

TESE

818

Escola Federal de Engenharia de Itajubá
- EFEI -

○ DESEMPENHO DE SISTEMAS
DE COMBUSTÃO A LENHA:
Aspectos Conceituais e Metodológicos

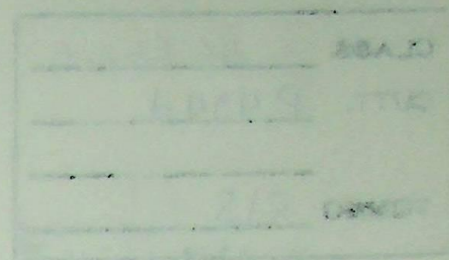
Cláudio Antônio Peres
M. Sc.

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ITAJUBÁ

1995

Cláudio Antônio Peres



**O DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMBUSTÃO A LENHA:
Aspectos Conceituais e Metodológicos**

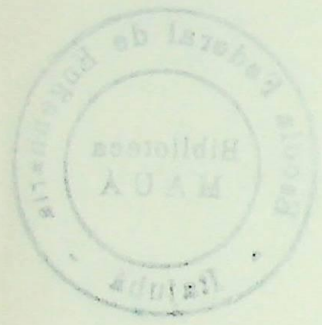


Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Escola Federal de Engenharia de Itajubá - EFEI, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Conversão de Energia
Orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto Horta Nogueira

Itajubá
Escola Federal de Engenharia de Itajubá
1995

CLASS 530.46:662.63 (043.2)
CUTT. P434d
TOMO 818



Peres, Cláudio Antônio.
O desempenho de sistema de combustão a lenha: aspectos conceituais e metodológicos. - Itajubá: EFEI, 1995.
190 p.
Dissertação (mestrado) EFEI.
1. Lenha - Combustão I. Título
CDU: 662.63

Dissertação defendida e aprovada, em 4 de setembro de 1995, pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Luís Augusto Barbosa Cortez
1º Examinador - UNICAMP

Prof. Rogério José da Silva
2º Examinador - EFEI

Prof. Luiz Augusto Horta Nogueira - Orientador
3º Examinador - EFEI

Dedico esta trabalho aos meus pais,
Ruben (In Memoriam) e Welzina, pela herança
maior que me deixaram: o exemplo de vida.
Dedico também à minha esposa, Lúcia,
e aos meus filhos, Gustavo e Renan Luis.

AGRADECIMENTOS

Mantenho meus singelos agradecimentos a todos aqueles colegas, instituições e empresas que, de alguma forma, colaboraram para a execução deste trabalho, em especial:

Ao professor Luiz Augusto Horta Noqueira, pela orientação científica e técnica, pelo companheirismo e pelo espírito dinâmico e engraçador, sempre voltado para a Ciência e a Tecnologia.

Ao engenheiro Antônio Cruz Vasques, quando então Presidente da Fundação Nacional de Tecnologia Industrial - NUTEC, pelo incentivo pessoal, institucional e atuação do curso de pós-graduação.

Ao professor João Wilson Ribeiro, também pelo incentivo e atuação no curso de pós-graduação.

Ao NUTEC e à CAPES, pelo apoio financeiro que contribuiu para a realização deste trabalho.

Aos engenheiros Antônio Tasso Noqueira Costa, Elomar Torres Santos e José Nilo Silveira Sales, respectivamente Presidente, Diretor de Produção Industrial e Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento do NUTEC pelo apoio e incentivo à realização deste trabalho, mediante ampla atuação pessoal das atividades da indústria.

As empresas Laticios Muriquiense Ltda, Super-Facop Mapará Ltda, SCA Indústria Têxtil, Vicunha Nordeste S/A Indústria Têxtil e Fiação Nordeste do Brasil S/A para gentileza de permitir a levantamento de informações de seus sistemas de controle e para disponibilização dessa forma, a realização dos estudos experimentais.

Ao professor Antônio Carlos de Azevedo, do Museu de Física, Departamento de Física da Universidade Estadual Paulista - UNESP, pelo apoio científico e colaboração prestada.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Ruben (In Memoriam) e Welzina, pela herança maior que me deixaram: o exemplo de vida.

Dedico também à minha esposa, Inês, e aos meus filhos, Gustavo e Renan Luís.

AGRADECIMENTOS

Manifesto meus singelos agradecimentos àquelas pessoas, instituições e empresas que, de alguma forma, colaboraram para a execução deste trabalho, em especial:

Ao professor Luiz Augusto Horta Nogueira, pela orientação dedicada e lúcida, pelo companheirismo e pelo espírito dinâmico e encorajador, sempre voltado para a Ciência e a Tecnologia.

Ao engenheiro Antônio Cruz Vasques, quando então Presidente da Fundação Núcleo de Tecnologia Industrial- NUTEC, pelo incentivo pessoal inestimável à iniciação do curso de pós-graduação.

Ao professor Júlio Wilson Ribeiro, também pelo incentivo à iniciação do curso de pós-graduação.

Ao NUTEC e à CAPES, pelo apoio financeiro que contribuiu sobremaneira para a realização deste trabalho.

Aos engenheiros Antônio Telmo Nogueira Bessa , Eliomar Torres Martins e José Júlio Silveira Sales, respectivamente Presidente, Diretor da Divisão de Engenharia Industrial e Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento do NUTEC pelo apoio e incentivo à retomada deste trabalho, mediante minha liberação parcial das atividades da Instituição.

Às empresas Laticínio Mantiqueira Ltda, Super-Recap Itajubá Ltda, Juosas S/A Indústria Têxtil, Vicunha Nordeste S/A Indústria Têxtil e Fiação Nordeste do Brasil S/A pela gentileza de permitirem o levantamento de informações dos seus sistemas de combustão a lenha, possibilitando dessa forma, a realização dos estudos experimentais.

Ao professor Ricardo Lima Carati, do Núcleo de Processamento de Dados da Universidade Federal do Ceará- NPD/UFC, pelo apoio complementar cordialmente oferecido.

Enfim, a todos os professores e colegas de curso que me dedicaram amizade e reconhecimento.

Sinceramente,

Cláudio Antônio Peres

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| LISTA DE TABELAS | VII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| SINOPSE | XI |
| RESUMO | XV |
| ABSTRACT | XVI |
| Capítulo 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| Capítulo 2 - A LENHA COMO COMBUSTÍVEL | 4 |
| 2.1 Aspectos Gerais | 5 |
| 2.2 A Importância do Consumo de Lenha no Brasil | 6 |
| 2.3 A Evolução do Preço da Lenha | 17 |
| 2.4 Impacto Ambiental Associado ao Uso de Lenha | 23 |
| Capítulo 3 - A COMBUSTÃO DA LENHA | 45 |
| 3.1 Introdução | 45 |
| 3.2 Características da Lenha | 47 |
| 3.3 Combustão química | 51 |
| 3.4 Tipos de lenha usados | 54 |
| 3.5 O processo de Combustão da Lenha | 59 |
| 3.6 Os Sistemas de Conversão Termoquímica da Lenha | 61 |
| 3.6.1 Combustão direta | 62 |
| 3.6.2 Cuidados com | 62 |
| 3.6.3 Características | 62 |
| 3.6.4 Características dos Sistemas de Combustão a Lenha | 63 |
| 3.6.4.1 Coeficiente de excesso de ar | 65 |
| 3.6.4.2 Temperatura dos gases de exaustão | 67 |
| 3.6.4.3 Poder calorífico da lenha | 68 |
| 3.6.4.4 Consumo de lenha | 69 |
| Capítulo 4 - O DESEMPENHO DE | 71 |
| 4.1 Introdução | 71 |
| 4.2 Combustão | 71 |
| 4.3 Métodos de Cálculo do Consumo | 71 |
| 4.3.1 Análise empírica | 71 |
| 4.3.1.1 Método direto | 72 |
| 4.3.1.2 Método indireto | 73 |
| 4.3.2 Análise teórica | 73 |
| 4.3.2.1 Método direto | 73 |
| 4.3.2.2 Método indireto | 73 |
| 4.4 Análise de Desempenho do Desempenho | 74 |
| 4.5 Características | 77 |

É no balanço dos acertos e erros que se julga o valor do homem, e não na falta de erros de quem não tem sido capaz de decidir.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----|
| LISTA DE TABELAS | VII |
| LISTA DE FIGURAS | IX |
| SIMBOLOGIA | XI |
| RESUMO | XV |
| ABSTRACT | XVI |
| Capítulo 1 - INTRODUÇÃO | 1 |
| Capítulo 2 - A LENHA COMO COMBUSTÍVEL | 4 |
| 2.1 Aspectos Gerais | 5 |
| 2.2 A Importância do Consumo de Lenha no Brasil | 6 |
| 2.3 A Evolução do Preço da Lenha | 17 |
| 2.4 O Impacto Ambiental Associado ao Uso da Lenha | 23 |
| Capítulo 3 - A COMBUSTÃO DA LENHA | 45 |
| 3.1 Introdução | 33 |
| 3.2 Características da Lenha | 33 |
| 3.2.1 Constituição química | 33 |
| 3.2.2 Unidades de medida usuais | 34 |
| 3.3 O Processo de Combustão da Lenha | 39 |
| 3.4 Os Sistemas de Conversão Termoquímica da Lenha | 41 |
| 3.4.1 Combustão direta | 42 |
| 3.4.2 Carbonização | 42 |
| 3.4.3 Gaseificação | 42 |
| 3.5 Características dos Sistemas de Combustão a Lenha | 43 |
| 3.5.1 Coeficiente de excesso de ar | 43 |
| 3.5.2 Temperatura dos gases de exaustão | 57 |
| 3.5.3 Poder calorífico da lenha | 58 |
| 3.5.4 Consumo de lenha | 60 |
| Capítulo 4 - O DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMBUSTÃO A LENHA | 62 |
| 4.1 Introdução | 63 |
| 4.2 Conceitos | 63 |
| 4.3 Métodos de Cálculo do Desempenho | 66 |
| 4.3.1 Análise energética | 67 |
| 4.3.1.1 Método direto | 67 |
| 4.3.1.2 Método indireto | 69 |
| 4.3.2 Análise exergética | 73 |
| 4.3.2.1 Método direto | 73 |
| 4.3.2.2 Método indireto | 79 |
| 4.4 Análise da Sensibilidade do Desempenho | 84 |
| 4.5 Comentários | 97 |

| | |
|--|-----|
| Capítulo 5 - ESTUDOS EXPERIMENTAIS | 100 |
| 5.1 Introdução | 101 |
| 5.2 Apresentação dos Casos Experimentais Estudados e dos Resultados Obtidos..... | 101 |
| 5.3 Comentários | 113 |
| Capítulo 6 - COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES | 115 |
| Capítulo 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 119 |
| | |
| ANEXOS | |
| Anexo 1 - Tabelas Auxiliares do Capítulo 2 | 124 |
| Anexo 2 - A Influência do CO na Equação da Combustão da Lenha | 129 |
| Anexo 3 - A Geração Termoelétrica a Lenha no Plano 2010 (Eletrobrás) | 131 |
| Anexo 4 - Poderes Caloríficos de Alguns Energéticos | 133 |
| Anexo 5 - Programas Computacionais | 135 |
| A5.1 Análise de sensibilidade do coeficiente de excesso de ar | 136 |
| A5.2 Geração dos arquivos de dados do PROGRAM DESEMP | 141 |
| A5.3 PROGRAM DESEMP - desempenhos e sensibilidade dos desempenhos | 145 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|----|---|----|
| 1 | Consumo total de fontes energéticas primárias (1970-1991) | 8 |
| 2 | Pesquisa de preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas | 17 |
| 3 | Evolução do preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas, com base no preço corrente e em moedas constantes | 18 |
| 4 | Distribuição da densidade demográfica por Unidade da Federação | 25 |
| 5 | Representatividade das faixas de densidade demográfica do Brasil | 26 |
| 6 | Área equivalente ao consumo de lenha no Brasil | 28 |
| 7 | Representatividade da lenha na produção e na extração florestais | 28 |
| 8 | Importância dos processos de exploração arbórea referente à superfície equivalente média explorada do Brasil | 30 |
| 9 | Composição de algumas espécies de plantas superiores | 34 |
| 10 | Variação da massa específica em função do conteúdo de umidade de algumas espécies arbóreas | 36 |
| 11 | Variação da massa específica em função do tipo de árvore | 37 |
| 12 | Variação da massa específica em função do tempo de secagem ao ar livre | 38 |
| 13 | Variação da massa específica em função da idade da árvore | 39 |
| 14 | Análise volumétrica do ar atmosférico | 46 |
| 15 | Composição do <i>Eucalyptus saligna</i> | 54 |
| 16 | Efeito da idade da árvore sobre o coeficiente de excesso de ar | 54 |
| 17 | Composição de algumas espécies de árvore | 55 |
| 18 | Efeito da espécie de árvore sobre o coeficiente de excesso de ar | 55 |
| 19 | Efeito da produção de carvão residual sobre o coeficiente de excesso de ar | 55 |
| 20 | Convenção dos desempenhos energéticos e exergéticos em função dos poderes caloríficos utilizados (método direto e indireto) | 66 |
| 21 | Equações simplificadas do coeficiente de transferência de calor | 72 |
| 22 | Variáveis usadas na simulação da sensibilidade do desempenho | 85 |
| 23 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do conteúdo de umidade da lenha..... | 86 |
| 24 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do poder calorífico da lenha..... | 88 |
| 25 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do consumo medido de lenha..... | 89 |
| 26 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da massa específica da lenha..... | 89 |
| 27 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do conteúdo de umidade do carvão..... | 90 |
| 28 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do poder calorífico do carvão..... | 91 |
| 29 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da presença de carvão residual..... | 91 |
| 30 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da temperatura dos gases de chaminé..... | 92 |
| 31 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do teor de CO ₂ dos gases de chaminé..... | 93 |

| | | |
|----|--|-----|
| 32 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da produção de vapor..... | 94 |
| 33 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da pressão de vapor..... | 94 |
| 34 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da temperatura da água de alimentação..... | 95 |
| 35 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação das condições ambientes (TBS/TBU)..... | 96 |
| 36 | Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da temperatura média das paredes do sistema | 96 |
| 37 | Quadro resumo da sensibilidade média percentual dos desempenhos em função da variação unitária percentual dos fatores considerados | 98 |
| 38 | Caracterização das unidades industriais visitadas..... | 101 |
| 39 | Características gerais dos geradores de vapor estudados..... | 102 |
| 40 | Dados medidos e estimados dos sistemas de combustão a lenha estudados | 103 |
| 41 | Quadro resumo de resultados dos estudos experimentais..... | 105 |
| 42 | Desvios entre os desempenhos energéticos diretos e indiretos dos sistemas de combustão a lenha estudados..... | 106 |
| 43 | Representatividade das perdas exergéticas dos sistemas de combustão a lenha estudados..... | 109 |
| 44 | Diferença entre os valores do consumo nominal de lenha e o consumo medido de lenha..... | 110 |
| 45 | Comportamento dos desempenhos indiretos devido à utilização do conceito de consumo nominal de lenha..... | 110 |
| 46 | Consumo total de fontes energéticas primárias (por década- 70/80) | 124 |
| 47 | Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (1970-1991) | 124 |
| 48 | Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (por década- 70/80) | 125 |
| 49 | Consumo de energia no setor residencial (1970-1991) | 125 |
| 50 | Consumo de energia no setor residencial (por década-70/80) | 125 |
| 51 | Consumo de energia no setor industrial (1970-1991) | 126 |
| 52 | Consumo de energia no setor industrial (por década-70/80) | 126 |
| 53 | Consumo de lenha nos segmentos industriais (1970-1991) | 127 |
| 54 | Consumo de lenha nos segmentos industriais (por década-70/80) | 127 |
| 55 | Consumo de energia no setor agropecuário (1970-1991) | 128 |
| 56 | Consumo de energia no setor agropecuário (por década-70/80) | 128 |
| 57 | Custos finais de geração térmica- CFGT (em US\$/MWh)..... | 132 |
| 58 | Poderes caloríficos usuais de alguns energéticos..... | 134 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|----|--|----|
| 1 | Consumo total de fontes energéticas primárias (1970-1991) | 8 |
| 2 | Participação da lenha na demanda de energia primária renovável | 9 |
| 3 | Representatividade das fontes energéticas primárias (por década- 70/80) | 10 |
| 4 | Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (1970-1991)..... | 10 |
| 5 | Três aspectos distintos do consumo de lenha dos setores da economia nacional | 11 |
| 6 | Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (por década- 70/80) | 12 |
| 7 | Consumo de energia no setor residencial (1970-1991) | 12 |
| 8 | Consumo de energia no setor residencial (por década-70/80) | 13 |
| 9 | Consumo de energia no setor industrial (1970-1991) | 14 |
| 10 | Consumo de energia no setor industrial (por década-70/80) | 14 |
| 11 | Consumo de lenha nos segmentos industriais (1970-1991) | 15 |
| 12 | Consumo de energia no setor agropecuário (1970-1991) | 16 |
| 13 | Consumo de energia no setor agropecuário (por década-70/80) | 16 |
| 14 | Evolução do preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas, em US\$... | 19 |
| 15 | Evolução do preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas, em IGP | 19 |
| 16 | Evolução do preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas, em IPC | 20 |
| 17 | A variação inflacionária máxima do preço da lenha, em moedas constantes (US\$, IGP e IPC) | 21 |
| 18 | Evolução dos preços da lenha nativa e plantada em Minas Gerais | 21 |
| 19 | Preço, por unidade energética, da lenha de Minas Gerais, do óleo combustível e do GLP | 22 |
| 20 | Relações de preço entre a lenha de Minas Gerais e o óleo combustível e o GLP .. | 23 |
| 21 | Representatividade das populações urbana e rural das Regiões e do País | 26 |
| 22 | Representatividade das faixas de densidade demográfica do Brasil | 27 |
| 23 | Representatividade da lenha em relação às produções florestais total e nativa | 29 |
| 24 | Representatividade da extração florestal anual em relação à produção florestal anual | 29 |
| 25 | Representatividade dos processos de exploração da floresta nativa brasileira | 30 |
| 26 | Variação da massa específica com a umidade | 37 |
| 27 | Variação da massa específica com o tempo de secagem ao ar livre de algumas espécies de eucalipto | 38 |
| 28 | Variação da massa específica com a idade da árvore | 39 |
| 29 | Modelo conceitual da combustão de energéticos sólidos proposto por Edwards ... | 40 |
| 30 | Estágios do processo de combustão da lenha | 41 |
| 31 | Sistemas de combustão da lenha | 41 |
| 32 | Efeito da produção de carvão residual sobre o coeficiente de excesso de ar, em função do teor de CO ₂ | 56 |
| 33 | Efeito da produção de carvão residual sobre o coeficiente de excesso de ar, em função do teor de O ₂ | 57 |
| 34 | Componentes da exergia | 65 |
| 35 | Esquema simplificado do volume de controle referente ao sistema de combustão a lenha genérico | 67 |

| | | |
|----|--|-----|
| 36 | Esquema simplificado dos fluxos de calor para o sistema de combustão a lenha genérico | 81 |
| 37 | Variação da umidade da madeira após o corte | 104 |
| 38 | Desempenhos energéticos do sistema de combustão 1 | 107 |
| 39 | Desempenhos energéticos do sistema de combustão 2 | 107 |
| 40 | Variação percentual dos desempenhos energéticos diretos dos casos estudados, em função da variação percentual da umidade da lenha | 111 |
| 41 | Variação percentual dos desempenhos energéticos indiretos dos casos estudados, em função da variação percentual da umidade da lenha | 112 |
| 42 | Variação percentual dos desempenhos energéticos diretos dos casos estudados, em função da variação percentual do poder calorífico da lenha | 112 |
| 43 | Variação percentual dos desempenhos energéticos indiretos dos casos estudados, em função da variação percentual do poder calorífico da lenha | 113 |

SIMBOLOGIA

- a = proporção média de celulose da madeira (%)
a = altura (m)
an = anergia específica (kJ/kg)
A = área da parede externa do sistema de combustão (m²)
b = proporção média de hemicelulose da madeira (%)
CNL = consumo nominal de lenha úmida (kg lenha úmida/h)
CNL_s = consumo nominal de lenha seca (kg lenha seca/h)
%CO₂ = teor de CO₂ dos fumos (kmol CO₂/kmol fumos)
c = proporção média de lignina da madeira (%)
cp_{ar} = calor específico do ar (kJ/kg K)
cp_{len} = calor específico da lenha (kJ/kg K)
cp_{gs} = calor específico médio dos gases secos de exaustão (kJ/kg K)
cp_{gu} = calor específico médio dos gases úmidos de exaustão (kJ/kg K)
cp_{CO₂} = calor específico de CO₂ dos gases de exaustão (kJ/kg K)
cp_{O₂} = calor específico de O₂ dos gases de exaustão (kJ/kg K)
cp_{N₂} = calor específico de N₂ dos gases de exaustão (kJ/kg K)
cp_{ag} = calor específico da água dos gases de exaustão (kJ/kg K)
Cl = fração mássica de C da lenha (kg C/kg lenha seca)
d = diâmetro (m)
e = energia específica (kJ/kg)
ex = exergia específica (kJ/kg)
ex₁ = exergia específica do fluido quente (kJ/kg fluido quente)
ex₂ = exergia específica do fluido frio (kJ/kg fluido frio)
ex_{comb} = exergia química específica de um combustível (kJ/kg)
Ex_u = exergia total útil do sistema de combustão (kJ/h)
Ex_{ap} = exergia aportada ou consumo exergético total (kJ/h)
Ex₃ = exergia total da lenha (kJ/h)
Ex₅ = exergia total dos gases de exaustão (kJ/h)
Ex_g = exergia total dos gases na câmara de combustão (kJ/h)
Ex₆ = exergia total do carvão residual (kJ/h)
Ex_{par} = exergia total perdida pelas paredes do sistema térmico (kJ/h)
Ex_s = soma das parcelas de exergia de saída Ex₅, Ex_{par} e Ex₆ (kJ/h)
Ex_{deg} = exergia total degradada (kJ/h)
Ex_{tc} = parcela da exergia degradada devido à transferência de calor em situação de grandes diferenças de temperatura (kJ/h)
Ex_{ic} = parcela da exergia degradada devido às irreversibilidades típicas da combustão (kJ/h)
Ex_f = exergia física da lenha (kJ/h)
Ex_q = exergia química da lenha (kJ/h)
h = entalpia específica do estado considerado (kJ/kg)
Hl = fração mássica de H da lenha (kg H/kg lenha seca)
h₀ = entalpia específica de referência (kJ/kg)
h₁ = entalpia específica do fluido quente (kJ/kg)

h_2 = entalpia específica do fluido frio (kJ/kg)
 h_{iv} = entalpia de vaporização da água (kJ/kg água)
 i = quantidade de paredes externas do sistema de combustão
 k = coeficiente de transferência de calor (W/m^2K)
 l = comprimento (m)
 m_a = massa absoluta de água presente na madeira (kg)
 m_{ag} = massa de água presente na lenha, em base molar (kg água/kmol lenha seca)
 m_{ms} = massa absoluta de madeira seca (kg)
 m_{ls} = massa relativa de lenha seca, em base molar da lenha (kg lenha seca/kmol lenha seca)
 m_{lu} = massa relativa de lenha úmida, em base molar da lenha (kg lenha úmida/kmol lenha seca)
 m_{car} = massa relativa de carvão residual (kg carvão/kmol lenha seca)
 m_{ar} = massa de água formada na combustão, pela reação química do hidrogênio da lenha com o oxigênio do ar de combustão (kg água/kmol lenha seca)
 m_t = massa total de madeira úmida (kg)
 m_1 = fluxo mássico de fluido quente (kg/h)
 m_2 = fluxo mássico de fluido frio (kg/h)
 m_3 = fluxo mássico de lenha (kg/h)
 m_5 = fluxo mássico de gases secos de chaminé (kg/kg lenha seca)
 m_{5u} = fluxo mássico de gases úmidos de chaminé (kg/kg lenha úmida)
 m_6 = fluxo mássico de carvão residual (kg/h)
 M_{ag} = massa ou peso molecular da água (kg água/kmol água)
 M_{ls} = massa ou peso molecular equivalente da lenha seca (kg lenha seca/kmol lenha seca)
 M_{car} = massa ou peso molecular equivalente do carvão (kg carvão/kmol carvão)
 M_{CO_2} = massa ou peso molecular de CO_2 dos gases de exaustão (kg CO_2 / kmol CO_2)
 M_{O_2} = massa ou peso molecular de O_2 dos gases de exaustão (kg O_2 /kmol O_2)
 M_{N_2} = massa ou peso molecular de N_2 dos gases de exaustão (kg N_2 /kmol N_2)
 M_{ch} = massa ou peso molecular médio dos gases de exaustão (kg/kmol gases úmidos)
 Nl = fração mássica de N da lenha (kg N/kg lenha seca)
 $n_{ag,ar}$ = número de moles de água no ar de combustão (kmol água)
 n_{ar} = número de moles total do ar úmido (kmol ar úmido)
 n_{ls} = número de moles de lenha seca (kmol lenha seca)
 $n_{ag,len}$ = número relativo de moles da água contida na lenha (kmol água/kmol lenha seca)
 n_{CO_2} = número de moles de CO_2 dos gases de exaustão (kmol CO_2)
 n_{O_2} = número de moles de O_2 dos gases de exaustão (kmol O_2)
 n_{N_2} = número de moles de N_2 dos gases de exaustão (kmol N_2)
 Ol = fração mássica de O da lenha (kg O/kg lenha seca)
 $\%O_2$ = teor de O_2 dos fumos (kmol O_2 /kmol fumos)
 p_1 = fração molar de CO_2 dos gases de exaustão secos (kmol CO_2 /kmol lenha seca)
 p_2 = fração molar de O_2 dos gases de exaustão secos (kmol O_2 /kmol lenha seca)
 p_3 = fração molar da umidade dos gases de exaustão secos (kmol água/ kmol lenha seca)
 p_4 = fração molar de N_2 dos gases de exaustão secos (kmol N_2 /kmol lenha seca)
 p_5 = fração molar do carvão residual (kmol carvão/kmol lenha seca)
 P_0 = pressão do estado de referência (kgf/cm²)
 P_1 = pressão de saída do fluido quente (kgf/cm²)
 P_2 = pressão de entrada do fluido frio (kgf/cm²)
 P_5 = pressão dos gases de exaustão (kgf/cm²)

