seca (TR-Seco) e do rendimento da madeira (REND).

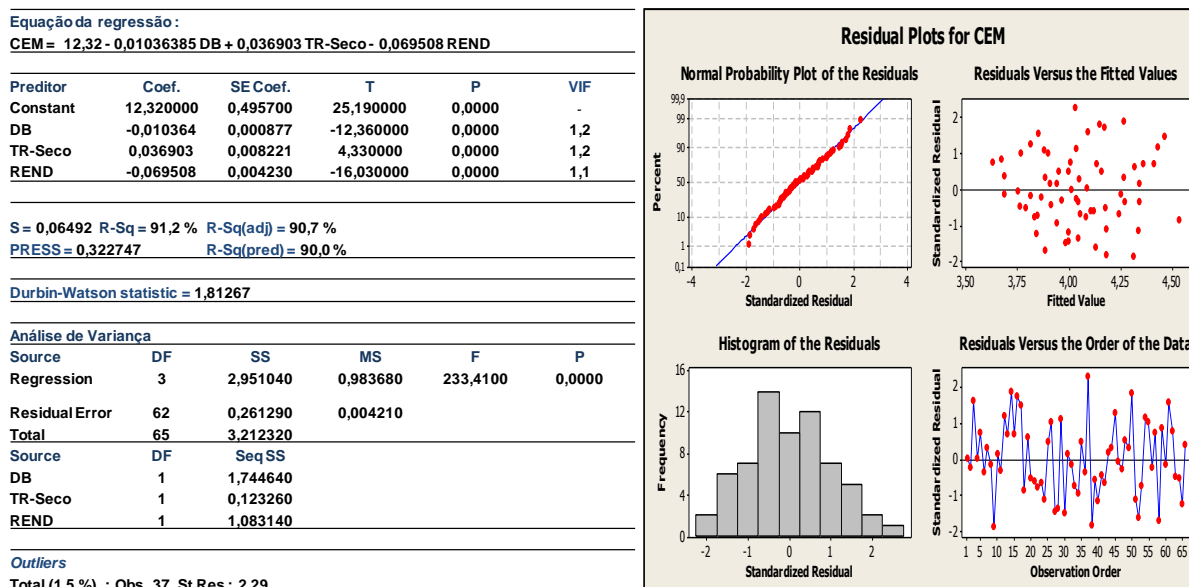


FIGURA 7.3 – Correlação múltipla para o consumo específico de madeira

- O valor-p ( $0,0000 < p_r=0,05$ ) e o F ( $233 > F_{3,62}=2,75$ ) mostram que o modelo é significativo ao nível de  $\alpha = 0,05$ , indicando que, no mínimo, um coeficiente é diferente de zero.
- Os valores-p para os coeficientes estimados das variáveis independentes (DB, TR-Seco e REND) são todos 0,0000, indicando que eles são significativamente relacionados com o CEM.
- Os coeficientes R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> são respectivamente 91,2%, 90,7% e 90,0% , muito próximos em valores, significando que os preditores não estão em número excessivo, e explicam cerca de 90% da variância no CEM, com adequada habilidade de predição.
- O gráfico de análise dos resíduos padronizados para a probabilidade normal apresenta linearidade com a curva normal para o modelo, o que também é visualizado no histograma dos resíduos, consistente com a curva normal.

- O gráfico do resíduo padronizado em função dos valores preditos e do número de observações apresenta os pontos dispersos sem um padrão definido, o que leva a concluir que os erros têm variância homogênea com média próxima de zero em toda a faixa de predição do modelo.
- Ocorre a incidência de um *outlier* (1,5%) neste modelo, o qual foi mantido.
- Relações de dependência entre os preditores (densidade básica, rendimento e teor de resíduos) do consumo específico de madeira mostram relativa ausência de colinearidade entre eles, como mostra a Figura 7.4 e os coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) e valor- $p < 0,05$ , somente nas correlações das variáveis independentes com o CEM. As correlações entre as variáveis dependentes (DB, TR-SECO e REND) apresentam muito baixos coeficientes de correlação e valor- $p > 0,05$ .

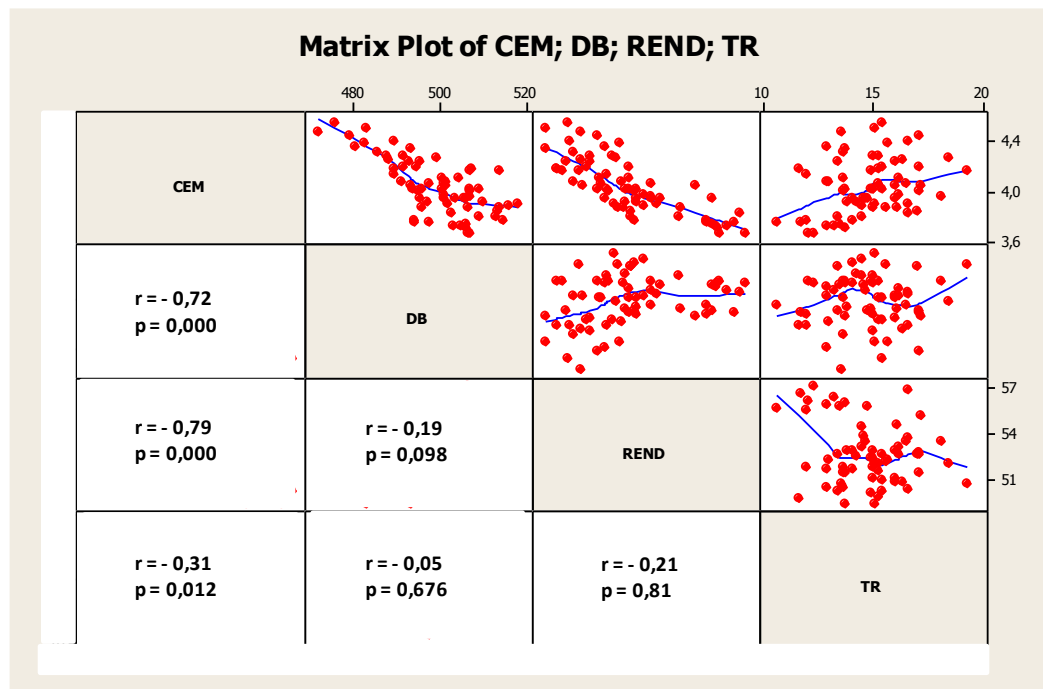


FIGURA 7.4 – Matriz de correlação entre as variáveis do consumo específico de madeira

Para confirmar a falta de colinearidade entre as variáveis independentes, os valores de VIF de 1,1 a 1,2 ( $< 4,0$ ) e do coeficiente DW = 1,81 (próximo de 2) mostram a consistência dessa análise.

Os gráficos representados na Figura 7.5, da variável predita versus a variável medida, mostram que o modelo é capaz de fornecer resultados confiáveis de predição do consumo

específico de madeira para celulose (CEM) dentro de um intervalo de predição de 95%, mostrando bom ajuste ao método de MLR.

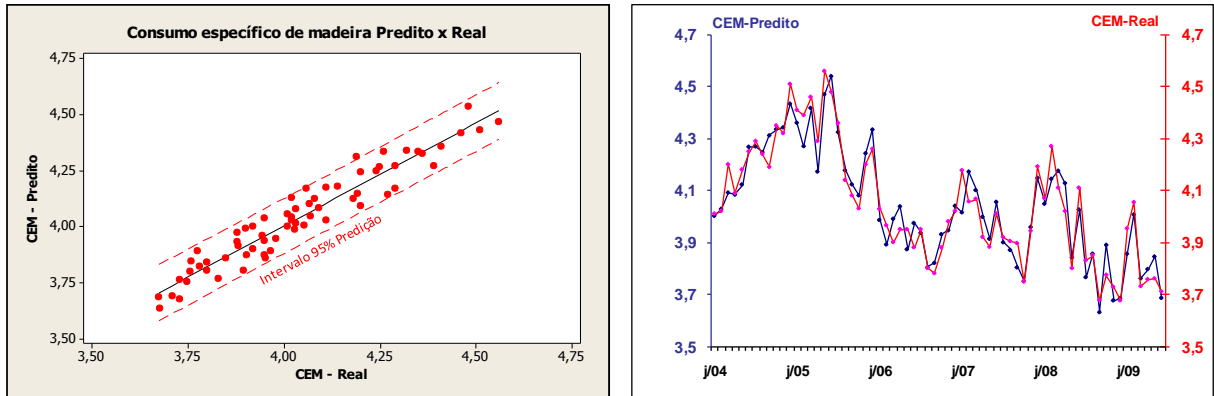


FIGURA 7.5 – Relação entre variável predita e variável medida para o consumo específico de madeira

Como previsto no diagrama de caminhos, ilustrado na Figura 6.6, conhecendo-se o teor de resíduos e o consumo específico de madeira, é possível calcular a quantidade de resíduos gerada, sendo para isso necessário conhecer a densidade aparente da madeira, ou seja, converter a quantidade de madeira consumida em volume ( $m^3$ -sólido) para unidade de massa úmida que, multiplicada pelo teor de resíduo base seca e teor seco da madeira, mostra a quantidade de resíduos gerada. A densidade aparente da madeira sofre influência direta da densidade básica da madeira e de seu teor seco, uma vez que a umidade da madeira influencia na sua massa e na sua dilatação em volume e a densidade básica representa a densidade do material seco.

No caso de a indústria possuir a sistemática de medição da densidade aparente, facilmente calcula-se a quantidade de resíduos gerada. No entanto, no caso da medição de densidade aparente não estar disponível sistematicamente, pode-se obtê-la utilizando-se da correlação entre a densidade aparente com a densidade básica e o teor seco da madeira.

Ressalta-se o fato de a densidade aparente da madeira ser amplamente utilizada no cálculo de conversão da madeira recebida de unidade mássica para unidade volumétrica, ou seja, a madeira recebida é pesada em balança apropriada para caminhões e seu peso é convertido em volume com a utilização da densidade volumétrica. No caso da IP-Luiz Antonio, a densidade aparente é determinada por amostragem de toras nos caminhões, e, através da medição de volume e peso da tora, determina-se a densidade aparente, sendo esta, portanto, fortemente influenciada pela umidade contida na tora.

Com a quantidade de resíduos gerada conhecida, pode-se calcular a disponibilidade de resíduos para queima na caldeira de biomassa.

A Figura 7.6 ilustra a regressão linear múltipla para a predição da densidade aparente da madeira (DA) em função da densidade básica (DB) e do teor seco da madeira (TS-Mad).

*Análise de Regressão : DA x DB , TS-Madeira*

Equação da regressão:					
DA = 1455,59 - 0,37897 DB - 12,8988 TS-Madeira					
Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	1455,5900	13,020000	111,840000	0,0000	-
DB	0,378970	0,029580	12,810000	0,0000	1,3
TS-Madeira	-12,898800	0,148300	-86,970000	0,0000	1,3
S = 2,13287 R-Sq = 89,3 % R-Sq(adj) = 89,0 %					
PRESS = 315,919 R-Sq(pred) = 89,0 %					
Durbin-Watson statistic = 1,79527					
Análise de Variança					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	39253	19626,0	4314,29	0,0000
Residual Error	63	287	5,0		
Total	65	39539			
Source	DF	Seq SS			
DB	1	4841			
TS-Madeira	1	34412			
Outliers					
Total (4,5 %) : Ob 4 : St Res 2,67 ; Obs 6 : -2,38 ; Obs 41 : -2,83					

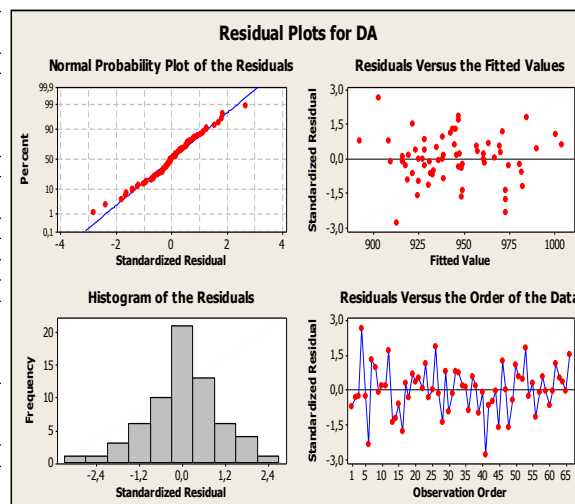


FIGURA 7.6 – Correlação múltipla para a densidade aparente da madeira

- O valor-p ( $0,0000 < p_r=0,05$ ) e o F ( $4314 > F_{2,63}=3,14$ ) mostram que o modelo é significativo ao nível de  $\alpha = 0,05$ , indicando que, no mínimo, um coeficiente é diferente de zero.
- Os valores-p para os coeficientes estimados das variáveis independentes (DB, TR-SECO e REND) são todos 0,0000, indicando que eles são significativamente relacionados com a DA.
- Os coeficientes R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> são respectivamente 89,3%, 89,0% e 89,0% , muito próximos em valores, significando que os preditores explicam cerca de 89% da variância na DA, com adequada habilidade de predição.
- O gráfico de análise dos resíduos padronizados para a probabilidade normal apresenta linearidade com a curva normal para o modelo, o que também é visualizado no histograma dos resíduos, consistente com a curva normal.
- O gráfico do resíduo padronizado em função dos valores preditos e do número de observações apresenta os pontos dispersos sem um padrão definido, o que leva a concluir que os erros têm variância homogênea com média próxima de zero em toda a faixa de predição do modelo.

- Ocorre a incidência de três *outliers* neste modelo, representando 4,5% do total de observações. As três observações serão mantidas para predição do modelo, pois, além de não serem influentes, suas retiradas não representam alteração significativa na capacidade de predição do modelo, como testado.
- Não ocorre colinearidade entre as variáveis independentes (DB e TS-Mad). Os valores de VIF de 1,3 (< 4,0) e do coeficiente DW = 1,80 (próximo de 2) mostram a consistência desta análise.

### ***Método alternativo de predição do consumo específico de madeira:***

Uma forma alternativa de predição do consumo específico de madeira (CEM) é correlacioná-lo com a densidade aparente da madeira (DA), que expressa a densidade do material (densidade básica, DB) e suas variações em função do teor seco da madeira – TS-Mad (quantidade de água e variação volumétrica da madeira) e com o rendimento total da madeira (RENDT), considerando a quantidade da celulose produzida pelo peso da madeira seca na entrada do setor de preparação de madeira (neste caso o rendimento engloba as perdas de madeira ou resíduo gerado na preparação de madeira), ou seja:

$$\text{CEM} = \beta_1 + \beta_2 \text{DA} + \beta_3 \text{RENDT}$$

A equação acima representa a influência da variação volumétrica no peso da madeira pela variação da densidade aparente-DA e da eficiência de utilização da madeira no processo industrial (rendimento total-RENDT), incluindo a geração de resíduos na área de preparação de madeira, rendimento do processo de polpação e perdas de fibras. Quanto maior a densidade aparente da madeira (DA) e maior o rendimento total (RENDT), menor o consumo específico de madeira (CEM).

A Figura 7.7 ilustra a regressão linear múltipla para a predição do consumo específico de madeira (CEM) em função da densidade aparente da madeira (DA) e do rendimento total da madeira (RENDT), cujos valores de valor-p da regressão e dos coeficientes mostram que eles são significantes na relação com o CEM, confirmado pelos valores de R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> da ordem de 88%. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seu histograma mostram um padrão dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea em relação aos valores preditos. Em função dos valores de VIF=1,2 e DW=1,45, não ocorre colinearidade entre a DA e RENDT.

Análise de Regressão: CEM x DA , RENDT

Equação da regressão :  
**CEM = 1,3734 + 0,0006150 . DA + 4751,57 . 1 / RENDT^2**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	1,3734	0,1278000	10,740	0,0000	-
DA	0,0006150	0,0001442	4,260	0,0000	1,2
1/RENDT^2	4751,57	78,480000	60,550	0,0000	1,2

S = 0,0267223 R-Sq = 88,6 % R-Sq(adj) = 88,3 %  
 PRESS = 0,0488326 R-Sq(pred) = 88,1 %

Durbin-Watson statistic = 1,4529

Análise de Variância					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	3,1848	1,5924	2230,00	0,0000
Residual Error	63	0,0450	0,0007		
Total	65	3,2298			

Source	DF	Seq SS
DA	1	0,5671
1/RENDT^2	1	2,6178

Outliers  
 Total (4,5 %) : Ob 18 : St Res 2,88 ; Obs 26 : -2,87 ; Obs 37 : -2,69

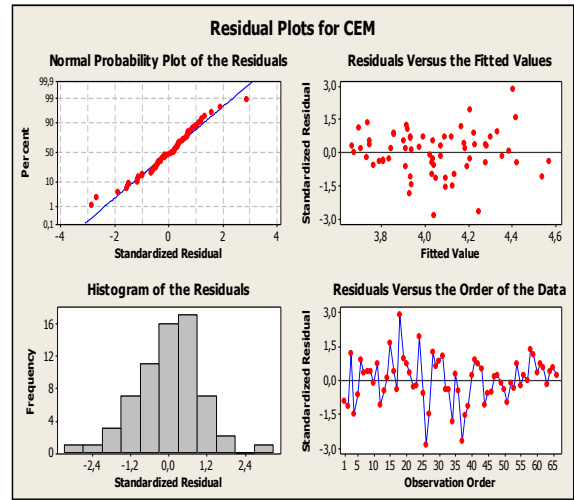


FIGURA 7.7 – Correlação múltipla para o consumo específico de madeira (alternativo)

A Figura 7.8 ilustra a validade dos dois modelos de predição do consumo específico de madeira, podendo ambos ser utilizados adequadamente.

- $CEM_1 = 12,32 - 0,010364 DB + 0,036903 TR-Seco - 0,069508 REND$
- $CEM_2 = 1,3734 + 0,0006150 . DA + 4751,57 . 1 / RENDT^2$

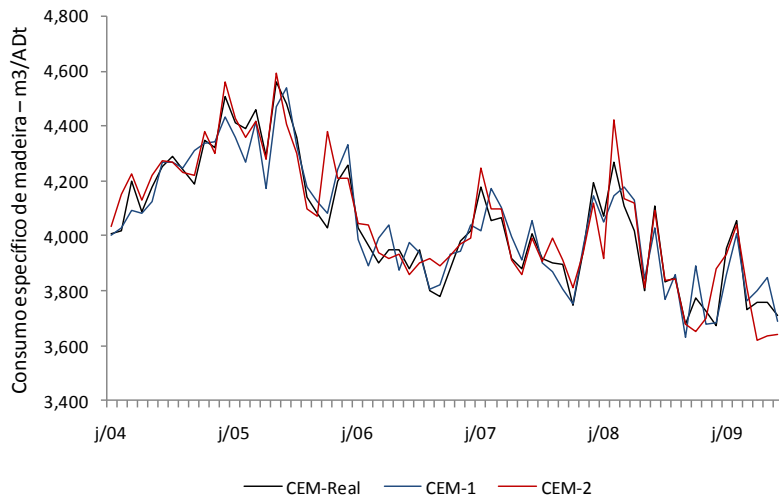


FIGURA 7.8 – Comparação dos modelos de predição do consumo específico de madeira



## 7.2 - Predição da relação sólidos/polpa e consumo de óleo no forno de cal

### *Predição da relação sólidos/polpa*

A predição da relação sólidos queimados na caldeira de recuperação pela produção de celulose (RSP - sólidos/polpa) é necessária para a determinação da produção de celulose, uma vez que o gargalo de produção na IP-Luiz Antonio se encontra na capacidade de queima da caldeira de recuperação, atualmente de 1.700 tss/d. Quanto maior o rendimento e menor a carga alcalina total (CAT) aplicada no cozimento, menor a geração de sólidos para a caldeira de recuperação e conseqüentemente menor a relação sólidos/polpa, maximizando a produção de celulose para a queima de 1.700 tss/d na caldeira de recuperação. A maximização do rendimento representa menos sólidos orgânicos ( $\text{Orgânicos} = (100 - \text{REND}) / \text{REND}$ ) no licor preto e a minimização da carga alcalina total menos sólidos inorgânicos ( $\text{Inorgânicos} = \text{kg.Na}_2\text{CO}_3 / \text{ADt} + \text{kg.NaOH}_{\text{at}} / \text{ADt}$ ).

Tecnicamente, como exposto no Capítulo 3, pode haver relações de dependência entre os preditores (rendimento, atividade do licor branco e carga de álcali ativo) da relação sólidos/polpa (RSP). Essas correlações são esperadas, uma vez que a qualidade da madeira (ver Capítulo-2) pode afetar o rendimento (REND) e alterar a carga de álcali ativo no cozimento (CAA,  $\text{kg-NaOH}_{\text{at}} / \text{ADt}$ ), o que implica em maior ou menor fluxo de licor verde e branco na caustificação e alteração na eficiência de reação (ATIV,  $\text{kg-Na}_2\text{CO}_3 / \text{ADt}$ ), principalmente em sobrecarga.

Portanto, a análise da matriz de correlações em conjunto com a análise dos fatores de inflação da variância (VIF) e do fator de Durbin-Watson nas variáveis preditoras da RSP é de relevância na validação do modelo.

A Figura 7.9 ilustra a regressão linear múltipla para a predição da relação sólidos/polpa (RSP) em função da carga de orgânicos e inorgânicos no licor preto para queima na caldeira de recuperação, ou seja, do rendimento ( $\text{Orgânicos} = (100 - \text{REND}) / \text{REND}$ ), da eficiência de caustificação ( $\text{Kg-Na}_2\text{CO}_3 / \text{ADt}$ ) e carga de álcali ativo ao cozimento ( $\text{Kg-NaOH}_{\text{at}} / \text{ADt}$ ); ( $\text{Inorgânicos} = (\text{Kg-Na}_2\text{CO}_3 + \text{Kg-NaOH}) / \text{ADt}$ ).

Análise de Regressão: RSP x (100-REND)/REND, Kg.Na2CO3/ADt, Kg.NaOHat/ADt

Equação da regressão :

$$RSP = 0,2821 + 0,62895 (100-REND)/REND + 0,0015977 \text{ Kg.Na2CO3/ADt} + 0,0013791 \text{ Kg.AA-NaOH/ADt}$$

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	0,2821000	0,1108000	2,550000	0,0130	-
(100-REND)/REND	0,6289500	0,0495100	12,700000	0,0000	1,2
kg.Na2CO3/ADt	0,0015977	0,0004875	3,280000	0,0020	1,7
kg.AA-NaOH/ADt	0,0013791	0,0003468	3,980000	0,0000	1,6

S = 0,0255502 R-Sq = 85,3 % R-Sq(adj) = 84,8 %  
PRESS = 0,0452063 R-Sq(pred) = 83,9 %

Durbin-Watson statistic = 1,26

Análise de Variança

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	0,239516	0,079839	122,3000	0,0000
Residual Error	62	0,040474	0,000653		
Total	65	0,279991			

Source	DF	Seq SS
(100-REND)/REND	1	0,201365
kg.Na2CO3/ADt	1	0,027828
kg.AA-NaOH/ADt	1	0,010324

Outliers

Total (1,5%) : Obs. 20 St Res : 2,74 : Obs. 42 St Res : - 2,01

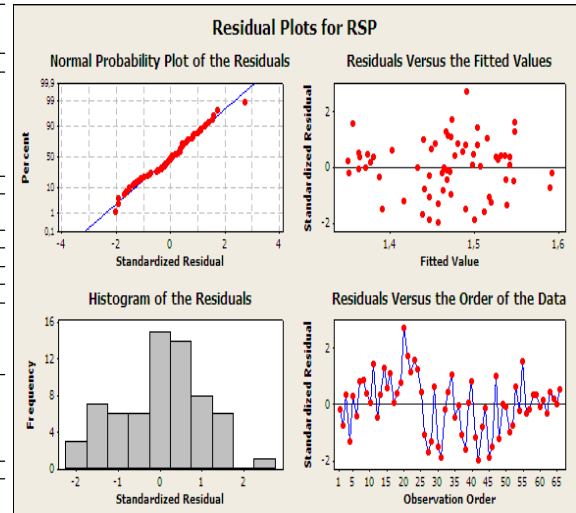


FIGURA 7.9 – Correlação múltipla para predição da relação sólidos/polpa

- O valor-p ( $0,0000 < p_r=0,05$ ) e o F ( $122 > F_{3,62}=2,75$ ) mostram que o modelo é significativo ao nível de  $\alpha = 0,05$ , indicando que, no mínimo, um coeficiente é diferente de zero.
- Os valores-p para os coeficientes estimados das variáveis independentes são iguais a 0,0000 para 100-REND/REND e Kg-NaOH<sub>at</sub>/ADt e 0,002 para Kg-Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/ADt, ou seja, menores que  $p_r < 0,05$ , indicando que eles são significativamente relacionados com a RSP.
- Os coeficientes R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> são respectivamente 85,3%, 84,8% e 83,9%, muito próximos em valores, significando que os preditores não estão em número excessivo e explicam aproximadamente 84% da variância na RSP, com adequada habilidade de predição.
- O gráfico de análise dos resíduos padronizados para a probabilidade normal apresenta linearidade com a curva normal para o modelo, o que também é visualizado no histograma dos resíduos, consistente com a curva normal.
- O gráfico do resíduo padronizado em função dos valores preditos e do número de observações apresenta os pontos dispersos sem um padrão definido, o que leva a concluir que os erros têm variância homogênea com média próxima de zero em toda a faixa de predição do modelo.

- Ocorre a incidência de dois *outliers* (3,0%) neste modelo, os quais foram mantidos, pois a análise de retirada dos mesmos não indicou que sejam pontos influentes ou de alavancagem no modelo de predição.
- Relações de dependência entre os preditores ( $(100-\text{REND})/\text{REND}$ ),  $\text{Kg-Na}_2\text{CO}_3/\text{ADt}$  e  $\text{Kg-NaOH}_{\text{at}}/\text{ADt}$  da relação sólidos/polpa (RSP), mostram pequena colinearidade entre eles, como ilustra a Figura 7.10, com coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ) entre 33,7% a 59,1% e valor- $p < 0,05$ . No entanto, avaliando os fatores de inflação da variância (VIF) de 1,2 a 1,7, bem menores que  $\text{VIF}_r = 4$  e o fator de Durbin-Watson de 1,28, mais próximo de 2 do que de zero, considerou-se ausência de colinearidade no modelo.

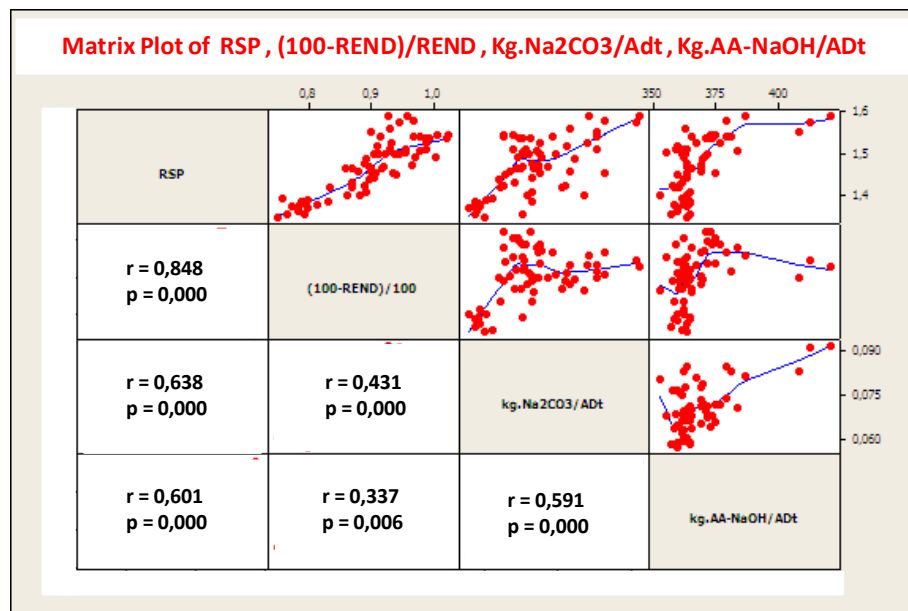


FIGURA 7.10 – Matriz de correlação entre as variáveis da relação sólidos / polpa

Os gráficos representados na Figura 7.11, da variável predita versus a variável medida, mostram que o modelo é capaz de fornecer resultados confiáveis de predição da relação sólidos/polpa (RSP) dentro de um intervalo de predição de 95%.

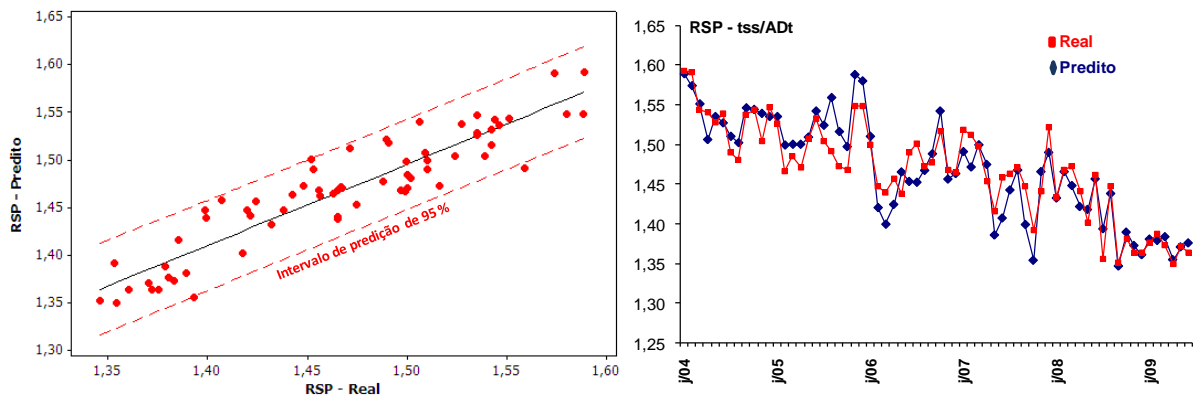


FIGURA 7.11 – Relação entre variável predita e variável medida para a relação sólidos/polpa (RSP)

### ***Predição do vapor gerado/sólidos queimados (t.vapor/tss)***

Conhecendo-se a relação sólidos/polpa (RSP) e a taxa de queima de sólidos (tss/d) na caldeira de recuperação, é possível calcular a taxa de produção de celulose (t.cel/d), a qual servirá de base de cálculo para as estimativas absolutas de consumo de madeira e insumos energéticos.

A geração específica de vapor pela caldeira de recuperação (t.vapor/tss) depende da composição do licor preto (poder calorífero) que está diretamente relacionada com o teor de orgânicos (rendimento) e inorgânicos (carga alcalina total) e conseqüentemente com a relação sólidos/polpa (RSP).

Para que seja possível calcular a geração de vapor da caldeira de biomassa é necessário conhecer a geração de vapor da caldeira de recuperação, pois, pela demanda total de vapor na fábrica menos a geração de vapor na caldeira de recuperação, obtém-se a geração de vapor necessária na caldeira de biomassa.

A Figura 7.12 ilustra a regressão linear simples para a predição da geração específica de vapor (t.vapor/tss) em função da relação sólidos/polpa, cujos valores de valor-p da regressão e dos coeficientes mostram que são significantes na relação com t.vapor/tss, confirmado pelos valores de R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> da ordem de 86%. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seu histograma mostram um padrão dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea em relação aos valores preditos.

**Análise de Regressão : t.vapor/tss x RSP**

Equação da regressão:  
 $t.vapor/tss = 4,64117 - 1,10047 RSP$

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	4,64117	0,07813	59,400	0,0000
RSP	-1,10047	0,05318	-20,690	0,0000

S = 0,0281396 R-Sq = 87,0 % R-Sq(adj) = 86,8 %  
 PRESS = 0,0538047 R-Sq(pred) = 86,2 %

Durbin-Watson statistic = 1,83264

Análise de Variância					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0,33908	0,33908	428,22	0,0000
Residual Error	64	0,05068	0,00079		
Total	65	0,38976			

Outliers  
 Total (4,5%) : Obs 39 : St Res = 2,10 : Obs 44 : St Res = -2,32 : Obs 63 : St Res = -2,50

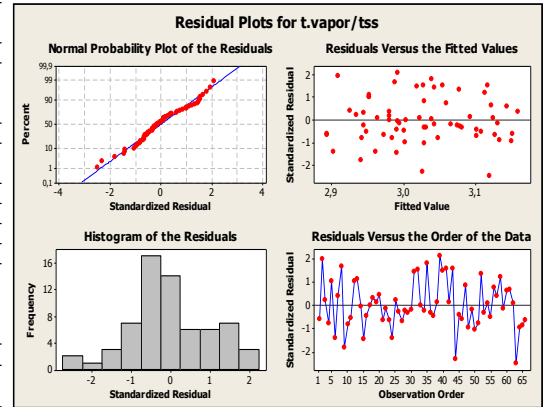


FIGURA 7.12 – Análise de regressão para a geração específica de vapor na CR

Os gráficos representados na Figura 7.13, da variável predita versus a variável medida, mostram que o modelo é capaz de fornecer resultados confiáveis de predição da geração específica de vapor (t.vapor/tss) dentro de um intervalo de predição de 95%.

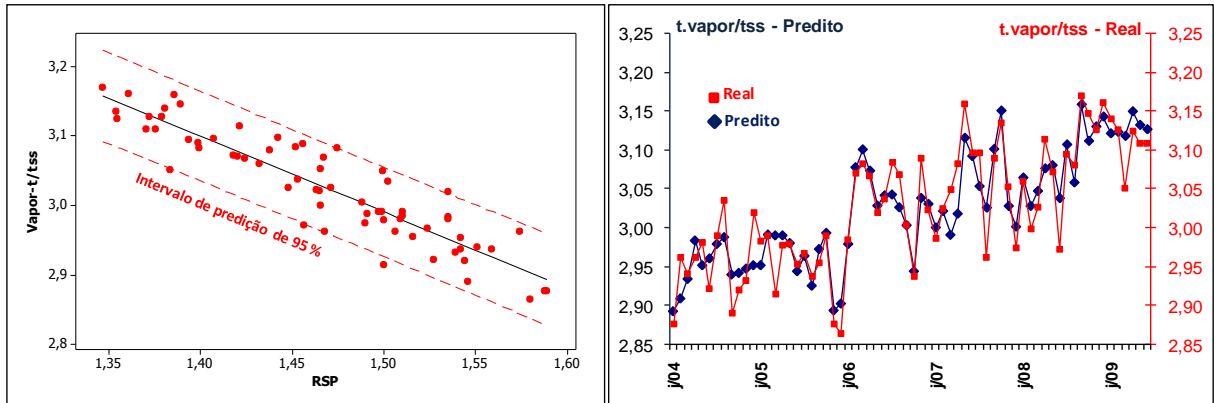


FIGURA 7.13 – Relação entre a variável predita e a variável medida para geração de vapor–CR

**Predição do consumo de cal na caustificação e óleo 7A no forno de cal**

O consumo de óleo combustível tipo 7A no forno de cal (Óleo-7A) depende da sulfidez (SULF) do licor verde e da quantidade de álcali convertida na caustificação (AAC), que está diretamente relacionada à carga de álcali ativo (CAA) utilizada no cozimento. Quanto maior a sulfidez e menor a carga de álcali ativo ao cozimento, menor a quantidade de álcali convertido na caustificação, menor a geração de lama de cal (CaCO<sub>3</sub>) e

consequentemente menor o consumo de óleo (Óleo-7A) para a calcinação da lama de cal para cal (CaO).

Dada a natureza do processo de caustificação e forno de cal com reações químicas bem definidas, as correlações obtidas devem representar bem a predição da produção de cal e o consumo de óleo combustível, caso contrário os dados devem ser revistos com relação a erros de medições.

As Figuras 7.14 e 7.15 ilustram as regressões lineares simples para a predição do consumo de cal (Kg.CaO/ADt), em função da conversão de álcali na caustificação (Kg.AAC/ADt), e do consumo de óleo combustível 7A (Kg.Óleo-7A/t.CaO), em função da produção de cal (Kg.CaO/ADt), cujos valores de valor-p da regressão e dos coeficientes mostram que eles são significantes na relação de predição, confirmado pelos valores de R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> da ordem de 95,7% para o consumo de cal e de 97,8% para o consumo de óleo-7A. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seus histogramas mostram um alinhamento dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea em relação aos valores preditos. Os *outliers* representam 4,5% dos dados em ambas as relações, sendo mantidos na estimativa dos modelos, pois testes de retirada desses dados indicaram que não se tratam de dados influentes ou de alavancagem dos modelos.

#### Análise de Regressão : Kg.CaO/Adt x Kg.AAC/Adt

Equação da regressão:					
Kg.CaO/Adt = - 56,694 + Kg.AAC/Adt					
Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	
Constant	-0,4380	6,0300	-0,0700	0,0350	
Kg.AAC/Adt	0,8558	0,0220	38,9300	0,0000	
S = 2,5525 R-Sq = 95,9 % R-Sq(adj) = 95,9 %					
PRESS = 443 R-Sq(pred) = 95,7 %					
Durbin-Watson statistic = 1,95					
Análise de Variança					
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	9874,0	9874,0	1515	0,0000
Residual Error	64	417,0	6,5		
Total	65	10291,0			
Outliers					
Total (4,5 %) : Obs 07 : St Res = 2,08 ; Obs 08 : St Res = 2,38 ; Obs 24 : St Res : 2,30					

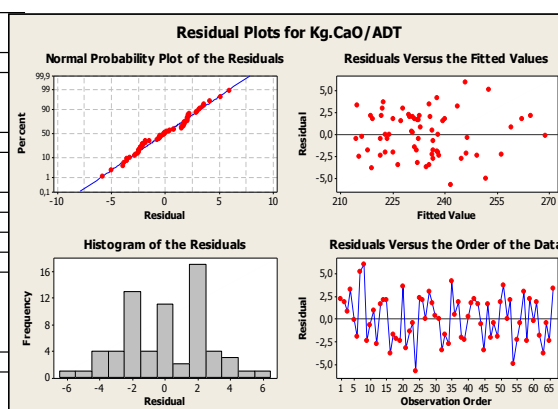


FIGURA 7.14 - Análise de regressão para a produção de cal no forno de cal

*Análise de Regressão : Kg.Óleo-7A/t.CaO x Kg.CaO/Adt*

Equação da regressão:  
**Kg.Óleo-7A/t.CaO = 102,474 + 0,128959 Kg.CaO/Adt**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P
Constant	102,4740	0,5680	180,5500	0,0000
Kg.CaO/Adt	0,1290	0,0024	53,2300	0,0000

S = 0,251681 R-Sq = 97,8 % R-Sq(adj) = 97,8 %  
 PRESS = 4,35394 R-Sq(pred) = 97,6 %

Durbin-Watson statistic = 2,46

**Análise de Variância**

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	179,5	179,490	2833	0,0000
Residual Error	64	4,1	0,060		
Total	65	183,5			

**Outliers**  
 Total (4,5 %) : Obs 05 : St Res = 2,51 ; Obs 11 : St Res = 2,15 ; Obs 57 : St Res : 2,08

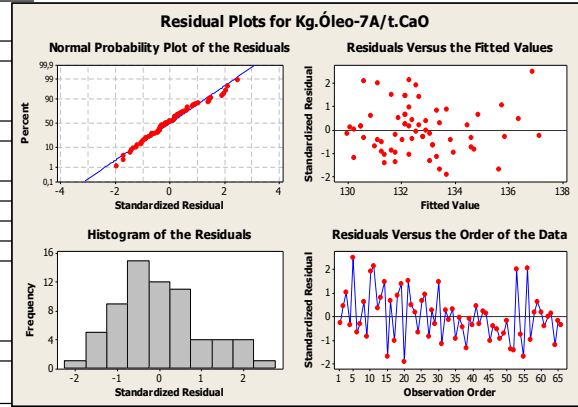


FIGURA 7.15 - Análise de regressão para o consumo de óleo no forno de cal

**7.3 – Predição do consumo de celulose e produção nas máquinas de papel**

Para o cálculo da produção vendável de celulose, é necessário conhecer o consumo desse material nas máquinas de papel para propiciar o cálculo da parte vendável em função da sua produção total.

As produções nas máquinas de papel dependem fortemente da gramatura do papel – gramas de papel por m<sup>2</sup> - produzido, uma vez que as velocidades de produção operam no máximo de capacidade. Para cada gramatura de papel, existe uma receita que determina a sua composição (celulose refinada, carbonato de cálcio, amido interno, amido superficial, colas sintéticas impermeabilizadoras, alvejantes, anilinas e outros produtos). Entre a produção bruta e a produção acabada, existe uma perda de papel inerente ao processo de corte para a adequação de formatos, sendo esta perda denominada aproveitamento, sendo utilizados 94,6% como valor médio (5,4 % de perda de papel entre produção bruta e acabada).

Com a produção vendável de celulose e acabada de papel, calcula-se a produção de produto vendável para utilização nos cálculos comparativos de custos. Nesse caso, o ajuste é somente para achar as equações referentes ao percentual de celulose contido no papel por gramatura, conforme especificação de fabricação pré-estabelecida. Por essa razão, necessariamente, o ajuste aos modelos deve ser perfeito, ou seja, com R-Sq = R-Sq<sub>adj</sub> = R-Sq<sub>pred</sub> = 100 %. Utilizou-se um ajuste polinomial de terceiro grau após testes com outros polinômios e funções.

As Figuras 7.16 e 7.17 ilustram as equações encontradas para os valores de especificação de percentagem de celulose contida no papel para diferentes gramaturas, sendo a curva de ajuste 100% alinhada com os dados de especificação.

**Análise de Regressão : %Cel-1 x g/m2-1**

Equação da regressão:

$$\%Cel-1 = 303,0 - 7,539 \text{ g/m}^2-1 + 0,08481 \text{ g/m}^2-1^{**2} - 0,000319 \text{ g/m}^2-1^{**3}$$

S = 0,00606889 R-Sq = 100,0% R-Sq(adj) = 100,0%

Análise de Variância

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	3,60900	1,20310	32665	0,0000
Residual Error	22	0,00081	0,00004		
Total	25	3,61010			

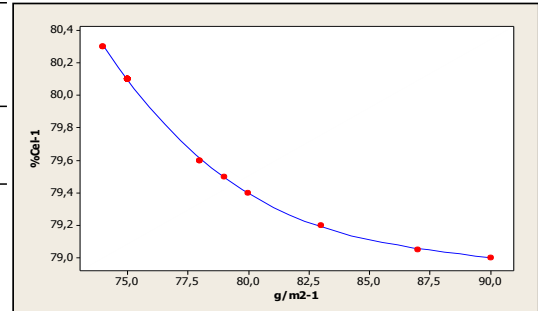


FIGURA 7.16 - Análise de regressão para o % Celulose nos papéis da máquina-1

**Análise de Regressão : %Cel-2 x g/m2-2**

Equação da regressão:

$$\%Cel-2 = 84,87 + 0,3927 \text{ g/m}^2-2 - 0,008117 \text{ g/m}^2-2^{**2} + 0,000029 \text{ g/m}^2-2^{**3}$$

S = 0,00745789 R-Sq = 100,0% R-Sq(adj) = 100,0%

Análise de Variância

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	198,739	66,2463	1191050	0,0000
Residual Error	22	0,001	0,0001		
Total	25	198,740			

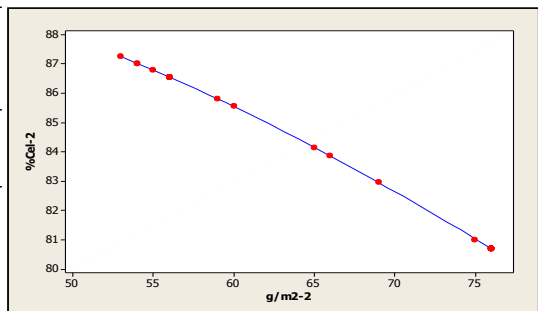


FIGURA 7.17 - Análise de regressão para o % Celulose nos papéis da máquina-2



#### **7.4 - Predição do consumo de vapor, geração vapor e consumo de biomassa, madeira e óleo combustível na caldeira de biomassa.**

O consumo de combustíveis na caldeira de biomassa (resíduos de biomassa, madeira e óleo combustível) para geração de vapor está diretamente relacionado ao consumo de vapor nos diversos setores da fábrica, pois corresponde à diferença entre o consumo total de vapor e a produção de vapor na caldeira de recuperação. O teor seco da biomassa e o número de enrosco nas esteiras de biomassa também influem consideravelmente no consumo de madeira e óleo combustível.

O consumo de vapor na área da linha de fibras é diretamente proporcional à taxa de produção de celulose, uma vez que as temperaturas utilizadas estão otimizadas para as reações químicas no processo (cozimento, deslignificação com  $O_2$  e branqueamento). O mesmo ocorre na área de recuperação, ou seja, o consumo de vapor é proporcional à taxa de produção de celulose (evaporação, *stripper*, aquecedores de ar e de licor, ejetores, etc). Nas máquinas de papel, o consumo de vapor é proporcional à gramatura e à velocidade (taxa de produção) e, na área de utilidades, depende da produção de celulose e da produção de papel

##### ***Predição do consumo de vapor nos setores de celulose, recuperação e papel***

Modelos de regressões lineares simples são utilizados nas áreas de celulose, recuperação e papel. A Figura 7.18 ilustra os modelos, cujos valores de valor-p  $< 0,05$  das regressões e dos coeficientes mostram que eles são significantes, confirmado pelos valores de  $R-Sq$ ,  $R-Sq_{adj}$  e  $R-Sq_{pred}$ , maiores que 90%. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seu histograma mostram um padrão dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea em relação aos valores preditos, mostrando linearidade.