P_{ch} = perdas de calor pela chaminé (kJ/kg lenha seca)
 P_{gs} = perdas associadas aos gases secos de exaustão (kJ/kg lenha seca)
 P_{vap} = perdas associadas ao vapor d'água na chaminé (kJ/kg lenha seca)
 P_{par} = perdas médias de calor por convecção natural através das paredes do sistema de combustão (kJ/kg lenha seca)
 P_{car} = perdas de calor associadas ao carvão residual (kJ/kg lenha seca)
 P_v = pressão parcial do vapor d'água contido no ar úmido (Pa)
 P_s = pressão de saturação da água pura (Pa)
 P_{atm} = pressão atmosférica ou barométrica (Pa)
 PC_{len} = poder calorífico genérico da lenha (kJ/kg)
 PC_{car} = poder calorífico genérico do carvão (kJ/kg)
 PCI_{comb} = poder calorífico inferior de um combustível genérico (kJ/kg)
 PCI_s = poder calorífico inferior da lenha, base seca (kJ/kg lenha seca)
 PCI_u = poder calorífico inferior da lenha, base úmida (kJ/kg lenha úmida)
 PCS_s = poder calorífico superior da lenha, base seca (kJ/kg lenha seca)
 PCS_u = poder calorífico superior da lenha, base úmida (kJ/kg lenha úmida)
 PCl_{cs} = poder calorífico inferior do carvão, base seca (kJ/kg carvão seco)
 PCl_{cu} = poder calorífico inferior do carvão, base úmida (kJ/kg carvão úmido)
 $PCSc_s$ = poder calorífico superior do carvão, base seca (kJ/kg carvão seco)
 $PCSc_u$ = poder calorífico superior do carvão, base úmida (kJ/kg carvão úmido)
 Q_u = calor total útil produzido pelo sistema de combustão (kJ/h)
 Q_3 = calor total da lenha (kJ/h)
 Q_{par} = fluxo médio de calor através das paredes, por convecção natural (kJ/h)
 q = fluxo de calor por convecção natural (W)
 q_3 = calor fornecido pela lenha (kJ/kg)
 r_2 = número de moles do conteúdo de umidade da lenha (kmol água/kmol lenha seca)
 r_3 = número de moles do ar estequiométrico, úmido, de combustão (kmol ar/kmol lenha seca)
 r_4 = número de moles da cinza da lenha (kmol cinza/kmol lenha seca)
 R = constante universal dos gases (8,314 kJ/kmol K)
 R_{ar} = constante do ar (0,2871 kJ/kg K)
 R_{ch} = constante dos gases úmidos de exaustão (kJ/kmol K)
 s = entropia específica do estado considerado (kJ/kg K)
 s_0 = entropia específica do estado de referência (kJ/kg K)
 s_1 = entropia específica do fluido quente (kJ/kg K)
 s_2 = entropia específica do fluido frio (kJ/kg K)
 T_0 = temperatura do estado de referência (K)
 T_1 = temperatura do fluido quente (K)
 T_2 = temperatura do fluido frio (K)
 T_3 = temperatura da lenha (K)
 T_5 = temperatura dos gases de exaustão (K)
 T_{mp} = temperatura média de parede (K)
 T_t = temperatura média termodinâmica (K)
 T_{ef} = temperatura efetiva de chama (K)
 UR = umidade relativa do ar ou teor molar da umidade do ar (kmol água/ kmol O_2)
 x = número de moles de carbono na fórmula molecular equivalente da lenha seca (kmol C/ kmol lenha seca)
 x_1 = número de moles de carbono da celulose ou da hemicelulose (kmol C/kmol celulose ou hemicelulose)

x_2 = número de moles de carbono da lignina (kmol C/kmol lignina)
 x' = número de moles de carbono na fórmula molecular equivalente do carvão residual (kmol C/kmol carvão)
 X_{gu} = umidade absoluta molar dos gases de exaustão úmidos (kmol água/kmol gases úmidos)
 w_{len} = conteúdo de umidade da lenha, em base úmida (kg água/kg lenha úmida)
 w_{car} = conteúdo de umidade do carvão, em base úmida (kg água/kg carvão)
 y = número de moles de hidrogênio na fórmula molecular equivalente da lenha seca (kmol H/kmol lenha seca)
 y_1 = número de moles de hidrogênio da celulose ou da hemicelulose (kmol H/kmol celulose ou hemicelulose)
 y_2 = número de moles de hidrogênio da lignina (kmol H/kmol lignina)
 y' = número de moles de hidrogênio na fórmula molecular equivalente do carvão residual (kmol H/kmol carvão)
 y_{CO_2} = fração molar de CO_2 dos gases de exaustão (kmol CO_2 /kmol gases úmidos)
 y_{O_2} = fração molar de O_2 dos gases de exaustão (kmol O_2 /kmol gases úmidos)
 y_{N_2} = fração molar de N_2 dos gases de exaustão (kmol N_2 /kmol gases úmidos)
 y_{H_2O} = fração molar de H_2O dos gases de exaustão (kmol H_2O /kmol gases úmidos)
 $y_{CO_2}^0$ = fração molar de CO_2 no ambiente de referência (kmol CO_2 /kmol gases úmidos)
 $y_{O_2}^0$ = fração molar de O_2 no ambiente de referência (kmol O_2 /kmol gases úmidos)
 $y_{N_2}^0$ = fração molar de N_2 no ambiente de referência (kmol N_2 /kmol gases úmidos)
 $y_{H_2O}^0$ = fração molar de H_2O no ambiente de referência (kmol H_2O /kmol gases úmidos)
 z = número de moles de oxigênio na fórmula molecular equivalente da lenha seca (kmol O/kmol lenha seca)
 z_1 = número de moles de oxigênio da celulose ou da hemicelulose (kmol O/kmol celulose ou hemicelulose)
 z_2 = número de moles de oxigênio da lignina (kmol O/kmol lignina)
 z' = número de moles de oxigênio na fórmula molecular equivalente do carvão residual (kmol O/kmol carvão)

Alfabeto Grego:

λ = coeficiente de excesso de ar
 τ = número de moles de nitrogênio em relação ao oxigênio do ar (kmol N_2 /kmol O_2)
 α = número de moles de água em relação ao oxigênio do ar (kmol água/kmol O_2)
 σ = número de moles de água no ar de combustão úmido (kmol água/kmol ar úmido)
 χ = teor molar de carvão residual (kmol carvão/kmol lenha úmida)
 ε_3 = relação entre a exergia química específica da lenha e seu poder calorífico inferior
 ε_6 = relação entre a exergia química específica do carvão e seu poder calorífico inferior
 η = fração do calor da lenha incorporada pelo fluido de trabalho (%)
 τ = fração do calor da lenha perdida pelas paredes do sistema (%)
 β = fração do calor da lenha perdida através do carvão (%)
 η_d = desempenho energético, método direto (%)
 η_i = desempenho energético, método indireto (%)
 ϕ_d = desempenho exergético, método direto (%)
 ϕ_i = desempenho exergético, método indireto (%)

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma metodologia de cálculo do desempenho de sistemas térmicos a lenha com base na oxidação agregada da celulose, hemicelulose e lignina, os três elementos principais de constituição da parede celular vegetal. Considera-se também a parcela de carvão não convertido contido nas cinzas e os conteúdos de umidade da lenha, do ar de combustão e do resíduo carbonífero formado. Para tanto, desenvolveram-se critérios de desempenho fundamentados na Primeira e na Segunda Leis da Termodinâmica, através do método exergético. Além disso, os desempenhos foram obtidos segundo duas vertentes distintas de dados: através do método direto, alicerçado na avaliação do efeito útil, e do método indireto, a partir de medições das perdas.

Um sistema de combustão hipotético foi estudado para se verificar a sensibilidade do desempenho em relação às suas principais grandezas características. Em sistemas reais, analisaram-se cinco caldeiras de pequeno porte, pertencentes a unidades industriais em operação produtiva normal. Da análise energética, conclui-se que o desempenho pode apresentar valores distorcidos quando comparados com padrões de literatura, em decorrência da operação tipicamente variável dos sistemas e da impossibilidade comum de obtenção de medidas simultâneas de grandezas utilizando-se instrumentos portáteis. A análise exergética demonstrou que, para o caso de sistemas térmicos de pequeno porte, o desempenho apresenta-se muito baixo, podendo-se inclusive assumir valores negativos, sem sentido físico, devido principalmente aos valores superestimados das perdas desses sistemas.

ABSTRACT

This work presents a procedure for thermal systems performance calculation fueled by firewood based on the aggregated oxidation of the cellulose, hemicellulose and lignin, which are the three main constituents of the vegetable cell wall. The non-converted charcoal portion presented in the ash and moisture contents of firewood, air combustion and carbon residue are also take into account. The procedure was based on the fundamentals of First and Second Laws of Thermodynamics, using the exergy concept. In addition, the performances were judged by the direct method, based on the analysis of useful effect, and the indirect method, by losses measurement.

An hypothetical combustion system was studied in order to verify the performance sensibility relative to its main thermal parameters. Analysis of real systems comprised of five boilers of small capacity, all belonged to industries in normal operation were carried out. The energetic analysis has shown unusual values of performance when compared with standard ones of literature, due to typically variable operation of these systems and the impossibility of obtaining simultaneous measurements of the variables by portable instruments. The exergetic analysis has demonstrated the performance of small capacity thermal systems is very low. Some negative values may be calculated, without physical meaning due to overestimated values of losses in these combustion systems.

INTRODUÇÃO

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1 - INTRODUÇÃO

O conceito de desempenho ou eficiência é de suma importância para a análise de sistemas de combustão, pois constitui-se num parâmetro referencial do grau de aproveitamento da fonte energética empregada no intuito de se produzir um efeito útil desejado. Medir, avaliar, acompanhar e controlar índices de eficiência serão sempre atividades fundamentais para o uso racional de energia.

Normalmente, expressa-se o desempenho de sistemas de combustão em função do Primeiro Princípio da Termodinâmica, qual seja o Princípio de Conservação da Energia, e é comum a base de cálculo diferir entre autores. Por exemplo, é sempre questionável qual o efeito útil, ou se deve ser usado o poder calorífico inferior ou superior.

Com isso, não é tão simples julgar um sistema de combustão levando-se em conta apenas um dado índice de desempenho, e mais difícil torna-se a missão de comparar sistemas de combustão etiquetados cada qual com um valor percentual de desempenho, os quais podem ter sido tratados sob pontos de vista diferentes. Por exemplo: um deles considera a influência do conteúdo de umidade do ar de combustão e do combustível, enquanto outro contempla somente o conteúdo de umidade do combustível, rejeitando a parcela do ar por presumir desprezível sua participação no processo térmico.

Diante dessas e de outras divergências de concepção existentes no meio técnico e científico, cabe buscar respostas concretas a indagações do tipo: Será que a variação do conteúdo de umidade do ar de combustão ou da parcela de carvão residual presente nas cinzas afetará de tal forma o desempenho que se deve incontinentemente considerá-los para efeito de cálculo, ou sua inclusão na equação do desempenho será tida como mero preciosismo, devido à não representatividade na magnitude do resultado final dos cálculos? Será que a espécie e a idade da árvore alterarão o resultado do modelamento matemático estabelecido para o desempenho? A condição ambiente em que se encontram os equipamentos térmicos tem alguma importância?

O objetivo do presente trabalho é promover uma investigação científica minuciosa a respeito de sistemas de combustão que utilizam lenha como energético, propondo-se a apresentar uma rotina de cálculo do desempenho e, de algum modo, dar resposta aos questionamentos anteriores. Dois métodos são abordados e suas características e resultados comparados, gerando-se uma série de expressões matemáticas para o cálculo do desempenho, à luz tanto da 1ª Lei da Termodinâmica, como também da combinação desta com a 2ª Lei da Termodinâmica, através do método exergético.

Foi executado um trabalho de campo em algumas unidades industriais localizadas nos municípios de Itajubá-MG e Fortaleza-CE, na intenção de gerar as informações requeridas pelo modelamento matemático, em situação real de regime dos equipamentos térmicos analisados. Assim é possível testar a operacionalidade do programa computacional criado para avaliar desempenhos e a conseqüente visualização dos valores finais de cada expressão. Com isso, facilita-se a escolha da expressão mais significativa dentre aquelas deduzidas, ou seja, auxilia-se efetivamente a selecionar o índice de desempenho que melhor indique a margem de aperfeiçoamento dos sistemas de combustão a lenha.

Considera-se aqui a equação de combustão da lenha com base na oxidação de seus principais constituintes da parede celular: celulose, hemicelulose e lignina. Leva-se em conta também, a parcela de carvão não convertido contido nas cinzas, assim como o conteúdo de umidade do ar de combustão e o da lenha.

Espera-se contribuir com este trabalho, para a padronização da metodologia do cálculo do desempenho de sistemas de combustão a lenha, lembrando sempre que as simplificações eventualmente adotadas neste documento buscam unicamente descomplicar a etapa de levantamento de informações sobre as variáveis condicionantes de processo, facilitando a ação do agente interessado na mensuração do desempenho, sem muito ou nenhum prejuízo em relação à situação real de operação dos sistemas. Nesse sentido, deve-se observar que há considerável restrição na maioria das empresas que consomem lenha, quanto à aquisição de instrumentos necessários à medição de todas as variáveis identificadas nos processos térmicos. Somente aquelas medições consideradas imprescindíveis foram mantidas, apesar de algumas delas apresentarem dificuldades naturais de obtenção.

Do uso adequado e racional de seus recursos naturais a Nação brasileira depende fortemente para a consecução de seus propósitos. Conhecer, diagnosticar e propor medidas efetivas de aperfeiçoamento dos sistemas de combustão de lenha são ações neste sentido.

2 - A LENHA COMO COMBUSTÍVEL

Introdução

A energia representa um elemento essencial requerido pelas atividades humanas, seja sejam elas de subsistência ou produtivas. Assim, o consumo da lenha para obtenção de energia vem desde o tempo em que o Homem conseguiu dominar o fogo. Esta substância figura como o combustível primordial da humanidade, ganhando forte importância com a Revolução Industrial. Ainda hoje, em muitos países tropicais, a lenha continua a fornecer a maior parte das exigências energéticas da população para o preparo de alimentos, aquecimento e processamento de produtos primários.

Porém, com a forte demanda de lenha associada à produção de energia elétrica nos primórdios da Revolução Industrial, foram iniciadas as pesquisas de alternativas na Europa, obrigando a adoção dos combustíveis fósseis. Nos países em desenvolvimento, porém, a lenha continua a ser o principal combustível utilizado. O período de transição para o uso de combustíveis fósseis a sustentar o desenvolvimento dos países ricos, marcando uma mudança nos padrões tecnológicos que visavam ao melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Nesse período, a lenha e outros biomassa foram considerados combustíveis primitivos. A combinação dos combustíveis fósseis, com o melhor aproveitamento do maior poder calorífico e a facilidade de utilização, possibilitou a adoção de sistemas de geração térmica modernos, compatíveis com os padrões tecnológicos exigidos pelo desenvolvimento energético. Durante sua industrialização, houve interesse e adoção de lenha e biomassa bastante grande, substituindo os sistemas primitivos de geração térmica tradicionais. Porém, devido ao custo elevado dos combustíveis oriundos da destilação, fracionamento da petróleo, a produção de energia elétrica não decresceu.

Atualmente, na década de 70, o aumento acelerado do consumo e a redução da produção de energia, levaram à política energética para países produtores de petróleo de grande potencial, gerando forte preocupação no campo energético. Este período originou séries de pesquisas nos países desenvolvidos de energia essencialmente autóctones, visando a obtenção de energia elétrica a partir de fontes renováveis. Para isso, foram desenvolvidos programas de pesquisa e desenvolvimento para a obtenção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, visando a obtenção de energia elétrica a partir de fontes renováveis.

Capítulo 2

A LENHA COMO COMBUSTÍVEL

Este capítulo trata da importância da lenha como combustível e da sua utilização em diferentes setores da economia. A lenha é um recurso renovável e de fácil obtenção, sendo utilizada principalmente para a produção de energia elétrica e para o aquecimento de ambientes. A utilização da lenha como combustível é uma prática comum em muitos países, especialmente em áreas rurais e em países em desenvolvimento. A lenha é um recurso renovável e de fácil obtenção, sendo utilizada principalmente para a produção de energia elétrica e para o aquecimento de ambientes. A utilização da lenha como combustível é uma prática comum em muitos países, especialmente em áreas rurais e em países em desenvolvimento.

2 - A LENHA COMO COMBUSTÍVEL

2.1 - Aspectos Gerais

A energia representa um insumo essencial requerido pelas atividades humanas, quer sejam elas de subsistência ou produtivas. Assim, o emprego da lenha¹ como fonte de energia vem desde o tempo em que o Homem conseguiu dominar o fogo. Durante milênios figurou como o combustível primordial da humanidade, ganhando forte impulso a partir da Revolução Industrial. Ainda hoje, em vários países tropicais, a biomassa florestal² fornece a maior parte das exigências energéticas da população quanto a cocção de alimentos, aquecimento e processamento de matérias-primas.

Porém, com a forte demanda de lenha associada à produção de carvão vegetal e vapor nos primórdios da Revolução Industrial, foram exauridas as reservas de biomassa disponíveis na Europa, obrigando a exploração dos combustíveis fósseis, conhecidos há milênios mas até então pouco utilizados. O petróleo e o carvão mineral passaram então a sustentar o desenvolvimento dos países ricos, merecendo, pois, posição de destaque nos estudos tecnológicos que visavam ao melhor aproveitamento da capacidade termo-energética. Nesse período, a lenha e outras biomassas ficaram tecnologicamente abandonadas. A concorrência dos combustíveis fósseis, tecnicamente preferidos devido ao maior poder calorífico e à facilidade de utilizações específicas, era muito forte. Assim, para estar de acordo com o modelo tecnológico desenvolvimentista vigente, era imperativo adotar sistemas de geração térmica modernos, compatíveis com as exigências naturais daqueles energéticos nobres, de alta densidade energética.

No Brasil, durante sua industrialização, houve inclusive a aplicação de incentivos fiscais e financeiros bastante atrativos, institucionalizados por agentes governamentais, beneficiando sobremaneira o empresário industrial que optasse pela conversão de seus sistemas de geração térmica tradicionais. Foram tempos de oferta abundante de combustíveis oriundos da destilação fracionada do petróleo, a preços estáveis, quando não decrescentes.

Entretanto, na década de 70, o aumento acentuado do consumo e a relativa estagnação da oferta de energia, aliados à política radicalizada pelos países produtores e exportadores de petróleo em potencial, geraram fortes incrementos na cotação internacional do petróleo, originando sérias preocupações nos países dependentes da sua importação, essencialmente aqueles pertencentes ao mundo ocidental, cuja economia foi profundamente afetada. Particularmente os países em desenvolvimento foram duramente penalizados pela alta incontida do preço do petróleo, passando a enfrentar enormes dificuldades na obtenção de energia suficiente para atender suas necessidades básicas.

Frente a esse cenário difícil, estabelecido pela política energética mundial, o Brasil envidou esforços específicos para combater a crise do petróleo deflagrada. Um deles foi o estímulo à substituição de fontes energéticas importadas por alternativas regionais, dando origem a projetos pioneiros, de tecnologia nacional, como o Proálcool.

¹ Conceitua-se lenha, as achas (porções) do cerne (tronco) e as ramificações principais (galhos, de maior diâmetro) de árvores, destinadas a servir de combustível; e madeira, um termo genérico para o cerne de árvores destinado a finalidades energéticas ou industriais, como a indústria do mobiliário, a indústria da construção civil e naval, etc.

² Conceitua-se biomassa florestal, todo material resultante da exploração comercial da árvore, ou seja, o cerne, as ramificações principais e os resíduos florestais (demais ramificações, casca, copa e raízes)

No segmento industrial, observou-se uma forte tendência de volta às origens, ou seja, permuta de derivados de petróleo por lenha, uma das principais fontes alternativas e renováveis de energia potencialmente disponíveis em todas as regiões nacionais. Assim, era a atividade florestal que ganhava impulso com o advento de incentivos fiscais, paradoxalmente à política fiscal implementada na década anterior, que contemplava os combustíveis líquidos derivados de petróleo. Retomaram-se, então, os estudos técnicos para o uso termicamente eficiente da biomassa florestal, cuja tecnologia energética progredira pouco, geralmente associada à produção de madeira para celulose.

Atenta à essa realidade, a indústria nacional de equipamentos térmicos passou a aperfeiçoar os seus modelos, objetivando obter melhores desempenhos das instalações e controle de processos, considerando o uso da lenha e resíduos de biomassa.

Outro impacto energético mundial veio nos anos 80, causado pelo confronto armado Irã-Iraque, no Golfo Pérsico. A "guerra fria" foi fator dominante do cenário político, instabilizando novamente o preço do petróleo e gerando incertezas na sua oferta.

Dessa vez, porém, o País não foi surpreendido como antes. A produção interna de petróleo e as reservas de seus derivados eram razoáveis. Além do mais, boa parte do segmento industrial já havia absorvido a política de conservação de energia e substituição de derivados de petróleo por alternativas nacionais. Tinha-se notícia de que várias indústrias já haviam consagrado a lenha e outras biomassas como fontes térmicas renováveis em seus processos produtivos.

A década de 90 iniciou com preços relativamente baixos e recursos abundantes de petróleo. Mas, não demorou muito e outro conflito armado no Golfo Pérsico inquietaria a situação mundial de oferta do petróleo. Dessa vez, os protagonistas foram o Iraque e os chamados Países Aliados, estes liderados pelos Estados Unidos, sob aprovação da Organização das Nações Unidas - ONU, em virtude da invasão do Kuwait pelas forças armadas do Iraque, na segunda metade de 1990. A conflagração durou muito pouco, e a vitória dos aliados garantiu o início da retomada dos preços e do fornecimento do petróleo.

É interessante observar que sempre que ocorre estabilização ou mesmo retração de preço e boa oferta de petróleo no mercado internacional, inicia-se um processo de inviabilização econômica de projetos de energia alternativa, tornando-os menos competitivos, o que implica em desencorajamento e abandono de seus objetivos. A lenha faz parte desse contexto, aparecendo em destaque evidentemente devido aos elevados custos de implantação, exploração e manutenção das chamadas florestas energéticas.

Não obstante, as disponibilidades de solo e clima adequados e a evolução tecnológica dos equipamentos de uso energético da biomassa recolocaram as perspectivas para esse vetor na matriz energética brasileira, acredita-se de forma irreversível.

2.2 A Importância do Consumo de Lenha no Brasil

Antes de iniciar a análise da demanda nacional de lenha, cabe esclarecer que os dados históricos foram retirados integralmente do Balanço Energético Nacional - BEN publicado, pelo Ministério das Minas e Energia, em dois anos distintos: 1988 e 1992.

Utilizou-se o BEN/92 por ser o mais recente disponível na época da elaboração deste estudo, contendo dados referentes ao período de 1976 a 1991, inclusive incorporando alterações decorrentes da revisão de séries históricas. Já o BEN/88 apresenta dados desde 1970 (próximo ao início da "crise do petróleo") até 1987. Por não ter sido submetido à mesma revisão estabelecida no BEN/92, observa-se que há divergência entre os valores representativos do uso da lenha em todos os anos interseccionais entre eles. Por exemplo, o consumo de lenha no país, em 1976, foi registrado em 102.522 t pelo BEN/88, enquanto o BEN/92 fornece o valor de 102.886 t.

Resolveu-se, então, adotar a seguinte metodologia: aproveitar os dados de 1970 a 1975 do BEN/88, essencialmente porque mostra o comportamento de consumo de energia durante o primeiro grande impacto político-econômico do petróleo, compilando do BEN/92 os dados de 1976 a 1991, indispensáveis à análise comportamental histórica.

A participação da lenha na matriz energética brasileira vem se retraindo sistematicamente ao longo dos anos, conforme aponta a Tabela 1. Nela pode-se verificar que a lenha representava 42,6% da demanda nacional de fontes energéticas primárias³ em 1970, diminuindo para 14,6% em 1991. Isso significa 65,7% de redução participativa no mercado energético nacional, embora o valor do consumo tenha se reduzido em 15% nesses 22 anos. Até mesmo a crise do petróleo evidenciada em 1973 não foi capaz de gerar um acréscimo significativo de consumo de lenha, apesar das fortes tendências de seu emprego como energético substituto dos derivados de petróleo nos segmentos industriais.

A Figura 1 mostra o comportamento das curvas características das fontes energéticas primárias do período 1970-1991. Vê-se a tendência de queda do consumo de lenha, em oposição à tendência de elevação do consumo das demais fontes. Aparece em realce a energia hidráulica, que em 1970 representava 15,5% de toda a energia consumida no país, passando em 1991 a representar 34,3%, ocupando então a posição de energético mais consumido nacionalmente; posição essa assumida já a partir do ano anterior.