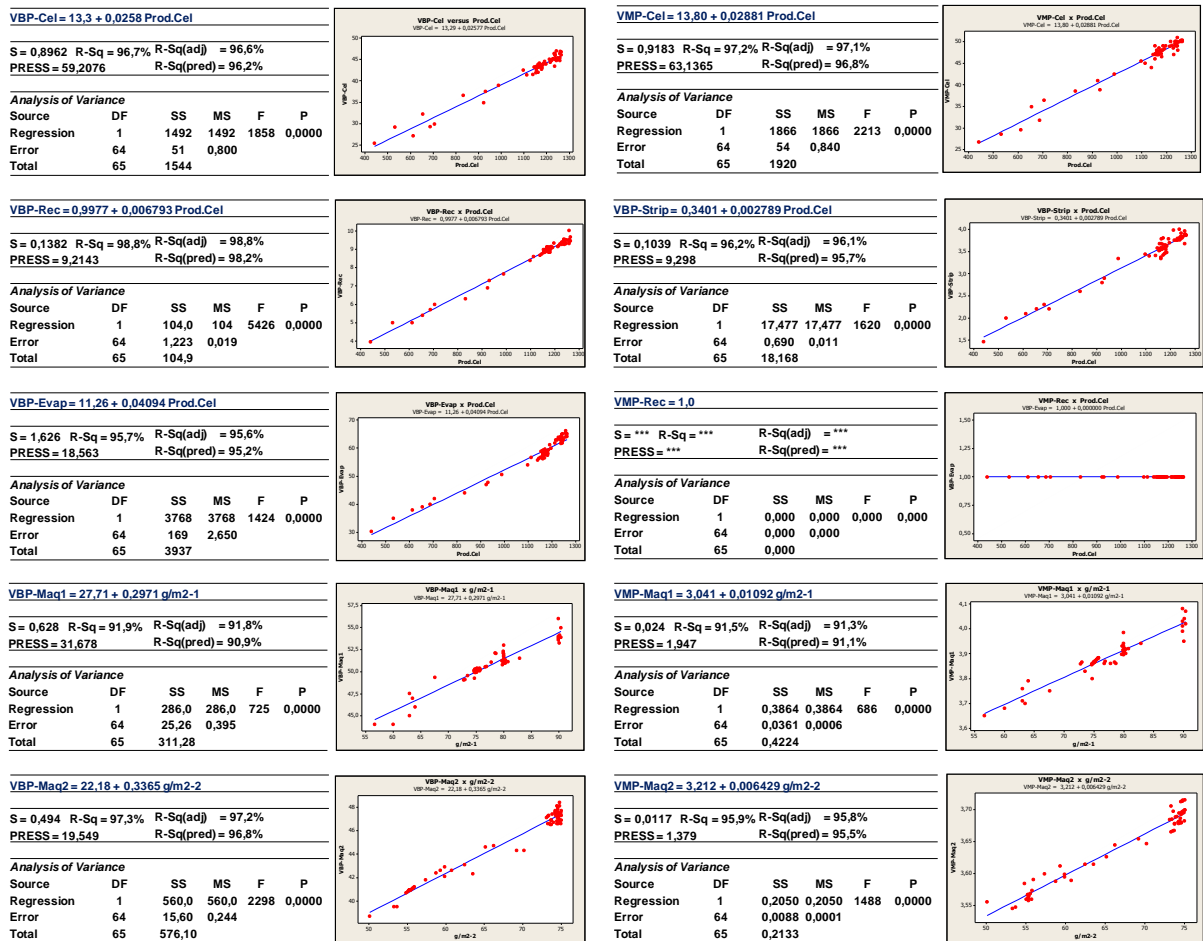


FIGURA 7.18 – Correlações simples para consumo de vapor na Cel, Rec, Máq.1 e Máq.2

**Predição do consumo de vapor nos setores de utilidades e outros**

Para o consumo de vapor nos setores da área de utilidades e outros, regressões múltiplas são utilizadas para relacionar o consumo de vapor com as taxas de produção de celulose e papel numa mesma equação.

A Figura 7.19 ilustra as regressões lineares múltiplas, cujos valores de valor-p da regressão e dos coeficientes mostram que eles são significantes com valor-p < 0,05, confirmado pelos valores de R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> da ordem de 96% a 98%. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seu histograma mostram um padrão dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea dos resíduos padronizados em relação aos valores preditos mostrando comportamento linear das variáveis. Em função dos valores de VIF=1,0 e DW > 1,7, não ocorre, nos modelos, colinearidade entre a Prod.Cel, g/m<sup>2</sup>-1 e g/m<sup>2</sup>-2.

Equação da regressão:  
**VBP-UTI = - 0,481 + 0,00408 Prod.Cel + 0,0237 g/m2-1 + 0,0278 g/m2-2**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	-0,4808000	0,2233000	-2,150000	0,0350	-
Prod.Cel	0,0040823	0,0000725	56,340000	0,0000	1,0
g/m2-1	0,0236570	0,0019020	12,440000	0,0020	1,0
g/m2-2	0,0277640	0,0015370	18,060000	0,0000	1,0

S = 0,106083 R-Sq = 98,1 % R-Sq(adj) = 98,0 %  
 PRESS = 0,769445 R-Sq(pred) = 97,9 %

Durbin-Watson statistic = 1,85407

**Análise de Variação**

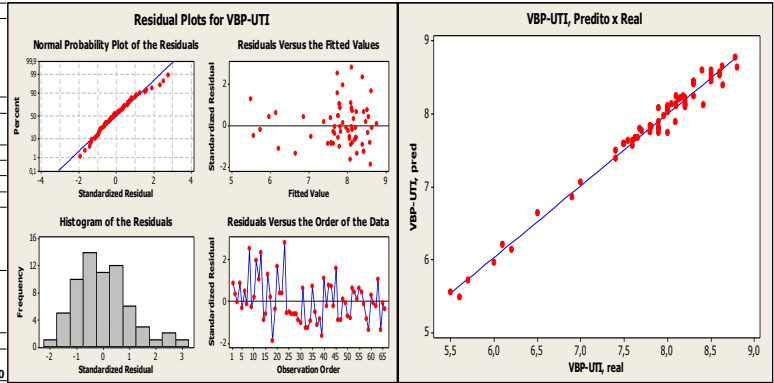
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	36,755000	12,252000	1089,0000	0,0000
Residual Error	62	0,698000	0,011000		
Total	65	37,453000			

Source	DF	Seq SS
Prod.Cel	1	31,946000
g/m2-1	1	1,136000
g/m2-2	1	3,672000

**Outliers**

Total (4,5 %) : Obs. 08 St Res : 2,53 ; Obs. 13 St Res : 2,34 ; Obs. 23 St Res 2,80



Equação da regressão:  
**VBP-Des = - 0,711 + 0,00597 Prod.Cel + 0,0362 g/m2-1 + 0,0404 g/m2-2**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	-0,7107000	0,2976000	-2,390000	0,0200	-
Prod.Cel	0,0059724	0,0000966	61,850000	0,0000	1,0
g/m2-1	0,0362090	0,0025350	14,280000	0,0000	1,0
g/m2-2	0,0404330	0,0020480	19,740000	0,0000	1,0

S = 0,1413 R-Sq = 98,4 % R-Sq(adj) = 98,4 %  
 PRESS = 1,39271 R-Sq(pred) = 98,2 %

Durbin-Watson statistic = 1,92

**Análise de Variação**

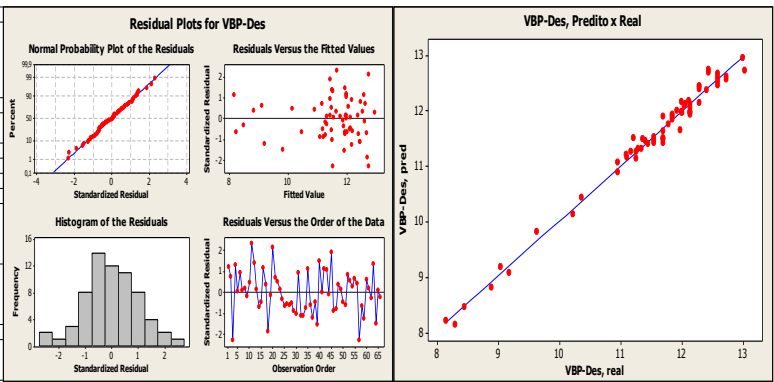
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	73,699000	26,233000	1313,0000	0,0000
Residual Error	62	1,239000	0,020000		
Total	65	79,937000			

Source	DF	Seq SS
Prod.Cel	1	68,183000
g/m2-1	1	2,726000
g/m2-2	1	7,789000

**Outliers**

Total (4,5 %) : Obs. 03 St Res : -2,28 ; Obs. 11 St Res : 2,33 ; Obs. 20 St Res 2,12



Equação da regressão:  
**VMP-UTI = - 0,596 + 0,00514 Prod.Cel + 0,0302 g/m2-1 + 0,0353 g/m2-2**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	-0,5961000	0,2602000	-2,290000	0,0250	-
Prod.Cel	0,0051442	0,0000844	60,930000	0,0000	1,0
g/m2-1	0,0301770	0,0022170	13,610000	0,0000	1,0
g/m2-2	0,0353380	0,0017910	19,730000	0,0000	1,0

S = 0,1236 R-Sq = 98,4 % R-Sq(adj) = 98,3 %  
 PRESS = 1,05489 R-Sq(pred) = 98,2 %

Durbin-Watson statistic = 1,76

**Análise de Variação**

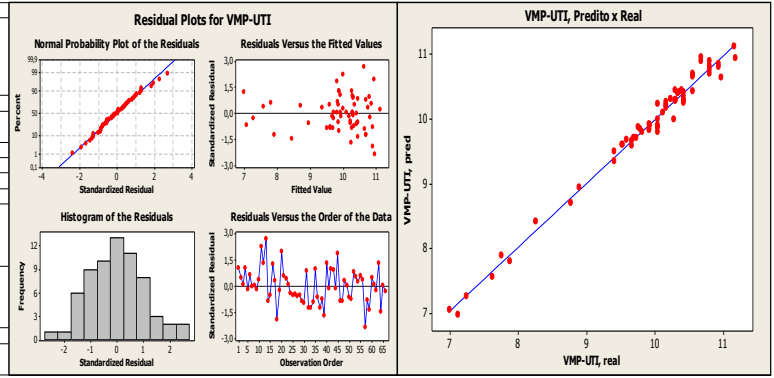
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	58,434000	19,478000	1274,0000	0,0000
Residual Error	62	0,948000	0,015000		
Total	65	59,382000			

Source	DF	Seq SS
Prod.Cel	1	50,634000
g/m2-1	1	1,850000
g/m2-2	1	5,950000

**Outliers**

Total (4,5 %) : Obs. 11 St Res : 2,27 ; Obs. 13 St Res : 2,71 ; Obs. 57 St Res 2,38



Equação da regressão:  
**VBP-Outr = - 0,264 + 0,00222 Prod.Cel + 0,0135 g/m2-1 + 0,0150 g/m2-2**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	-0,2637000	0,1105000	-2,390000	0,0200	-
Prod.Cel	0,0022194	0,0000359	61,900000	0,0000	1,0
g/m2-1	0,0134533	0,0009413	14,290000	0,0000	1,0
g/m2-2	0,0150242	0,0007605	19,750000	0,0000	1,0

S = 0,0525 R-Sq = 98,5 % R-Sq(adj) = 98,4 %  
 PRESS = 0,19203 R-Sq(pred) = 98,26 %

Durbin-Watson statistic = 1,9234

**Análise de Variação**

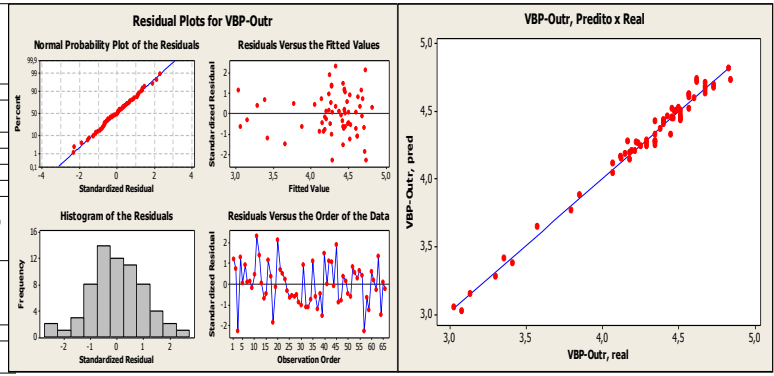
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	3	10,867200	3,622400	1314,5400	0,0000
Residual Error	62	0,170800	0,002800		
Total	65	11,038100			

Source	DF	Seq SS
Prod.Cel	1	9,415500
g/m2-1	1	0,376300
g/m2-2	1	1,075400

**Outliers**

Total (4,5 %) : Obs. 3 St Res : -2,28 ; Obs. 11 St Res : 2,32 ; Obs. 57 St Res -2,31



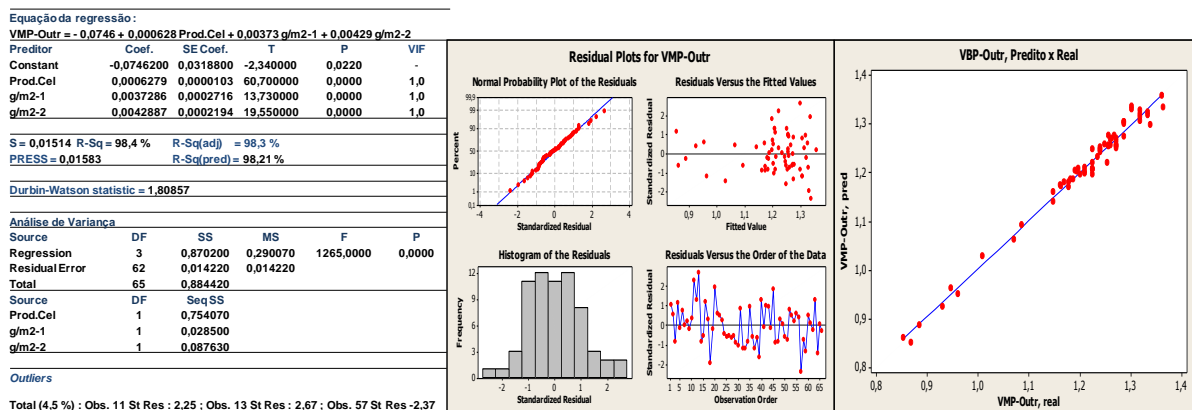


FIGURA 7.19 – Correlações múltiplas para consumo de vapor na Utilidades e Indeterminados

As regressões obtidas para o consumo de vapor nos setores de celulose, recuperação, papel e utilidades apresentam adequada linearidade com as taxas de produção de celulose e papel, como esperado. Isto evidencia que o banco de dados utilizado apresenta boa confiabilidade. Também, no período analisado, as especificações de temperaturas utilizadas no processo de produção e de umidade dos papéis produzidos não tiveram alterações significativas, sendo o principal fator de influência nos erros obtidos a temperatura ambiente, provocando variações de consumo de vapor entre os meses de inverno e verão.

### *Predição do consumo de Óleo-3A na caldeira de biomassa*

De conhecimento da geração de vapor na caldeira de biomassa (obtido pela diferença entre o consumo total de vapor e a geração de vapor na caldeira de recuperação), do teor seco da biomassa, da quantidade de madeira alimentada na forma de cavacos e do número de enrosocos nas esteiras de biomassa, é possível obter a relação com a quantidade de óleo combustível tipo 3A utilizada.

O teor seco da biomassa é a variável mais importante, pois um valor maior que 55% com um consumo complementar de madeira praticamente elimina a necessidade de queima de óleo combustível na caldeira de biomassa em função de não ocorrer a necessidade de energia para evaporação do excesso de água contida na biomassa.

A Figura 7.20 ilustra a regressão linear múltipla para a predição do consumo de óleo-3A em função da produção de vapor na caldeira de biomassa (V.Cald.Biom), do teor seco da biomassa (TS-Biom), do consumo de madeira para energia (Cons.Mad.Ene) e do número de enrosocos da esteira de biomassa (No.Enr).

Equação da regressão :

Óleo-3A = 84,0 + 0,427 V.Cald.Biom - 1,85 TS-Biom - 0,224 Cons.Mad.Ene + 0,638 No.Enr

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	83,9670	4,78300	17,5500	0,0000	-
V.Cald.Biom	0,4272	0,03212	13,3000	0,0000	1,2
TS-Biom	-1,8523	0,06876	-26,9400	0,0000	1,1
Cons.Mad.Ene	-0,2238	0,01333	-16,7900	0,0000	1,1
No.Enr	0,6385	0,03326	19,2000	0,0000	1,2

S = 1,84486 R-Sq = 97,6 % R-Sq(adj) = 97,3 %

PRESS = 161,335 R-Sq(pred) = 96,8 %

Durbin-Watson statistic = 1.89592

Análise de Variança

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	4921,00	1230,40	361,50	0,0000
Residual Error	36	122,50	3,40		
Total	40	5043,90			

Source	DF	Seq SS
V.Cald.Biom	1	41,30
TS-Biom	1	2140,80
Cons.Mad.Ene	1	1484,90
No.Enr	1	1254,40

Outliers

Total (2,5 %) : Obs. 33 St Res : -2,11

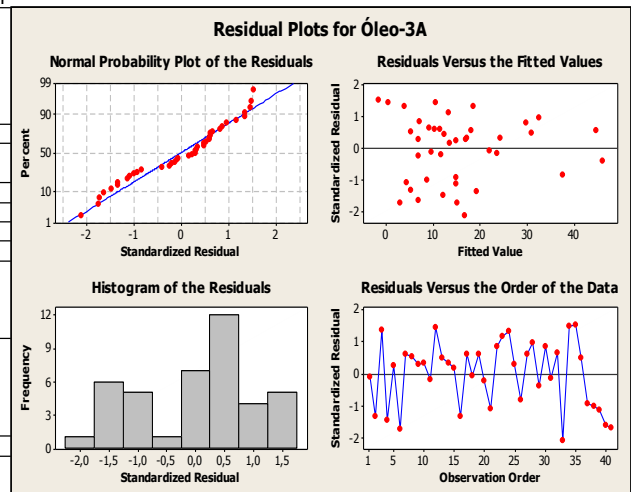


FIGURA 7.20 - Análise de regressão para o consumo de óleo na caldeira de biomassa

- O valor-p ( $0,0000 < p_r=0,05$ ) e o F ( $381 > F_{4,36}=3,14$ ) mostram que o modelo é significativo ao nível de  $\alpha = 0,05$ , indicando que, no mínimo, um coeficiente é diferente de zero.
- Os valores-p para os coeficientes estimados das variáveis independentes (V.Cald.Biom, TS-Biom, Cons.Mad.Ene e No.Enr) são todos 0,0000, indicando que eles são significativamente relacionados com o Óleo-3A.
- Os coeficientes R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> são respectivamente 97,6%, 97,3% e 96,9%, muito próximos em valores, significando que os preditores explicam cerca de 97% da variância no Óleo-3A, com adequada habilidade de predição.
- O gráfico de análise dos resíduos padronizados para a probabilidade normal apresenta linearidade com a curva normal para o modelo, o que também é visualizado no histograma dos resíduos, consistente com a curva normal.
- O gráfico do resíduo padronizado em função dos valores preditos e do número de observações apresenta os pontos dispersos sem um padrão definido, o que leva a concluir que os erros têm variância homogênea com média próxima de zero em toda a faixa de predição do modelo.
- Ocorre a incidência de um *outlier* neste modelo, representando 2,5% do total de observações. Esta observação será mantida para predição do modelo, pois, além de não ser influente, sua retirada não representa alteração significativa na capacidade de predição do modelo, como testado.

- Não ocorre colinearidade entre as variáveis independentes. Os valores de VIF de 1,2 ( $< 4,0$ ) e do coeficiente DW = 1,89 (próximo de 2) mostram a consistência desta análise.

Os gráficos representados na Figura 7.21, da variável predita versus a variável medida, mostram que o modelo é capaz de fornecer resultados confiáveis de predição do consumo de Óleo-3A dentro de um intervalo de predição de 95%, mostrando bom ajuste ao método de MLR.

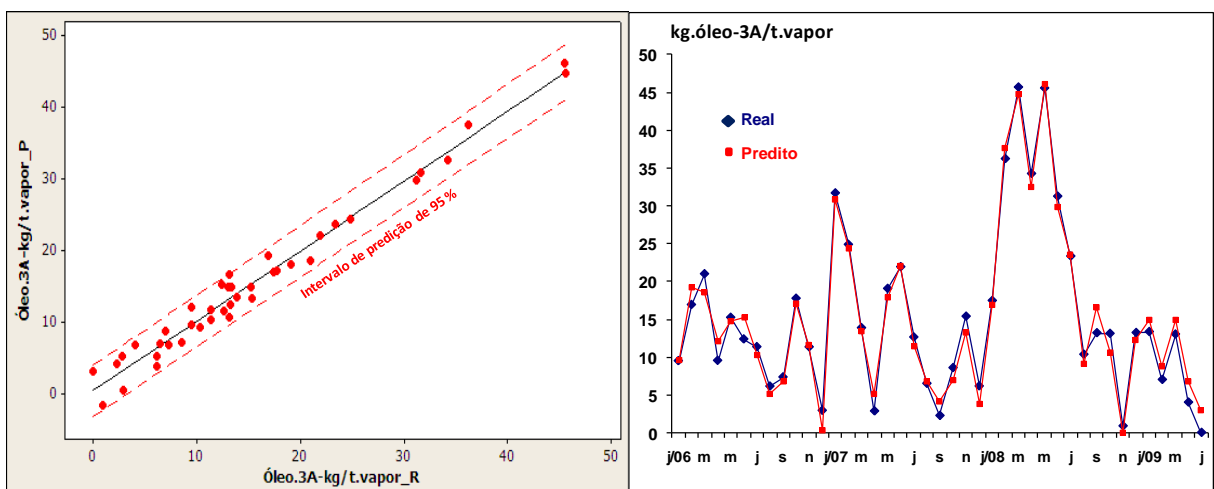


FIGURA 7.21 - Relação entre variável predita e variável medida para o consumo de óleo combustível

### ***Predição do consumo de biomassa na caldeira de biomassa***

A quantidade de biomassa para a caldeira é calculada em função da quantidade de óleo combustível e da madeira necessária para a geração de vapor demandada. Essa quantidade é fortemente dependente do seu teor seco, e, em teor seco maior que 55%, não ocorre a utilização de óleo-3A e a madeira de energia demandada é mínima, maximizando a utilização de biomassa.

Uma alternativa para esse modelo seria a relação entre a biomassa utilizada (Kg.Biom.Seca/t.vapor) em função de seu teor seco (TS-Biom) e a geração de vapor demandada (V.Cald.Biom); no entanto, isto eliminaria a opção de utilização de óleo-3A e madeira de energia mesmo em maiores teores secos da biomassa, o que pode ocorrer em casos de falta de biomassa ou estratégias de variações de preços.

A Figura 7.22 ilustra a regressão linear múltipla, cujos valores de valor-p da regressão e dos coeficientes mostram que eles são significantes com valor-p  $< 0,05$ , confirmado pelos

valores de R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> da ordem de 97,5%. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seu histograma mostram um padrão dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea dos resíduos padronizados em relação aos valores preditos, mostrando comportamento linear das variáveis. Em função dos valores de VIF=1,3 e DW > 1,29, não ocorre, no modelo, colinearidade entre Óleo-3A e Cons.Mad.Ene.