Por sua vez, a Figura 2 apresenta três estágios distintos da participação da lenha no consumo interno de energia primária renovável. No primeiro, em 1970, a lenha se destacava com 67,5%, enquanto a energia hidráulica representava 24,5%, contra os 8% restantes das outras biomassas. Em 1979, houve um quase empate técnico entre a lenha (44%) e a energia hidráulica (44,5%), ficando o grupo das demais biomassas em terceiro lugar com 11,5%, porém já sentindo a ascensão de consumo proporcionado pela presença dos produtos derivados da cana-de-açúcar, cujas tecnologias de obtenção e uso consolidaram-se no Brasil, com repercussão mundial positiva. No último ano das séries históricas, verifica-se a supremacia da energia hidráulica (56,5%) em relação à lenha (24,1%) e a proximidade participativa existente entre a lenha e o grupo das outras biomassas (18,5%), este basicamente representado pelos derivados da cana-de-açúcar (89,7%, o que equivale a 19.522×10^3 tEP).

³ Providas pela natureza na sua forma direta: lenha, petróleo, gás natural, carvão mineral, energia hidráulica, etc.

TABELA 1
Consumo total de fontes energéticas primárias (1970-1991)

| A N O | ENERGIA PRIMÁRIA RENOVÁVEL | | | | | | ENERGIA PRIMÁRIA NÃO RENOVÁVEL | | | | TOTAL 10 ³ tEP |
|-------------|----------------------------|------|---------------------|------|---------------------|------|--------------------------------|------|---------------------|-----|------------------------------|
| | Biomassa | | | | Energia Hidráulica | | Petróleo | | Outras | | |
| | Lenha ^(*) | | Outras | | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | |
| | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | | | | | | | |
| 1970 | 31.789 | 42,6 | 3.757 | 5,0 | 11.542 | 15,5 | 25.060 | 33,6 | 2.507 | 3,3 | 74.655 |
| 71 | 31.809 | 41,1 | 4.003 | 5,2 | 12.528 | 16,2 | 26.425 | 34,1 | 2.632 | 3,4 | 77.397 |
| 72 | 32.012 | 37,4 | 4.519 | 5,2 | 14.697 | 17,2 | 31.710 | 37,0 | 2.700 | 3,2 | 85.638 |
| 73 | 31.520 | 33,6 | 4.867 | 5,2 | 16.788 | 17,9 | 37.866 | 40,4 | 2.691 | 2,9 | 93.732 |
| 74 | 32.191 | 32,6 | 4.879 | 4,9 | 19.047 | 19,3 | 39.793 | 40,3 | 2.932 | 2,9 | 98.842 |
| 75 | 32.739 | 31,0 | 4.463 | 4,2 | 20.963 | 19,9 | 43.994 | 41,7 | 3.417 | 3,2 | 105.576 |
| 76 | 31.483 | 28,3 | 5.068 | 4,5 | 24.045 | 21,6 | 46.794 | 42,0 | 3.958 | 3,6 | 111.348 |
| 77 | 30.436 | 26,0 | 6.880 | 5,9 | 27.109 | 23,1 | 47.902 | 40,9 | 4.809 | 4,1 | 117.136 |
| 78 | 29.422 | 23,4 | 7.718 | 6,1 | 29.796 | 23,7 | 53.405 | 42,5 | 5.425 | 4,3 | 125.766 |
| 79 | 29.995 | 22,4 | 8.877 | 6,6 | 33.808 | 25,2 | 55.577 | 41,4 | 5.905 | 4,4 | 134.162 |
| 1980 | 30.695 | 22,1 | 10.077 | 7,3 | 37.383 | 26,9 | 54.319 | 39,2 | 6.286 | 4,5 | 138.760 |
| 81 | 30.034 | 21,8 | 11.035 | 8,0 | 37.922 | 27,5 | 52.478 | 38,1 | 6.443 | 4,6 | 137.912 |
| 82 | 28.745 | 20,0 | 12.998 | 9,0 | 40.928 | 28,6 | 51.856 | 36,3 | 8.511 | 6,0 | 143.038 |
| 83 | 29.855 | 20,0 | 16.235 | 10,8 | 43.928 | 29,4 | 50.905 | 34,1 | 8.550 | 5,7 | 149.473 |
| 84 | 32.922 | 20,1 | 17.750 | 10,8 | 48.312 | 29,5 | 54.124 | 33,1 | 10.570 | 6,5 | 163.678 |
| 85 | 32.513 | 19,0 | 20.140 | 11,8 | 51.729 | 30,2 | 54.580 | 31,9 | 12.221 | 7,1 | 171.183 |
| 86 | 32.356 | 18,5 | 18.531 | 10,6 | 52.902 | 30,2 | 58.081 | 33,2 | 13.247 | 7,5 | 175.117 |
| 87 | 32.367 | 17,8 | 22.038 | 12,1 | 53.824 | 29,5 | 59.460 | 32,6 | 14.579 | 8,0 | 182.268 |
| 88 | 32.158 | 17,5 | 20.485 | 11,1 | 57.737 | 31,4 | 59.570 | 32,4 | 14.056 | 7,6 | 184.006 |
| 89 | 32.541 | 17,6 | 19.943 | 10,8 | 59.360 | 32,0 | 59.771 | 32,2 | 13.800 | 7,4 | 185.415 |
| 1990 | 28.180 | 15,6 | 20.041 | 11,0 | 59.945 | 33,0 | 59.915 | 33,0 | 13.402 | 7,4 | 181.483 |
| 91 | 27.021 | 14,6 | 21.775 | 12,0 | 63.157 | 34,3 | 56.726 | 30,8 | 15.359 | 8,3 | 184.108 |

FORNTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

(*) Inclusive carvão vegetal.

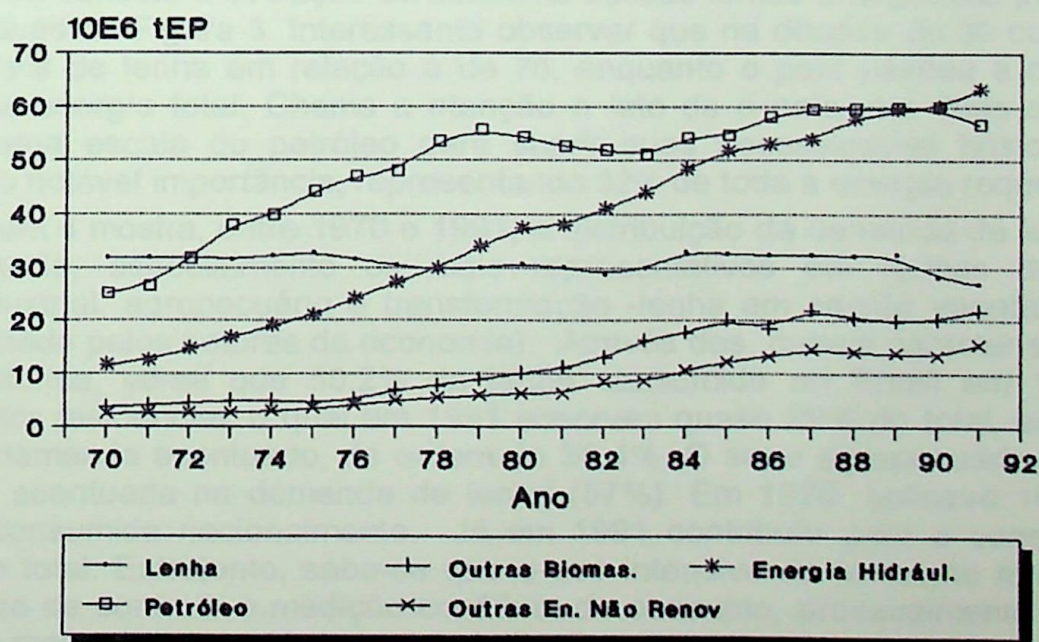


FIGURA 1 - Consumo total de fontes energéticas primárias (1970-1991)
FORNTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

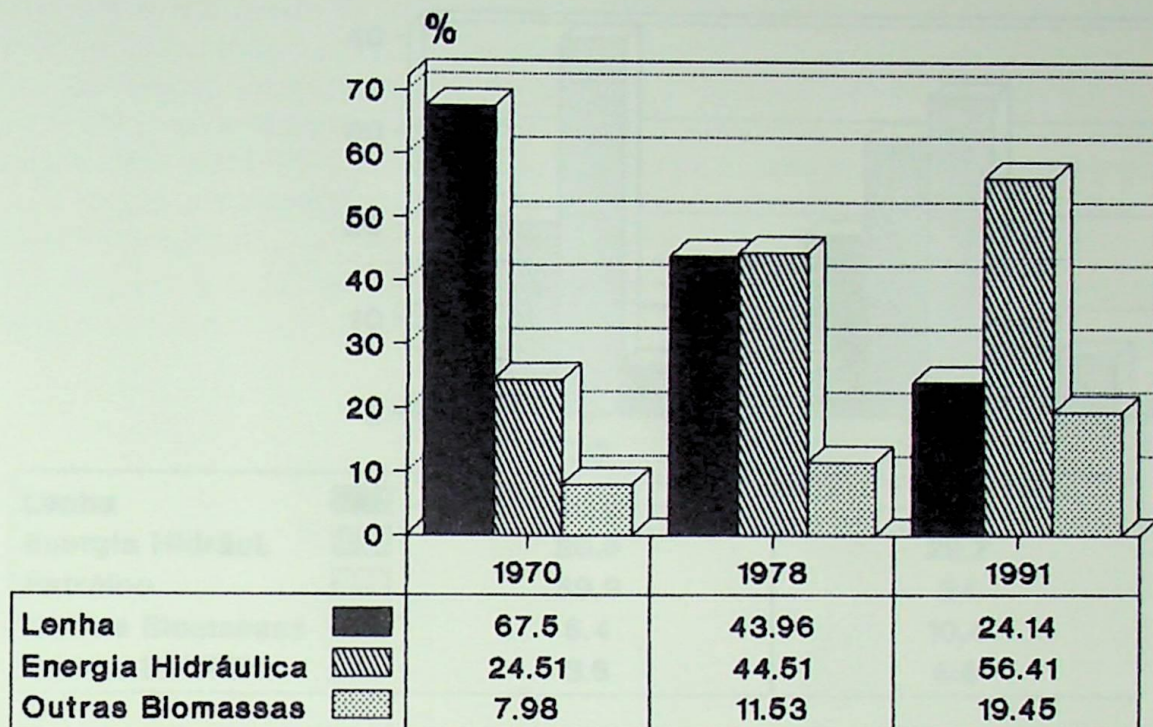


FIGURA 2 - Participação da lenha na demanda de energia primária renovável
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Pode-se verificar a evolução do consumo dessas fontes energéticas primárias, por década, através da Figura 3. Interessante observar que na década de 80 consumiu-se só 10,25% mais de lenha em relação à de 70, enquanto o país passou a consumir 59,2% a mais de energia total. Chama a atenção o fato de o país, em duas décadas, depender em larga escala do petróleo para suprir suas necessidades básicas, e a biomassa ter tido notável importância, representando 32% de toda a energia requerida.

A Figura 4 mostra, entre 1970 e 1991, a distribuição da demanda de lenha por setor da economia, especialmente os mais representativos em termos de uso (residencial, industrial, agropecuário e transformação -lenha em carvão vegetal, que é totalmente absorvido pelos setores da economia). Através das curvas características de cada série histórica, vê-se que 59,2% da lenha consumida no Brasil em 1970 foi destinada ao setor residencial, o qual em 1991 absorveu quase 29% do total, acusando um declínio de demanda acentuado, da ordem de 58,4%. O setor agropecuário também registrou queda acentuada na demanda de lenha (57%). Em 1970, aplicava 15,2% da lenha que era consumida nacionalmente. Já em 1991 contribuiu para o consumo de apenas 7,7% do total. Entretanto, sabe-se que o uso intensivo da lenha no meio rural, sem possibilidade de controle e medição confiável de consumo, provavelmente tornaria sua participação maior do que a efetivamente indicada.

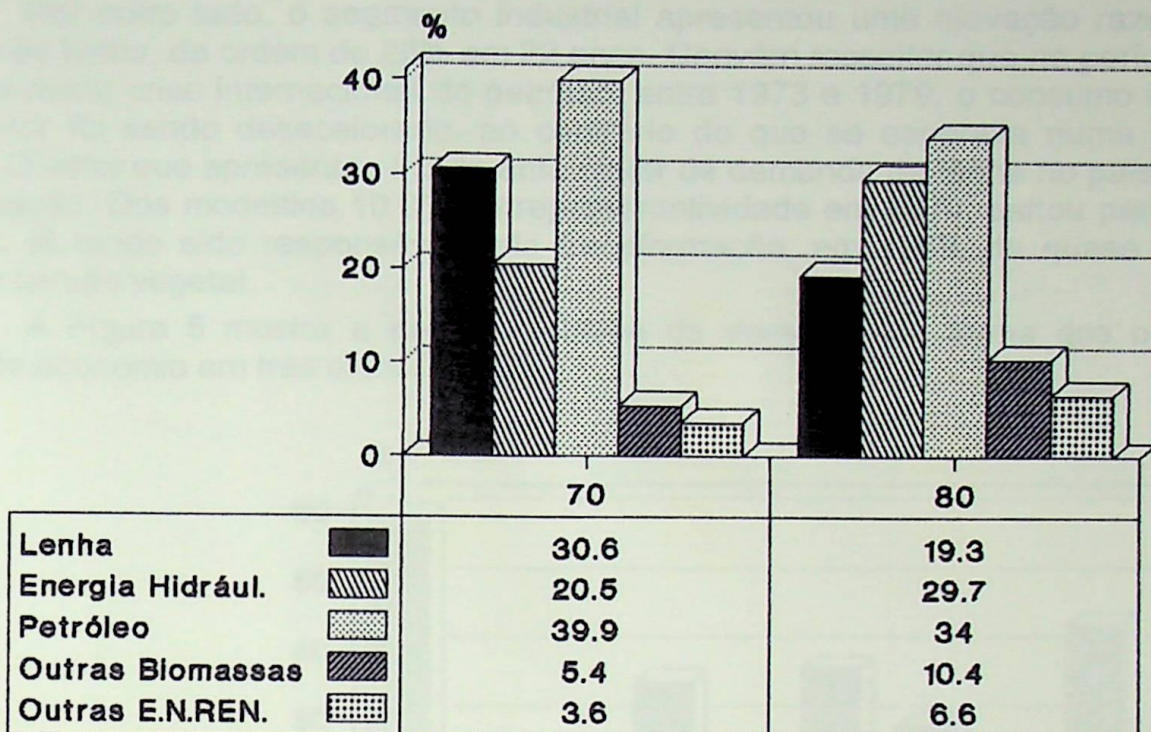


FIGURA 3 - Representatividade das fontes energéticas primárias (por década- 70/80)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

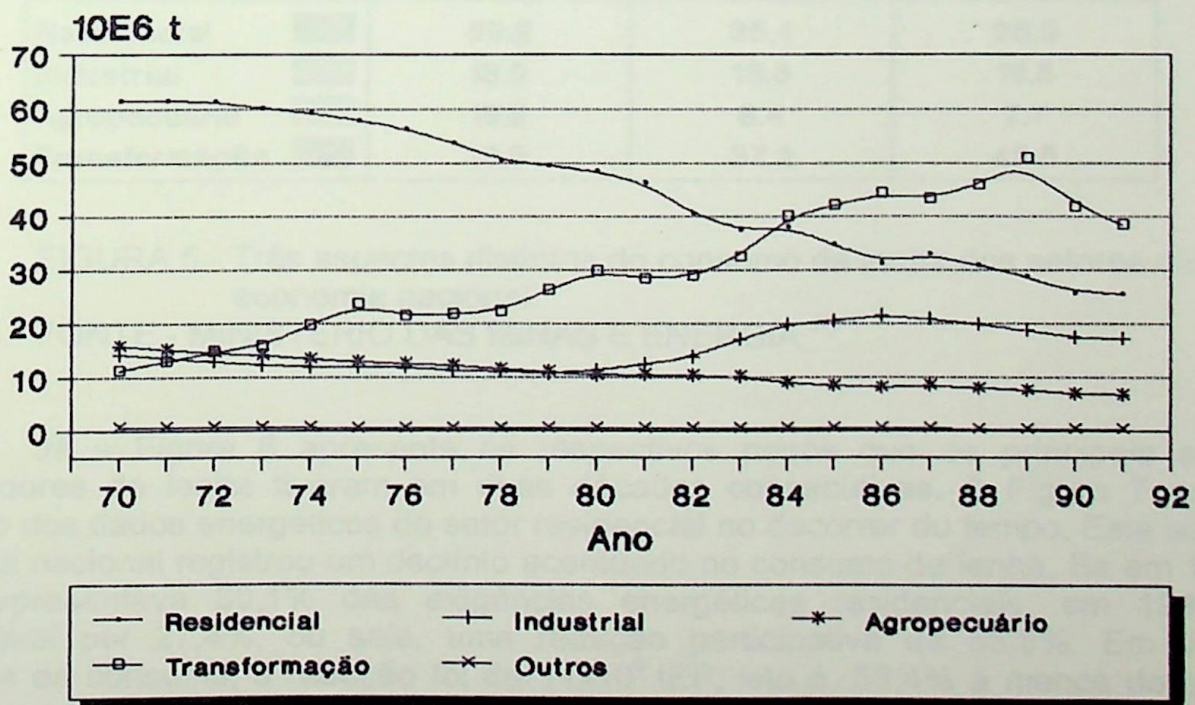


FIGURA 4 - Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (1970-1991)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Por outro lado, o segmento industrial apresentou uma elevação razoável no consumo de lenha, da ordem de 20% em 22 anos. Convém ressaltar que no período mais crucial da maior crise internacional do petróleo, entre 1973 e 1979, o consumo de lenha nesse setor foi sendo desacelerado, ao contrário do que se esperava numa situação daquela. O setor que apresentou incremento maior de demanda de lenha no país foi o de transformação. Dos modestos 10,9% de representatividade em 1970, saltou para 43,5% em 1991; já tendo sido responsável pela transformação, em 1989, de quase 48% da lenha em carvão vegetal.

A Figura 5 mostra a posição relativa da demanda de lenha dos principais setores da economia em três anos distintos.

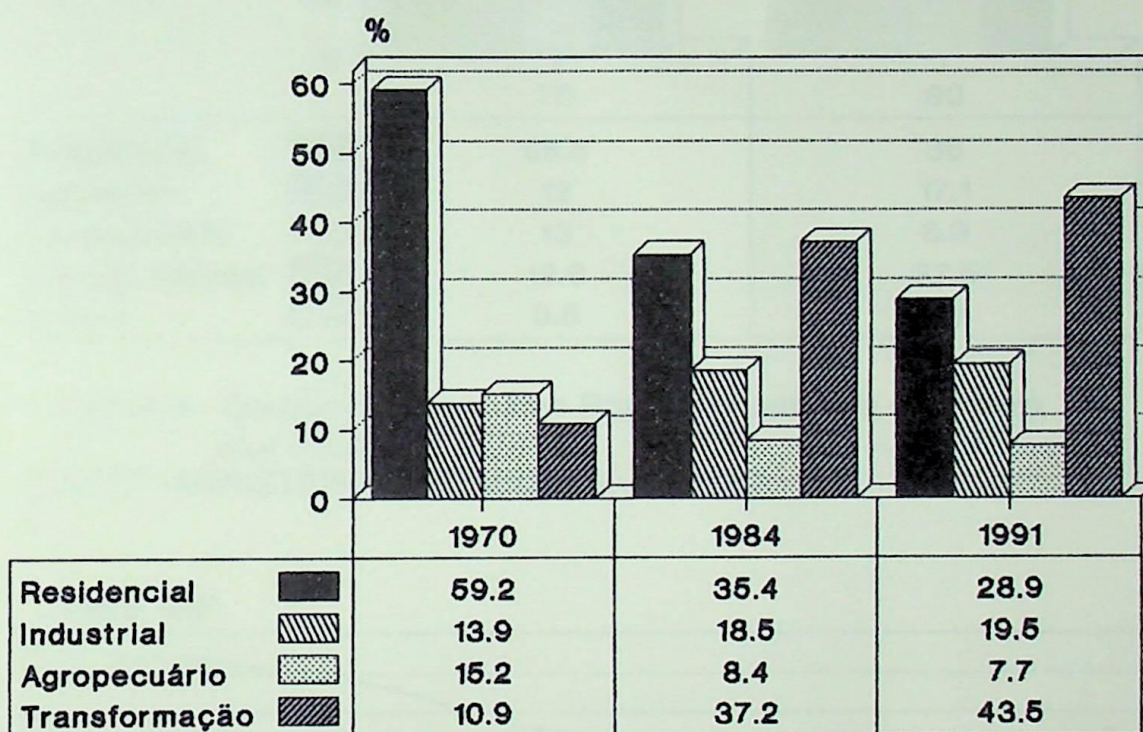


FIGURA 5 - Três aspectos distintos do consumo de lenha dos setores da economia nacional.

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Já a Figura 6 apresenta os respectivos pesos que os principais setores consumidores de lenha tiveram em duas décadas consecutivas. A Figura 7 exhibe a flutuação dos dados energéticos do setor residencial no decorrer do tempo. Este setor da economia nacional registrou um declínio acentuado no consumo de lenha. Se em 1970 a lenha representava 80,1% das exigências energéticas residenciais, em 1991 era responsável por 27,4%, ou seja, uma redução participativa de 65,8%. Em valores absolutos de consumo, a redução foi de 11×10^6 tEP, isto é, 58,4% a menos do que se consumia em 1970. Observa-se que em 1986 a eletricidade superou a lenha em demanda, e o gás liquefeito de petróleo- GLP, ou simplesmente gás de cozinha recebeu incrementos de demanda, porém em menor proporção que a eletricidade.

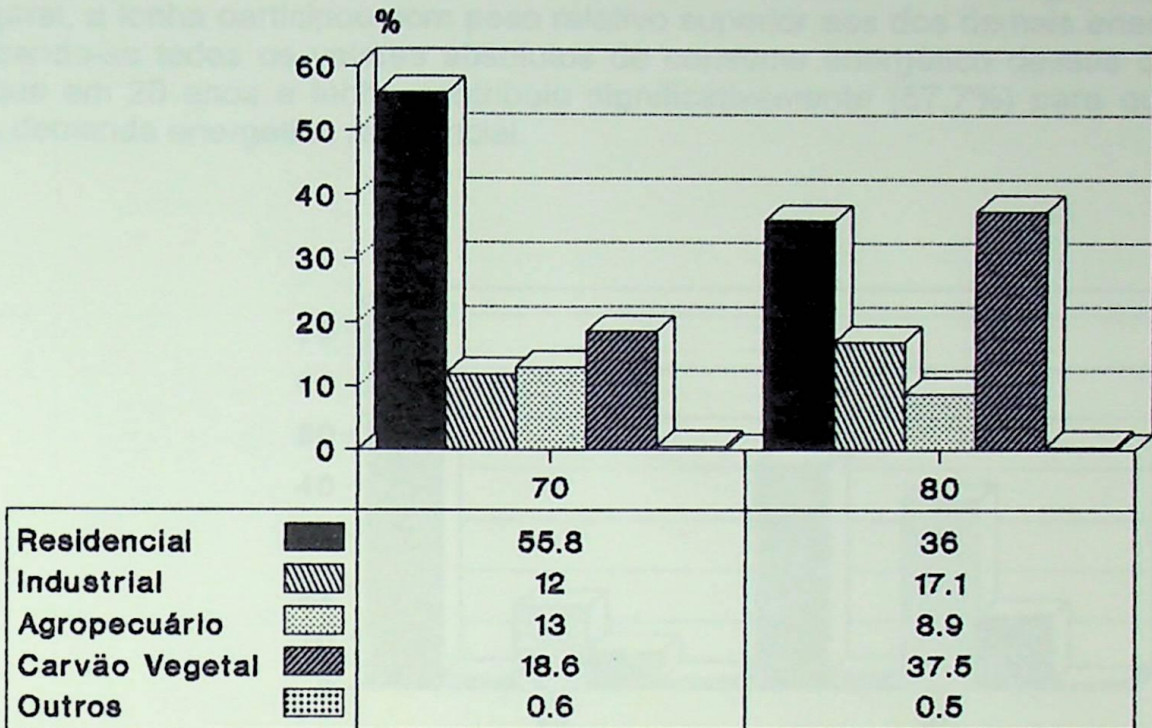


FIGURA 6 - Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (por década -70/80)

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

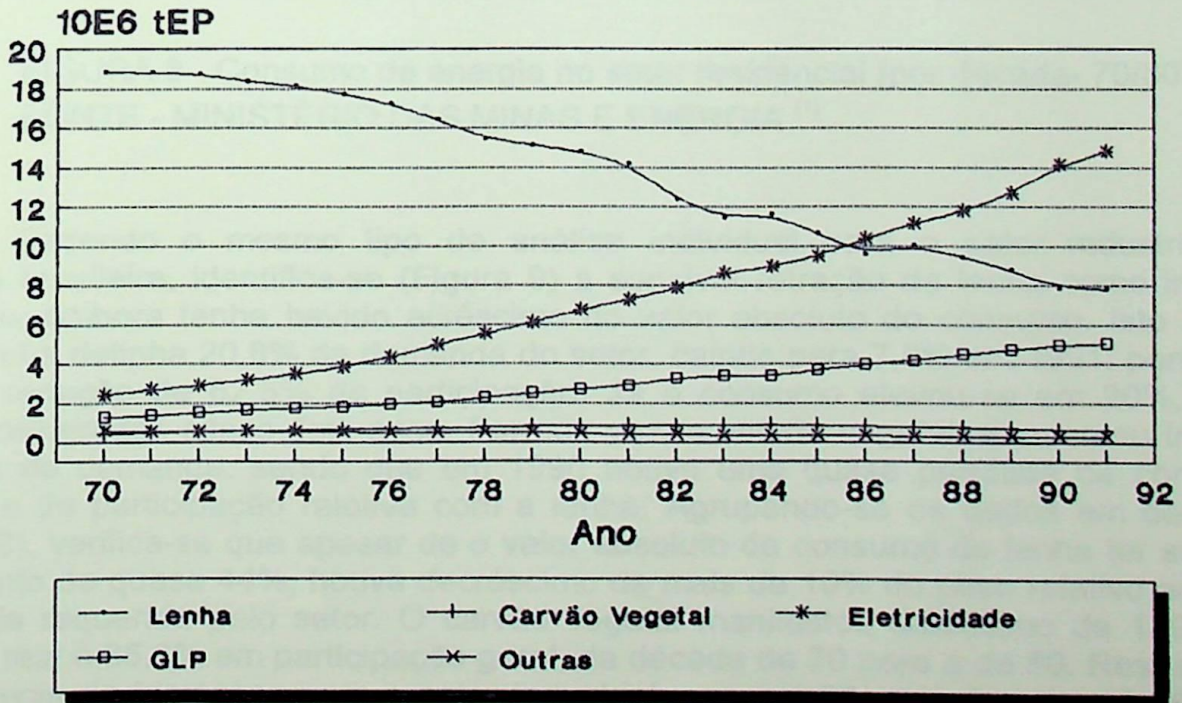


FIGURA 7 - Consumo de energia no setor residencial (1970-1991).
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Comparando com o consumo total das décadas de 70 e 80 (Figura 8), vê-se que, no geral, a lenha participou com peso relativo superior aos dos demais energéticos. Contabilizando-se todos os valores absolutos de consumo energético dessas décadas, nota-se que em 20 anos a lenha contribuiu significativamente (57,7%) para que fosse suprida a demanda energética residencial.

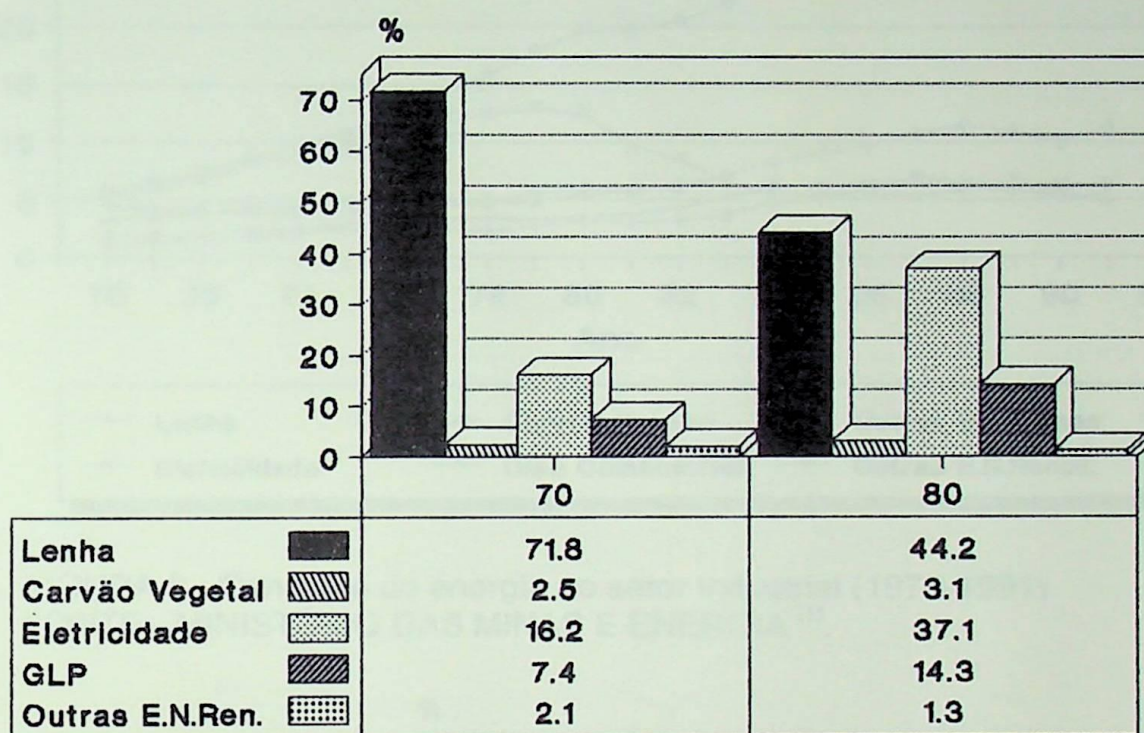


FIGURA 8 - Consumo de energia no setor residencial (por década- 70/80)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Fazendo o mesmo tipo de análise individual para o setor industrial da economia brasileira, identifica-se (Figura 9) a sensível retração da lenha como insumo energético, embora tenha havido acréscimo no valor absoluto do consumo. Isto é, em 1970 a lenha detinha 20,8% da demanda do setor, caindo para 7,8% em 1991; portando, havendo redução de 62,5% de participação. Já o consumo elevou-se em 20%, caso sejam considerados esses dois anos. Por sua vez, o carvão vegetal apresentou índices razoáveis de demanda, sendo que em 1990 houve uma quase paridade de consumo absoluto e de participação relativa com a lenha. Agrupando-se os dados em décadas (Figura 10), verifica-se que apesar de o valor absoluto de consumo de lenha ter sentido um aumento de quase 44%, houve decréscimo de mais de 10% do peso relativo ao total de energia requerida pelo setor. O carvão vegetal manifestou acréscimo de 139% de consumo real e 35,6% em participação geral, da década de 70 para a de 80. Ressalta-se a importância da biomassa para o setor industrial, que em 20 anos forneceu 28,6% de toda a energia por ele requerida.

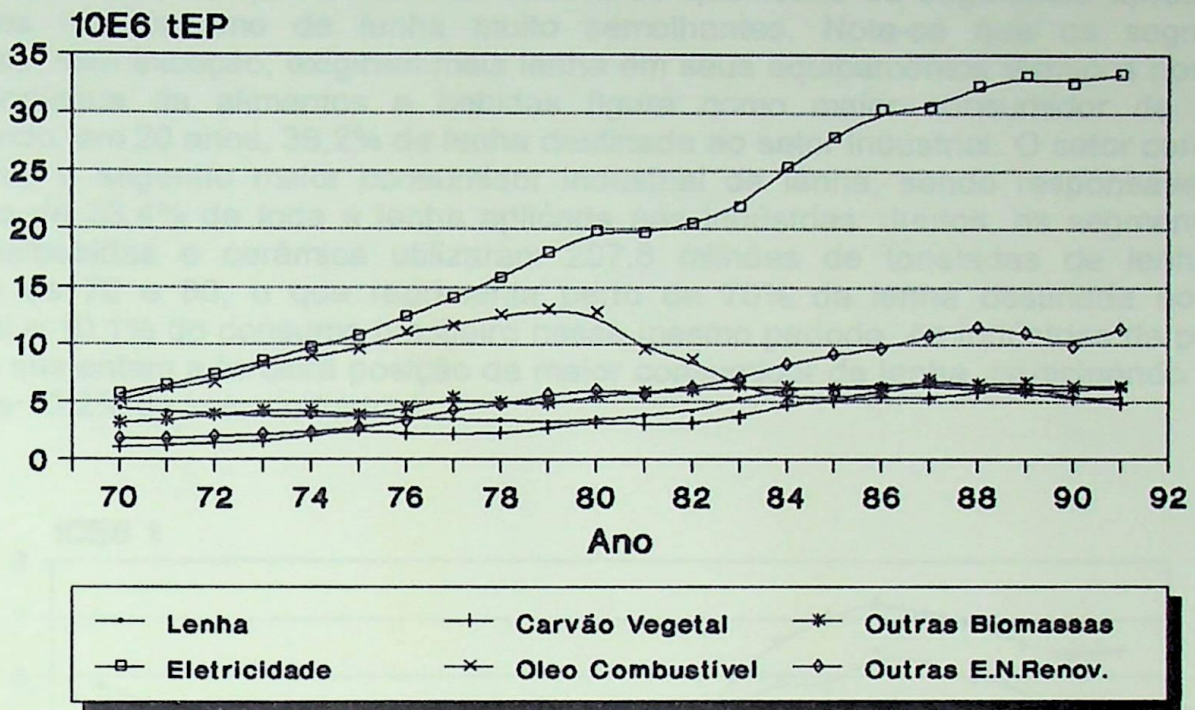


FIGURA 9 - Consumo de energia no setor industrial (1970-1991)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

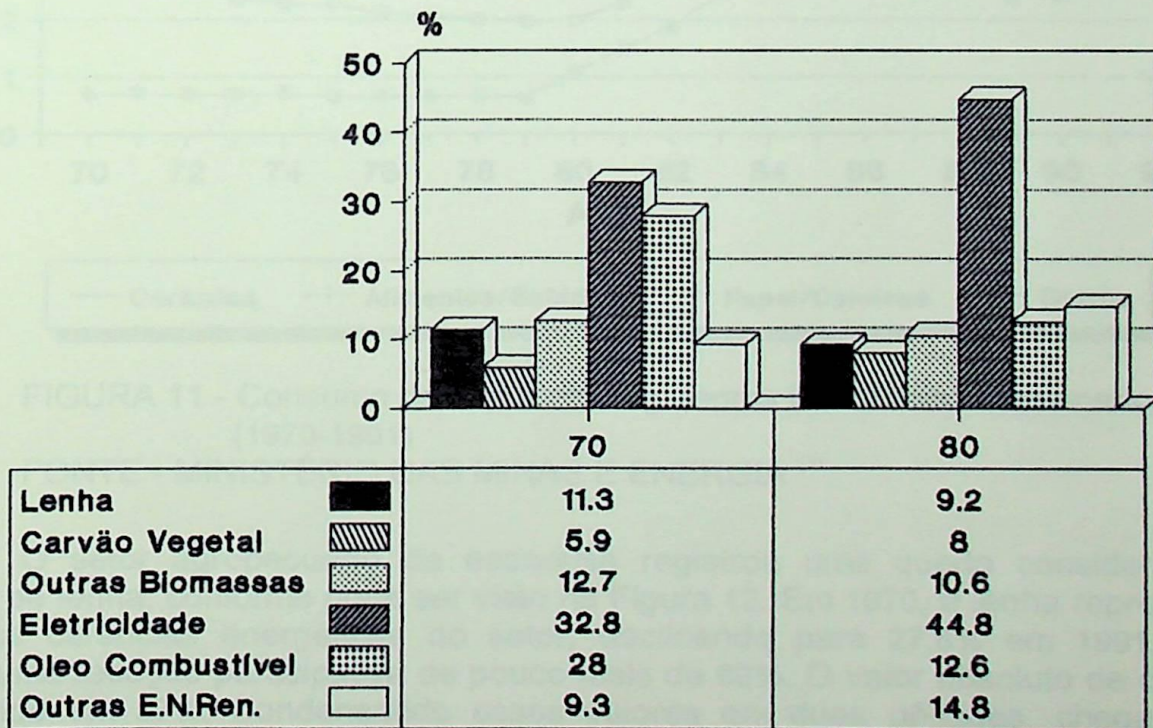


FIGURA 10 - Consumo de energia no setor industrial (por década -70/80)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

A Figura 11 registra a evolução do consumo de lenha referente aos principais segmentos industriais que a utilizam. Verifica-se que todos os segmentos apresentam flutuações no consumo de lenha muito semelhantes. Nota-se que os segmentos industriais, sem exceção, exigiram mais lenha em seus equipamentos térmicos nos anos 80. A indústria de alimentos e bebidas figura como maior consumidor de lenha, absorvendo, em 20 anos, 36,2% da lenha destinada ao setor industrial. O setor ceramista representa o segundo maior consumidor industrial de lenha, sendo responsável pela absorção de 33,4% de toda a lenha aplicada nas indústrias. Juntos, os segmentos de alimentos/bebidas e cerâmica utilizaram 207,6 milhões de toneladas de lenha nas décadas de 70 e 80, o que representa perto de 70% da lenha destinada ao setor industrial e 10,1% do consumo brasileiro nesse mesmo período. As indústrias de papel e celulose sustentam a terceira posição de maior consumidor de lenha, participando com o índice de 10,2% do setor industrial.

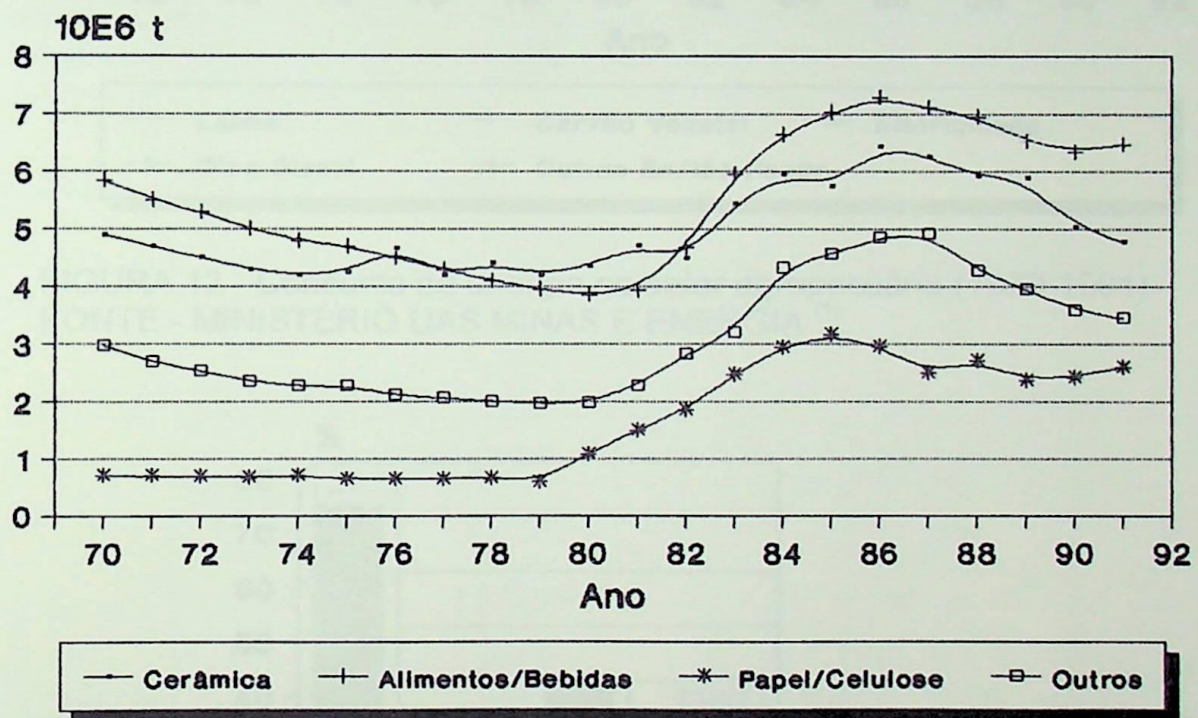


FIGURA 11 - Consumo de lenha em segmentos industriais selecionados (1970-1991)

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

O setor agropecuário da economia registrou uma queda considerável no consumo de lenha, conforme pode ser visto na Figura 12. Em 1970, a lenha representava 90,6% das carências energéticas do setor, declinando para 27,8% em 1991, o que significa uma redução participativa de pouco mais de 69%. O valor absoluto de consumo foi reduzido em 57%. Condensando esses valores em duas décadas, chega-se aos resultados apresentados na Figura 13. Verifica-se a redução significativa de demanda de lenha pelo setor, da ordem de 32% em termos absolutos e 45% em participação relativa ao total de energia registrado. Mesmo assim, pode-se ver que no período de 20 anos a lenha sustentou 56% da energia total dispendida pelo setor agropecuário.

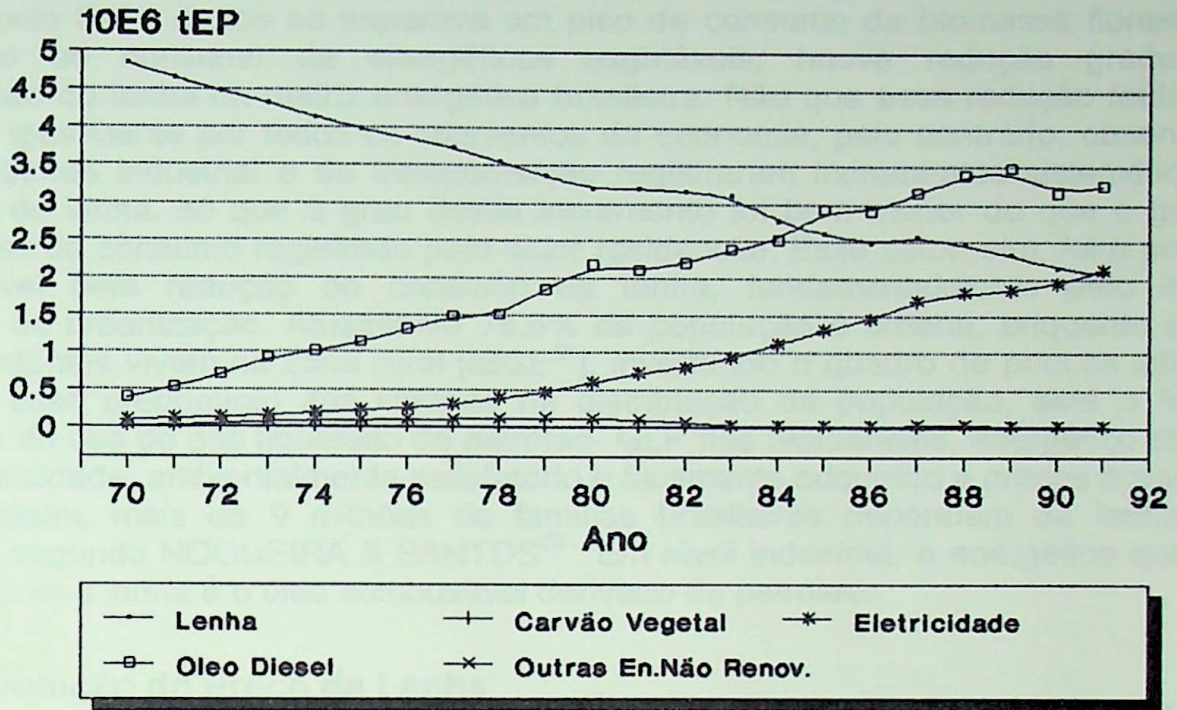


FIGURA 12 - Consumo de energia no setor agropecuário (1970-1991)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

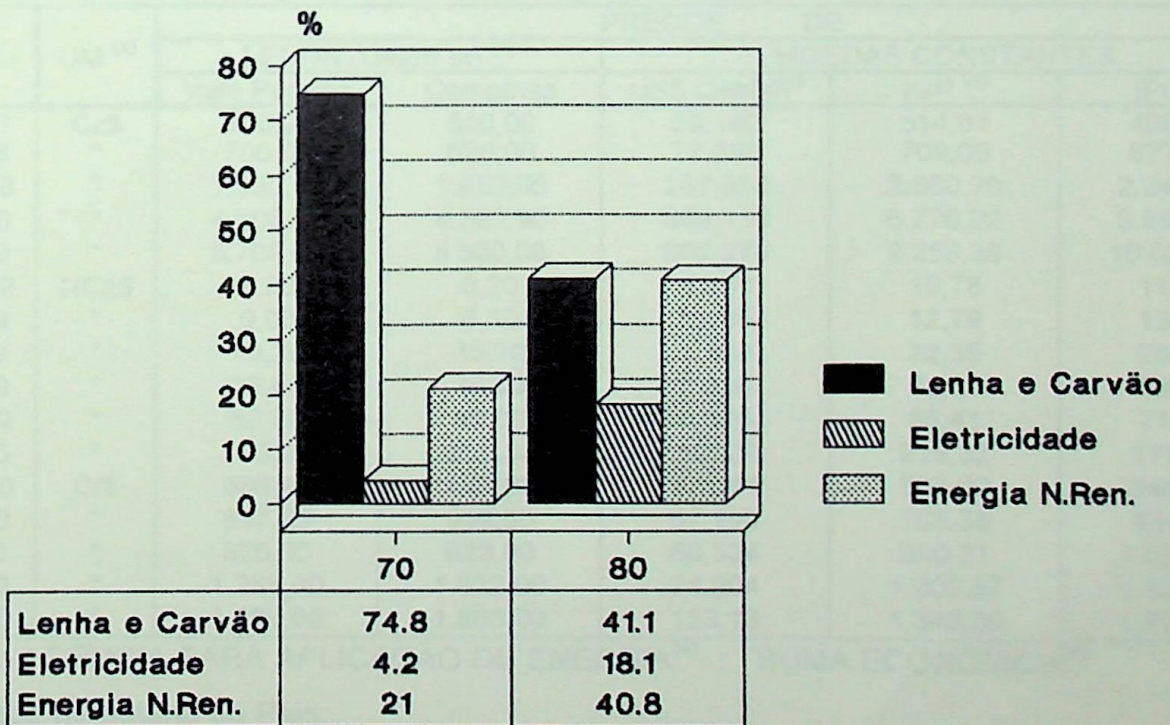


FIGURA 13 - Consumo de energia no setor agropecuário (por década - 70/80)
 FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Diante dessa análise geral, pode-se tirar algumas conclusões. Primeiramente, viu-se que, apesar dos momentos de crise da questão energética mundial, vivenciados também pelo País, donde se esperava um pico de consumo da biomassa florestal em detrimento ao consumo de energéticos esgotáveis, houve redução gradual da participação da lenha na matriz energética brasileira. Não que essa redução tenha sido motivada igualmente por todos os segmentos da economia, pelo contrário, observou-se que os setores industrial e de transformação registraram incrementos sistemáticos no consumo de lenha, só que o grau desse incremento foi bem menor do que o grau de decréscimo de consumo registrado pelo setor residencial. Esse setor, sim, foi o principal responsável pela redução do consumo da lenha, fundamentalmente pelo intenso processo de urbanização. Atualmente 75,5% da população é urbana, enquanto que os 24,5% restantes vivem na zona rural [IBGE⁽²⁾], invertendo o quadro de poucas décadas. Aliado a esse predomínio das cidades na distribuição da população, está o fato da ascensão do uso do gás liquefeito de petróleo- GLP nas residências, energético esse de maior praticidade, ambientalmente satisfatório e facilmente adquirido a preços acessíveis. Mesmo assim, mais de 9 milhões de famílias brasileiras dependem da lenha para cozinhar, segundo NOGUEIRA & SANTOS⁽³⁾. Em nível industrial, o energético que mais compete com a lenha é o óleo combustível derivado de petróleo.

2.3- A Evolução do Preço da Lenha

A Tabela 2 expõe os resultados de uma pesquisa periódica do preço da lenha consumida nas regiões paulistas Vale do Paraíba e Campinas.

TABELA 2
Pesquisa de preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas

| DATA | UM ^(a) | PREÇOS DE | | | | |
|--------|-------------------|---|----------|-----------------------------|--------------------|--------------------|
| | | LENHA (UM/m ³ st) ^(b) | | MOEDAS CONSTANTES | | |
| | | Vale Paraíba | Campinas | US\$ Oficial ^(c) | IGP ^(d) | IPC ^(e) |
| NOV/87 | Cz\$ | 500,00 | 540,00 | 59,160 | 514,01 | 499,23 |
| JAN/88 | " | 700,00 | 620,00 | 77,380 | 709,69 | 677,40 |
| AGO/88 | " | 1.550,00 | 1.850,00 | 267,990 | 2.560,76 | 2.244,92 |
| DEZ/88 | " | 4.600,00 | 4.300,00 | 669,110 | 6.776,22 | 5.889,80 |
| JAN/89 | " | 5.700,00 | 5.300,00 | 907,270 | 9.253,39 | 10.029,15 |
| MAR/89 | NCz\$ | 8,30 | 8,20 | 1,000 | 10,78 | 11,02 |
| MAI/89 | " | 9,00 | 8,30 | 1,099 | 12,79 | 13,00 |
| JUL/89 | " | 16,30 | 15,70 | 1,898 | 22,35 | 20,90 |
| SET/89 | " | 36,00 | 36,30 | 3,238 | 42,38 | 36,75 |
| NOV/89 | " | 62,50 | 90,00 | 6,165 | 85,41 | 71,53 |
| JAN/90 | " | 133,40 | 160,30 | 14,206 | 219,32 | 171,47 |
| MAR/90 | Cr\$ | 386,40 | 450,00 | 37,341 | 535,09 | 546,07 |
| JUN/90 | " | 617,60 | 832,50 | 57,190 | 708,38 | 934,39 |
| JUL/90 | " | 826,00 | 923,00 | 66,534 | 800,31 | 1.055,11 |
| SET/90 | " | 1.285,00 | 1.622,00 | 74,904 | 1.009,67 | 1.332,87 |
| NOV/90 | " | 1.388,00 | 1.863,00 | 123,13 | 1.346,96 | 1.776,94 |

FONTE - AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA⁽⁴⁾ ; SUMA ECONÔMICA⁽⁵⁾.

(a) Unidade monetária do País.

(b) Preço corrente da lenha, pesquisado nas regiões Vale do Paraíba e Campinas.

(c) Dólar oficial médio mensal.

(d) Índice Geral de Preços-IGP, da Fundação Getúlio Vargas - FGV.

(e) Índice de Preços ao Consumidor- IPC, da FGV.

Nota-se que no intervalo de tempo considerado, a moeda oficial brasileira mudou de nome três vezes; em nenhuma delas conseguiu a desejada estabilidade monetária. Por isso, com base nessa pesquisa de preço e nos valores médios mensais das moedas constantes, consideradas (dólar comercial, IGP e IPC), montou-se a Tabela 3 com o objetivo de se verificar a evolução do preço da lenha, em moeda forte.