Equação da regressão :  
**Kg.Biom.Seca/t.vapor = 395 - 2,61 Óleo-3A, real - 1,54 Cons.Mad.Ene**

Preditor	Coef.	SE Coef.	T	P	VIF
Constant	395,2040	3,42900	115,2500	0,0000	-
Óleo-3A	-2,6118	0,08035	-32,5000	0,0000	1,3
Cons.Mad.Ene	-1,5449	0,03987	-38,7400	0,0000	1,3

---

S = 5,0705 R-Sq = 97,9 % R-Sq(adj) = 97,8 %  
 PRESS = 1158 R-Sq(pred) = 97,5 %

---

Durbin-Watson statistic = 1,29351

---

Análise de Variança

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	45653,00	22826,00	888,00	0,0000
Residual Error	38	977,00	26,00		
Total	40	46630,00			

---

Source	DF	Seq SS
Óleo-3A	1	7060,00
Cons.Mad.Ene	1	38593,00

---

Outliers  
 Total (5,0 %) : Obs. 13 St Res: 2,35 ; Obs 33 St Res: 2,42

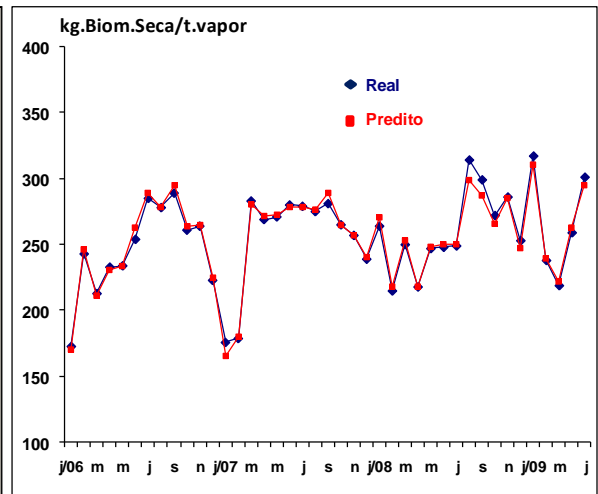
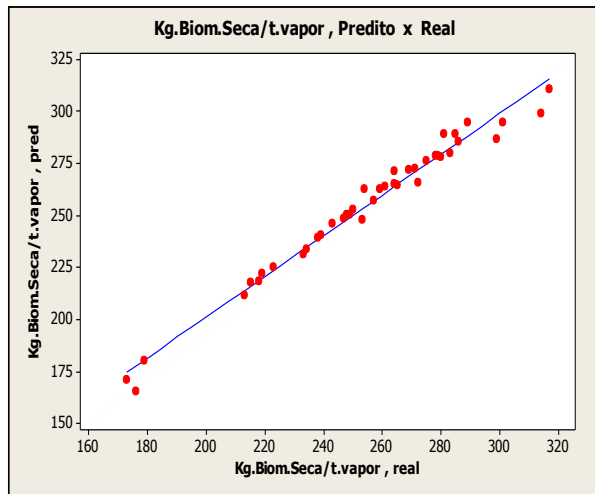
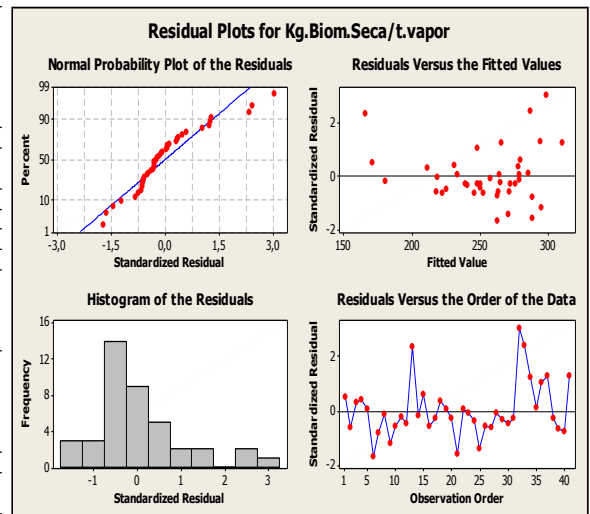


FIGURA 7.22 - Análise de regressão para o consumo de biomassa na caldeira de biomassa

Como previsto no diagrama de caminhos, ilustrado na Figura 6.6, conhecendo-se o teor de resíduos base seca, consumo específico de madeira e densidade aparente da madeira (ver ítem 7.1), é possível calcular a quantidade de resíduos (biomassa) gerada. A quantidade

de biomassa consumida na caldeira de biomassa é calculada multiplicando-se o consumo de biomassa na caldeira de biomassa (Kg.Biom.Seca/t.vapor) pela geração de vapor na caldeira.

Conhecendo-se a quantidade de biomassa gerada (resíduo) e a quantidade de biomassa consumida, é possível calcular a taxa de variação de estoque de biomassa (Est.Biom).

## 7.5 – Predição da geração e compra de energia elétrica

O diagrama de caminhos, ilustrado na Figura 6.10, mostra a interdependência das variáveis utilizadas na predição da energia elétrica gerada.

O modelo proposto para predição da energia elétrica gerada (GEE) (ver item 3.3, Turboogeradores do Capítulo 3) utiliza-se de duas variáveis dependentes – vapor de admissão à alta pressão (VAP-ADM) e vapor de extração à média pressão (VMP-EXT) –, mensuráveis no estudo de caso em questão, mostrando que além do fluxo de vapor de admissão, o fluxo de extração de vapor de média pressão influencia na geração de energia elétrica devendo, se possível, ser substituído por vapor de contrapressão (VBP-CPR), permitindo maior geração de energia elétrica. A estimativa da compra de energia elétrica (CEE) se dá pela diferença do consumo de energia elétrica total (TEE) na fábrica, variável conhecida, menos a energia elétrica gerada. Devem ser descontadas do vapor de admissão de alta pressão as correntes utilizadas em válvulas redutoras de pressão, equipamentos acionados por turbinas e para o tanque acumulador, tendo-se que o modelo construído permitirá estimar a perda de geração de energia elétrica caso essas correntes sejam utilizadas.

A Figura 7.23 ilustra a regressão linear múltipla, cujos valores de valor-p da regressão e dos coeficientes mostram que eles são significantes com valor-p < 0,05, confirmado pelos valores de R-Sq, R-Sq<sub>adj</sub> e R-Sq<sub>pred</sub> da ordem de 99,0%. Também os gráficos de probabilidade normal dos resíduos padronizados e seu histograma mostram um padrão dos resíduos padronizados com a curva normal, assim como variância homogênea dos resíduos padronizados em relação aos valores preditos, mostrando comportamento linear das variáveis. Em função dos valores de VIF=1,3 e DW > 1,32, não ocorre, no modelo, colinearidade entre o VAP-ADM e VMP-EXT.



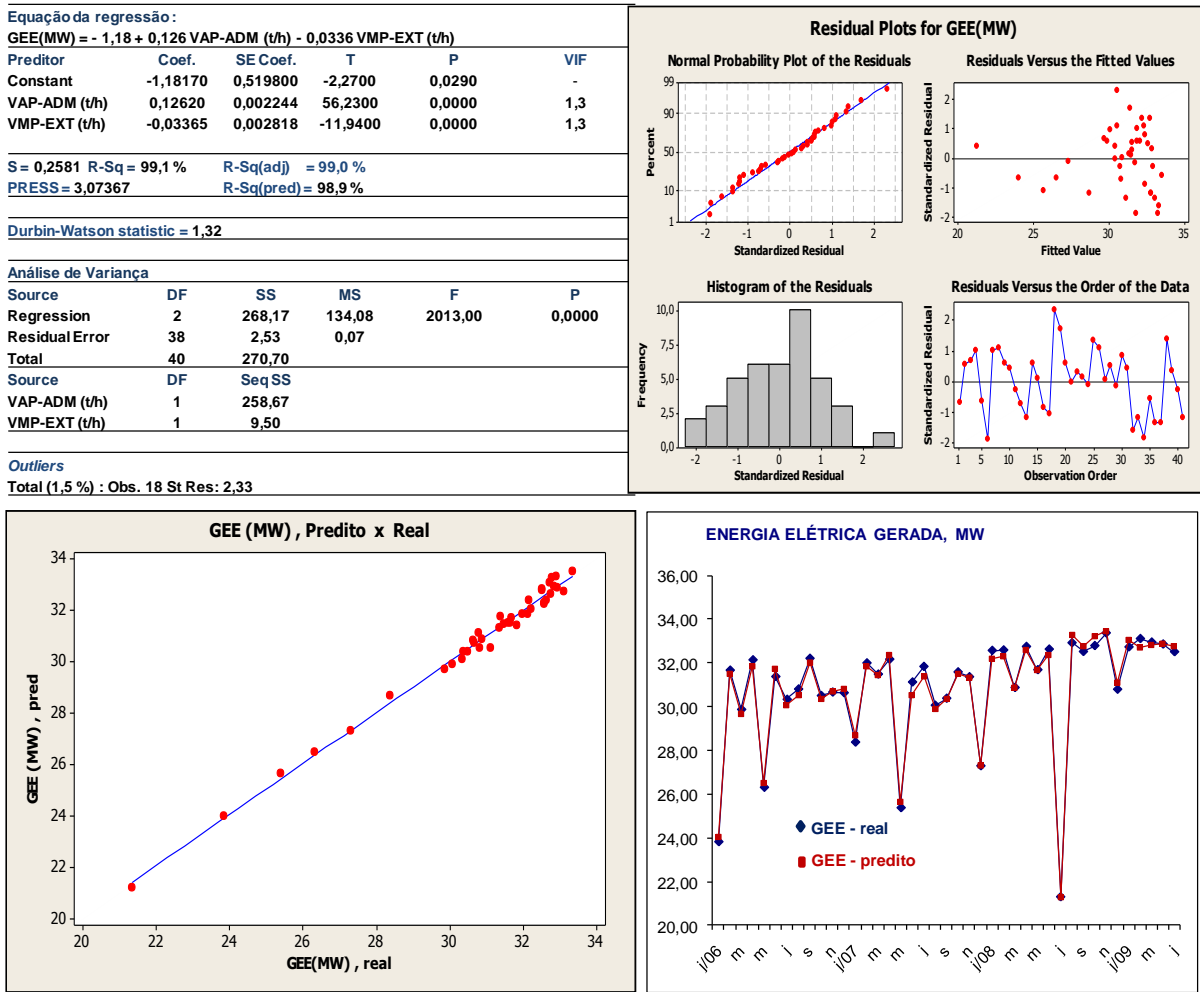


FIGURA 7.23 - Análise de regressão para a geração de energia elétrica

### 7.6 – Tradução do diagrama de caminhos geral em equações

A Tabela 7.1 ilustra a tradução do diagrama de caminhos para as equações do estudo de caso, obtidas por regressões lineares simples, regressões lineares múltiplas e por balanço de massa, formalizando funcionalmente o modelo estrutural.

Tabela 7.1 - Equações do estudo de caso para modelagem

Equações do Modelo	Variáveis		
	Constante	Exógenas	Endógenas
TS-Biom (%) = -56,694 + 1,9661 . (TS-Cav)	-56,694	1,9661 . (TS-Cav)	-
TR-Úmido = 37,0076 - 0,40844 TS-Biom	37,0076	-	0,40844 TS-Biom
TR-Seco = (TR-Úmido * TS-Biom)/TS-Mad		Cálculo de balanço de massa	
CEM = 12,32 - 0,01036385 DB + 0,036903 TR-Seco - 0,069508 REND	12,32	0,01036385 DB + 0,069508 REND	0,036903 TR-Seco
TS-Mad (%) = TS-Cav . (1 - TR/100) + TS-Biom . TR/100		Cálculo de balanço de massa	
DA = 1455,59 - 0,37897 DB - 12,8988 TS-Madeira	1455,59	- 0,37897 DB	- 12,8988 TS-Madeira
Res.Ger (kg.seco/Adt) = DA . CEM . TS-Mad . TR-seco		Cálculo de balanço de massa	
RSP = 0,2821 + 0,62895 (100-REND)/REND + 0,0015977 kg.Na2CO3/AD + 0,0013791 kg.AA-NaOH/Adt	0,2821	+ 0,62895 (100-REND)/REND + 0,0015977 kg.Na2CO3/AD + 0,0013791 kg.AA-NaOH/Adt	-
Produção.Cel (ADt/d) = TSS / RSP		Cálculo de balanço de massa	
Ger.Vapor.Rec(t/ss) = 4,64117 + 1,10047 . RSP	4,64117	-	+ 1,10047 . RSP
Vapor.Rec (t/h) = Ger.Vapor . TSS/24		Cálculo de balanço de massa	
AAC (kg.NaOH/ADt) = CAA - (CAA . SULF/100)		Cálculo de balanço de massa	
Kg.CaO/Adt = - 56,694 + 0,8558 Kg.AAC/Adt	-56,694	+ 0,8558 Kg.AAC/Adt	-
Kg.Óleo-7At.CaO = 102,474 + 0,128959 Kg.CaO/Adt	102,474	-	+ 0,128959 Kg.CaO/Adt
Prod.Bruta-2 (t/d) = (Veloc-2*4,45*g/m <sup>2</sup> -2*1440)*0,965/(1000000)		Cálculo de balanço de massa	
Prod.Acab (t/d) = 0,946 . (Prod.Bruta-1 + Prod.Bruta-2)		Cálculo de balanço de massa	
%Cel-1 = 303,0 - 7,539 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,08481 g/m <sup>2</sup> -1*2 - 0,000319 g/m <sup>2</sup> -1*3	303	7,539 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,08481 g/m <sup>2</sup> -1*2 -	-
%Cel-2 = 84,87 + 0,3927 g/m <sup>2</sup> -2 - 0,008117 g/m <sup>2</sup> -2*2 + 0,000029 g/m <sup>2</sup> -2*3	84,87	+ 0,3927 g/m <sup>2</sup> -2 - 0,008117 g/m <sup>2</sup> -2*2 +	-
Cons.Cel-1 (ADt/d) = %Cel-1 . Prod.Bruta-1 / 100		Cálculo de balanço de massa	
Cons.Cel-2 (ADt/d) = %Cel-2 . Prod.Bruta-2 / 100		Cálculo de balanço de massa	
Prod.Acab.Cel (ADt/d) = Prod.Cel - (Cons.Cel-1 + Cons.Cel-2)		Cálculo de balanço de massa	
VBP-Cel = 13,30 + 0,0258 Prod.Cel	13,30	-	+ 0,0258 Prod.Cel
VMP-Cel = 13,80 + 0,02881 Prod.Cel	13,80	-	+ 0,02881 Prod.Cel
VBP-Rec = 0,9977 + 0,006793 Prod.Cel	0,9977	-	+ 0,006793 Prod.Cel
VBP-Strip = 0,3401 + 0,002789 Prod.Cel	0,3401	-	+ 0,002789 Prod.Cel
VBP-Evap = 11,26 + 0,04094 Prod.Cel	11,26	-	+ 0,04094 Prod.Cel
VMP-Rec (t/h) = 1,0	1,0000	-	-
VBP-UTI = - 0,481 + 0,00408 Prod.Cel + 0,0237 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0278 g/m <sup>2</sup> -2	-0,481	+ 0,0237 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0278 g/m <sup>2</sup> -2	+ 0,00408 Prod.Cel
VBP-Des = - 0,711 + 0,00597 Prod.Cel + 0,0362 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0404 g/m <sup>2</sup> -2	-0,7110	+ 0,0362 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0404 g/m <sup>2</sup> -2	+ 0,00597 Prod.Cel
VMP-UTI = - 0,596 + 0,00514 Prod.Cel + 0,0302 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0353 g/m <sup>2</sup> -2	-0,5960	+ 0,0302 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0353 g/m <sup>2</sup> -2	+ 0,00514 Prod.Cel
VBP-Maq1 = 27,71 + 0,2971 g/m <sup>2</sup> -1	27,71	+ 0,2971 g/m <sup>2</sup> -1	-
VBP-Maq2 = 22,18 + 0,3365 g/m <sup>2</sup> -2	22,18	+ 0,3365 g/m <sup>2</sup> -2	-
VMP-Maq1 = 3,041 + 0,01092 g/m <sup>2</sup> -1	3,04	+ 0,01092 g/m <sup>2</sup> -1	-
VMP-Maq2 = 3,212 + 0,006429 g/m <sup>2</sup> -2	3,212	+ 0,006429 g/m <sup>2</sup> -2	-
VBP-Outr = - 0,264 + 0,00222 Prod.Cel + 0,0135 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0150 g/m <sup>2</sup> -2	-0,2640	+ 0,0135 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,0150 g/m <sup>2</sup> -2	+ 0,00222 Prod.Cel
VMP-Outr = - 0,0746 + 0,000628 Prod.Cel + 0,00373 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,00429 g/m <sup>2</sup> -2	-0,0746	+ 0,00373 g/m <sup>2</sup> -1 + 0,00429 g/m <sup>2</sup> -2	0,000628 Prod.Cel
VBP-Tot (t/h) = VBP-Cel + VBP-Rec + VBP-Strip + VBP-Evp + VBP-Util + VBP-Des + VBP-Maq1 + VBP-Maq2 + VBP-Outr + V atm		Cálculo de balanço de massa	
VMP-Tot (t/h) = VMP-Cel + VMP-Rec + VMP-Util + VMP-Maq1 + VMP-Maq2 + VMP-Outr		Cálculo de balanço de massa	
V.Cons (t/h) = VBP-Tot + VMP-Tot		Cálculo de balanço de massa	
V.Cons.Cel (t/h) = VBP-Cel + VMP-Cel		Cálculo de balanço de massa	
V.Cons.Rec (t/h) = VBP-Rec + VBP-Strip + VBP-Evp + VMP-Rec		Cálculo de balanço de massa	
V.Cons.Util (t/h) = VBP-Util + VBP-Des + VMP-Util		Cálculo de balanço de massa	
V.Cons.Máqs (t/h) = VBP-Maq1 + VBP-Maq2 + VMP-Maq1 + VMP-Maq2		Cálculo de balanço de massa	
V.Cons.Indet (t/h) = VBP-Outr + VMP-Outr		Cálculo de balanço de massa	
VAP (t/h) = V.Cons - DES.VBP - DES.VMP		Cálculo de balanço de massa	
V.Cald.Biom (t/h) = VAP - V.Cal.Rec		Cálculo de balanço de massa	
Cons.Mad.Ene (kg/t.vapor) = Cons.Mad.Ene(m <sup>3</sup> /dia) . 24 . 0,8 . 0,7 / (100 . 24 . V.Cald.Biom)		Cálculo de balanço de massa	
Óleo-3A = 84,0 + 0,427 V.Cald.Biom - 1,85 TS-Biom - 0,224 Cons.Mad.Ene + 0,638 No.Enr	84,00	- 0,224 Cons.Mad.Ene + 0,638 No.Enr	- 1,85 TS-Biom + 0,427 V.Cald.Biom
Xg.Biom.Seca/t.vapor = 395 - 2,61 Óleo-3A - 1,54 Cons.Mad.Ene	395,00	- 1,54 Cons.Mad.Ene	- 2,61 Óleo-3A
VBP-CPR (t/h) = VBP-Tot - DES.VBP - RED.VBP - VCE.VBP - TB.VBP - TAC.VBP - CALD3.VBP		Cálculo de balanço de massa	
VMP-EXTR = VMP-Tot - DES.VMP - RED.VMP		Cálculo de balanço de massa	
VAP-ADM (t/h) = VMP-EXTR + VBP-CPR		Cálculo de balanço de massa	
ΣEE(MW) = - 1,18 + 0,126 VAP-ADM (t/h) - 0,0336 VMP-EXT (t/h)	-1,1800	-	+ 0,126 VAP-ADM - 0,0336 VMP-EXT
ΣEE (MW) = TEE - GEE		Cálculo de balanço de massa	

(Vermelho : Equação ajustada por regressão linear, Azul : Equação ajustada por balanço de massa)

## 7.7 – Exemplo de utilização da modelagem

Para efeito de ilustração de utilização do modelo elaborado, exemplificaremos com duas situações para comparação :

Situação-1 (Valores-1) : TS-Cav = 58% e Cons.Mad.Ene = 268,55 m<sup>3</sup>/d

Situação-2 (Valores-2) : TS-Cav = 50% e Cons.Mad.Ene = 300,00 m<sup>3</sup>/d

O restante dos dados de entrada são dados comuns do dia a dia da empresa e são os mesmos para ambas as situações :

Tabela –7.2 – Exemplo de utilização do modelo elaborado

Dados de Entrada	Unidades	Valores-1	Valores-2	Dados de Saída	Unidades	Valores-1	Valores-2
Queima de sólidos na Caldeira de Recuperação	TSS/dia	1700,00	1700,00	Produção de Celulose	Adt/dia	1235,10	1235,10
Rendimento da madeira (50 a 58%)	%	55,00	55,00	Produção de Celulose Acabada	Adt/dia	398,53	398,53
Densidade básica da madeira (460 a 530 kg/m3)	kg/m3	500,00	500,00	Produção de Papel Acabado	t/dia	972,82	972,82
% Seco da madeira picada (50 a 64%)	%	58,00	50,00	Produção de Produto Vendável (Papel+Celulose)	t/dia	1371,35	1371,35
Carga de álcali efetivo sobre madeira,16,5-18,5%	%	17,50	17,50				
Atividade do licor branco (81 a 87%)	%	85,00	85,00	Consumo de madeira para celulose	m3/dia	4735,94	4897,59
Sulfidez do licor branco (29 a 32%)	%	30,00	30,00	Consumo de óleo combustível 7A, fornos-cal	t/dia	34,58	34,58
				Consumo de óleo combustível 3A, caldeiras 1/2	t/dia	0,00	55,37
Gramatura do papel - Máquina 1 (60 a 100 g/m2)	g/m2	75,00	75,00	Consumo de óleo combustível 3A,caldeira 3	t/dia	0,00	0,00
Gramatura do papel - Máquina 2 (45 a 75 g/m2)	g/m2	68,00	68,00	Energia elétrica comprada	MWh/dia	667,68	667,68
				Consumo total de energia comprada	MMBTU/dia	6.308,33	8.826,48
Vapor para redutora de 65 p/ 12 bar	t/h	0,00	0,00				
Vapor para redutora de 65 p/ 4,5 bar	t/h	0,00	0,00	Custo de madeira para celulose	R\$/dia	355.195,74	367.319,08
Vapor para tanque acumulador de vapor	t/h	0,00	0,00	Custo de madeira para celulose - específico	R\$/Adt	287,58	297,40
Vapor para turbina da bomba de água	t/h	0,00	0,00	Custo de madeira para celulose - específico	R\$/t.vend	259,01	267,85
Vapor de 4,5 bar para atmosfera	t/h	0,00	0,00				
Produção de vapor da caldeira-3	t/h	0,00	0,00	Custo de madeira para energia	R\$/dia	20.141,25	22.500,00
				Custo de cavacos para energia	R\$/dia	0,00	0,00
Consumo madeira para energia-máx. 350 m3/d	m3/dia	268,55	300,00	Custo de óleo combustível 7A, fornos-cal	R\$/dia	27.662,43	27.662,43
Consumo cavacos para energia-máx. 200 ton/d	t/dia	0,00	0,00	Custo de óleo combustível 3A, caldeiras 1/2	R\$/dia	0,00	47063,05
Consumo total de energia elétrica (45 a 65 MW)	MW	61,01	61,01	Custo de óleo combustível 3A, caldeira 3	R\$/dia	0,00	0,00
				Custo da energia elétrica comprada	R\$/dia	150.228,68	150.228,44
Preço da madeira para celulose	R\$/m3	75,00	75,00	Custo total da energia comprada	R\$/dia	198.032,36	247.453,92
Preço da madeira para energia	R\$/m3	75,00	75,00	Custo total da energia comprada - específico	R\$/MMBTU	31,39	28,04
Preço dos cavacos para energia	R\$/t	145,00	145,00	Custo total da energia comprada - específico	R\$/t.vend	144,41	180,45
Preço da energia elétrica	R\$/Mw h	225,00	225,00				
Preço do óleo combustível 3A	R\$/t	850,00	850,00	Custo total: madeira-celulose e energia comprada	R\$/dia	553.228,10	614.773,00
Preço do óleo combustível 7A	R\$/t	800,00	800,00	Custo total: madeira-celulose e energia comprada	R\$/t.vend	403,42	448,30

Como se pode observar, a queda no teor seco da madeira aumentou a perda de madeira (teor de resíduos) de celulose, provocando um aumento no consumo e no custo específico de madeira para celulose. Mesmo aumentando o consumo de madeira de energia, devido o menor teor seco da biomassa (cascas), foi necessário aumentar o consumo de óleo na caldeira de biomassa, aumentando o custo dos insumos energéticos. Portanto, a queda do teor seco da madeira de 58% para 50% provocou um aumento do custo de madeira de celulose e insumos energéticos de 11,2% (403,42 para 448,30 R\$/t.vendável), ou um acréscimo de dispêndio de 61.545 R\$/dia.