TABELA 3

Evolução do preço da lenha nas regiões Vale do Paraíba e Campinas, com base no preço corrente e em moedas constantes

| DATA | UM | UM/m ³ st (*) | | US\$/m ³ st | | IGP/m ³ st | | IPC/m ³ st | |
|--------|-------|--------------------------|----------|------------------------|-------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | | VP | C | VP | C | VP | C | VP | C |
| NOV/87 | Cz\$ | 500,00 | 540,00 | 8,45 | 9,12 | 0,9727 | 1,0506 | 1,0015 | 1,0817 |
| JAN/88 | " | 770,00 | 620,00 | 9,95 | 8,01 | 1,0850 | 0,8736 | 1,1367 | 0,9152 |
| AGO/88 | " | 1.550,00 | 1.850,00 | 5,78 | 6,90 | 0,6053 | 0,7224 | 0,6904 | 0,8241 |
| DEZ/88 | " | 4.600,00 | 4.300,00 | 6,87 | 6,43 | 0,6788 | 0,6346 | 0,7810 | 0,7301 |
| JAN/89 | " | 5.700,00 | 5.300,00 | 6,28 | 5,84 | 0,6160 | 0,5728 | 0,5683 | 0,5284 |
| MAR/89 | NCz\$ | 8,30 | 8,20 | 8,30 | 8,20 | 0,7697 | 0,7604 | 0,7530 | 0,7440 |
| MAI/89 | " | 9,00 | 8,30 | 8,19 | 7,55 | 0,7038 | 0,6491 | 0,6920 | 0,6382 |
| JUL/89 | " | 16,30 | 15,70 | 8,59 | 8,27 | 0,7293 | 0,7024 | 0,7798 | 0,7511 |
| SET/89 | " | 36,00 | 36,30 | 11,12 | 11,21 | 0,8495 | 0,8566 | 0,9795 | 0,9876 |
| NOV/89 | " | 62,50 | 90,00 | 10,14 | 14,60 | 0,7318 | 1,0540 | 0,8737 | 1,2582 |
| JAN/90 | " | 133,30 | 160,30 | 9,38 | 11,28 | 0,6078 | 0,7309 | 0,7774 | 0,9349 |
| MAR/90 | Cr\$ | 386,40 | 450,00 | 10,35 | 12,05 | 0,7221 | 0,8410 | 0,7076 | 0,8241 |
| JUN/90 | " | 617,60 | 832,50 | 10,80 | 14,56 | 0,8718 | 1,1752 | 0,6610 | 0,8910 |
| JUL/90 | " | 826,00 | 923,00 | 12,41 | 13,87 | 1,0321 | 1,1533 | 0,7828 | 0,8748 |
| SET/90 | " | 1.285,00 | 1.622,00 | 17,16 | 21,65 | 1,2727 | 1,6064 | 0,9641 | 1,2170 |
| NOV/90 | " | 1.388,00 | 1.863,00 | 11,27 | 15,13 | 1,0300 | 1,3830 | 0,7811 | 1,0484 |

FONTE - AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA⁽⁴⁾.
SUMA ECONÔMICA⁽⁵⁾.

(*) Preço corrente da lenha, pesquisado nas regiões Vale do Paraíba (VP) e Campinas (C).

A princípio, o preço da lenha não deveria modificar-se tanto, já que se tinha como base moedas constantes, as quais evoluíam em função da inflação registrada. Entretanto, observam-se súbitas oscilações do preço convertido da lenha nessas regiões (Figuras 14, 15 e 16).

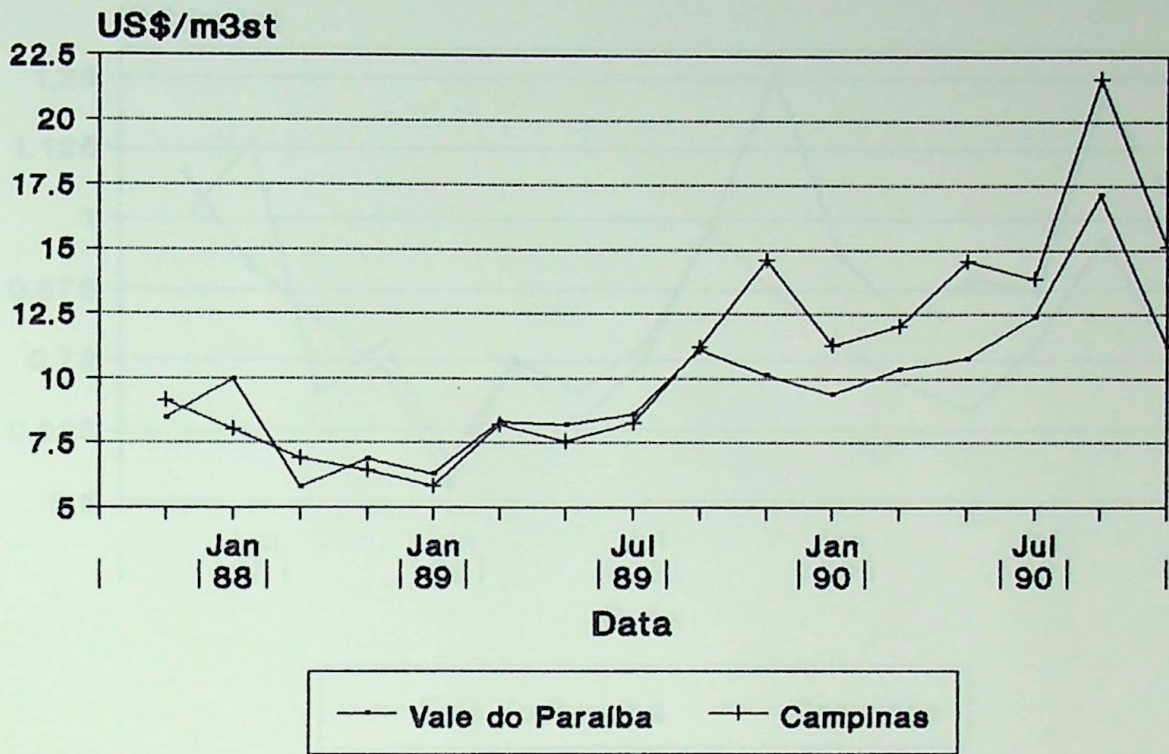


FIGURA 14 - Evolução do preço da lenha no Vale do Paraíba e em Campinas, em US\$
 FONTE - AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA⁽⁴⁾ ; SUMA ECONÔMICA⁽⁵⁾ .

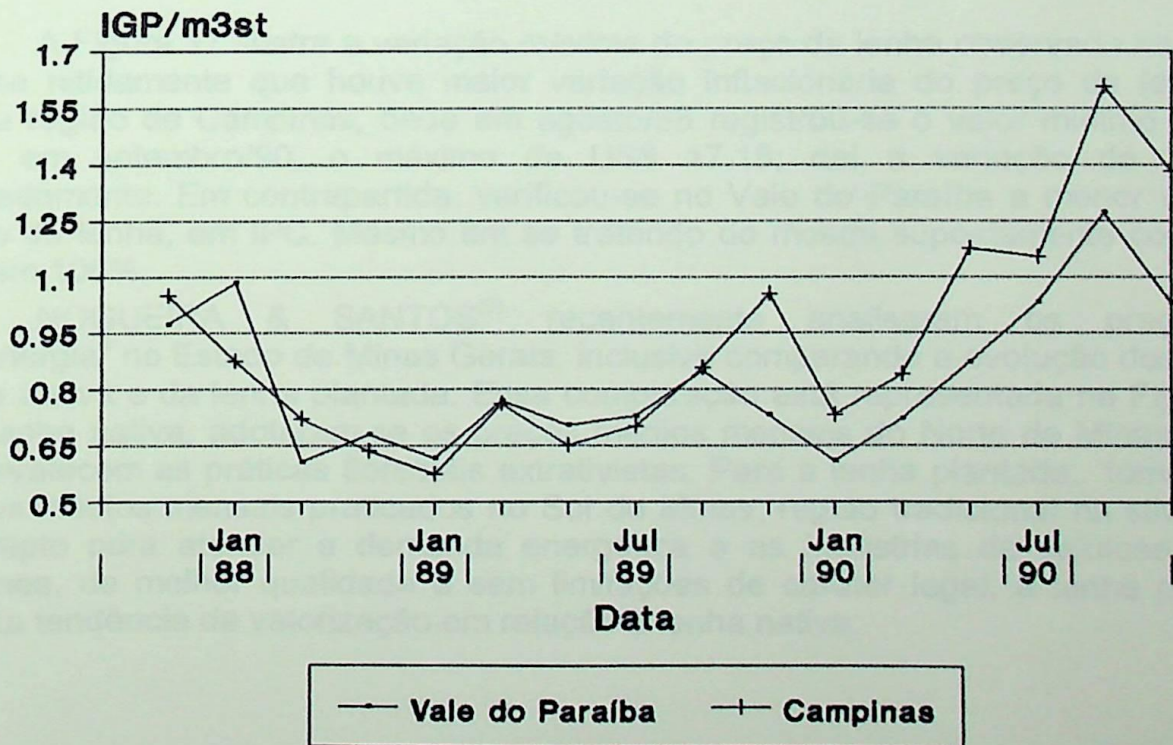


FIGURA 15 - Evolução do preço da lenha no Vale do Paraíba e em Campinas, em IGP
 FONTE - AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA⁽⁴⁾ ; SUMA ECONÔMICA⁽⁵⁾ .

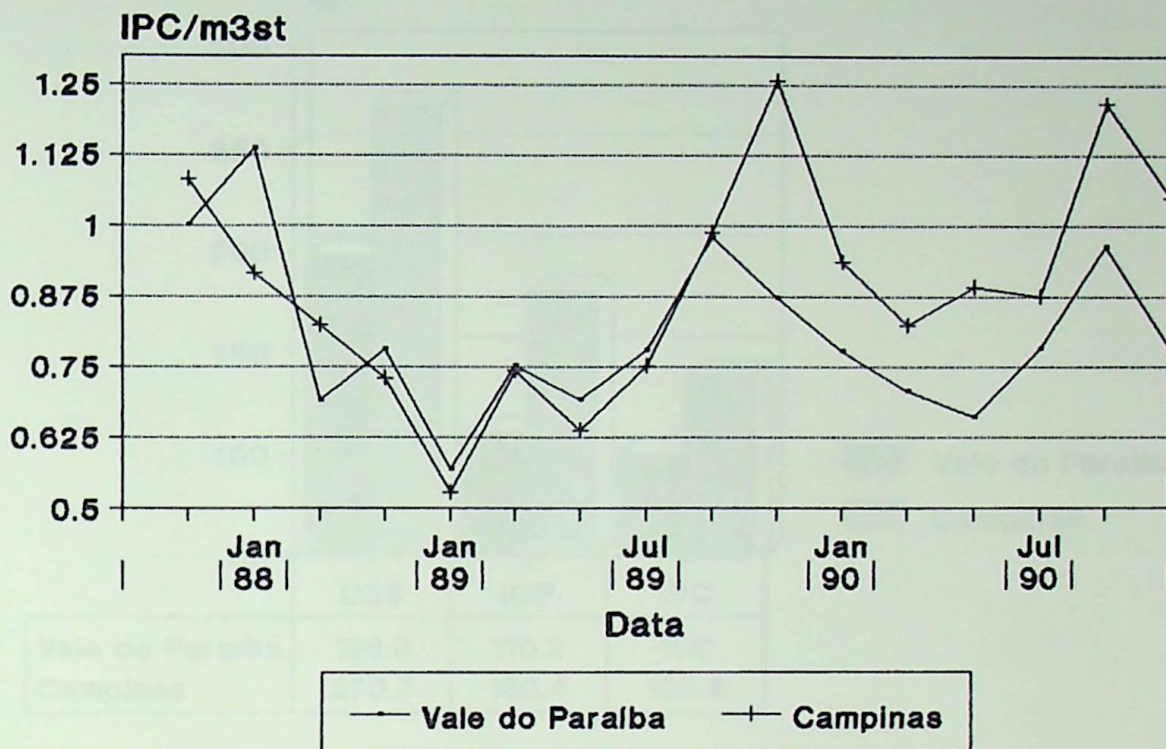


FIGURA 16 - Evolução do preço da lenha no Vale do Paraíba e em Campinas, em IPC
 FONTE - AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA⁽⁴⁾ ; SUMA ECONÔMICA⁽⁵⁾ .

A Figura 17 ilustra a variação máxima do preço da lenha observada na Tabela 13. Vê-se nitidamente que houve maior variação inflacionária do preço da lenha em dólar, na região de Campinas, onde em agosto/88 registrou-se o valor mínimo de US\$ 5.78, e em setembro/90, o máximo de US\$ 17.18; daí a variação de 270,7%, aproximadamente. Em contrapartida, verificou-se no Vale do Paraíba a menor variação de preço da lenha, em IPC. Mesmo em se tratando de moeda supostamente constante, oscilou em 100%.

NOGUEIRA & SANTOS⁽³⁾ recentemente analisaram os preços da dendroenergia⁴ no Estado de Minas Gerais, inclusive comparando a evolução dos preços da lenha nativa e da lenha plantada. Essa comparação está representada na Figura 18. Para a lenha nativa, adotaram-se os preços médios mensais do Norte de Minas, região onde prevalecem as práticas florestais extrativistas. Para a lenha plantada, tomaram-se os preços médios mensais praticados no Sul de Minas, região tradicional na silvicultura do eucalipto para atender a demanda energética e as indústrias de celulose. Mais homogênea, de melhor qualidade e sem limitações de caráter legal, a lenha plantada apresenta tendência de valorização em relação à lenha nativa.

⁴ Do grego "dendron", que significa árvore.

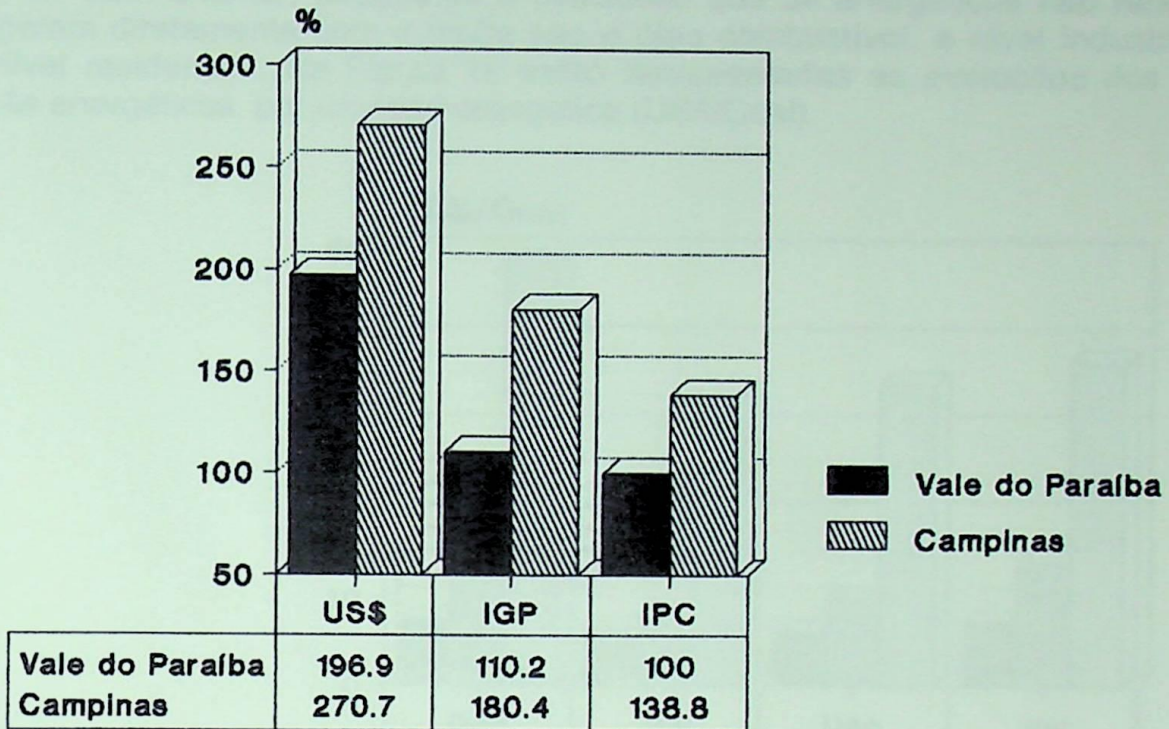


FIGURA 17 - A variação inflacionária máxima do preço da lenha, em moedas constantes (US\$, IGP e IPC)
 FONTE - AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA⁽⁴⁾ ; SUMA ECONÔMICA⁽⁵⁾ .

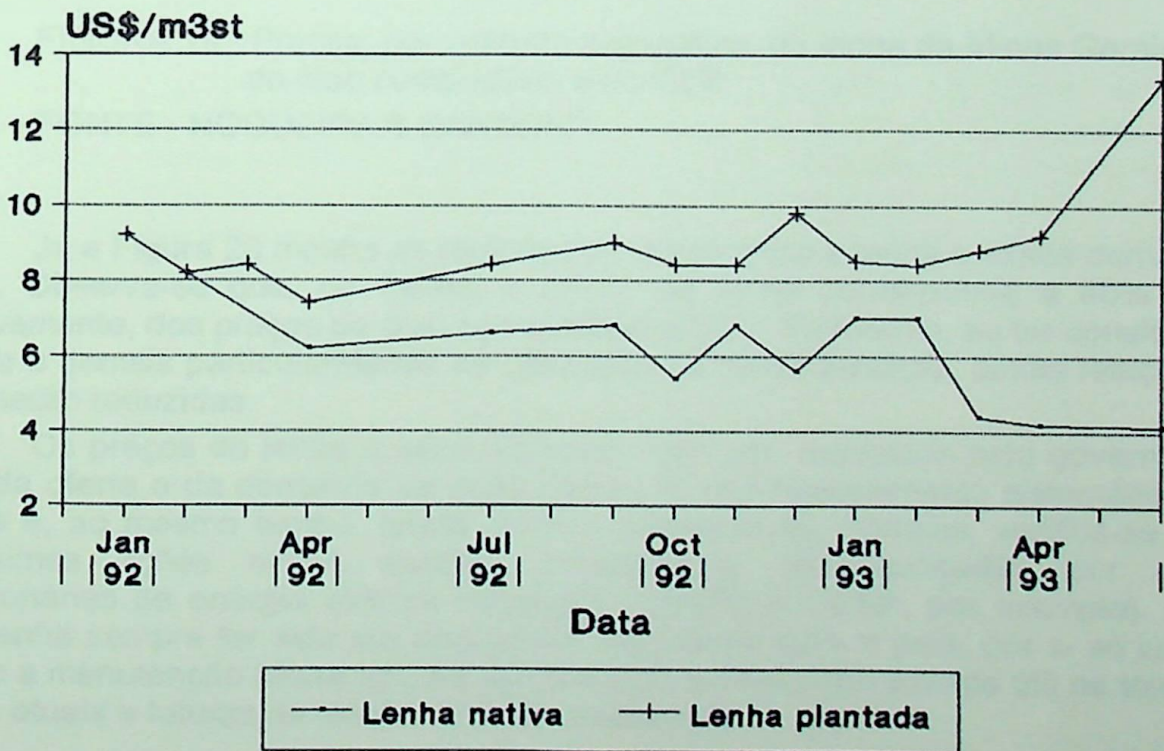


FIGURA 18 - Evolução dos preços da lenha nativa e plantada em Minas Gerais
 FONTE - NOGUEIRA & SANTOS⁽³⁾ .

No item anterior, chegou-se à conclusão que os energéticos não renováveis que competem diretamente com a lenha são o óleo combustível, a nível industrial, e o GLP, a nível residencial. Na Figura 19 estão representadas as evoluções dos preços desses três energéticos, por unidade energética (US\$/Gcal).

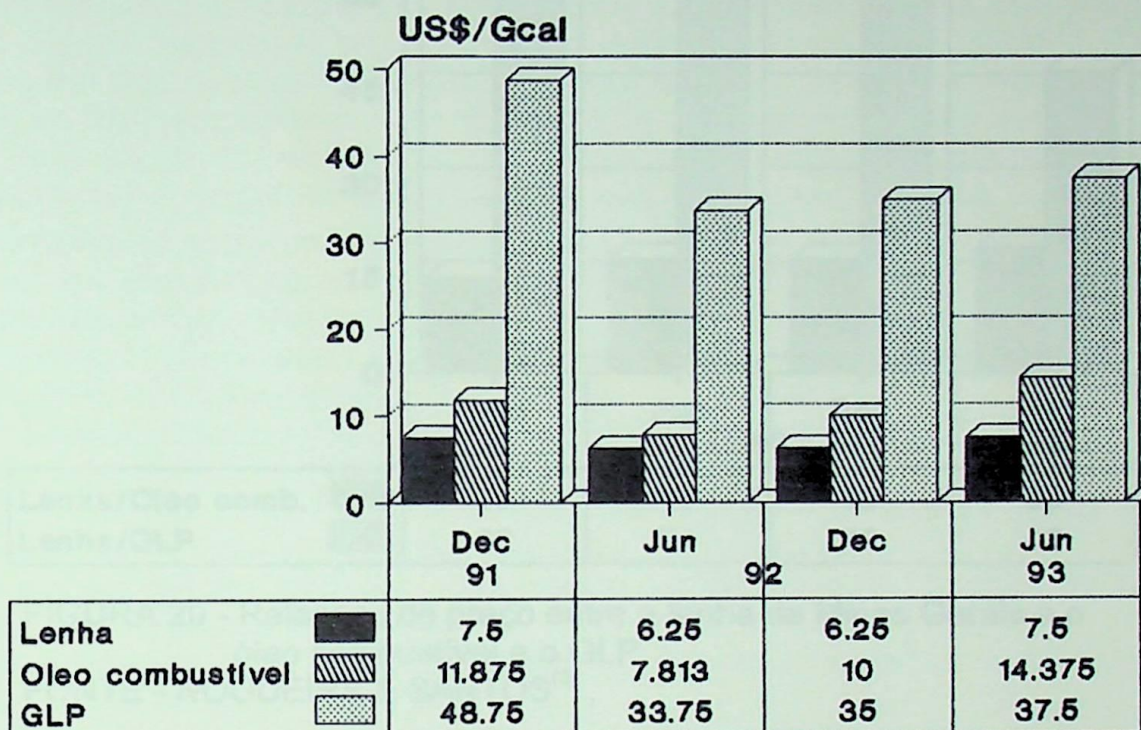


FIGURA 19 - Preços, por unidade energética, da lenha de Minas Gerais, do óleo combustível e do GLP.

FONTE - NOGUEIRA & SANTOS⁽³⁾.

Já a Figura 20 mostra as relações de preço entre a lenha e esses derivados de petróleo. Observa-se que, na média, o preço da lenha corresponde a 60% e 20%, respectivamente, dos preços de óleo combustível e GLP. Entretanto, se for considerada a eficiência e demais particularidades de utilização da dendroenergia, essas relações com certeza serão reduzidas.

Os preços da lenha e seus derivados não são regulados pelo governo, e sim pela lei da oferta e da demanda de cada região. O acompanhamento sistemático desse processo é, ao mesmo tempo, tarefa difícil e interessante. Todavia, verifica-se que há pouquíssimas ações nesse sentido, basicamente desencadeadas por algumas concessionárias de energia elétrica estaduais (CEMIG e CESP, por exemplo). O mero fato da lenha sempre ter sido um energético importante para o país, por si só justifica a difusão e a manutenção desse tipo de serviço, que constitui ferramenta útil na tomada de decisões atuais e futuras da Nação na área de energia.

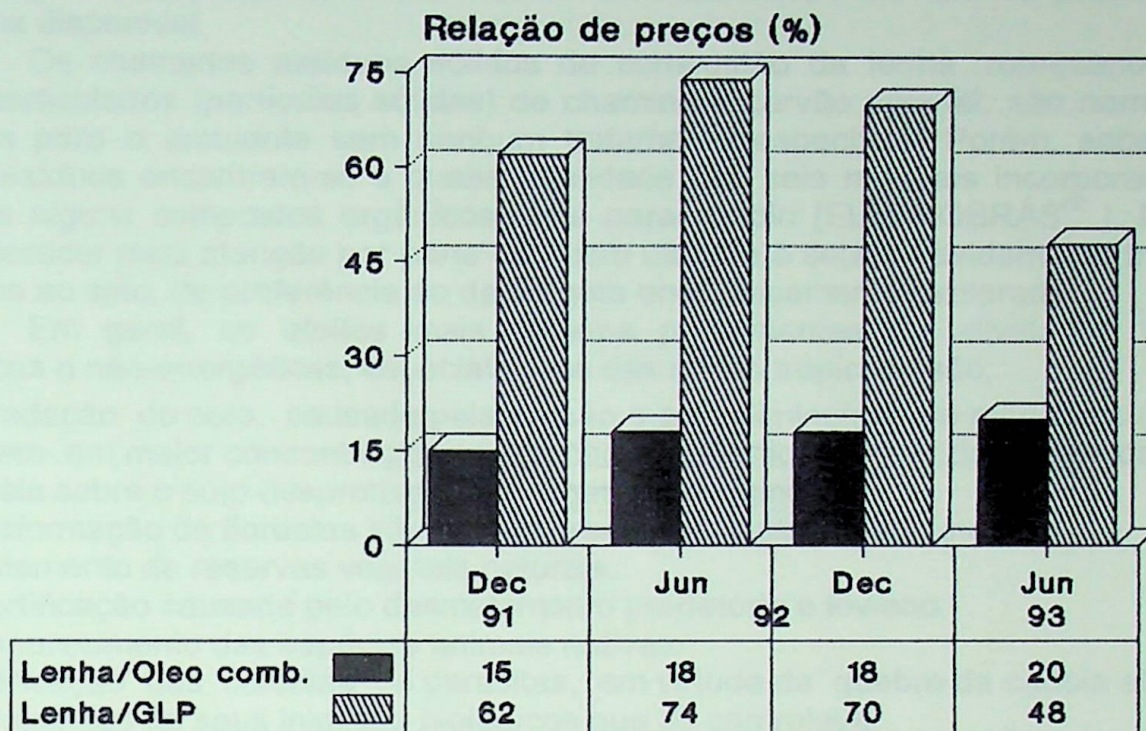


FIGURA 20 - Relações de preço entre a lenha de Minas Gerais e o óleo combustível e o GLP.