As Figuras 7.24 e 7.25 mostram o modelo obtido com as equações ajustadas por MLR, além dos cálculos de balanço de massa.

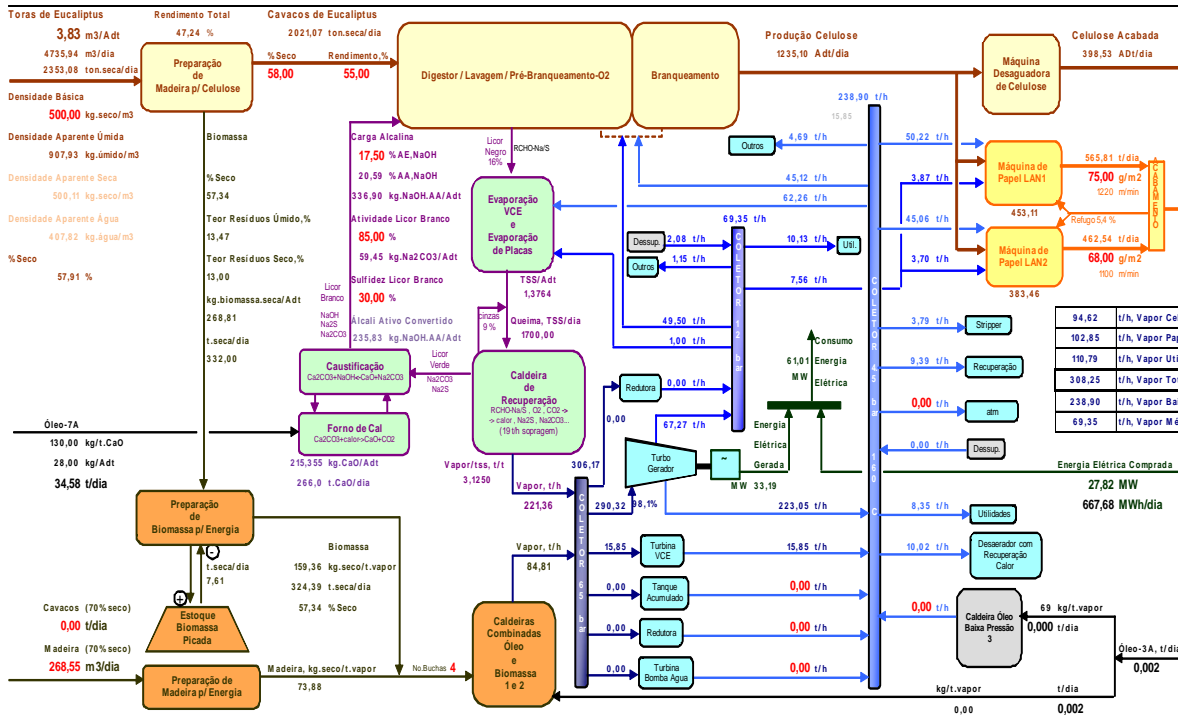


FIGURA 7.24 – Modelo estrutural para a Situação-1

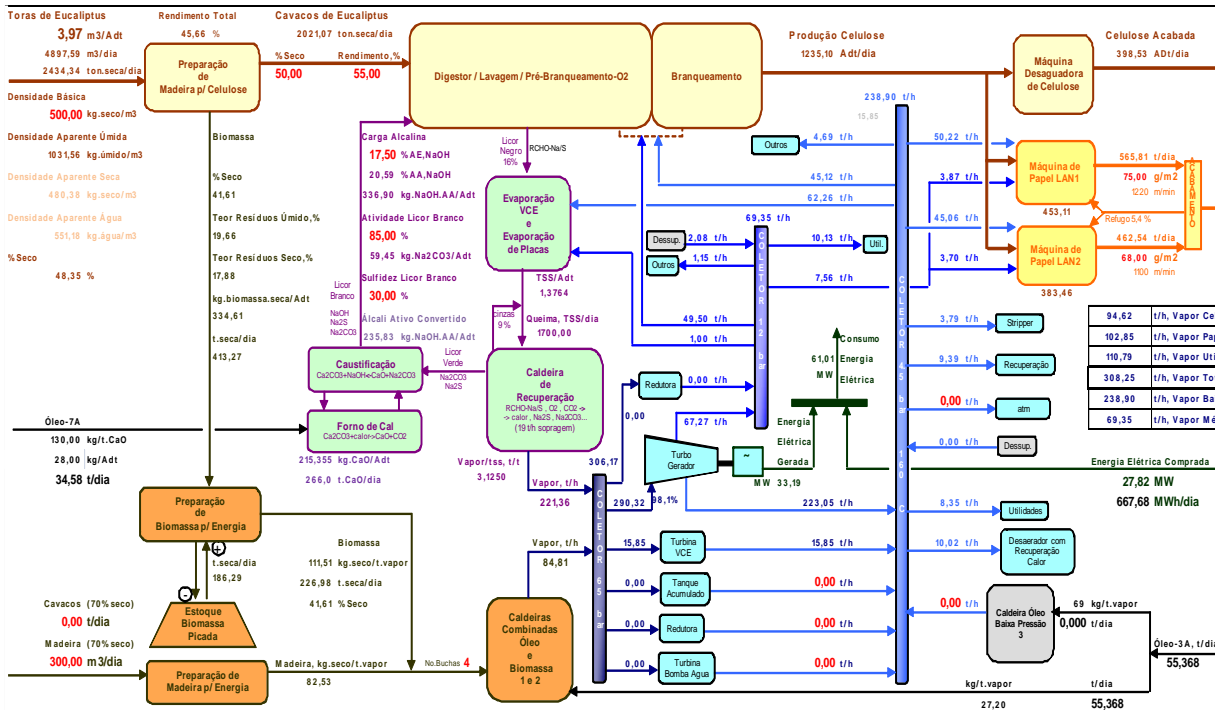


FIGURA 7.25 – Modelo estrutural para a Situação-2

## 8. SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM O MODELO

O objetivo deste capítulo é exemplificar a utilidade do modelo e, para isso, foram selecionados seis cenários para estudo, avaliando os custos resultantes:

- Influência da densidade básica e rendimento sem aumento de produção de celulose
- Influência da densidade básica e rendimento com aumento de produção de celulose
- Influência do teor seco da madeira de celulose
- Influência do preço de energia elétrica e consumo de vapor
- Influência da redução do consumo de vapor, teor seco da madeira e preço de energia elétrica
- Influência de válvulas redutoras de vapor, turbinas de acionamento e tanque acumulador

Os preços utilizados foram 75 R\$/m<sup>3</sup>.mad.Cel , 75 R\$/m<sup>3</sup>/mad.Ene , 800 R\$/t.Óleo7A , 850 R\$/t.Óleo3A e 225 R\$/MWh.EE .

### 8.1 - Influência da densidade básica e rendimento com produção constante

Tabela-8.1 - Influência da densidade básica e rendimento com produção de celulose e papel constante										
DB	kg.seco/m3	480	500	520	480	500	520	480	500	520
REND	%	50	50	50	53	53	53	56	56	56
Produção.Cel	Adt/d	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099	1099
Prod.Cel.Acab	Adt/d	262	262	262	262	262	262	262	262	262
Prod.Pap.Acab	t/d	973	973	973	973	973	973	973	973	973
Prod.Vendável	t/d	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235
TR-Seco	%	13	13	13	13	13	13	13	13	13
CEM	m3/Adt	4,40	4,16	3,91	4,21	3,96	3,72	4,01	3,77	3,52
DA	kg-úmido/m3	901	907,93	915,08	900,78	907,93	915,08	900,78	907,93	915,08
TS-Mad	%	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91
TS-BIOM	%	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34
Ger.Biom	t.seca/d	337	320	303,87	322	306	289	307	290	274
Cons.Biom	t.seca/d	322	322	322	327	327	327	327	327	327
Taxa Estoque Biom	t.seca/d	14	-2	-18	-5	-21	-38	-21	-37	-54
CAA	Kg-NaOH.AA/Adt	371	371	371	350	350	350	331	331	331
ATIV	%	85	85	85	85	85	85	85	85	85
SULF	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30
TSS	tss/d	1700	1700	1700	1583	1583	1583	1479	1479	1479
RSP	Adt/tss	1,5470	1,5470	1,5470	1,4408	1,4408	1,4408	1,3460	1,3460	1,3460
CaO	t.CaO/d	261	261	261	246	246	246	232	232	232
Óleo7A-Forno	t.Óleo7A/d	33,87	33,87	33,87	31,94	31,94	31,94	30,21	30,21	30,21
Cons.Vap.Cel	t/h	87	87	87	87	87	87	87	87	87
Cons.Vap.Rec/Ut	t/h	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Cons.Vap.Pap	t/h	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Cons.Vap.Tot	t/h	288	288	288	288	288	288	288	288	288
Cons.VBP	t/h	225	225	225	225	225	225	225	225	225
Cons.VMP	t/h	64	64	64	64	64	64	64	64	64
Ger.Vap.CR	t/h	208	208	208	202	202	202	195	195	195
Ger.Vap.CB	t/h	78	78	78	85	85	85	92	92	92
TEE	MW	60	60	60	60	60	60	60	60	60
GEE	MW	31,06	31,06	31,06	31,06	31,06	31,06	31,06	31,06	31,06
CEE	MW	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94	28,94
Mad.Ene	m3/d	200	200	200	264	264	264	337	337	337
Óleo3A-CB	t.Óleo3A/d	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Custo.Mad.Cel	R\$/d	362.923	342.740	322.557	346.900	326.717	306.534	330.879	310.695	290.512
Custo.ENE	R\$/d	199.048	199.048	199.048	202.279	202.279	202.279	206.419	206.419	206.419
Custo.Total	R\$/d	561.971	541.788	521.605	549.179	528.996	508.813	537.298	517.114	496.931
Custo.Esp.Mad.Cel	R\$/t.vendável	293,82	277,48	261,14	280,85	264,51	248,17	267,88	251,54	235,20
Custo.Esp.ENE	R\$/t.vendável	161,15	161,15	161,15	163,76	163,76	163,76	167,12	167,12	167,12
Custo.Esp.Total	R\$/t.vendável	454,97	438,63	422,29	444,61	428,27	411,93	434,99	418,65	402,31

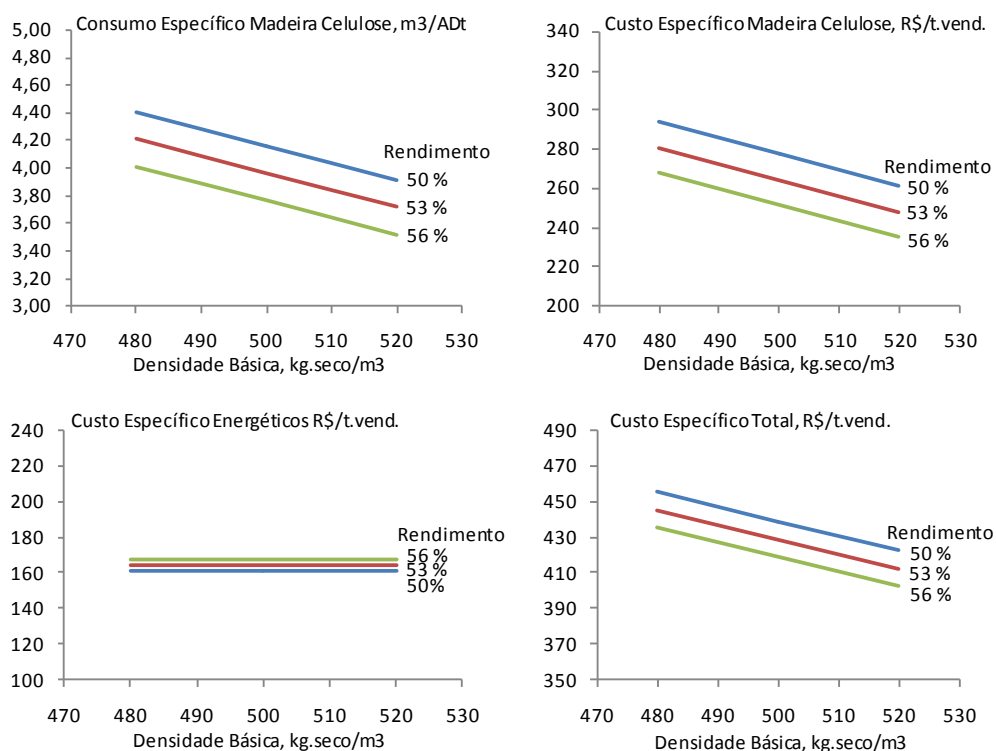


FIGURA 8.1 – Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Densidade Básica e Rendimento

O modelo, conforme Tabela 8.1 e Figura 8.1, comprova a tendência mais vantajosa de consumo de madeira com maior densidade básica mesmo que se tenha alguma perda de rendimento. Para DB=480 e REND=56, o custo é de 267,88 R\$/t.vend., ao passo que para DB=520 e REND=50% o custo é de 261,14 R\$/t.vend.

A densidade básica não altera o custo de insumos energéticos, no entanto, quanto maior o rendimento, menor a geração de sólidos para a caldeira de recuperação e menor sua produção de vapor, o que implica em maior produção de vapor pela caldeira de biomassa e menor produção da caustificação e forno de cal. Dessa forma, maior o consumo de madeira de energia para a caldeira de biomassa e menor o consumo de óleo no forno de cal, resultando em um pequeno acréscimo no custo de energéticos, em face da maior proporção do aumento de madeira. Para REND=50% , Custo.Mad.Ene=12,1 R\$/t.vend., Custo.Óleo7A=23,3 R\$/t.vend e para REND=56% , Custo.Mad.Ene=20,5 R\$/t.vend. , Custo.Óleo7A=20,8 R\$/t.vend .

Portanto, recomenda-se o desenvolvimento de florestas com clones de maior densidade básica e com o máximo de rendimento, o que, além de propiciar menor custo operacional, proporciona maior quantidade de madeira em peso por hectare, minimizando os custos de toda a cadeia de produção de celulose.

## 8.2 - Influência da densidade básica e rendimento com aumento de produção

Neste ítem, será avaliada a influência da densidade básica e do rendimento, considerando o aumento de produção de celulose em função da menor geração de sólidos (menor RSP, devido maior rendimento) para queima na caldeira de recuperação que mantém a queima em 1.700 tss/d. Isso permite aumentar a geração de vapor na caldeira de recuperação proporcionalmente ao aumento de produção de celulose, sem aumento considerável na geração de vapor da caldeira de biomassa, apesar do aumento de consumo de vapor das áreas de celulose, utilidades e recuperação. O aumento no consumo de vapor permitirá maior geração de energia elétrica no turbogerador e conseqüentemente menor compra, pois o aumento no consumo total de energia elétrica é proporcionalmente menor em função do aumento de produção de celulose. O pequeno aumento de geração de vapor na caldeira de biomassa será suprido com madeira de energia, sem necessidade de utilização de óleo-3<sup>a</sup>. No entanto, a maior produção de celulose demandará maior produção na caustificação e forno de cal e, conseqüentemente, maior consumo de óleo-7A no forno de cal.

Tabela-8.2 - Influência da densidade básica e rendimento com aumento de produção de celulose										
DB	kg.seco/m³	480	500	520	480	500	520	480	500	520
REND	%	50	50	50	53	53	53	56	56	56
Produção.Cel	Adt/d	1099	1099	1099	1180	1180	1180	1263	1263	1263
Prod.Cel.Acab	Adt/d	262	262	262	343	343	343	426	426	426
Prod.Pap.Acab	t/d	973	973	973	973	973	973	973	973	973
Prod.Vendável	t/d	1235	1235	1235	1316	1316	1316	1399	1399	1399
TR-Seco	%	13	13	13	13	13	13	13	13	13
CEM	m³/Adt	4,40	4,16	3,91	4,21	3,96	3,72	4,01	3,77	3,52
DA	kg-úmido/m³	901	907,93	915,08	900,78	907,93	915,08	900,78	907,93	915,08
TS-Mad	%	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91
TS-BIOM	%	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34
Ger.Biom	t.seca/d	337	320	303,87	345	328	310	353	334	315
Cons.Biom	t.seca/d	322	322	322	325	325	325	327	327	327
Taxa Estoque Biom	t.seca/d	14	-2	-18	21	3	-15	26	7	-13
CAA	Kg-NaOH,AA/Adt	371	371	371	350	350	350	331	331	331
ATIV	%	85	85	85	85	85	85	85	85	85
SULF	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30
TSS	tss/d	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1479	1479	1479
RSP	Adt/tss	1,5470	1,5470	1,5470	1,4408	1,4408	1,4408	1,3460	1,3460	1,3460
CaO	t,CaO/d	261	261	261	264	264	264	267	267	267
Óleo7A-Forno	t.Óleo7A/d	33,87	33,87	33,87	34,29	34,29	34,29	34,72	34,72	34,72
Cons.Vap.Cel	t/h	87	87	87	92	92	92	96	96	96
Cons.Vap.Rec/Util	t/h	98	98	98	106	106	106	113	113	113
Cons.Vap.Pap	t/h	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Cons.Vap.Tot	t/h	288	288	288	300	300	300	312	312	312
Cons.VBP	t/h	225	225	225	233	233	233	242	242	242
Cons.VMP	t/h	64	64	64	67	67	67	70	70	70
Ger.Vap.CR	t/h	208	208	208	216	216	216	224	224	224
Ger.Vap.CB	t/h	78	78	78	82	82	82	86	86	86
TEE	MW	60,00	60,00	60,00	60,60	60,60	60,60	61,22	61,22	61,22
GEE	MW	31,06	31,06	31,06	32,33	32,33	32,33	33,63	33,63	33,63
CEE	MW	28,94	28,94	28,94	28,27	28,27	28,27	27,59	27,59	27,59
Mad.Ene	m³/d	200	200	200	232	232	232	279	279	279
Óleo3A-CB	t.Óleo3A/d	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Custo.Mad.Cel	R\$/d	362.923	342.740	322.557	372.469	350.798	329.127	380.292	357.094	333.897
Custo.ENE	R\$/d	199.048	199.048	199.048	194.936	194.936	194.936	196.578	196.578	196.578
Custo.Total	R\$/d	561.971	541.788	521.605	567.405	545.735	524.064	576.870	553.673	530.475
Custo.Esp.Mad.Cel	R\$/t.vendável	293,82	277,48	261,14	282,99	266,53	250,06	271,77	255,20	238,62
Custo.Esp.ENE	R\$/t.vendável	161,15	161,15	161,15	148,11	148,11	148,11	140,48	140,48	140,48
Custo.Esp.Total	R\$/t.vendável	454,97	438,63	422,29	431,10	414,64	398,17	412,26	395,68	379,10

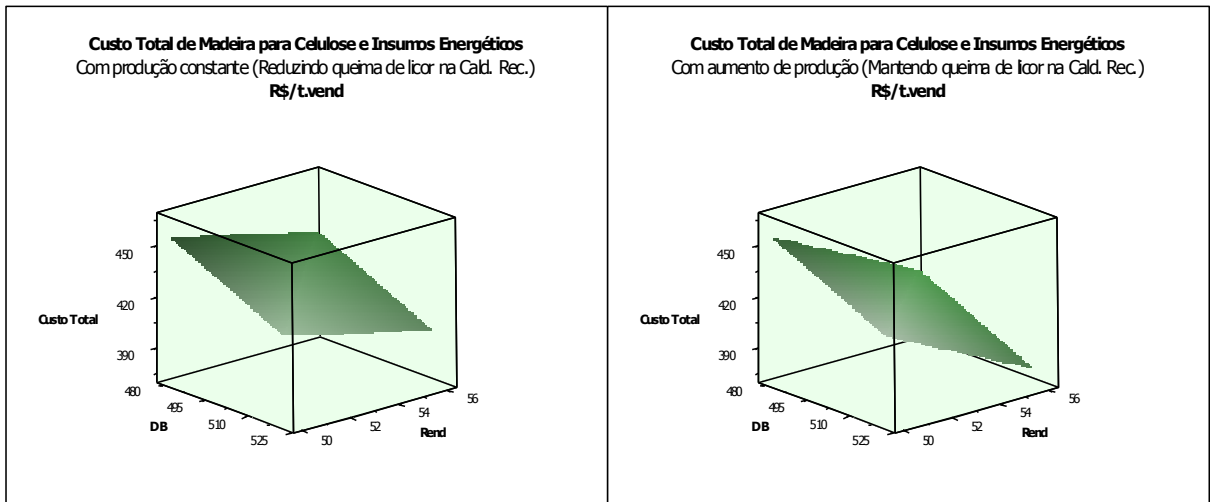
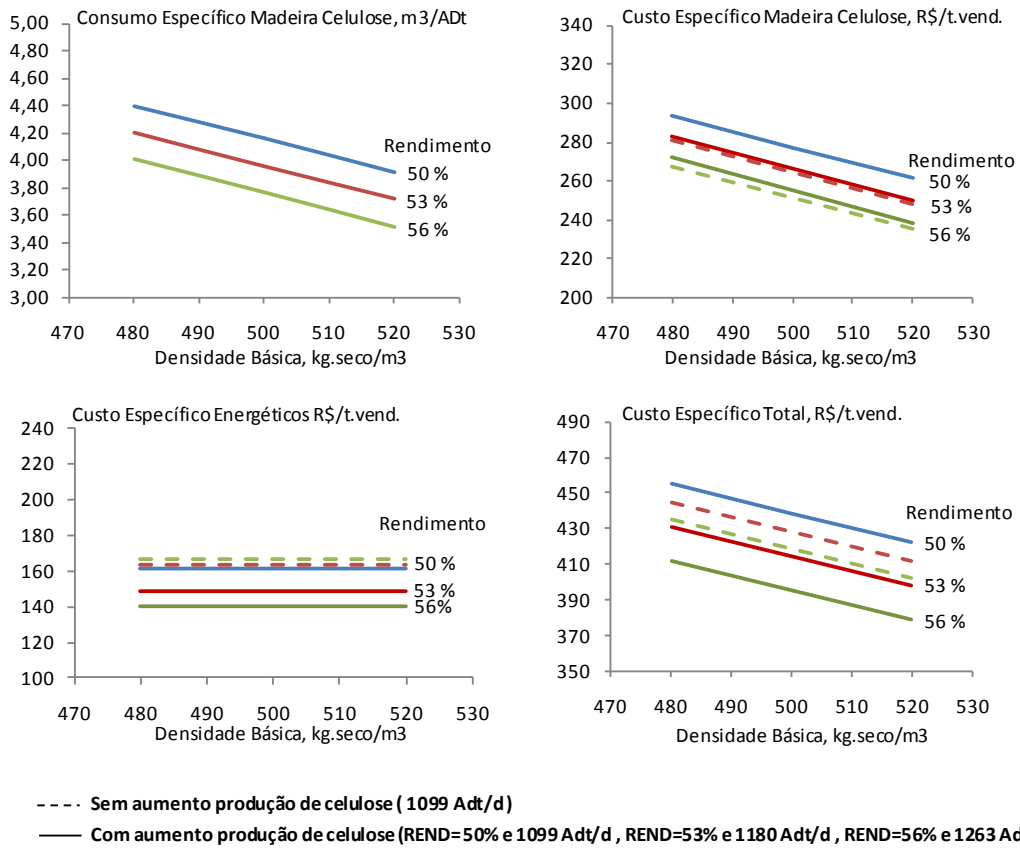


FIGURA 8.2 - Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Densidade Básica e Rendimento  
 (Com e sem aumento da produção de celulose, com produção de papel constante)



Conforme ilustrado na Figura 8.2, não ocorre diferença significativa no custo específico de madeira para celulose; no entanto, o custo específico de energéticos reduz-se significativamente com o aumento de produção proporcionado com o aumento de rendimento, pelos motivos já expostos.

Portanto, confirma-se a importância do aumento de escala de produção para redução de custos de insumos energéticos em fábricas de celulose com sistemas de cogeração com capacidade para processar o aumento de consumo de vapor, processando biomassa e madeira de energia na caldeira de biomassa, sem a utilização de combustíveis fósseis. Paralelo a esse fato, ressalta-se mais uma vez a importância de maximizar o rendimento, tanto no processo de polpação como no desenvolvimento de clones na gestão florestal.

Como comentário adicional, já discutido conceitualmente no item 2.5 e página 26 do Capítulo 2, a utilização de aditivos no cozimento, como antraquinona e surfactantes, pode ser uma boa opção para redução do consumo específico de madeira e aumento da produção de celulose proporcionado pelo efeito desses aditivos no aumento de rendimento. A vantagem, neste caso, é que o aumento de rendimento é proporcionado pela alteração na cinética química das reações de deslignificação, em que normalmente observa-se uma redução na carga de álcali e temperatura de cozimento, mantendo a mesma relação de orgânicos e inorgânicos no licor preto, ou seja, o mesmo poder calorífero sem afetar a taxa de geração de vapor por sólidos queimados na caldeira de recuperação. Portanto, neste caso, analisa-se o aumento de custo com a aplicação de antraquinona versus o incremento na produção de celulose, a redução no consumo específico de madeira, o acréscimo de madeira de energia na caldeira de biomassa para suprir o aumento de consumo de vapor atrelado à maior taxa de produção e a redução de consumo específico de óleo-7A no forno de cal em função da menor carga de álcali requerida.

### 8.3 - Influência do teor seco da madeira de celulose e da biomassa

O teor seco da madeira, e por consequência da biomassa, é uma variável de influência tanto no consumo específico de madeira para celulose, atuando no teor de resíduo, como no consumo de combustível na caldeira de biomassa, pois um excesso de água na biomassa pode exigir a necessidade de queima de óleo combustível na caldeira, em função de ocorrer a necessidade de energia complementar para evaporação do excesso de água contida na biomassa.

Na IP-Luiz Antonio, a madeira de celulose é armazenada de 25 a 35 dias no campo, com o intuito do teor seco aumentar, observando-se que um tempo menor provoca excesso de quebras de madeira no tambor descascador devido a madeira estar muito úmida (maior teor de resíduo) e um tempo maior provoca dificuldades de descascamento devido a maior aderência da casca na tora de madeira.

Tabela-8.3 - Influência do teor seco da madeira de celulose				
TS-Cav	%	50,00	55,00	60,00
TS-Mad	%	48,35	54,44	60,15
TS-Biom	%	41,61	51,44	61,27
Produção.Cel	Adt/d	1235	1235	1235
Prod.Cel.Acab	Adt/d	399	399	399
Prod.Pap.Acab	t/d	973	973	973
Prod.Vendável	t/d	1371	1371	1371
DB	kg.seco/m3	500	500	500
REND	%	55,0	55,0	55,0
TR-Seco	%	17,88	14,83	11,78
CEM	m3/Adt	3,97	3,88	3,80
DA	kg-úmido/m3	1032	952,84	878,96
Ger.Biom	t.seca/d	413	371	301,37
Cons.Biom	t.seca/d	212	267	382,41
Taxa Estoque Biom	t.seca/d	202	105	-81
CAA	Kg-NaOH.AA/Adt	337	337	337
ATIV	%	85	85	85
SULF	%	30	30	30
TSS	tss/d	1700	1700	1700
RSP	Adt/tss	1,3764	1,3764	1,3764
CaO	t.CaO/d	266	266	266
Óleo 7A-Forno	t.Óleo7A/d	34,58	34,58	34,58
Cons.Vap.Cel	t/h	95	95	95
Cons.Vap.Rec/Ut	t/h	111	111	111
Cons.Vap.Pap	t/h	103	103	103
Cons.Vap.Tot	t/h	308	308	308
Cons.VBP	t/h	239	239	239
Cons.VMP	t/h	69	69	69
Ger.Vap.CR	t/h	221	221	221
Ger.Vap.CB	t/h	85	85	85
TEE	MW	61,01	61,01	61,01
GEE	MW	33,19	33,19	33,19
CEE	MW	27,82	27,82	27,82
M ad.Ene	m3/d	350	350	150,3
Óleo 3A-CB	t.Óleo3A/d	49,1	12,03	0,00
Custo.Mad.Cel	R\$/d	367.319	359.742	352.165
Custo.ENE	R\$/d	245.876	220.667	189.160
Custo.Total	R\$/d	613.196	580.409	541.325
Custo.Esp.Mad.Cel	R\$/t.vendável	267,85	262,33	256,80
Custo.Esp.ENE	R\$/t.vendável	179,30	160,91	137,94
Custo.Esp.Total	R\$/t.vendável	447,15	423,24	394,74

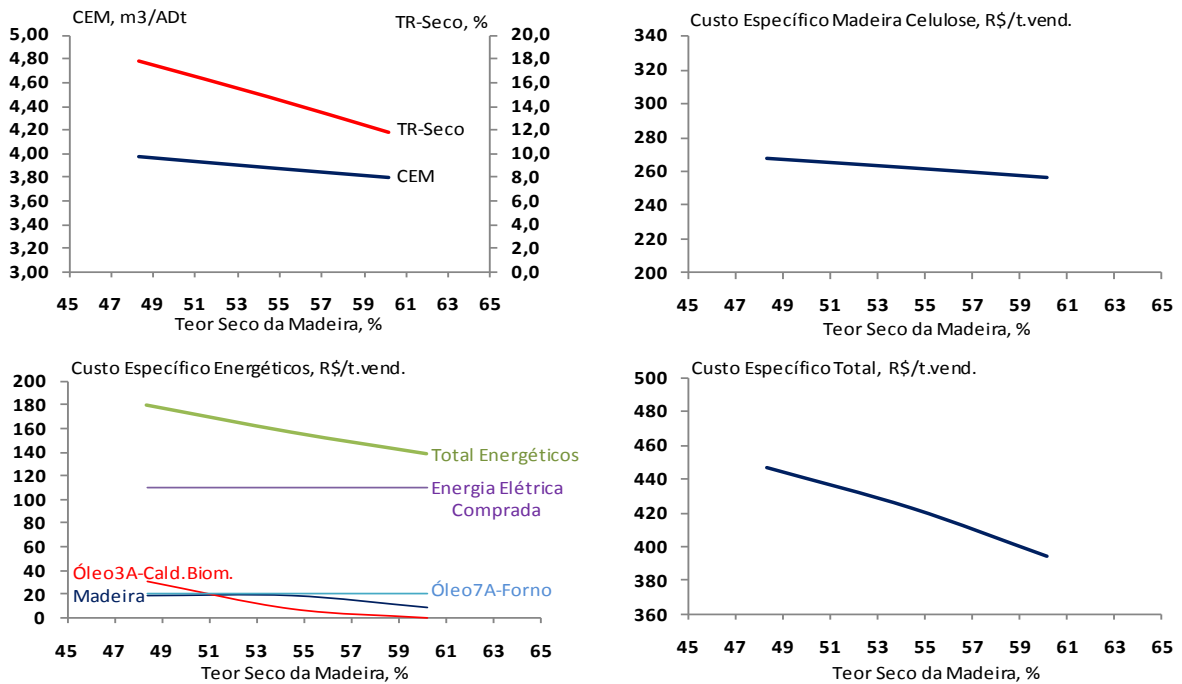


FIGURA 8.3 - Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Teor Seco da Madeira

Conforme Tabela 8.3 e Figura 8.3, considerando que a queima de madeira está limitada ao máximo de 350 m<sup>3</sup>/d; em teor seco abaixo de 55% ocorre a necessidade de queima de óleo-3A, sendo o acréscimo de custo em insumos energéticos para uma redução de ~ 5% no teor seco da ordem de 18 a 23 R\$/t.vendável, correspondendo a de R\$ 26.000,00 a R\$ 32.000,00 por dia em dispêndio. Assim, todos os esforços são necessários no sentido de processar a madeira de celulose com o maior teor seco possível e estudar formas de se evitar o uso de água sobre a madeira com casca durante sua passagem no processo de descascamento.

Portanto, ressalta-se aqui que o custo de processamento de madeira com baixo teor seco, atrelado ao seu uso com baixo tempo de corte na floresta, muitas vezes para facilitar o descascamento ou com a adição de água na madeira com casca durante o processamento na preparação de madeira, é significativamente alto no consumo de combustíveis adicionais para evaporação da água na casca. Deve-se ter habilidade técnica suficiente para demonstrar que o retorno financeiro de investimentos na preparação para processar madeira com maior tempo de corte ou em processo de secagem da casca com a utilização de calor dos gases da caldeira é perfeitamente viável, sem esquecer que madeira mais seca propicia menor custo de transporte dessa madeira das florestas à fábrica.

## 8.4 - Influência do preço de energia elétrica e do consumo de vapor

Uma preocupação atual na gestão de custos da fábrica refere-se ao preço da energia elétrica, o qual vem aumentando anualmente em face do aumento de demanda no mercado e a oferta estável por parte das concessionárias. Dessa forma, ficar descoberto de um contrato significa estar exposto ao nível dos reservatórios das hidrelétricas. Se este estiver baixo, a entrada de termoeletricas significa grandes aumentos de preços. Por outro lado, as renovações de contratos cada vez menos vem cobertas de subsídios, o que implica estar preparado para aumentos consideráveis no custo do produto, uma vez que os novos contratos não necessariamente cobrem toda a necessidade de consumo, ficando uma parcela a ser comprada no mercado livre.

Uma forma de estar preparado para conviver com grandes aumentos de preço é ter a opção de aumentar a geração própria de energia elétrica, que pode ser viabilizada pela instalação de uma turbina de condensação ou aumentar o consumo de vapor (desaerador, por ex.) utilizando-se da madeira de energia como combustível, menos custoso que os combustíveis fósseis.

Tabela-8.4 - Influência do preço de energia elétrica e consumo de vapor x Madeira de energia																
Cons.Vap.Tot		308	320	335	350	370	308	320	335	350	370	308	320	335	350	370
Preço CEE		225	225	225	225	225	350	350	350	350	350	500	500	500	500	500
Produção.Cel	Adt/d	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235
Prod.Cel.Acab	Adt/d	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
Prod.Pap.Acab	t/d	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973
Prod.Vendável	t/d	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371
DB	kg.seco/m3	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
REND	%	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
TR-Seco	%	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
CEM	m3/Adt	3,83	4,21	4,01	3,52	3,52	3,83	3,96	3,77	3,52	3,52	3,83	3,72	3,52	3,52	3,52
DA	kg-úmido/m3	908	900,78	900,78	915,08	915,08	908	907,93	907,93	915,08	915,08	908	915,08	915,08	915,08	915,08
TS-Mad	%	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91	57,91
TS-BIOM	%	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34	57,34
Ger.Biom	t.seca/d	332	332	353	315	315	332	332	334	315	315	332	332	315	315	315
Cons.Biom	t.seca/d	327	326	309	274	200	327	326	309	274	200	327	326	309	274	200
Taxa Estoque Biom	t.seca/d	5	6	23	58	132	5	6	23	58	132	5	6	23	58	132
CAA	Kg-NaOHA/Adt	337	350	331	331	331	337	350	331	331	331	337	350	331	331	331
ATIV	%	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
SULF	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
TSS	tss/d	1700	1700	1479	1479	1479	1700	1700	1479	1479	1479	1700	1700	1479	1479	1479
RSP	Adt/tss	13764	14408	13460	13460	13460	13764	14408	13460	13460	13460	13764	14408	13460	13460	13460
CaO	t.CaO/d	266	264	267	267	267	266	264	267	267	267	266	264	267	267	267
Óleo7A-Fomo	t.Óleo7A/d	34,58	34,29	34,72	34,72	34,72	34,58	34,29	34,72	34,72	34,72	34,58	34,29	34,72	34,72	34,72
Cons.Vap.Cel	t/h	95	92	96	96	96	95	92	96	96	96	95	92	96	96	96
Cons.Vap.Rec/Ut	t/h	111	123	138	153	173	111	123	138	153	173	111	123	138	153	173
Cons.Vap.Pap	t/h	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Cons.VBP	t/h	239	251	266	281	301	239	251	266	281	301	239	251	266	281	301
Cons.VMP	t/h	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69	69
Ger.Vap.CR	t/h	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221
Ger.Vap.CB	t/h	85	97	112	127	147	85	97	112	127	147	85	97	112	127	147
TEE	MW	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101
GEE	MW	33,19	34,68	36,57	38,46	40,99	33,19	34,68	36,57	38,46	40,99	33,19	34,68	36,57	38,46	40,99
CEE	MW	27,82	26,34	24,44	22,55	20,03	27,82	26,34	24,44	22,55	20,03	27,82	26,34	24,44	22,55	20,03
M ad.Ene	m3/d	261,59	391,6	590	826	1197,4	261,59	391,6	590	826	1197,4	261,59	391,6	590	826	1197,4
Óleo3A-CB	t.Óleo3A/d	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87
Custo.Mad.Cel	R\$/d	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196
Custo.ENE	R\$/d	198.253	199.997	204.684	212.132	226.356	281.714	279.009	278.017	286.438	381.866	373.823	366.016	360.970	358.536	358.536
Custo.Total	R\$/d	553.449	555.193	559.880	567.328	581.552	636.909	634.204	633.213	641.634	737.062	729.019	721.212	716.166	713.732	713.732
Custo.Esp.Mad.Cel	R\$/t.vendável	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01
Custo.Esp.ENE	R\$/t.vendável	144,57	145,84	149,26	154,69	165,06	205,43	203,46	202,73	204,02	208,87	278,46	272,59	266,90	263,22	261,45
Custo.Esp.Total	R\$/t.vendável	403,58	404,85	408,27	413,70	424,07	464,44	462,47	461,74	463,03	467,89	537,47	531,61	525,91	522,23	520,46
Tabela-8.3 - Influência do preço de energia elétrica e consumo de vapor x Madeira de energia (máx.350 m3/d) e Óleo-3A																
M ad.Ene	m3/d	261,59	350	350	350	350	261,59	350	350	350	350	261,59	350	350	350	350
Óleo3A-CB	t.Óleo3A/d	0,87	6,09	31,01	60,54	107,09	0,87	6,09	31,01	60,54	107,09	0,87	6,09	31,01	60,54	107,09
Custo.Mad.Cel	R\$/d	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196	355.196
Custo.ENE	R\$/d	198.253	201.309	212.266	227.144	256.506	281.714	280.321	285.599	294.798	313.198	381.866	375.135	373.598	375.983	385.221
Custo.Total	R\$/d	553.449	556.505	567.462	582.340	611.702	636.909	635.516	640.794	649.994	668.394	737.062	730.331	728.794	731.178	740.417
Custo.Esp.Mad.Cel	R\$/t.vendável	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01	259,01
Custo.Esp.ENE	R\$/t.vendável	144,57	146,80	154,79	165,64	187,05	205,43	204,41	208,26	214,97	228,39	278,46	273,55	272,43	274,17	280,91
Custo.Esp.Total	R\$/t.vendável	403,58	405,81	413,80	424,65	446,06	464,44	463,42	467,27	473,98	487,40	537,47	532,56	531,44	533,18	539,92

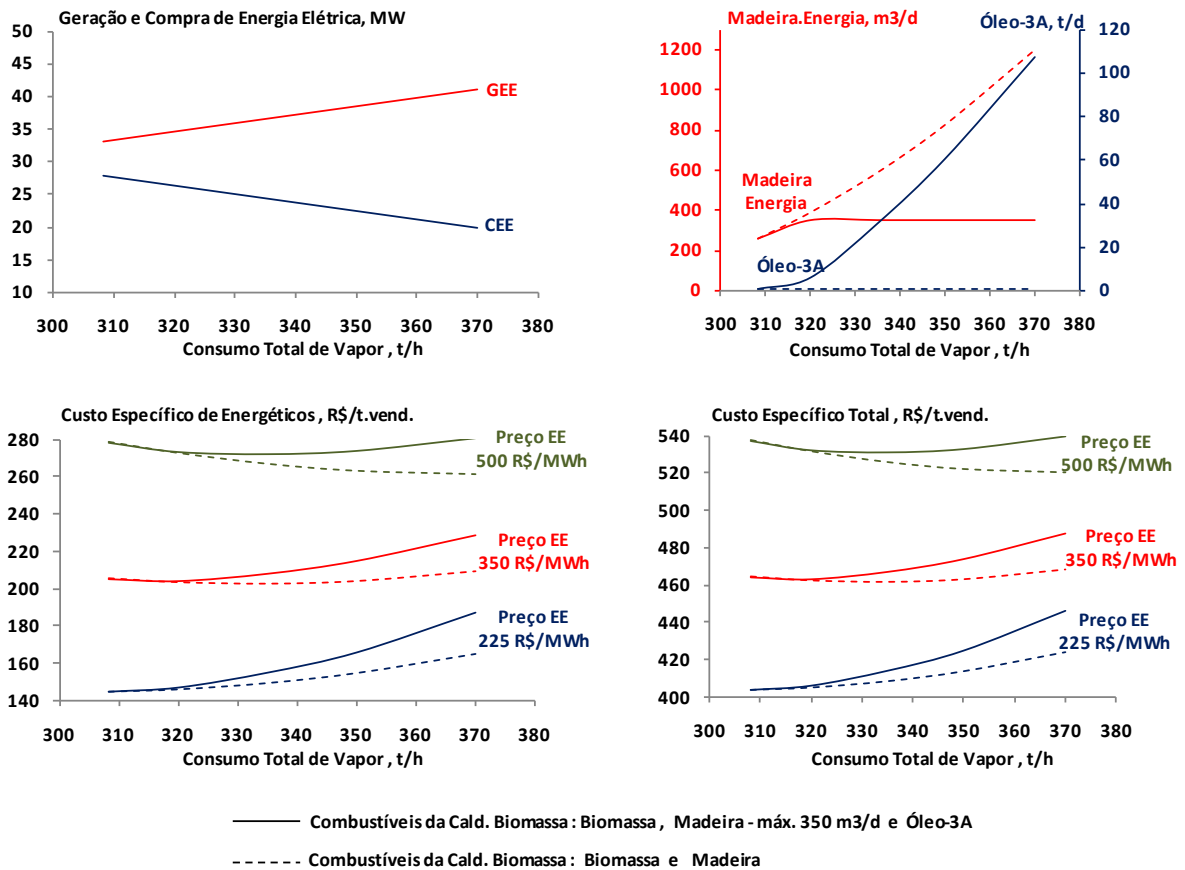


FIGURA 8.4 - Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Preço da EE e Consumo de Vapor

Conforme Tabela 8.4 e Figura-8.4, a madeira, como fonte de combustível adicional à maior produção de vapor, torna-se uma alternativa interessante para minimizar os efeitos do aumento de preço na energia elétrica adquirida da concessionária ou até mesmo a substituição dos combustíveis fósseis, no caso o óleo combustível ou gás natural.

Portanto, confirma-se a vantagem da instalação de sistemas de cogeração com turbinas de condensação, tendo o vapor de admissão oriundo de caldeiras de biomassa à alta pressão, consumindo madeira de energia, uma vez que os preços de energia elétrica e combustíveis fósseis devem continuamente aumentar, acompanhando a menor disponibilidade destes. Mais uma vez demonstra-se a vantagem competitiva obtida das florestas de eucalipto no setor de produção de celulose, que antes não eram exploradas devido aos baixos preços de energia elétrica disponível. As instalações recentes de fábricas de celulose (Cenibra, Veracel, Fibria e BahiaSul) utilizam esse conceito para autossuficiência em energia elétrica.

## 8.5 – Influência da redução no Consumo Total. Vapor, TS-Mad e Preço de CEE

Toda redução no consumo de vapor da fábrica, antes de ser efetivada, deve ter avaliado qual o impacto no sistema de cogeração, pois, apesar de reduzir combustível na caldeira de biomassa, em contrapartida provocará perda de geração de energia elétrica e consequentemente uma maior compra na concessionária.

Como visto no item 8.3, o teor seco da biomassa exerce considerável influência no consumo de combustíveis, principalmente abaixo de 55%, quando ocorre a necessidade de uso de óleo combustível e madeira de energia na caldeira para auxiliar na evaporação de água em excesso na biomassa. Neste caso, com o teor seco da biomassa abaixo de 55%, a redução no consumo de vapor e também na caldeira de biomassa representará redução de combustível comprado em proporção de custo maior que a perda de geração de energia, mesmo quando de maiores preços de energia elétrica adquirida, como ilustra a Tabela 8.5 e a Figura 8.5.