FONTES - NOGUEIRA & SANTOS⁽³⁾.

2.4 - O Impacto Ambiental Associado ao Uso da Lenha

Energia e meio ambiente estão intimamente ligados. As ações de geração, transformação, transporte, distribuição e uso final da energia provocam impactos variados sobre o meio ambiente, impactos esses que se tornam mais graves à medida que aquelas ações passam a ser realizadas à margem do padrão racional.

A presença de cobertura vegetal original pressupõe diferentes modalidades de ação do Homem sobre ela: pelo aproveitamento econômico ou extrativismo, para dar lugar, ou não, a áreas de lavouras ou pastagens, pela conservação, proteção, preservação e recuperação. Essas ações têm provocado profundas alterações na cobertura vegetal.

É assim que a vegetação, tomada como um recurso natural, ganha importância para a sobrevivência da sociedade humana, integrando o planejamento nacional. A utilização intensiva da lenha e seus derivados energéticos apresenta peculiaridades de contaminação ambiental diferentes de outras fontes de energia, embora ainda permaneça incógnita a magnitude das conseqüências advindas dos impactos ecológicos associados à exploração florestal energética em grande escala. No aspecto térmico, a queima de qualquer forma de combustível, quer seja sólido, líquido ou gasoso, inevitavelmente gera substâncias poluentes que são lançadas à atmosfera, independente do estágio de desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de combustão. A única diferença existente entre um processo de combustão tecnologicamente bem concebido e outro não, do ponto de vista estritamente ambiental, é o menor índice de emissão de substâncias nocivas ao ambiente por aquele; além, é claro, da redução significativa de consumo da

fonte energética empregada, o que implica em mais tempo de uso da potencialidade energética disponível.

Os chamados resíduos sólidos de combustão da lenha, representados por cinzas, particulados (partículas sólidas) de chaminé e carvão vegetal, são normalmente rejeitados para o ambiente sem nenhum tratamento específico. Porém, sabe-se que nesses resíduos encontram-se a quase totalidade dos sais minerais incorporados pelo vegetal e alguns compostos orgânicos úteis para o solo [ELETROBRÁS⁽⁶⁾]. Por isso, devem merecer mais atenção por parte de quem os gera e serem devidamente tratados e restituídos ao solo, de preferência ao da floresta energeticamente explorada.

Em geral, os efeitos mais comuns provenientes de atividades florestais energéticas e não-energéticas, especialmente das matas tropicais, são:

- a) Degradação do solo, causada pela erosão e pela diminuição de nutrientes (os quais existem em maior concentração nas camadas superficiais), devido à ação das águas pluviais sobre o solo desprotegido da vegetação original.
- b) Transformação de florestas inteiras em áreas de vegetação secundária.
- c) Esgotamento de reservas vegetais naturais.
- d) Desertificação causada pelo desmatamento predatório e leviano.
- e) Desaparecimento das espécies animais nativas.
- f) Amplificação das colônias de parasitas, em virtude da quebra da cadeia alimentar pela extinção de seus inimigos biológicos que as controlava.
- g) Prejudica as bacias hídricas, provocando inundações e quedas de barreiras, ameaçando mananciais de água doce.
- h) Menor absorção do bióxido de carbono e de outros "gases de estufa", com isso intensificando-se o aquecimento global.

A intervenção incontrolada do ser humano na natureza, mediante a contínua devastação das formações vegetais nativas, tem retardado a recomposição de ecossistemas em exaurimento. Constata-se o extrativismo indiscriminado de matas silvestres completas, sem que haja, ao menos, a reposição arbórea, nem tampouco o plantio de espécies comprovadamente mais adaptadas à região. Uma grande parte da lenha consumida se origina do remanescente de matas naturais, o que é inadmissível dos pontos de vista técnico, econômico e ambiental, gerando, como conseqüência, espécies nativas progressivamente de menor porte e qualidade inferior às originais. As alterações climáticas podem resultar em desertificação, malogro de colheitas, padrões climatológicos imprevisíveis e a elevação do nível do mar, ameaçando a população das ilhas e das áreas litorâneas.

Preocupa, portanto, o fato da grande maioria dos desmatamentos não corresponder à ocupação da terra com atividades produtivas, fato esse que somado à realização periódica das queimadas, resulta em acentuada degradação ambiental ao longo dos anos.

Apesar do quadro crônico da silvicultura brasileira, ainda pode-se citar alguns fatores favoráveis à exploração da lenha no país. Os mais importantes são:

- a) Grande extensão territorial do país.
- b) Elevadas concentrações demográficas urbanas.
- c) Elevado índice médio de insolação.
- d) Domínio das tecnologias de queima da lenha e seus derivados energéticos.
- e) Queda da participação da lenha na matriz energética brasileira, que se orienta para o uso de biomassa renovável.

A considerável dimensão do território nacional, 8.511.996,3 km², induz a exploração florestal sem afetar a produção alimentar, desde que racionalmente distribuída e não haja incremento substancial na demanda.

A Tabela 4 apresenta a distribuição da densidade demográfica do Brasil, por Unidade da Federação.

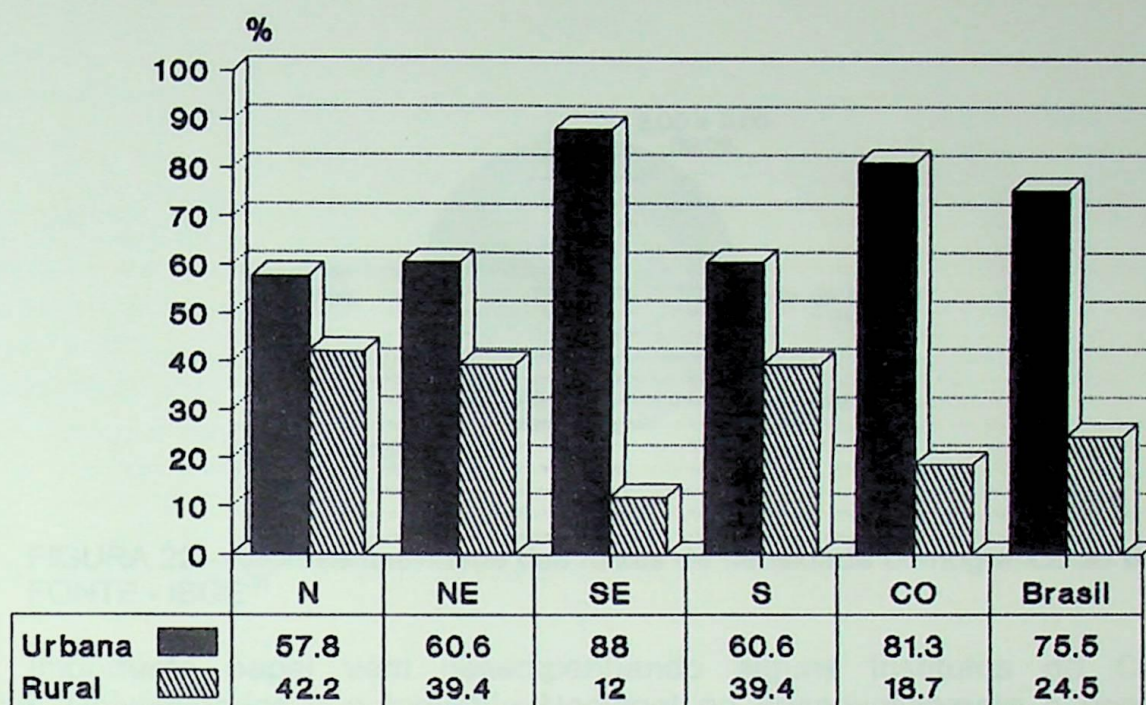
TABELA 4
Distribuição da densidade demográfica por Unidade da Federação

| R E G | UF | SUPERFÍCIE (km ²) | P O P U L A Ç Ã O | | | | DENS. DEM. ^(a) hab/km ² | |
|--------------------------------------|------|----------------------------------|--------------------|-------------|-------------------|-------------|---|--------------|
| | | | URBANA | | RURAL | | | TOTAL |
| | | | habitantes | % | habitantes | % | | habitantes |
| N O R T E | RO | 238.378,7 | 658.172 | 58,2 | 472.701 | 41,8 | 1.130.874 | 4,74 |
| | AC | 153.697,5 | 258.035 | 61,9 | 159.130 | 38,1 | 417.165 | 2,72 |
| | AM | 1.567.958,7 | 1.501.807 | 71,4 | 601.094 | 28,6 | 2.102.901 | 1,34 |
| | RR | 225.017,0 | 139.466 | 64,6 | 76.484 | 35,4 | 215.950 | 0,96 |
| | AP | 142.358,5 | 233.515 | 80,9 | 55.175 | 19,1 | 288.690 | 2,03 |
| | PA | 1.246.833,1 | 2.609.777 | 50,4 | 2.571.793 | 49,6 | 5.181.570 | 4,16 |
| | TO | 277.321,9 | 530.795 | 57,7 | 389.321 | 42,3 | 920.116 | 3,32 |
| | Sub1 | 3.851.560,4 | 5.931.567 | 57,8 | 4.325.699 | 42,2 | 10.257.266 | 2,66 |
| N O R D E S T E | MA | 329.555,8 | 1.972.008 | 40,0 | 2.957.021 | 60,0 | 4.929.029 | 14,96 |
| | PI | 251.273,3 | 1.366.218 | 52,9 | 1.214.997 | 47,1 | 2.581.215 | 10,27 |
| | CE | 145.693,9 | 4.158.059 | 65,4 | 2.204.561 | 34,6 | 6.362.620 | 43,67 |
| | RN | 53.166,3 | 1.668.165 | 69,1 | 745.956 | 30,9 | 2.414.121 | 45,41 |
| | PB | 53.958,2 | 2.051.576 | 64,1 | 1.149.101 | 35,9 | 3.200.677 | 59,32 |
| | PE | 101.023,4 | 5.046.535 | 70,9 | 2.076.013 | 29,1 | 7.122.548 | 70,50 |
| | AL | 29.106,9 | 1.481.125 | 58,9 | 1.031.866 | 41,1 | 2.512.991 | 86,34 |
| | SE | 21.866,6 | 1.001.940 | 67,2 | 489.927 | 32,8 | 1.491.867 | 68,24 |
| | BA | 566.978,5 | 7.007.729 | 59,1 | 4.847.428 | 40,9 | 11.855.157 | 20,91 |
| | Sub2 | 1.556.001,1 | 25.753.355 | 60,6 | 16.716.870 | 39,4 | 42.470.225 | 27,30 |
| S U D E | MG | 586.624,3 | 11.776.538 | 74,9 | 3.955.423 | 25,1 | 15.731.961 | 26,82 |
| | ES | 45.733,0 | 1.922.828 | 74,0 | 675.677 | 26,0 | 2.598.505 | 56,82 |
| | RJ | 43.653,3 | 12.177.144 | 95,3 | 606.617 | 4,7 | 12.783.761 | 292,85 |
| | SP | 248.255,7 | 29.272.927 | 92,8 | 2.273.546 | 7,2 | 31.546.473 | 127,07 |
| | Sub3 | 924.266,3 | 55.149.437 | 88,0 | 7.511.263 | 12,0 | 62.660.700 | 67,80 |
| S U L | PR | 199.323,9 | 6.192.976 | 73,3 | 2.250.323 | 26,7 | 8.443.299 | 42,36 |
| | SC | 95.318,3 | 3.205.600 | 70,6 | 1.332.648 | 29,4 | 4.538.248 | 47,61 |
| | RS | 280.674,0 | 6.994.134 | 76,6 | 2.141.345 | 23,4 | 9.135.479 | 32,55 |
| | | Sub4 | 575.316,2 | 16.392.710 | 60,6 | 5.724.316 | 39,4 | 22.117.026 |
| C E N T R | MS | 357.471,9 | 1.413.095 | 79,4 | 365.646 | 20,6 | 1.778.741 | 4,98 |
| | MT | 901.420,7 | 1.481.073 | 73,2 | 541.451 | 26,8 | 2.022.524 | 2,24 |
| | GO | 340.165,9 | 3.241.119 | 80,8 | 771.443 | 19,2 | 4.012.562 | 11,80 |
| | DF | 5.794,2 | 1.513.470 | 94,7 | 84.945 | 5,3 | 1.598.415 | 274,31 |
| | | Sub5 | 1.604.852,3 | 7.648.757 | 81,3 | 1.763.485 | 18,7 | 9.412.242 |
| TOTAL^(b) | | 8.511.996,3 | 110.875.826 | 75,5 | 36.041.633 | 24,5 | 146.917.459 | 17,26 |

FONTE - IBGE⁽²⁾. ^(a) Densidade demográfica ^(b) Sub1+Sub2+Sub3+Sub4+Sub5

NOTA: Em 1991, ainda não havia sido criado o Estado do Tocantins, através do desmembramento do Estado de Goiás.

A Figura 21 mostra esquematicamente a média percentual de população urbana e rural das Regiões e do País. Pode-se ver claramente que existe acentuada concentração demográfica urbana e, por conseguinte, menor concentração demográfica rural. Na média, observa-se que 75,5% da população brasileira ocupam preferencialmente as áreas urbanizadas, ficando o meio rural com apenas 24,5%.



N= Norte NE= Nordeste SE= Sudeste
S= Sul CO= Centro-Oeste

FIGURA 21 - Representatividade das populações urbana e rural das Regiões e do País.

FONTE - IBGE⁽²⁾.

A Tabela 5 mostra a distribuição do território brasileiro em função das faixas de densidade demográfica comumente usadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística- IBGE. A Figura 22 representa essa tabela em gráfico de setores, para melhor visualização de seus valores representativos. A partir desses dados, pode-se observar que 60% do território nacional tem média inferior a 5 habitantes/km². Considerando, também, a supremacia da concentração populacional das cidades frente à do campo, conclui-se que há possibilidade de implantação de projetos de florestas energéticas sem interferir negativamente nas zonas populosas. A irradiação solar abundante concorre para a intensificação do processo biológico de fotossíntese e, conseqüentemente, para a rápida regeneração das florestas.

TABELA 5
Representatividade das faixas de densidade demográfica do Brasil

| DENSIDADE DEMOGRÁFICA (habitantes/km ²) | SUPERFÍCIE | | UNIDADES DA FEDERAÇÃO |
|---|-----------------|-------|----------------------------------|
| | km ² | % | |
| Menos de 2,00 | 1.792.975,7 | 21,0 | AM,RR |
| 2,00 a 5,00 | 3.317.482,3 | 39,0 | RO,AC,AP,PA,TO,MS,MT |
| 5,01 a 25,00 | 1.487.973,5 | 17,5 | MA,PI,BA,GO |
| 25,01 a 100,00 | 1.615.861,6 | 19,0 | CE,RN,PB,PE,AL,SE,MG,ES,PR,SC,RS |
| Mais de 100,00 | 297.703,2 | 3,5 | RJ,SP,DF |
| TOTAL | 8.511.996,3 | 100,0 | - |

FONTE - IBGE⁽²⁾.

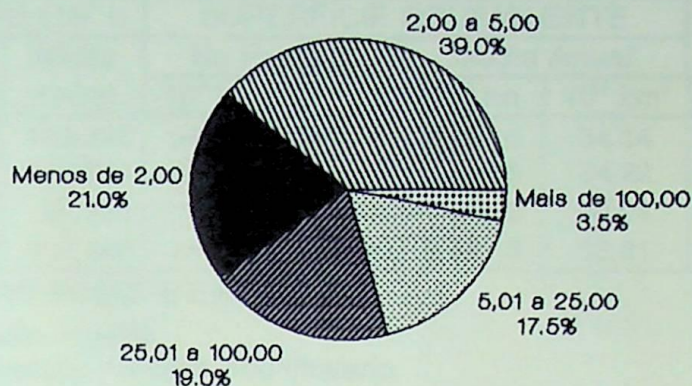


FIGURA 22 - Representatividade das faixas de densidade demográfica do Brasil.
 FONTE - IBGE⁽²⁾.

Importante papel vêm desempenhando alguns Institutos de Ciência e Tecnologia, Universidades e a Indústria Nacional no desenvolvimento e controle dos processos de combustão da lenha e seus derivados energéticos, contribuindo sobremaneira para o domínio estratégico de tecnologias alternativas que visam à substituição de derivados de petróleo por combustíveis renováveis regionais.

Igual contribuição tem sido oferecida por segmentos dos setores público e privado, referente à pesquisa e desenvolvimento de tecnologias apropriadas às atividades de reflorestamento como um todo, englobando os aspectos energético e industrial. A silvicultura brasileira desenvolveu-se bastante, principalmente devido às empresas produtoras de celulose.

Apresenta-se a Tabela 6 para se ter uma idéia da área do território nacional que foi explorada por atividades florestais, para dela retirar-se lenha. Convém explicar que para se encontrar a área equivalente ao consumo de lenha, adotou-se o rendimento de exploração da ordem de 100 m³st/ha/ano e a massa específica da lenha catada, heterogênea, de 300 kg/m³st. Vale lembrar que a produtividade sustentada normalmente admitida está compreendida entre 20 e 25 m³st/ha/ano. Observa-se que nos anos 70 foram explorados 341.400 km² de florestas brasileiras para fins energéticos, o que representa 4% do território nacional. Equivale praticamente à superfície dos Estados de Goiás e Tocantins⁵. Na média anual, a área explorada ficou na faixa de 78% da superfície do Estado do Rio de Janeiro⁶.

Nos anos 80 a situação não se modificou muito, existindo um aditivo de apenas 0,25% em relação à área explorada na década anterior. Ou seja, houve uma considerável estabilização da "indústria da lenha" brasileira. Nos dois primeiros anos da década de 90 comprovou-se que o país extraiu 12% a menos de lenha de sua cobertura vegetal, com base na média anual da década passada. Enfim, no período de 22 anos explorou-se o equivalente a 8,7% da superfície total do território nacional para obtenção exclusiva de lenha. Em última análise, pode-se afirmar que, em média, 0,4% do Território Nacional todo ano é explorado para obtenção de lenha, ou seja, 33.810 km², o equivalente quase à área do Estado de Alagoas e do Distrito Federal.

⁵ Goiás e Tocantins= 340.165,9 km².

⁶ Rio de Janeiro= 43.653,3 km²

TABELA 6
Área equivalente ao consumo de lenha no Brasil

| PERÍODO | CONSUMO (10 ³ t) | | SUPERFÍCIE EQUIVALENTE | | | | % DA SUPERF. EQUIV. REL. ÁREA BRASIL | |
|--------------|-----------------------------|-------------|------------------------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------------|
| | No Período | Média Anual | No Período | | Média Anual | | Período | Média Anual |
| | | | 10 ³ ha | 10 ³ km ² | 10 ³ ha | 10 ³ km ² | | |
| Década de 70 | 1.024.200 | 102.420 | 34.140 | 341,40 | 3.414,0 | 34,14 | 4,01 | 0,404 |
| Década de 80 | 1.026.800 | 102.680 | 34.226 | 342,26 | 3.422,6 | 34,22 | 4,02 | 0,402 |
| 1990 a 1991 | 180.600 | 90.300 | 6.020 | 60,20 | 3.010,0 | 30,01 | 0,71 | 0,354 |
| 1970 a 1991 | 2.231.600 | 101.440 | 74.386 | 743,86 | 3.381,3 | 33,81 | 8,74 | 0,397 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA⁽¹⁾.

- NOTA: (a) Inclusive carvão vegetal.
 (b) Taxa de exploração florestal, 100 t/ha/ano.
 (c) 1 ha = 1 hm² = 10⁻² km².
 (d) Território nacional, 8.511.996,3 km².
 (e) Massa específica da lenha, 300 kg/m³st.

GALLO MENDOZA & SUÁREZ⁽⁷⁾ também quantificaram a superfície teoricamente explorada para extração de madeira, quer seja ela voltada para fins energéticos, quer seja para fins industriais, envolvendo o Brasil. Na Tabela 7 está representada a influência que a utilização da lenha exerce sobre a produção florestal nativa e plantada de alguns países latino-americanos e sobre a extração florestal total para fins energéticos e madeireiros, não se considerando outras causas importantes de devastação florestal, como a expansão da fronteira agropecuária e urbanística e as queimadas indiscriminadas de reservas florestais. Nesse estudo, observa-se que a exploração da lenha no Brasil representa 70,4% da extração florestal total. Em relação àquilo que se produz de biomassa florestal anualmente no país, 15,3% são explorados visando à obtenção de lenha e carvão vegetal (Figura 23).

TABELA 7
Representatividade da lenha na produção e na extração florestais [10⁶ m³/ano^(a)]

| FATORES | BRASIL | MÉXICO | COLÔMBIA | ARGENTINA | C. RICA |
|--|----------------|--------------|-------------|-------------|------------|
| 1. Produção Anual Estimada | <u>1.238,3</u> | <u>127,2</u> | <u>66,2</u> | <u>65,6</u> | <u>2,9</u> |
| Floresta nativa | 1.044,0 | 127,2 | 66,2 | 52,5 | 2,9 |
| Floresta plantada | 194,3 | - | - | 13,1 | - |
| 2. Extração Florestal Anual ^(b) | <u>268,9</u> | <u>19,1</u> | <u>33,1</u> | <u>11,6</u> | <u>2,4</u> |
| Floresta nativa | 191,2 | 19,1 | 33,1 | 5,2 | 2,4 |
| Floresta plantada | 77,7 | - | - | 6,4 | - |
| 3. Extração de Lenha ^(c) | <u>189,3</u> | <u>12,6</u> | <u>27,2</u> | <u>1,5</u> | <u>1,3</u> |
| 4. Relação (%) entre a Extração da Lenha e a: | | | | | |
| Produção anual | 15,3 | 9,9 | 41,0 | 2,3 | 43,1 |
| Extração anual | 70,4 | 66,0 | 82,2 | 12,9 | 52,1 |
| 5. Relação (%) entre a Extração Anual e a Produção Anual Total | 21,7 | 15,0 | 50,0 | 17,7 | 82,7 |

FONTE - GALLO MENDOZA & SUÁREZ⁽⁷⁾.

(a) Valores médios anuais para distintos períodos das décadas de 70 e 80.

(b) Referente à extração com finalidades madeireiras e energéticas.

(c) Inclui carvão vegetal.

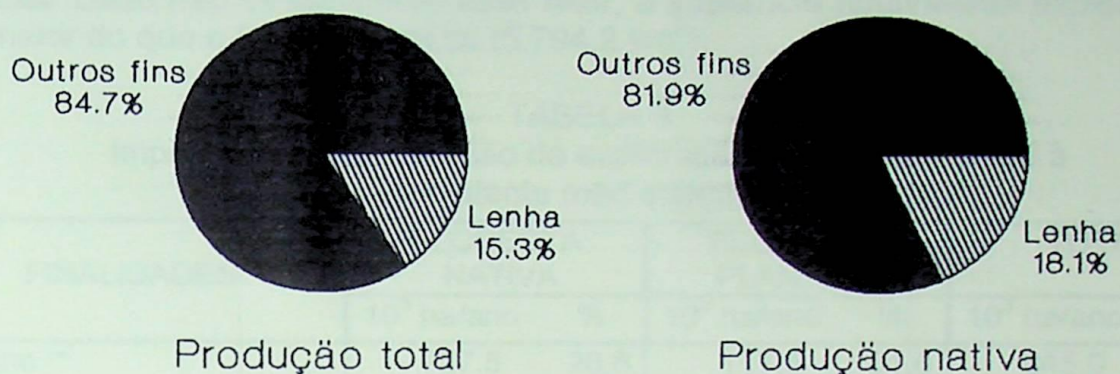


FIGURA 23 - Representatividade da lenha em relação às produções florestais total e nativa
 FONTE - GALLO MENDOZA & SUÁREZ⁽⁷⁾.

Se for considerada apenas a produção florestal nativa, vê-se que dela são extraídos aproximadamente 18% para fins energéticos. É interessante notar que 21,7% da produção anual de biomassa florestal são extraídos para atender às demandas energética e madeireira do país (Figura 24).

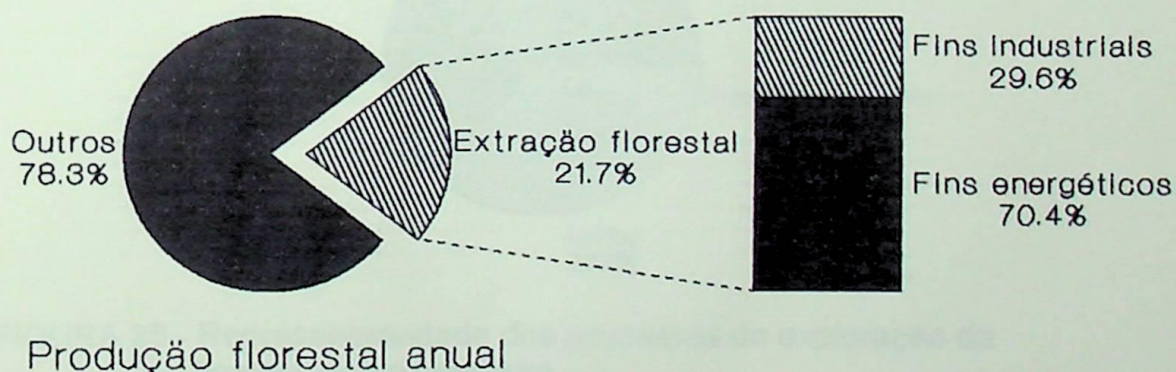


FIGURA 24 - Representatividade da extração florestal anual em relação à produção florestal anual.
 FONTE - GALLO MENDOZA & SUÁREZ⁽⁷⁾.