A biomassa composta de casca e resíduos de madeira, é um combustível de custo aproximadamente zero, pois este já está incluso e pago na madeira de celulose que será consumida independente da quantidade de biomassa gerada.

Tabela-8.5 – Influência da redução no Cons.Total.Vapor , TS-Mad e preço de CEE													
Cons.Vap.Tot	t/h	308	298	288	308	298	288	308	298	288	308	298	288
TS-Mad	%	48,35	48,35	48,35	60,15	60,15	60,15	50	50	50	60,15	60,15	60,15
Preço CEE	R\$/MWh	225	225	225	225	225	225	350	350	350	350	350	350
Produção.Cel	Adt/d	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235	1235
Prod.Cel.Acab	Adt/d	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399	399
Prod.Pap.Acab	t/d	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973	973
Prod.Vendável	t/d	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371	1371
DB	kg.seco/m3	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
REND	%	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
TR-Seco	%	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88	17,88
CEM	m3/Adt	3,97	3,97	3,97	3,80	3,80	3,80	3,97	3,97	3,97	3,80	3,80	3,80
DA	kg-úmido/m3	1032	1032	1032	878,96	878,96	878,96	1032	1032	1032	878,96	878,96	878,96
TS-BIOM	%	4161	4161	4161	6127	6127	6127	4161	4161	4161	6127	6127	6127
Ger.Biom	t.seca/d	413	413	413	301	301	301	413	413	413	301	301	301
Cons.Biom	t.seca/d	212	370	157	385	370	347	212	370	157	385	370	347
Taxa Estoque Biom	t.seca/d	202	227	256	-83	-69	-46	202	227	256	-83	-69	-46
CAA	Kg-NaOHAA/Adt	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337	337
ATIV	%	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85	85
SULF	%	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
TSS	tss/d	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700	1700
RSP	Adt/tss	13764	13764	13764	13764	13764	13764	13764	13764	13764	13764	13764	13764
CaO	t.CaO/d	266	266	266	266	266	266	266	266	266	266	266	266
Óleo7A-Forno	t.Óleo7A/d	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58	34,58
Cons.Vap.Cel	t/h	95	85	75	95	85	75	95	85	75	95	85	75
Cons.Vap.Rec/Utili	t/h	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111	111
Cons.Vap.Pap	t/h	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
Cons.VBP	t/h	239	234	229	239	234	229	239	234	229	239	234	229
Cons.VMP	t/h	69	64	59	69	64	59	69	64	59	69	64	59
Ger.Vap.CR	t/h	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221	221
Ger.Vap.CB	t/h	85	75	65	85	75	65	85	75	65	85	75	65
TEE	MW	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101	6101
GEE	MW	33,19	32,11	31,03	33,19	32,11	31,03	33,19	32,11	31,03	33,19	32,11	31,03
CEE	MW	27,82	28,9	29,98	27,82	28,9	29,98	27,82	28,9	29,98	27,82	28,9	29,98
Mad.Ene	m3/d	350	350	350,0	143,3	65,5	3,5	350	350	350	143,3	65,5	3,5
Óleo3A-CB	t.Óleo3A/d	49,10	30,73	14,36	0,87	0,87	0,87	49,1	30,7	14,4	0,87	0,87	0,87
Custo.Mad.Cel	R\$/d	367.319	367.319	367.319	352.165	352.165	352.165	367.319	367.319	367.319	352.165	352.165	352.165
Custo.ENE	R\$/d	245.876	236.096	228.006	189.381	189.372	190.556	329.337	322.796	317.945	272.841	276.072	280.495
Custo.Total	R\$/d	613.196	603.415	595.325	541.546	541.537	542.721	696.656	690.115	685.264	625.006	628.237	632.660
Custo.Esp.Mad.Cel	R\$/t.vendável	267,85	267,85	267,85	256,80	256,80	256,80	267,85	267,85	267,85	256,80	256,80	256,80
Custo.Esp.ENE	R\$/t.vendável	179,30	172,16	166,26	138,10	138,09	138,95	240,16	235,39	231,85	198,96	201,31	204,54
Custo.Esp.Total	R\$/t.vendável	447,15	440,02	434,12	394,90	394,89	395,76	508,01	503,24	499,70	455,76	458,12	461,34

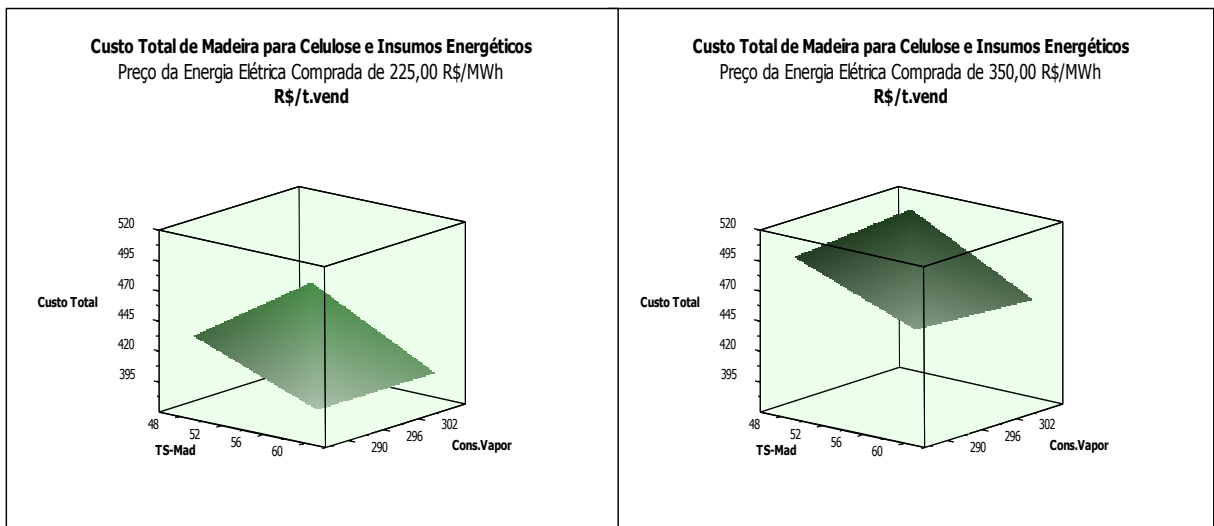
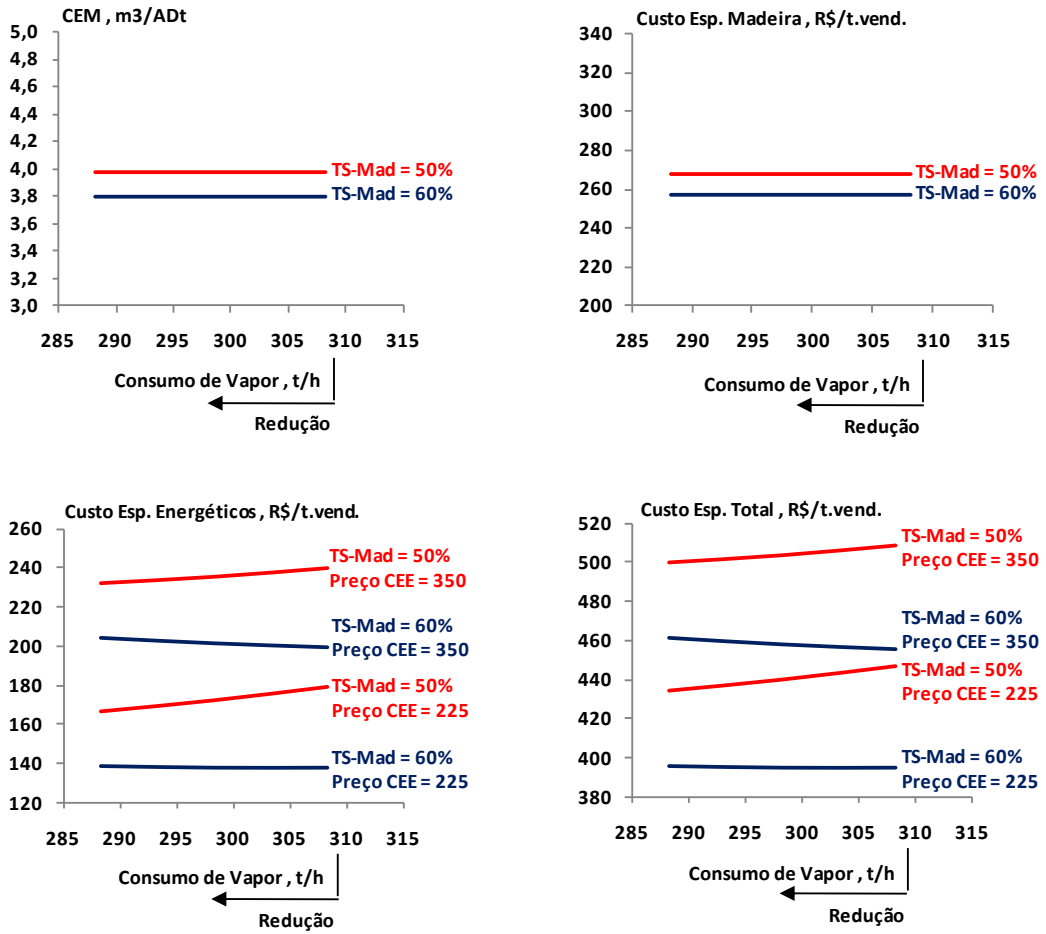


FIGURA 8.5 - Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Redução Consumo Vapor, TS-Mad e Preço CEE

Portanto, todo trabalho de redução de consumo de vapor na fábrica deve ser acompanhado de estudo de impacto no sistema de cogeração.

Ações de redução de custo em função de aumento no preço de energia elétrica devem ser direcionadas para redução no consumo de energia elétrica e não no consumo de vapor tentando compensá-la com a redução de combustíveis. Uma boa prática é priorizar essas reduções de consumo de vapor nos períodos do ano em que a madeira está mais úmida, ou seja, nas estações chuvosas e nas estações secas avaliar a prioridade na maior geração de energia elétrica, até porque nessas estações o preço da energia elétrica tende a aumentar.

De qualquer forma, novamente o maior teor seco da biomassa aparece como prioridade na redução de custos de insumos energéticos, dada a sua disponibilidade oriunda do processo de produção de celulose. Esforços devem ser conduzidos na área de produção de celulose para o processo estar adequado ao recebimento de madeira mais seca ou instalar equipamentos para secagem da casca com o aproveitamento térmico dos gases da caldeira. A Figura 8.6 ilustra os comentários dessas situações.

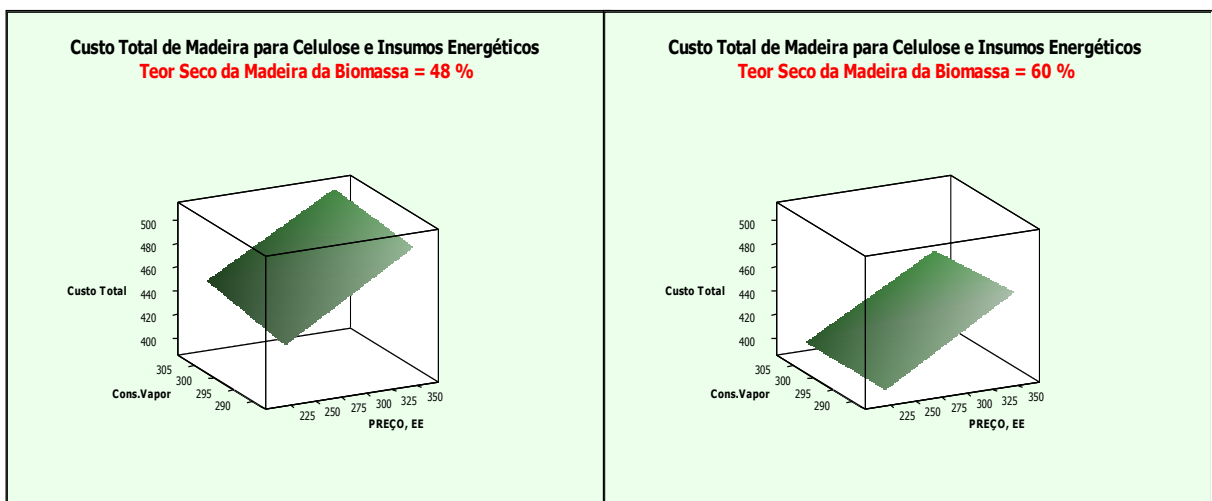


FIGURA 8.6 - Custo da Madeira e Insumos Energéticos x Redução Consumo Vapor, Preço CEE e TS-Biom



## 8.6- Influência de válvulas redutoras, turbo-equipamentos e tanque acumulador

As válvulas redutoras de pressão de vapor, o tanque acumulador de vapor e as turbinas de acionamento de equipamentos (bombas e ventiladores) são equipamentos necessários para propiciar maior segurança ao funcionamento do sistema de geração e distribuição de vapor. No entanto, dado a tendência de aumento no preço da energia elétrica comprada, garantir que esses equipamentos somente operem em situações emergenciais é muito importante para maximizar a geração de energia elétrica no turbogerador. Conforme exemplo demonstrado na Tabela 8.6, a operação de uma turbobomba, que substitui uma bomba elétrica de alimentação de água de caldeira, permite parar um motor elétrico de 0,7 MW; no entanto, devido ao baixo rendimento, consome cerca de 12 t/h de vapor de 65 bar de pressão, provocando uma perda de geração de energia elétrica de 1,5 MW, o que, descontado o motor elétrico, torna necessário um acréscimo de compra de 0,8 M, representando cerca de R\$ 8.200,00 por dia de custo.

Tabela-8.6 - Influência de válvulas redutoras, turbo-equipamentos e tanque acumulador				
Condição	Unidade	Referência	Referência + Turbobomba	Referência + Valv.Redutora Baixa Pressão
Cons.Vap.Tot	t/h	308	308	308
Ger.Vap.CR	t/h	221	221	221
Ger.Vap.CB	t/h	85	85	85
<b>Vapor Adm Turbina</b>	t/h	<b>290</b>	<b>278</b>	<b>275</b>
<b>TEE</b>	MW	<b>61,01</b>	<b>60,31</b>	<b>61,01</b>
<b>GEE</b>	MW	<b>33,19</b>	<b>31,68</b>	<b>31,3</b>
<b>CEE</b>	MW	<b>27,82</b>	<b>28,63</b>	<b>29,71</b>
<b>Perda Geração EE</b>	MW	-	<b>-1,51</b>	<b>-1,89</b>
<b>Acréscimo Compra EE</b>			<b>0,81</b>	<b>1,89</b>
<b>Custo.ENE</b>	R\$/d	<b>198.034</b>	<b>206.212</b>	<b>208.256</b>
<b>Acréscimo Custo.ENE</b>	R\$/d	-	<b>8.178</b>	<b>10.222</b>
<b>Custo.Esp.ENE</b>	R\$/t.vendável	<b>144,44</b>	<b>150,41</b>	<b>151,90</b>
<b>Acréscimo Custo.Esp</b>	R\$/t.vendável	-	<b>-5,97</b>	<b>-7,46</b>

Portanto, manter as válvulas desses equipamentos fechadas e em boas condições de manutenção (garantia de fechamento) e utilizá-los somente em condições de emergência evita consideráveis desperdícios de energia e custos.

## **9. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS**

### **9.1 - Conclusões**

Ao escolher este tema para desenvolver a dissertação de mestrado pretendia--se mostrar a importância de analisar o processo de produção de celulose e papel envolvendo todas as suas etapas de fabricação, quando decisões setoriais de alterações em variáveis do processo de fabricação são levadas adiante. Para isso, em função da natureza quantitativa e descritiva desta pesquisa, optou-se por verificar se a utilização da técnica de modelagem por regressão linear múltipla associada a balanços de massa e energia seria uma ferramenta viável, alternativa aos modelos teóricos (com base fenomenológica). Essa modelagem aborda um processo de complexidade reconhecida na interdependência entre as inúmeras variáveis de influência no resultado econômico do negócio, principalmente as relacionadas ao consumo de madeira de eucalipto para a produção de polpa e dos insumos energéticos comprados.

Com base nos resultados obtidos, é possível concluir que o emprego da modelagem com a técnica de regressão linear múltipla é uma ferramenta válida e de fácil utilização para a avaliação de resultados econômicos em processo de produção de celulose, quando alterações de variáveis ou de preços de madeira de eucalipto e insumos energéticos ocorrem.

### **9.2 - Considerações Finais**

Espera-se que este trabalho possa beneficiar profissionais, estudantes, professores e pesquisadores do setor de fabricação de celulose e papel, contribuindo para esclarecer as potencialidades no aprimoramento das decisões operacionais no processo industrial. Vale ressaltar que um ponto de preocupação sempre presente neste trabalho foi o de alertar para que o uso de técnicas estatísticas não seja feita de forma indiscriminada e descuidada, sendo de fundamental importância que, antes de sua aplicação, o modelo estrutural proposto seja fortemente fundamentado nos conceitos inerentes à engenharia do processo estudado, face ao caráter descritivo deste tipo de pesquisa.

Constata-se com esta dissertação que decisões para contraposições podem ser melhores avaliadas se adequadamente quantificadas economicamente, como, por exemplos:

- Numa fábrica integrada, uma redução na produção de celulose de mercado, mantendo a produção de papel, em face de dificuldades do mercado de celulose, pode reduzir

custos de inventário; no entanto, a consequente redução na geração de vapor da caldeira de recuperação e no consumo de vapor pode representar maior consumo de combustível e menor geração de energia elétrica, aumentando o custo de fabricação de celulose e papel, dependendo dos preços desses insumos.

- Uma redução no consumo de vapor na linha de fibras pode representar redução no consumo de combustíveis das caldeiras de força; no entanto, a redução de geração de energia elétrica associada deve ser levada em consideração no balanço econômico. Se esse combustível for composto por biomassa de baixo custo, o aumento na compra de energia elétrica pode representar um aumento de custo maior que a economia.
- Maior lavagem das toras de eucalipto representa maior remoção de impurezas e melhor operacionalidade na área de preparação de madeira; no entanto, o incremento na umidade da casca e resíduos de madeira implicará em maior consumo de combustíveis na caldeira de biomassa para evaporação do excesso de umidade.
- Um aumento da carga alcalina no digestor associada a menor temperatura de cozimento pode representar uma maior branqueabilidade da polpa sem perda de rendimento; no entanto, pode ocorrer incremento de sólidos inorgânicos no licor preto para queima na caldeira de recuperação reduzindo sua capacidade de geração de vapor ou até aumentar a relação sólidos/polpa, além do aumento de consumo de combustível no forno de cal para maior processamento de cal associado a maior demanda de licor branco.
- Um aumento no rendimento da madeira, obtido por redução da densidade básica da madeira, pode ser penalizado pelo maior consumo volumétrico aparente de madeira, uma vez que a madeira é comercializada em volume, além de poder aumentar a perda de madeira em face da maior incidência de quebras no tambor descascador.
- A instalação de ventiladores ou bombas acionados por turbinas a vapor de alta pressão, ou operação de válvulas de alívio e válvulas redutoras de pressão de vapor, pode representar maior estabilidade ao sistema de geração e distribuição de vapor na fábrica; no entanto, representa considerável perda de geração de energia elétrica, aumentando o custo de fabricação.
- Maiores temperaturas obtidas com o uso de vapor de média pressão na linha de fibras pode representar menor consumo de químicos; no entanto, maior geração de energia elétrica no turbogerador seria obtida com menor extração de vapor de média pressão e maior fluxo de vapor de baixa pressão obtido na contrapressão.

Destaca-se, portanto, pelos exemplos citados e pelas simulações efetuadas no Capítulo 8, a importância da análise de maior abrangência antes de tomadas de decisões nas alterações de variáveis de processo e estratégias operacionais, sendo esta demonstração, com a utilização de técnicas estatísticas, o principal aporte desta dissertação de mestrado.

### **9.3 - Perspectivas futuras**

Como sugestões para prosseguimento deste trabalho, são apresentados os temas:

- ✓ Estudo e aplicação de modelos estatísticos adaptáveis as pequenas diferenças de processo industrial entre fábricas.
- ✓ Construção de modelos de predição utilizando-se de uma estrutura de rede neural, estudando a melhor arquitetura de redes para o modelo estrutural.
- ✓ Aplicação da técnica multivariada de modelagem por equações estruturais na construção da interdependência de variáveis.
- ✓ Ampliar a abrangência deste trabalho para as demais variáveis de importância econômica no processo de produção de celulose e papel, tais como o consumo de químicos no branqueamento e outras utilidades.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEPRO. Matriz de conhecimento da engenharia de produção.

Disponível em : < [www.abepro.org.br](http://www.abepro.org.br)>. Acesso em 29 nov. 2010, 22:52.

Aracruz. Eucalipto & Meio Ambiente, Em tempos de Aquecimento Global.

Disponível em : [www.aracruz.com.br/eucalipto/pt/aquecimento02.html](http://www.aracruz.com.br/eucalipto/pt/aquecimento02.html)

Acesso em 14 set. 2010, 20:15.

Azzolini, P. Tecnologias de turbinas a vapor. In: 4º. CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E COGERAÇÃO DE ENERGIA DA ABESCO, 2007. São Paulo. **Anais...** São Paulo, v.3, p. 278-285. 1 CD-ROM.

Bachmann, D. Benchmarking Energético na Indústria de Celulose e Papel. **O Papel**, São Paulo, p. 72-75, Julho, 2009.

Bajay, S. V.; Berni, M. D. O potencial de eficiência energética na indústria de celulose e papel: Uma oportunidade competitiva e fonte de suprimento. In: SEMINÁRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NAS INDÚSTRIAS DE CELULOSE E PAPEL, 2010, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABTCP, 2010. 1 CD-ROM.

Barbeli, M. C. **Produção e utilização de energia na indústria de papel e celulose: passado recente e perspectivas futuras.** 2003. 223 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) – Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP, Campinas, 2003.

Barbieri, J. C.; Cajazeira, J. E. R.; Branchini, O. Cadeia de suprimento e avaliação do ciclo de vida do produto: revisão teórica e exemplo de aplicação. **O Papel**, São Paulo, v.70, n.9, p.52-72, Set./2009.

Barcellos, D. C.; Couto, L. C.; Muller, M. D.; Couto, L. O estado - da - arte da qualidade da madeira de eucalipto para produção de energia: Um enfoque nos tratamentos silviculturais. **RENABIO-Biomassa/Energia**, v.2, n.2, p.141-158, 2005.

Baptistella, M. **O uso de redes neurais e regressão linear múltipla na engenharia de avaliações:** Determinação dos valores venais de imóveis urbanos. 2005. 196 f. Dissertação (Mestrado em Programação Matemática).- Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2005.

Berman,C. Energia para quê e para quem no Brasil. In: WORKSHOP-HEIRINCH BOLL, São Paulo. **Anais...**São Paulo, 2008. 1 CD-ROM.

Berni, M. D.; Bajay, S. V.; Jannuzzi, G. M.; Gomes, R. Indústria brasileira de celulose e papel e a de outros países: uma avaliação entre os níveis de emissões e índices de eficiência energética. **O Papel**, São Paulo, v. 69, n.11, p. 87-96, Nov./2008.

Berti, L. C. **A utilização de Modelos Econométricos para a previsão do preço da celulose no mercado internacional:** Uma comparação entre Modelos Univariados e Multivariados. 2004. 212 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática em Finanças) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2004.

Bolen, K. A. **Structural Equations with Latent Variables.** New York: John Wiley & Sons, 1989.

BRACELPA, Setor de Celulose e Papel. Dados Estatísticos. São Paulo : Março, 2010. Disponível em : < [www.bracelpa.com.br](http://www.bracelpa.com.br) > . Acesso em 09 ago. 2010, 20:50.

BRACELPA. Relatório Anual 2008/2009. São Paulo, Mar./2010. Disponível em : < [www.bracelpa.com.br](http://www.bracelpa.com.br) > . Acesso em 09 ago. 2010, 20:50.

Braile, P. M.; Cavalcanti, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais.** São Paulo: CETESB,1993. 764 p.

Brand, M. A. **Qualidade da biomassa florestal para uso na geração de energia em função da estocagem.** 2007. 232 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2007

Brito, J. O.; Barrichelo, L. E. G. Características do eucalipto como combustível: Análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, Piracicaba-SP, n. 16, p. 63-70, 1978.

Brito, J. O.; Barrichelo, L. E. G. Correlações entre características físicas e químicas da madeira e a produção de carvão vegetal: I. Densidade e teor de lignina da madeira de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba-SP, n. 14, p. 9-20, 1977

Brito, J. O. The use of wood as energy.

Disponível em : < [www.scielo.br/scielo.php?script=sciissuetoc&pid=0103=isso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sciissuetoc&pid=0103=isso) > . Acesso em : 06 set. 2010, 21:50.

Brito, J. O.; Barrichelo L. E. G. Utilização integral da árvore: A casca. **IPEF** : Piracicaba, CT n. 50, Junho, 1979.

Cardoso, M. **Análise da unidade de recuperação do licor negro de eucalipto no processo kraft, avaliando alternativas de processamento.** 1998. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 1998.

Cardoso, M.; Carvalho, G.; Brandão H. S. Redução dos teores dos ions cloreto e potássio na unidade de recuperação do licor negro de eucalipto. In: CONGRESO IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN CELULOSA Y PAPEL, 28, 2000, Cidade do México. **Anais...**Cidade do México, v.2, p. 375, 2000.

Charnet, R. **Análise de Modelos de Regressão Linear.** Campinas : Unicamp, 2008. 356 p.

Chimack, M. J.; Walkert, C. E.; Miller, R. Energy conservation in the pulp and paper industry : An Illinois case study. In : ACEEE-PULP & PAPER, University of Illinois at Chicago, 2003, Chicago. **Anais...**, Chicago-IL-USA, 2003. 1 CD-ROM.

Codes, A. L. M. Modelagem de Equações Estruturais: um método para análise de fenômenos complexos. **Caderno RH**, Salvador-BA, v.18, n.45, p.471-484, Set./Dez. 2005.

Coelho, S. T.; Velázquez, S. G. Cogeneration in brazilian pulp and paper industry from biomass-orign to reduce CO2 emissions. In : Banff ANNUAL MEETING, PULP & PAPER INDUSTRY, 1996, Banff Canada. **Anais...**Banff Canada, 20-24 may, 1996, v. III, p. 1073-1085

Colacioppo, R. **Controle estatístico multivariado de processos para observações individuais**. 2001. 196 f. Dissertação (Mestrado em Estatística).- Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2001.

Colodette, J. L. Biorefinaria ou Biomania ? **Opiniões**, Ribeirão Preto-SP, Jun.-Ago./2008, p.20. Disponível em : < [www.opinioes.com.br](http://www.opinioes.com.br) >. Acesso em : 15 jul. 2010, 23:45.

Colodette, J. L.; Gomes, C. M.; Rabelo, M. S.; Eiras, K. M. M.; Gomes, A. F.; Oliveira, K. D. Branqueamento de polpa kraft de eucalipto : nível atual da técnica e novos desenvolvimentos. **O Papel**, São Paulo, Set./2006, p.88-111.

Colodette, J. L.; Gomide, J. L.; Girard, R.; Jaaskelainen, A. S.; Argyropoulos, D. S. Influence of pulping conditions on eucalyptus kraft pulp yield, quality and bleaching. **Tappi Journal**, v.1, n.1, p.14-20, Março 2002.

Colodette, J. L.; Costa, M. M.; Landim, A.; Silva, C. M.; Carvalho, M. M. L. Nova tecnologia de branqueamento adaptada ao fechamento do circuito de água. **Revista Árvore**, Viçosa MG, v.30, n.1, p.129-139, Jan./2006.

Confederação Nacional da Indústria-CNI. **Eficiência energética na indústria**: o que foi feito no Brasil, oportunidades de redução de custos e experiência internacional. PROCEL, Brasília, Ago./2009. Disponível em : < [www.procel.org.br](http://www.procel.org.br) >. Acesso em : 19 jul. 2010, 22:45.

Conselho de Informações sobre Biotecnologia. **Guia do Eucalipto**: Oportunidades para um desenvolvimento sustentável. São Paulo, Maio/2008.  
Disponível em : < [www.cib.org.br](http://www.cib.org.br) > . Acesso em : 17 ago 2010, 19:10.

Conte, S. D. **Elementos de Análise Numérica**. Porto Alegre : Globo, 1977. 331 p.



Curvelo, A. A. S. Biorefinaria: a matéria prima definindo processo. **Opiniões**, Ribeirão Preto-SP, Jun.-Ago./2008, p.23. Disponível em : < [www.opiniões.com.br](http://www.opiniões.com.br) >. Acesso em : 15 jul. 2010, 23:55.

Del Grande, M. H. **Racionalização do uso de água na indústria de celulose: O caso Bahia Pulp**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, 2004.

Draper, N. R. e Smith, H. **Applied Regression Analysis**. Wiley Press, New York, 1981.

Ernst & Young Brasil Ltda. **Brasil sustentável, desafios do mercado de energia**. São Paulo, 2008. Disponível em : < [www.ernstyoung.com.br](http://www.ernstyoung.com.br) >. Acesso em : 18 jul. 2010, 23:05.

Esquerre, K. P. S. O. R. **Aplicação de técnicas estatísticas multivariadas e de redes neurais na modelagem de um sistema de tratamento de efluentes industriais**. 2003. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2003.

Faleiros, M. Debate sobre bioenergia ganha força no setor. **O Papel**, São Paulo, p. 27-30, Outubro, 2009.

Faleiros, M. Pioneiros em política setorial para eficiência energética. **O Papel**, São Paulo, p. 26-30, abril, 2010.

Farias, S. A.; Santos, R. C. Modelagem de Equações Estruturais e Satisfação do Consumidor : uma Investigação Teórica e Prática. **RAC**, v.4, n.3, Set./Dez. 2000 p. 107-132

Ferreira, J.C.; Furtado, T. S.; Neves M. D.; Brand, M. A. Influência do teor de umidade no poder calorífero em diferentes idades e componentes de árvores de Pinus taeda. In : 1º. CONGRESSO BRASILEIRO SOBRE FLORESTAS ENERGÉTICAS, 2007, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte, Junho/2007. 1 CD-ROM.

Ferreira, O. C. **Teor de carbono em combustíveis da biomassa.**

Disponível em : <[ecen.com/eee57/eee57p/teor\\_de\\_carbono.htm](http://ecen.com/eee57/eee57p/teor_de_carbono.htm)> Acesso em : 28 jul. 2010, 21:15.

Fiorioli, J. C. **Modelagem matemática do efeito chicote em cadeias de abastecimento.**

2005. 198 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRS, Porto Alegre, 2005.

Foelkel, C. Ecoeficiência e produção mais limpa para a indústria de celulose e papel de eucalipto. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**, São Paulo, Março 2008. Disponível em :

<[celsiusdegree.com.br](http://celsiusdegree.com.br)> . Acesso em : 2 jul. 2010, 21:40.

Foelkel, C. E.; Moura, E.; Menochelli, S. Densidade Básica : sua verdadeira utilização como índice de qualidade da madeira de eucalipto para produção de celulose. In : CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 6, Campos do Jordão, 1990, **Anais...**Campos do Jordão, p.719-728.

Foelkel, C. Eucalyptus Online Book & Newsletter. Pergunta n.12 **Poder calorífero do licor.** [SD]. Disponível em : <[celsiusdegree.com.br](http://celsiusdegree.com.br)> . Acesso em : 8 jul. 2010, 18:35.

Fonseca, J. S.; Martins, G. A.; Toledo, G L. **Estatística Aplicada.** Editora Atlas, São Paulo-SP, 2006.

Francis, D. W.; Towers, M. T.; Browne, T. C. **Energy Cost Reduction in the Pulp and Paper Industry** - An Energy Benchmarking Perspective. PAPRICAN, Montreal, 2008.

Disponível em : <[oee.nrcan.gc.ca/infosource](http://oee.nrcan.gc.ca/infosource)>. Acesso em : 20 jul. 2010, 23:05.

Garcia, C. B. **Anatomia, composição e propriedade de 5 madeiras paraguaias.**1995. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, 1995.

Gomes, S. I.; Paraiso, P. R.; Andrade, C. M. G. Análise preliminar da viabilidade de cultivos florestais para produção de energia elétrica. **Espaço Energia**, Curitiba, n.04, Ago./2006.

Gomide, J. L.; Colodette, J. L.; Oliveira, R. C.; Silva, C. M. Caracterização tecnológica, para produção de celulose, da nova geração de clones de Eucalyptus do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa MG, v.29, n.1, p.129-137, Jan./2005.

Gomide, J. L. Produção de Celulose de Eucalyptus no Brasil: Desafios e Novos Desenvolvimentos. In: CONGRESSO ABTCP/TAPPI, 2006, São Paulo. **Anais...** São Paulo : SOBER, 2006. 1 CD-ROM.

Gomide, J. L. **ENF551-Estrutura Anatômica e Qualidade da Madeira**. Viçosa-MG, UFV, Outubro/2009.

Gomide, J. L.; Queiroz, S. C. S.; Colodette, J. L.; Oliveira, R. C. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de Eucalyptus grandis W. Hill ex Maiden X Eucalyptus urophylla S. T. Blake. **Revista Árvore**, Viçosa MG, v.28, n.6, p.901-909, 2004.

Gomide, J. L.; Santos, R. B.; Souza, L. C. Predição de qualidade da madeira e da polpa celulósica por técnica de espectroscopia de infravermelho próximo (NIRS). **Revista Árvore**, Viçosa MG, v.33, n.4, Julho e Agosto/2009.

Gotaverken Energy. **Sistemas de Recuperação Química e Energética**. Curitiba-PR, 1998. Disponível em : <gotaverken.com.br> . Acesso em : 18 out. 2010, 20:35.

Hair, J. F.; Anderson, R. E.; Tatham, R. L.; Black, W. C. **Análise Multivariada de Dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005. 593 p.

Hilgemberg, E. M.; Bacha, C. J. C. A evolução da indústria brasileira de celulose e sua atuação no mercado mundial. **Revista Análise Econômica**, São Paulo-SP, Ano.19, n.36, Março 2000.

Himmelblau, D. M. **Basic Principles and Calculations in Chemical Engineering**. New Jersey : Prentice-Hall, 1985. 542 p.

Hough, G. W. **Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes**. Atlanta GA, USA : TAPPI, 1985. 311 p.

Jackson, J. E. **A user guide to principal components**. Wiley Press, New York, 1991.

Johnson, M. E. **Multivariate Statistical Distribution**. Wiley Press, New York, 1987.

Johnson, R. A. e Winchern, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**. Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1998.

Kourti, T. e MacGregor, J. F. **Multivariate SPC methods for process and product monitoring**. *Journal of Quality Technology*, v.28, n.4, p.409-428, 1996.

Krug, T. Florestas energéticas: uma reflexão. **Opiniões**, Ribeirão Preto-SP, Jun. - Ago./2008, p.01. Disponível em : < [www.opiniões.com.br](http://www.opiniões.com.br) >. Acesso em : 27 jul. 2010, 21:25.

LWACEL Celulose. **Secagem e Embalagem**. Lencóis Paulista-SP, Julho, 2010.

Disponível em : <[www.lwart.com.br/site/content/lwarcel/celulose\\_processo.asp](http://www.lwart.com.br/site/content/lwarcel/celulose_processo.asp)>

Acesso em : 21 out. 2010, 22:05.

Macedo, I. C. **Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil** : situação atual, oportunidades e desenvolvimento. CGEE, CTEneg-Secretária Técnica do Fundo Setorial de Energia, Junho, 2001. Disponível em : < [www.cgee.com.br](http://www.cgee.com.br) >. Acesso em : 14 ago. 2010, 11:20.

Minitab Inc. **Manual de estatística aplicada**, 2003.

Marques, I. N. **Máquinas de Vapor**. Rio de Janeiro: PUC-RJ, 1975. 214 p.

Mokfienski, A.; Colodette, J. L.; Gomide, J. L.; Carvalho, A. M. M. L. A importância relativa da densidade da madeira e do teor de carboidratos no rendimento de polpa e na qualidade do produto. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v.18, n.3, p.402-413, Jul.-Set., 2008.

Montgomery, D. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. John Wiley & Sons Press, New York, 2002.

Montgomery, D. C. e Peck, E. A. **Introduction to linear regression analysis**. Wiley Press, New York, 1992.

Montgomery, D. C.; Runger, G. C.; Hubele, N. F. **Engineering Statistics**. Wiley Press, New York, 1998.

Morales, M. M., Martí, P., Campos, L., Sagrado, S. An environmental study by factor analysis of surface seawaters in the Gulf of Valencia. **Anal. Chim. Acta**, v.394, p.109-117, 1999.

Muller, M. D.; Couto, L. Avaliação de densidades de plantio e rotação de plantações de rápido crescimento para produção de biomassa. **RENABIO - Biomassa e Energia**, Documento Técnico n.2, Viçosa-MG, 2006.

Muramoto, M. C.; Migliorini, A. J.; Brito, J. O.; Barrichelo, L. E. G.; Seixas, F. Análise da produção energética e de carvão vegetal de espécies de eucalipto. **IPEF**, Piracicaba-SP, n.23, p.53-56, Abril 1983.

Nardelli, A. M. B.; Griffith J. J. Modelo Teórico para compreensão do ambientalismo empresarial do setor florestal brasileiro. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.6, p.865-869, 2003.

Neves, M.; Marron, A. Aproveitamento de resíduos de serraria de árvores de eucalyptus grandis de 15 anos. In: CIADICYP, Guadalajara-México, 2000. **Anais...Guadalajara**, 2000. 1 CD-ROM.

Oliveira, J. T. S.; Silva, J. C. Avaliação das propriedades higroscópicas da madeira de Eucalyptus saligna SM., em diferentes condições de umidade relativa do ar. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27,n.2, p.233-239, 2003.

Oliveira, P. A.; Silva, L. B.; Coutinho, A. S. **Aplicabilidade de modelos de regressão linear simples e múltipla em avaliações térmicas de ambientes de trabalho**. João Pessoa-PB, UFPB – Centro de Tecnologia, Engenharia de Produção, 2010.

Oliveira, J. T. S.; Silva, J. C. Variação radial da retrabilidade e densidade básica da madeira de *Eucalyptus saligna* Sm. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.27, n.3, p.381-385, 2003.

Ortiz-Estarelles, O., Martin-Biosca, Y, Medina-Hernandez, M. On the internal multivariate quality control of analytical laboratories. A case study: the quality of drinking water. **Chemical Intel. Lab. Systems**, v.56, p.93-103, 2001.

Pereira, J. C. D.; Higa, A. R.; Shimizu, J. Y.; Higa, R. C. V. Comparação da qualidade da madeira de eucalipto para fins energéticos. **REMADE**, Porto Alegre, n. 122, p.15-18, Jan./2010.

Philipp P. **Tecnologia de fabricação da pasta celulósica**. São Paulo: IPT, 1988

Piotto, Z. C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel** - Estudo de Caso. 2003. 321 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica de Sanitária) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2003.

Polowski, N. V. **Modelagem e otimização de digestores kraft descontínuos** utilizando redes neurais e modelo híbrido-integração de processos em tempo real. 2009. 208 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2009.

PricewaterhouseCoopers. **CEO Perspectives: Viewpoints of CEO's in the forest paper & packaging industry worldwide**. 2010 Edition.

Projeto Genolyptus. Genolyptus: **Rede Brasileira de Pesquisa do Genoma de Eucalyptus**. Disponível em : < [www.genolyptus.org.br/tiki-index.php](http://www.genolyptus.org.br/tiki-index.php) >. Acesso em : 24 ago. 2010, 10:10.

Quirino, W. F.; Vale A. T.; Andrade, A. P. A.; Abreu, V. L. S.; Azevedo, A. C. S. Poder Calorifero da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos. **RENABIO - Biomassa e Energia**, v.1, n.2, p.173-182, 2004

Rendeiro, G.; Nogueira, M. **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Programa Luz para todos, Ministério de Minas e Energia, 1a. Edição, Brasília, 2008.

Rezende, M. A.; Escobedo, J. F.; Ferraz, E. S. B. Retrabilidade volumétrica e densidade aparente da madeira em função da umidade. **IPEF**, n.39, p.33-40, ago.1998.

Ribeiro, R. N. **Utilização de redes neurais artificiais e tecnologia FT-NIR para predição do número kappa** em um processo kraft de cozimento de madeira em indústria de celulose.2007. 185 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial).- Universidade do Leste de Minas Gerais – UNILEST, Coronel Fabriciano-MG, 2007.

Rudd, J. B. Using a neural network system for advanced process control. **Tappi Journal**, Atlanta GA USA, October 1991, p.153-159.

Santos, S. R.; Sansígolo, C. A. Influência da densidade básica da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* na qualidade da polpa branqueada. **Ciência Florestal**, Santa Maria-RS, v.17, n.1, p.53-63, Jan./Mar., 2007.

Santos, A. M. **Análise de regressão linear múltipla aplicada a área da saúde pública**. Universidade Federal do Maranhão, Departamento de Saúde Pública, 2ª. edição, São Luis/MA, 2009.

Seixas, F.; Bauch, S. C.; Junior, E. D. O. Balanço energético e econômico de duas alternativas de descascamento de madeira de eucalipto. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, n.67, p.37-43, abr./2005.

Serrano, A. L. M. **Análise econométrica do mercado de madeira em toras para produção de celulose**. 2008. 188 f. Dissertação (Mestrado em Economia Florestal).- Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2008.

Silva, C. L.; Kopittice, B. H. Simulações e cenários a partir da cadeia de valor: uma aplicação na indústria de celulose. **Revista da FAE**, Curitiba-PR, v.5, n.1, p.43-59, Jan./Abr. 2002.

Silva, J. **Análise Termoeconômica do Processo de Geração de Vapor e Potência do Segmento de Celulose e Papel**. 2002. 198 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá-MG, 2002.

Silva Jr., F. G.; Barrichelo, L. E. G.; Resquin, F.; Brito, J. O.; Sansigolo, C. A. Qualidade da madeira para polpa celulósica kraft de Eucalyptus globulus plantados no Uruguai. **Scientia Forestalis**, Piracicaba SP, n.72, p.57-66, Dez./2006.

Silva Jr., F. G.; Sacon, V M.; Bassa, A. G. M. C. Misturas de madeira de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophylla e Pinus taeda para produção de celulose kraft através do processo Lo-Solids. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n.75, p. 19-29, Set./2007.

Silva, H. D. **O projeto Florestas Energéticas**. Opiniões, Ribeirão Preto-SP, Jun. - Ago./2008, p. 02. Disponível em : < [www.opiniones.com.br](http://www.opiniones.com.br) >. Acesso em : 27 out. 2010, 22:40.

Silva, R.; Haraguchi, S. K.; Muniz, E. C.; Rubira, A. F. Aplicações de fibras lignocelulósicas na química de polímeros e em compósitos. **Química Nova**, São Paulo, v.32, n.3, 2009.

Soares, T. S.; Carneiro, A. C. O.; Gonçalves, E. O.; Lelles, J. G. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **RCEEF**, Garça/FAEF, ano IV, n.8, Ago./2006.

Steiner, M. T.; Chaves Neto, A.; Braulio, N.; Alves, V. Métodos estatísticos multivariados aplicados à engenharia de avaliações. **Gestão&Produção**, vol.15, n.1, São Carlos-SP, Jan/Abr.2008.

Sturion, J. A.; Pereira, J. C. D.; Chemin, M. S. Qualidade da madeira de eucalyptus vimnalis para fins energéticos em função do espaçamento e idade de corte. **EMBRAPA, Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo-PR, n.16, p.55-59, dez/1988.



Szabó, L.; Soria, A.; Forsstrom, J. A world modelo for the pulp and paper industry: Demand, Energy and Emissions Scenarios to 2030. **Environmental Science & Policy** 12, p.257-269, 2009.

Tabacof, B. A evolução do setor florestal brasileiro. **Opiniões**, Ribeirão Preto-SP, Mar.-Mai./2008, p.01. Disponível em : < [www.opiniões.com.br](http://www.opiniões.com.br) >. Acesso em : 28 out. 2010, 21:20.

Trugilho, P. F.; Bianchi, M. L.; Gomide, J. L.; Schuchardt, U. Classificação de clones de Eucalyptus sp visando à produção de polpa celulósica. **Revista Árvore**, Viçosa MG, v.28, n.6, p.895-899, 2004.

Vairinhos, V.; Lobo V.; Silva, A. R. **Modelação de equações estruturais (SEM) para avaliar e monitorizar o Estado de Condição de um sistema mecânico**. Lisboa: Marinha de Portugal, 2008. Disponível em : < [www.marinha.com.pt](http://www.marinha.com.pt) >. Acesso em : 22 out. 2010, 19:15.

Vale, A. T.; Brasil, M. A. M.; Carvalho, C. M.; Veiga, R. A. A. Produção de energia do fuste de eucalyptus grandis HILL EX-MAIDEN e acacia mangium WILLD em diferentes níveis de adubação. **CERNE**, v.6, n.1, p.83-88, 2000.

Valverde, S. R.; Rezende, J. L. P.; Silva, M. L.; Jacovine, L. A. G.; Cravalho, R. M. M. Efeitos Multiplicadores da Economia Florestal Brasileira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.27, n.3, p.285-293, 2003.

Valverde, S. R.; Soares, N. S.; Silva, M. L. Desempenho das exportações brasileiras de celulose. **Revista Árvore**, Viçosa MG, v.30, n.6, p.1017-1023, 2006.

Velázquez, S. M. S. G. **A cogeração de energia no segmento de papel e celulose: Contribuição à matriz energética do Brasil**. 2002. 327 f. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2002.

Velázquez, S. M. S. G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose** com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás.

2006. 272 f. Tese (Doutorado em Energia) – Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2006.

Ximenes, N. P. **Aplicação de modelos lineares na estimativa de parâmetros de produtividade** do camarão marinho *Litopenaus vannamei* em berçários e viveiros de engorda. 2005. 94 f. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE, Recife, 2005.