A Tabela 8 inclui as parcelas representativas das expansões agropecuária e urbanística e as queimadas de florestas. Verifica-se que, no Brasil, essas parcelas são bastante significativas, sendo responsáveis por 63,1% da superfície equivalente de exploração arbórea nativa. Considerando esses fatores, a participação da lenha no processo de utilização do potencial florestal nativo cai para 28,8%. A Figura 25 ilustra

esses acontecimentos típicos. Por esse último trabalho, vê-se que, na média, explora-se uma superfície equivalente a 25.300 km² por ano, superior ao Estado de Sergipe (21.866,6 km²), considerando-se o fator de expansão da fronteira agropecuária e das queimadas. Caso não se considere esse fator, a superfície equivalente explorada (9.325 km²) é maior do que o Distrito Federal (5.794,2 km²).

TABELA 8
Importância dos processo de exploração arbórea referente à
superfície equivalente média explorada do Brasil

| FINALIDADES | FLORESTA NATIVA | | FLORESTA PLANTADA | | TOTAL | |
|-------------------------------------|------------------------|-------|------------------------|-------|------------------------|-------|
| | 10 ³ ha/ano | % | 10 ³ ha/ano | % | 10 ³ ha/ano | % |
| - Lenha (*) | 727,5 | 28,8 | 117,5 | 51,6 | 845,0 | 30,6 |
| - Indústria e Uso Direto | 205,0 | 8,1 | 110,0 | 48,4 | 315,0 | 11,4 |
| - Expansão Agropecuária e Queimadas | 1.597,5 | 63,1 | - | - | 1.597,5 | 58,0 |
| TOTAL EXPLORADO | 2.530,0 | 100,0 | 227,5 | 100,0 | 2.757,5 | 100,0 |

FONTE - GALLO MENDOZA & SUÁREZ⁽⁷⁾.

(*) Inclui carvão vegetal.

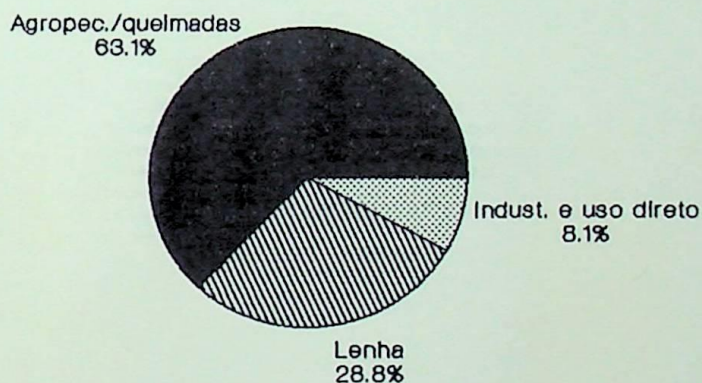


FIGURA 25 - Representatividade dos processos de exploração da floresta nativa brasileira.

FONTE - GALLO MENDOZA & SUÁREZ⁽⁷⁾.

Conclui-se, então, que a **expansão agropecuária, geralmente efetuada na forma de queimadas, é a principal responsável pela redução do potencial dendroenergético brasileiro.**

No aspecto industrial, tem-se que a atividade madeireira é uma das mais expressivas do mundo, porém no Brasil a madeira não é produzida e explorada com a mesma intensidade que nos países industrializados [IPT⁽⁸⁾]. Os maiores consumidores em potencial de madeira no país localizam-se nos Estados mais industrializados das regiões Sul e Sudeste, sendo abastecidos, em grande parte, da madeira proveniente da Floresta

Amazônica. No estudo sobre as florestas plantadas, destaca-se que "o uso de madeira da Amazônia não é por si só uma ameaça ao futuro da floresta, pois sua área florestal, estimada em 350 milhões de hectares (3,5 milhões de km², em torno de 41% do território nacional), assegura uma ampla possibilidade de aumento da produção madeireira".

Com base nessa afirmação, deduz-se que se da metade da Floresta Amazônica fosse retirado apenas 1 m³ de madeira por ha/ano, seria produzido um volume de 175 milhões de m³ de toras, suficiente para atender "aproximadamente cinco vezes a demanda nacional de madeira serrada".

Deduz-se, então, que o Brasil demanda em torno de 35 milhões de m³ de madeira serrada. Não se contabiliza aqui o volume de madeira exportado, nem tampouco aquele que deixa o país ilegalmente.

A COMBUSTÃO DA LENHA

Capítulo 3

A COMBUSTÃO DA LENHA

3 - A COMBUSTÃO DA LENHA

3.1 - Introdução

O objetivo maior deste capítulo é apresentar a equação química da combustão da lenha, que servirá de base para o cálculo do desempenho. Antes, faz-se uma revisão bibliográfica das características químicas e do processo de combustão da lenha, cujas reações químicas, complexas, ainda não são totalmente conhecidas. Os sistemas de conversão termoquímica da lenha são brevemente abordados, seguindo-se a introdução de alguns conceitos particulares à combustão da lenha, indispensáveis ao modelamento matemático do desempenho. Enfim, constitui um preâmbulo do capítulo seguinte, que trata exclusivamente desse modelamento.

3.2 - Características da Lenha

3.2.1 Constituição Química

Segundo WENZEL⁽⁹⁾, não há muita diferença de composição química entre as espécies de madeira, sendo constituídas basicamente de carbono, oxigênio e hidrogênio. De fato, através da análise química elementar detecta-se que a madeira compõe-se, em média, de 50% de carbono, 44% de oxigênio e 6% de hidrogênio, independente de quaisquer fatores, como: espécie vegetal, idade, condições edafo-climáticas, etc. A presença de nitrogênio (N₂) pode ser considerada desprezível.

Por outro lado, a madeira apresenta propriedades físicas significativamente variadas entre as espécies, como: densidade, resistência à tração, à compressão e ao cisalhamento e resistência aos agentes destrutivos [MENDES⁽¹⁰⁾].

Em termos gerais, isto é, desprezando-se a complexidade e a heterogeneidade química da madeira, pode-se afirmar que a sua parede celular constitui-se de três componentes principais: celulose, hemicelulose¹ e lignina - polímeros² formados durante o processo de fotossíntese³. A proporção com que esses três polímeros naturais aparecem na madeira é variável, como pode ser visto na Tabela 9, para algumas espécies. Porém, pode-se também aqui aproximar os valores, obtendo-se a seguinte proporção média: 50% de celulose, 20% de hemicelulose e 30% de lignina, conforme sugere MARTINS⁽¹¹⁾. Naturalmente que a proporção de celulose, hemicelulose e lignina é função de vários fatores, como por exemplo, espécie, idade, etc.

Conforme GOLDSTEIN⁽¹²⁾ e SHAFIZADEH & CHIN⁽¹³⁾, durante o processo de combustão, a hemicelulose, por ser menos estável, degrada-se primeiro, seguindo-se a celulose e, por fim, a lignina, cujo mecanismo de degradação térmica é pouco conhecido. A celulose e a hemicelulose são as principais fontes dos produtos voláteis, enquanto a lignina contribui predominantemente para a formação do resíduo carbonífero. Produz-se

¹ Denomina-se holocelulose a parcela de celulose e hemicelulose da madeira.

² Compostos formados por sucessivas aglomerações de grande número de moléculas fundamentais.

³ Principal processo de acumulação de energia nas plantas, cuja energia radiante ou luminosa é convertida em energia química, potencialmente na forma de carboidratos.

também da lignina, como frações voláteis, o ácido pirolenhoso, grande parte do alcatrão e pequenas frações de produtos voláteis (CO, CO₂, CH₄ e C₂H₆).

TABELA 9
Composição de algumas espécies de plantas superiores

| ESPÉCIE | CELULOSE | HEMICELULOSE | LIGNINA | EXTRATIVOS | CINZAS |
|---------------------------------|----------|--------------|---------|------------|--------|
| <i>Eucalyptus saligna</i> | 49,5 | 16,2 | 24,5 | ... | ... |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 55,0 | 17,3 | 26,2 | ... | ... |
| <i>Eucalyptus decaisneana</i> | 52,7 | 18,9 | 23,6 | ... | ... |
| <i>Eucalyptus camaldulensis</i> | 45,0 | 19,2 | 31,3 | 2,8 | 1,7 |
| <i>Abies balsamea</i> | 49,4 | 15,4 | 27,2 | 4,6 | 0,4 |
| <i>Pinus radiata</i> | 37,4 | 33,2 | 27,1 | 1,8 | 0,4 |
| <i>Pinus banksiana</i> | 47,5 | 16,2 | 27,4 | 8,4 | 0,2 |
| <i>Pinus sylvestris</i> | 40,0 | 28,5 | 27,7 | 3,5 | 0,3 |
| <i>Betula papyrifera</i> | 41,0 | 27,3 | 18,5 | 5,6 | 0,3 |
| <i>Acacia mollissima</i> | 42,9 | 33,6 | 20,8 | 1,8 | 0,9 |
| <i>Populus tremuloides</i> | 49,3 | 21,2 | 18,1 | 4,6 | 0,4 |

FONTE - MARTINS⁽¹¹⁾.
KLING⁽¹⁴⁾.
ELETROBRÁS⁽¹⁵⁾.

3.2.2 Unidades de Medida Usuais

Discute-se neste tópico algumas unidades de medida peculiares à lenha, como o estéreo; outras, embora sejam usadas na caracterização dos demais combustíveis, merecem destaque devido à importância para o gerenciamento do desempenho de sistemas de combustão a lenha. Pode-se citar a massa específica e o conteúdo de umidade.

O estéreo (st), ou metro cúbico estéreo (m³ st), é a medida de volume usual para a lenha, equivalente a 1 m³ de toras empilhadas. Trata-se de uma medida de volume aparente, que se relaciona de modo aproximado com a massa, mas é assim que geralmente se comercializa lenha. Para o cálculo do desempenho, só se justifica o seu uso quando não houver condições de se pesar a lenha a ser consumida no processo de combustão. Dispondo-se de uma balança de capacidade compatível com as toras de lenha, o valor absoluto do desempenho torna-se mais confiável, desde que a lenha pesada seja efetivamente introduzida no sistema de combustão, sem alteração de suas características dimensionais e estruturais identificadas no momento da pesagem. O conteúdo de umidade constitui o principal fator que influencia a massa do estéreo de lenha, isto é, a massa específica.

O conteúdo de umidade ou simplesmente umidade da madeira é o teor de água contida nas suas porosidades, sendo descrito de dois modos: base úmida e base seca. O conteúdo de umidade em base úmida é definido como a razão entre a massa de água presente na madeira e a massa total de madeira úmida. Assim,

$$U_{bu} = \frac{m_a}{m_a + m_{ms}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

ou

$$U_{bu} = \frac{m_a}{m_t} 100 \quad (3.2)$$

onde:

U_{bu} = conteúdo de umidade em base úmida (kg água/kg madeira úmida)

m_a = massa de água presente na madeira (kg)

m_{ms} = massa de madeira seca (kg)

m_t = massa total de madeira úmida (kg)

O conteúdo de umidade em base seca (U_{bs}) é definido como sendo a razão entre a massa de água presente na madeira e a massa de madeira seca. A expressão percentual fica:

$$U_{bs} = \frac{m_a}{m_{ms}} 100 \quad (3.3)$$

Este trabalho segue a regra geral, na qual o conteúdo de umidade refere-se à base úmida, a não ser que se especifique em contrário.

Dividindo-se ambos os termos de equação (3.1) por m_{ms} e combinando-se com a equação (3.3), de forma absoluta, obtém-se a relação existente entre U_{bu} e U_{bs} .

$$U_{bu} = \frac{\frac{m_a}{m_{ms}}}{\frac{m_a}{m_{ms}} + \frac{m_{ms}}{m_{ms}}} \rightarrow U_{bu} = \frac{U_{bs}}{1+U_{bs}} \quad (3.4)$$

Desenvolvendo-se a equação (3.4), vem:

$$U_{bs} = U_{bu} + U_{bu} \cdot U_{bs}$$

$$U_{bs} - U_{bu} \cdot U_{bs} = U_{bu}$$

$$U_{bs} = \frac{U_{bu}}{1 - U_{bu}} \quad (3.5)$$

O conteúdo de umidade da lenha varia bastante em função da espécie de árvore, dos procedimentos de plantio florestal e de produção de lenha, do tipo de armazenamento e manuseio, da proveniência (lugar de cultivo) e da estação do ano em que a árvore é abatida.

Segundo SKAAR⁽¹⁶⁾, a umidade da madeira é encontrada de três formas: vapor d'água, água capilar (também chamada de água de umidade, livre ou absorvida) e água estrutural (também chamada de água de constituição, higroscópica ou adsorvida). Comparados ao vapor d'água ambiente, ou seja, fora da madeira, esses três termos estão em níveis diferentes de energia, de acordo com DADKHAH-NIKOO & BUSHNELL⁽¹⁷⁾. O vapor d'água, do ar contido nas cavidades celulares da madeira, apresenta o mais alto nível de energia, quase igual ao nível de energia do vapor d'água

ambiente. Assim, e considerando também que a quantidade de vapor d'água na madeira é muito pequena, pode-se desprezá-la.

A água capilar ou livre é a que enche os espaços vazios entre as células e suas cavidades. O seu nível de energia é ligeiramente menor que a água no estado líquido do meio ambiente, à mesma temperatura. Isso é devido à força de atração capilar da água. Contudo, para vaporizar essa água absorvida, necessita-se de uma energia ligeiramente maior que a requerida para vaporizar a água no estado líquido do meio ambiente. Devido essa diferença ser pequena, normalmente é desprezada. Então, considera-se o calor de vaporização da água livre igual ao da água líquida do meio ambiente. A água livre reduz-se com o tempo após o corte, sendo a velocidade dessa redução uma função das condições de estocagem. Atingindo-se o ponto de equilíbrio higroscópico, o teor de umidade torna-se variável em função da umidade do ar, aumentando ou diminuindo com sua variação.

A água estrutural ou de constituição é a parte que se encontra dentro das paredes da célula, proveniente da constituição química das moléculas dos três componentes básicos da madeira (celulose, hemicelulose e lignina). O seu nível de energia é menor que o da água capilar, porém exige mais energia para ser vaporizada do que aquela necessária para vaporizar a água capilar.

JUNGE & OSWALD⁽¹⁸⁾ afirmam que há indícios de água capilar na madeira até um mínimo de 20% de umidade em base seca. Menos disso, só existe água estrutural.

Talvez o conteúdo de umidade seja o fator de maior relevância para a combustão da lenha, afetando diretamente sua eficiência. Exerce forte influência sobre a massa específica da madeira, como pode-se observar na Tabela 10 e na Figura 26, onde se apresenta a variação dessa propriedade para algumas espécies em função do conteúdo de umidade.

TABELA 10

Variação da massa específica em função do conteúdo de umidade de algumas espécies arbóreas

| ESPÉCIE | CONTEÚDO DE UMIDADE (%) | | | | |
|--|-------------------------|------|------|------|------|
| | 0 | 15 | 30 | 40 | 50 |
| <i>Eucalyptus saligna</i> | 0,63 | 0,74 | 0,90 | 1,05 | 1,26 |
| <i>Eucalyptus paniculata</i> | 1,03 | 1,21 | 1,47 | 1,72 | 2,06 |
| <i>Eucalyptus robusta</i> | 0,66 | 0,78 | 0,94 | 1,10 | 1,32 |
| <i>Eucalyptus citriodora</i> | 0,99 | 1,16 | 1,41 | 1,65 | 1,98 |
| <i>Astronium unundeuva</i> ^(a) | 1,03 | 1,21 | 1,47 | 1,72 | 2,06 |
| <i>Cedrela fissilis</i> ^(b) | 0,45 | 0,53 | 0,64 | 0,75 | 0,90 |
| <i>Hymenaea stilbocarpa</i> ^(c) | 0,77 | 0,91 | 1,10 | 1,28 | 1,54 |

FONTE - GASA⁽¹⁹⁾.

(a) Aroeira

(b) Cedro

(c) Jatobá

Além do conteúdo de umidade, outros fatores exercem influência na massa específica, como por exemplo, o tipo e a idade da árvore e o tempo de secagem. A massa específica aumenta proporcionalmente com o avanço de idade da árvore até estabilizar-se.

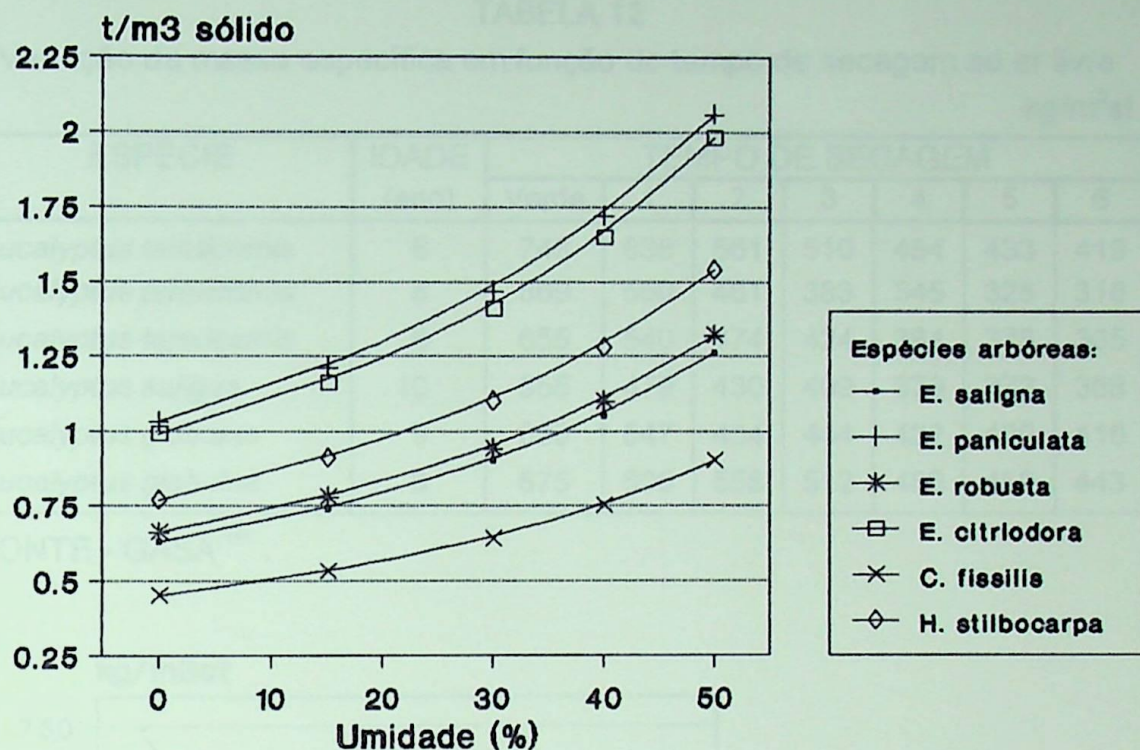


FIGURA 26 - Variação da massa específica com a umidade.

FONTE - GASA⁽¹⁹⁾.

A Tabela 11 apresenta a variação da massa específica em função de algumas espécies arbóreas.

TABELA 11

Variação da massa específica em função do tipo de árvore

| ESPÉCIE | DIÂMETRO MÉDIO DAS TORAS (cm) | MASSA ESPECÍFICA (kg/m ³ st seco) |
|--|-------------------------------|--|
| <i>Eucalyptus tereticornis</i> | 12 a 15 | 493,9 |
| <i>Piptadenia peregrina</i> ^(a) | 12 a 15 | 340,5 |
| <i>Aspidosperma peroba</i> ^(b) | 15 a 20 | 444,7 |
| <i>Peterodon pubescens</i> ^(c) | 12 a 15 | 484,4 |
| <i>Esenbeckia peiocarpa</i> ^(d) | 12 a 15 | 497,4 |

FONTE - GASA⁽¹⁹⁾.

(a) Angico. (b) Peroba. (c) Faveiro. (d) Guarantã

Já a Tabela 12 e a Figura 27 apresentam a variação da massa específica de algumas espécies de eucaliptos em função do tempo de secagem ao ar livre.

TABELA 12

Variação da massa específica em função do tempo de secagem ao ar livre
kg/m³st

| ESPÉCIE | IDADE (ano) | TEMPO DE SECAGEM | | | | | | |
|--------------------------------|----------------|------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | | Verde | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| <i>Eucalyptus tereticornis</i> | 6 | 748 | 635 | 561 | 510 | 454 | 433 | 419 |
| <i>Eucalyptus tereticornis</i> | 6 | 669 | 550 | 461 | 383 | 345 | 325 | 316 |
| <i>Eucalyptus tereticornis</i> | 6 | 655 | 540 | 474 | 424 | 384 | 375 | 365 |
| <i>Eucalyptus saligna</i> | 10 | 555 | 479 | 430 | 409 | 379 | 373 | 368 |
| <i>Eucalyptus globulus</i> | 9 | 689 | 547 | 484 | 444 | 432 | 420 | 416 |
| <i>Eucalyptus globulus</i> | 9 | 675 | 600 | 558 | 512 | 480 | 459 | 443 |

FONTE - GASA⁽¹⁹⁾.

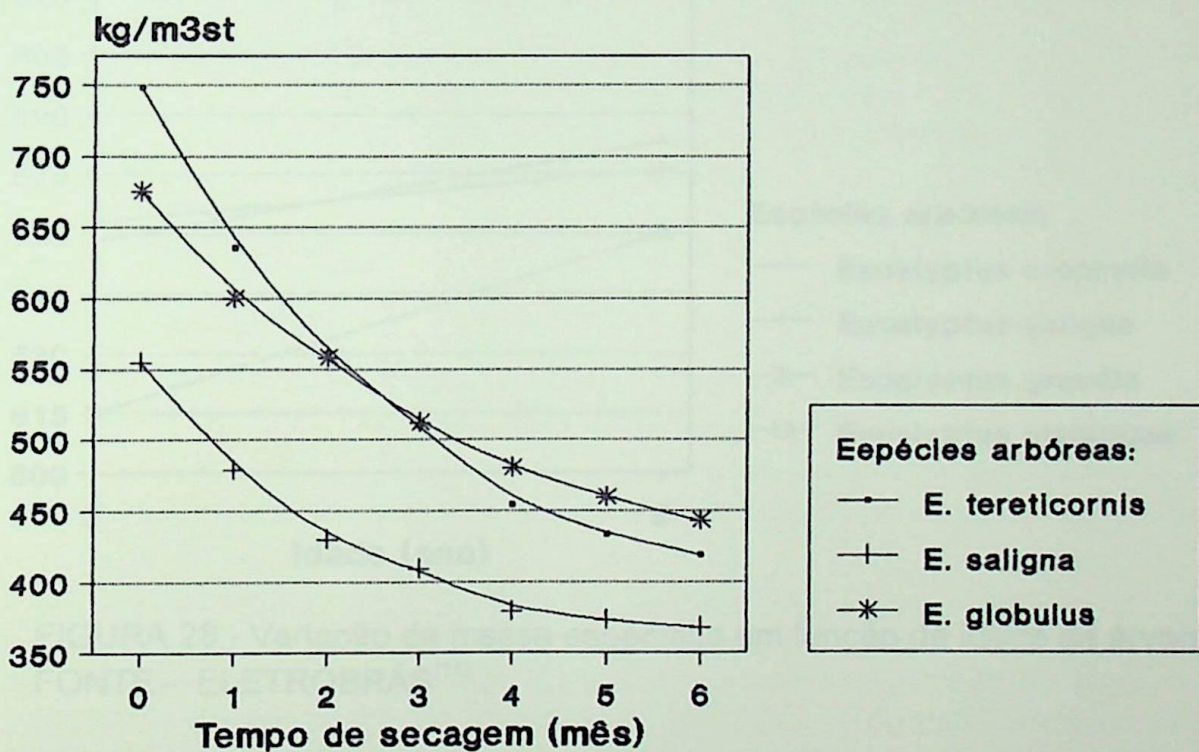


FIGURA 27 - Variação da massa específica com o tempo de secagem ao ar livre de algumas espécies de eucalipto.

FONTE - GASA⁽¹⁹⁾.

A Tabela 13 mostra como a massa específica se altera com a idade de algumas espécies de eucalipto. A Figura 28 ilustra essa alteração. Pode-se observar o ganho de massa diferente entre as espécies de eucalipto no mesmo intervalo de tempo.

TABELA 13

Variação da massa específica em função da idade da árvore
kg/m³st

| ESPÉCIE | IDADE (ano) | |
|-----------------------------|-------------|-----|
| | 7 | 8 |
| <i>Eucalyptus urophylla</i> | 558 | 563 |
| <i>Eucalyptus saligna</i> | 563 | 576 |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | 515 | 560 |
| <i>Eucalyptus propinqua</i> | 628 | 639 |

FONTE - ELETROBRÁS⁽¹⁵⁾.

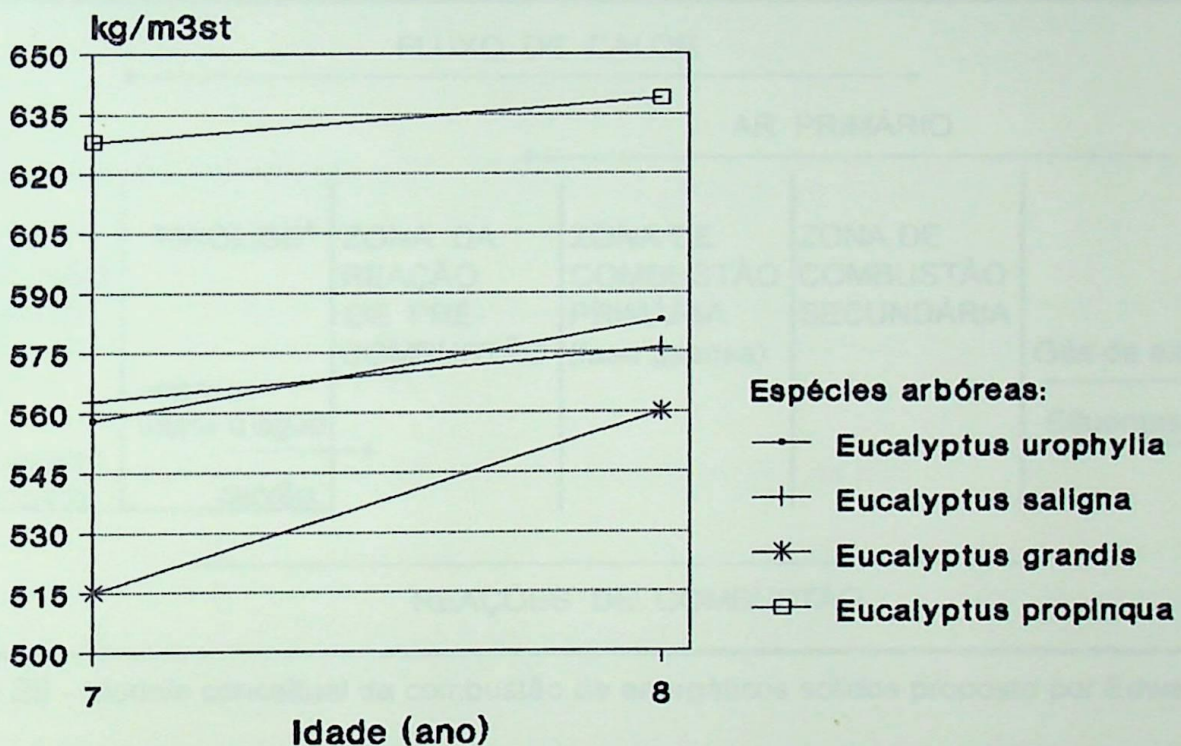


FIGURA 28 - Variação da massa específica em função da idade da árvore

FONTE - ELETROBRÁS⁽¹⁵⁾.

3.3 - O Processo de Combustão da Lenha

Entende-se por processo de combustão da lenha, a sucessão de reações químicas exotérmicas manifestadas entre os elementos de constituição da lenha e o agente oxidante do ar atmosférico. A exemplo de todas as biomassas, a combustão da lenha consiste na oxidação do carbono presente em sua constituição, principal elemento gerador de calor, e na oxidação do hidrogênio excedente produzindo água.

Para TILLMAN et al⁽²⁰⁾, o modelo conceitual de combustão de energéticos sólidos proposto por EDWARDS⁽²¹⁾ facilita a análise dos mecanismos associados à combustão da lenha. No modelo de Edwards, mostrado na Figura 29, há cinco zonas de

reação. Esse modelo ajuda a esclarecer a complexidade das reações ocorridas na combustão da lenha.

Fundamentados nesse modelo conceitual, TILLMAN et al⁽²⁰⁾ estabeleceram quatro estágios básicos de combustão da lenha, quais sejam: a) aquecimento e secagem; b) pirólise da partícula sólida; c) pirólise e oxidação em fase gasosa; e d) oxidação do carvão vegetal.

Fazendo-se uma correspondência entre esses dois modelos, tem-se que o estágio de aquecimento e secagem do modelo de Tillman corresponde à zona de sólido não reagente do modelo de Edwards; os estágios de pirólise da partícula sólida e oxidação do carvão vegetal correspondem à zona de pirólise; e o estágio de pirólise e oxidação em fase gasosa corresponde às zonas de combustão primária e secundária.

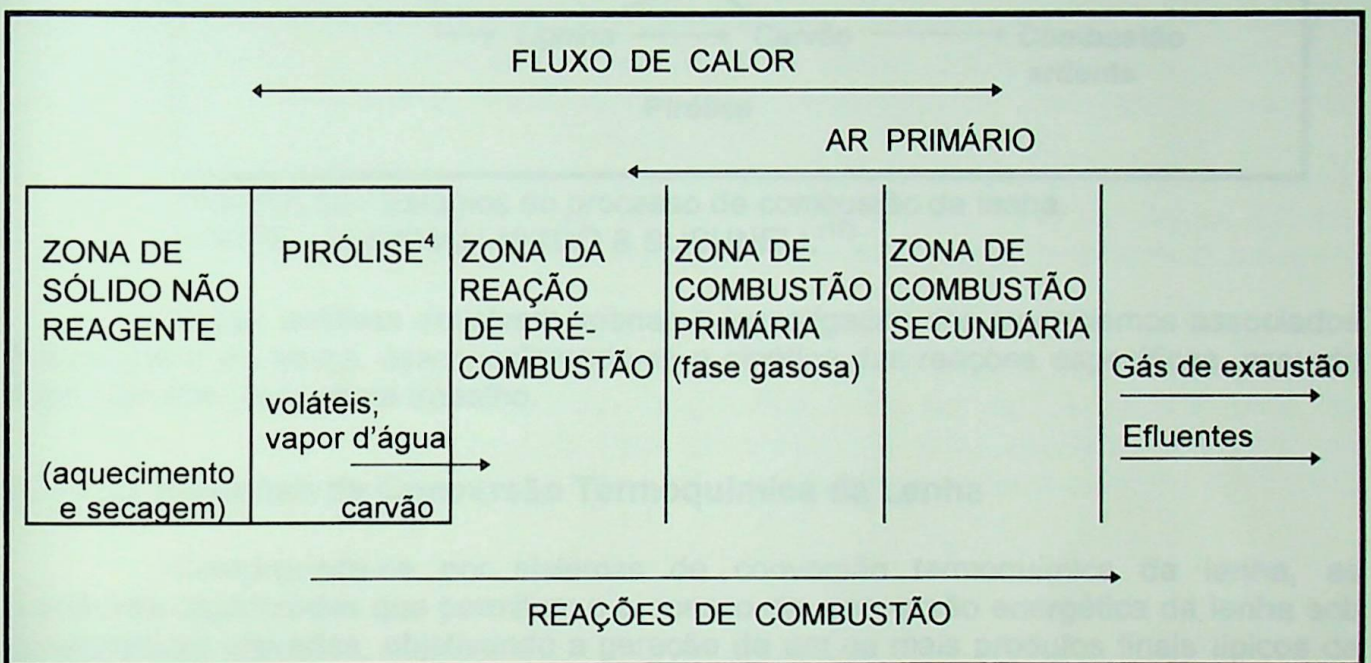


FIGURA 29 - Modelo conceitual da combustão de energéticos sólidos proposto por Edwards.

DADKHAH-NIKOO & BUSHNELL⁽¹⁷⁾ afirmam que a combustão genérica pode acontecer na fase gasosa, chamada de combustão flamejante, ou na fase sólida, denominada ardente, e que a combustão da lenha realiza-se em ambas as fases sólida e gasosa, precedida de secagem da madeira (Figura 30). Segundo esse modelo, no primeiro estágio do processo de combustão da madeira ocorre secagem ou evaporação da umidade. A reação é endotérmica, devendo-se fornecer energia para vaporizar a água. Logo após, inicia-se a fase de pirólise ou queima. Essa etapa ocorre quando se tem uma quantidade disponível de calor suficiente para transformar toda a lenha em gases voláteis e resíduos combustíveis (carvão vegetal).

Os gases combustíveis voláteis resultantes da pirólise podem reagir com o oxigênio na fase de combustão gasosa ou flamejante. Essa reação fornece calor para promover a secagem e a degradação térmica da lenha, bem como a elevação de temperatura dos produtos combustíveis. O resíduo remanescente da pirólise é um

⁴ Degradação química endotérmica e irreversível da madeira, na qual a madeira virgem é transformada em carvão vegetal e vapores combustíveis [KANURY⁽²²⁾].

carvão altamente reativo. A oxidação desse resíduo carbonífero se dá na fase sólida ou de combustão ardente.

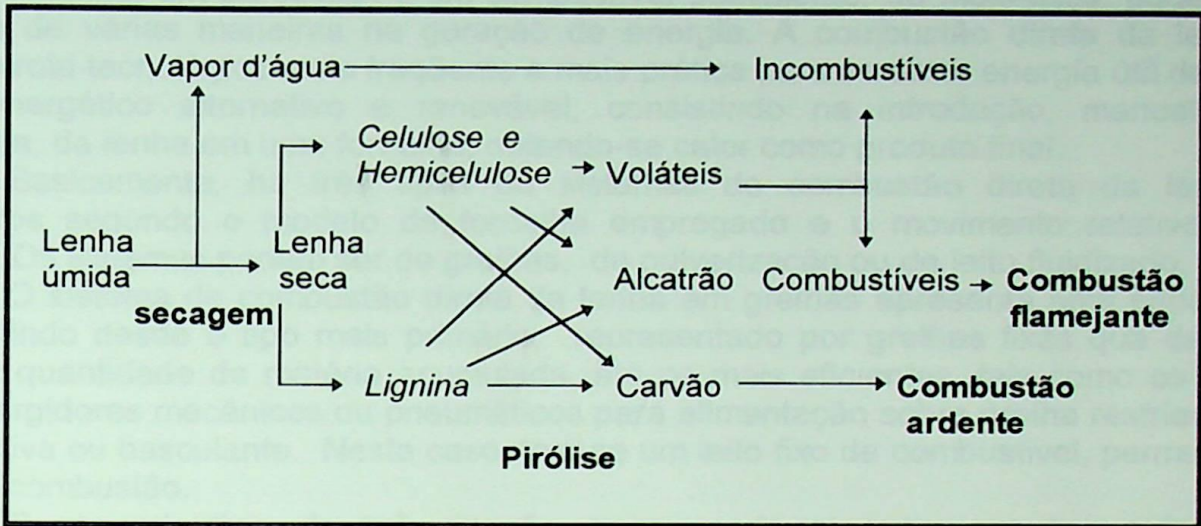


FIGURA 30 - Estágios do processo de combustão da lenha.
 FONTE - DADKHAH-NIKOO & BUSHNELL⁽¹⁷⁾.

Essas análises envolvem apenas a investigação dos mecanismos associados à combustão da lenha, desconsiderando-se a cinética das reações específicas, assunto esse não abordado neste trabalho.

3.4 - Os Sistemas de Conversão Termoquímica da Lenha

Compreende-se por sistemas de conversão termoquímica da lenha, as estruturas organizadas que permitem o processo de conversão energética da lenha sob temperaturas elevadas, objetivando a geração de um ou mais produtos finais típicos de cada estrutura, produtos esses que podem estar na forma de vetores energéticos sólidos, líquidos ou gasosos, ou mesmo ser a própria energia, na forma de calor. Em suma, é onde se realiza o processo de combustão da lenha, de forma integral ou parcial.

A Figura 31 ilustra essa definição, apontando os sistemas de combustão da lenha conhecidos: combustão direta, carbonização e gaseificação.

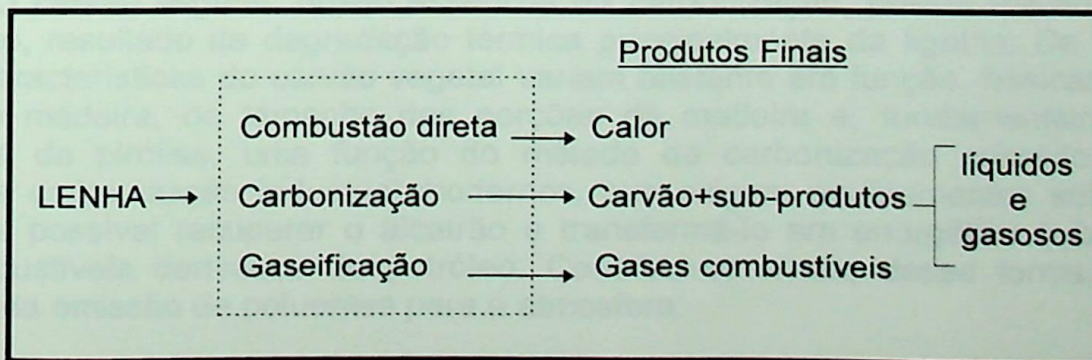


FIGURA 31 - Sistemas de combustão da lenha.

Os três sistemas apresentados serão tratados a seguir, de forma expedita, uma vez que apenas o primeiro deles é o objeto deste trabalho.

3.4.1 Combustão Direta

A lenha, em particular, é um combustível polivalente, de multi-usos, podendo ser usada de várias maneiras na geração de energia. A combustão direta da lenha constitui a rota tecnológica mais freqüente e mais prática para se obter energia útil desse recurso energético alternativo e renovável, consistindo na introdução, manual ou mecanizada, da lenha em uma fornalha, obtendo-se calor como produto final.

Basicamente, há três tipos de sistemas de combustão direta da lenha, classificados segundo o modelo de fornalha empregado e o movimento relativo da biomassa. Os sistemas podem ser de grelhas, de pulverização ou de leito fluidizado.

O sistema de combustão direta da lenha em grelhas apresenta uma série de variantes, indo desde o tipo mais primário, representado por grelhas fixas que detêm uma certa quantidade de matéria acumulada, até os mais eficientes, tais como os que usam espargidores mecânicos ou pneumáticos para alimentação sobre grelha resfriada a água, rotativa ou basculante. Neste caso, tem-se um leito fixo de combustível, permeado pelo ar de combustão.

O segundo tipo, de pulverização, compreende os casos em que a lenha, picada em granulometria adequada, é injetada na fornalha em condições de ser queimada toda, ou quase toda, em suspensão. Neste caso, o movimento da biomassa é essencialmente descendente.

No sistema de leito fluidizado, uma massa de material inerte (areia, calcário, etc.), incombustível, mistura-se à massa de cavacos de madeira, mantidos em suspensão por meio da pressão do ar insuflado. O material inerte tem a função primordial de sustentar alguma eventual demanda extra ou brusca de calor, mediante a cessão de parte de seu calor sensível. Neste último caso, a biomassa comporta-se como um líquido em movimento browniano.

3.4.2 Carbonização

A carbonização convencional consiste na pirólise da lenha em ambiente confinado, em presença de quantidades controladas de ar, gerando como produtos, carvão vegetal, vapores condensáveis (vapor d'água, alcatrão, ácido acético, álcool metílico, etc.) e gases incondensáveis (CO , CO_2 , H_2 , etc.). O fornecimento de calor pode ser autógeno, isto é, obtido pela combustão da própria lenha, ou externo.

O carvão vegetal, objeto essencial da carbonização, possui elevado teor de carbono fixo, resultado da degradação térmica principalmente da lignina. De um modo geral, as características do carvão vegetal variam bastante em função, basicamente, da espécie de madeira, do tamanho das porções de madeira e, fundamentalmente, da temperatura da pirólise, uma função do método de carbonização adotado. Existem métodos de carbonização industrial modernos, que exigem equipamentos sofisticados, tornando-se possível recuperar o alcatrão e transformá-lo em energético substituto de óleos combustíveis derivados de petróleo. Contribui-se ainda, dessa forma, para a diminuição da emissão de poluentes para a atmosfera.

3.4.3 Gaseificação

A gaseificação consiste basicamente na geração de combustíveis gasosos (CO e H_2), de baixo poder calorífico, a partir da combustão parcial da lenha, dos carvões

vegetal e mineral ou de outros combustíveis sólidos, utilizando um dos três meios oxidantes: o ar atmosférico, uma combinação de ar e vapor d'água, ou o oxigênio puro.

Determina-se o agente oxidante a ser empregado no sistema de gaseificação em função do uso que se pretende dar ao gás produzido, ou seja: gás combustível, ou gás de síntese. Utilizando-se apenas o ar atmosférico como agente oxidante na gaseificação, obtém-se o monóxido de carbono (CO) através de uma reação exotérmica com insuficiência de ar proposital, evitando-se assim a conversão de CO (gás combustível) em CO₂ (gás incombustível). O produto final desse tipo de gaseificação recebe o nome de gás de ar ou gás pobre. Caso o meio oxidante utilizado seja a combinação de ar atmosférico e vapor d'água, obtém-se o chamado gás de água, uma mistura combustível de CO e H₂, formada após tratamento do carvão incandescente com jatos de água, numa reação endotérmica. Portanto, o gás de ar e o gás de água destinam-se a finalidades energéticas. Já o emprego de oxigênio puro tem lugar quando se deseja obter o gás de síntese para a produção de metanol, amônia, etc, cujos processos de produção não admitem a presença de nitrogênio (N₂), elemento este que participa com aproximadamente 79% na composição volumétrica do ar atmosférico.

A composição do gás depende fundamentalmente da umidade da lenha que está sendo gaseificada. A elevação da umidade da lenha faz decrescer o teor de componentes combustíveis (CO, H₂, CH₄) no gás, aumentando-se em contra-partida, os teores de vapor d'água e dióxido de carbono (CO₂).

O baixo poder calorífico do gás combustível obtido da gaseificação da biomassa, implica em temperatura de chama baixa, e se constitui na principal limitação para a substituição de derivados de petróleo. Outra limitação é a impossibilidade de ser armazenado, devido não se liqüefazer à temperatura ambiente, devendo ser gerado próximo ao local de consumo. Por outro lado, é um gás isento de enxofre e não forma SO₂ (poluente e corrosivo) durante a sua combustão.

A seguir, serão analisadas as particularidades dos sistemas de combustão a lenha. O modelo matemático realizado baseia-se fundamentalmente na equação química da combustão da lenha, que considera os conteúdos de umidade da lenha e do ar atmosférico e o resíduo carbonífero resultante.

3.5 - Características dos Sistemas de Combustão a Lenha

3.5.1 Coefficiente de Excesso de Ar

Para que a combustão ocorra com bom desempenho, os sistemas de combustão devem operar sempre em condições tais que exista excesso de ar, ou seja, o ar disponível seja superior ao ar estequiométrico⁵, sendo oportuno a existência de um índice que determine se há excesso ou falta de ar na combustão. Esse índice é conhecido como coeficiente de excesso de ar, representado neste trabalho pela letra grega λ , cuja expressão é definida da seguinte forma:

$$\lambda = \frac{\text{massa de ar utilizado}}{\text{massa de ar estequiométrico}} \quad (3.6)$$

⁵ Quantidade exata de ar para promover a combustão completa, isto é, o ar mínimo requerido pelo combustível.

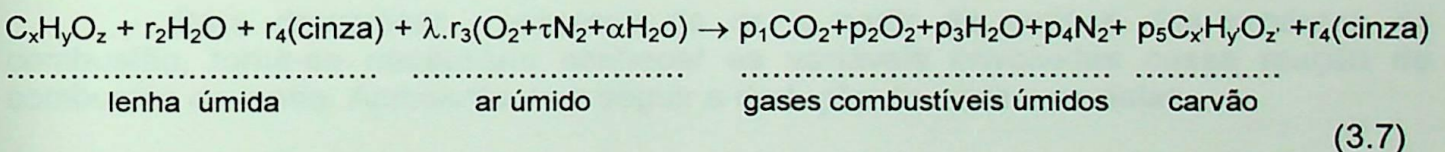
Assim, o coeficiente de excesso de ar pode assumir três situações distintas. A primeira quando for igual à unidade ($\lambda=1$), situação em que a combustão é dita estequiométrica. Na segunda, λ assume valores maiores que 1 ($\lambda>1$), e tem-se combustão com excesso de ar. Na última situação, a combustão ocorre de forma incompleta, com falta de ar, onde $\lambda<1$.

Resumidamente, tem-se:

- $\lambda = 1 \rightarrow$ combustão estequiométrica.
- $\lambda > 1 \rightarrow$ combustão com excesso de ar.
- $\lambda < 1 \rightarrow$ combustão com falta de ar.

Nos sistemas térmicos industriais, que usam o ar atmosférico como fonte de oxigênio (comburente) para efetuar a combustão, a situação real requerida é aquela em que há excesso de ar no ambiente do combustível, para que haja combustão completa. Contudo, o excesso de ar muito alto diminui o desempenho dos sistemas de combustão devido à menor temperatura de chama obtida e ao aumento das perdas na chaminé. Ou seja, há uma redução da temperatura dos produtos de combustão, diminuindo a transferência de calor para o fluido de trabalho, interferindo dessa forma, negativamente no efeito útil desejado para o sistema, bem como o maior fluxo de gases quentes para a atmosfera corresponde a maiores perdas de calor gerado na combustão da lenha. Desse modo, a determinação e controle do excesso de ar é fundamental para a adequada operação dos sistemas de combustão de lenha.

A determinação de λ pela equação (3.6) requer o conhecimento prévio das vazões mássicas de combustível e de ar de combustão, cuja determinação experimental está sujeita a erros consideráveis, principalmente em se tratando de combustão da lenha, complicada por natureza. Contudo, pode-se também determinar λ através do balanceamento da equação química da combustão da lenha:



onde:

x = número de moles de carbono na fórmula molecular equivalente da lenha seca (kmol C/kmol lenha seca).

y = número de moles de hidrogênio na fórmula molecular equivalente da lenha seca (kmol H/kmol lenha seca).

z = número de moles de oxigênio na fórmula molecular equivalente da lenha seca (kmol O/kmol lenha seca).

r_2 = número de moles da umidade da lenha (kmol água/kmol lenha seca).

r_3 = número de moles do ar atmosférico (kmol ar/kmol lenha seca).

r_4 = número de moles da cinza da lenha (kmol cinza/kmol lenha seca).

τ = número de moles de nitrogênio do ar em relação ao oxigênio do ar (kmol N_2 /kmol O_2).

α = número de moles da umidade do ar de combustão em relação ao oxigênio do ar (kmol água/kmol O_2).

λ = coeficiente de excesso de ar.

p_1 = fração volumétrica ou molar de CO_2 dos gases de exaustão secos (kmol CO_2 /kmol lenha seca).

p_2 = fração volumétrica ou molar de O_2 dos gases de exaustão secos (kmol O_2 /kmol lenha seca).

p_3 = fração volumétrica ou molar de umidade dos gases de exaustão secos (kmol água/kmol lenha seca).

p_4 = fração volumétrica ou molar de N_2 dos gases de exaustão secos (kmol N_2 /kmol lenha seca).

p_5 = fração volumétrica ou molar do carvão residual (kmol carvão/kmol lenha seca).

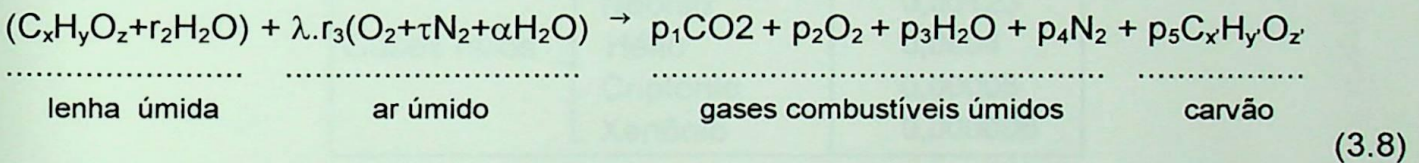
x' = número de moles de carbono na fórmula molecular equivalente do carvão residual (kmol C/kmol carvão).

y' = número e moles de hidrogênio na fórmula molecular equivalente do carvão residual (kmol H/kmol carvão).

z' = número de moles de oxigênio na fórmula molecular equivalente do carvão residual (kmol O/kmol carvão).

Desconsiderou-se a participação do monóxido de carbono (CO) nos produtos de combustão devido sua presença praticamente não interferir no balanço material da equação da combustão da lenha (v. Anexo 2).

Considerando que a fração sólida não combustível (cinza) resultante da combustão esteja presente na mesma proporção identificada pela análise química elementar da lenha, ela pode ser excluída da expressão anterior, que fica assim :



Para determinar o excesso de ar a partir da análise dos produtos de combustão, torna-se necessário conhecer as variáveis envolvidas nessa reação de combustão da lenha. Apresenta-se a seguir a dedução de cada uma delas.

a) Número de moles dos principais elementos constituintes da lenha (x,y,z)

GOLDSTEIN⁽¹²⁾ cita que o efeito global da combustão da lenha pode ser perfeitamente representado pelo produto dos efeitos isolados da combustão de seus principais constituintes da parede celular: celulose, hemicelulose e lignina. KANURY & BLACKSHEAR⁽²³⁾ identificaram a celulose por uma fórmula química empírica, $C_6H_{10}O_5$, e a lignina por $C_{47}H_{52}O_{16}$. A hemicelulose tem composição química similar à celulose, diferenciando desta no peso molecular, fator este que não interfere na combustão.

Assim, tem-se que:

$$\begin{array}{lll}
 a \text{ Celulose} & = a C_{x_1}H_{y_1}O_{z_1} & = a C_6H_{10}O_5 \\
 b \text{ Hemicelulose} & = b C_{x_1}H_{y_1}O_{z_1} & = b C_6H_{10}O_5 \\
 c \text{ Lignina} & = c C_{x_2}H_{y_2}O_{z_2} & = c C_{47}H_{52}O_{16}
 \end{array}$$

onde a,b,c são as proporções médias de celulose, hemicelulose e lignina, respectivamente, da lenha. O resultado do somatório desses índices é igual ao número de moles da lenha seca ($a+b+c = 1$ kmol lenha seca).

Das fórmulas moleculares acima, fica:

$$x = (a+b)6 + c.47 \quad (3.9)$$

$$y = (a+b)10 + c.52 \quad (3.10)$$

$$z = (a+b)5 + c.16 \quad (3.11)$$

b) Teor molar de nitrogênio presente no ar atmosférico em relação ao oxigênio (τ)

O ar atmosférico, manancial do oxigênio propriamente utilizado nos processos de combustão para oxidar os constituintes dos combustíveis, possui a composição volumétrica mostrada na Tabela 14.

TABELA 14
Análise volumétrica do ar atmosférico

| COMPONENTES QUÍMICOS | % | |
|----------------------|-----------|----------|
| Nitrogênio | 78,03 | |
| Oxigênio | 20,99 | |
| Argônio | 0,94 | |
| Dióxido de carbono | 0,03 | |
| Hidrogênio | 0,01 | |
| Gases raros | Neônio | 0,00123 |
| | Hélio | 0,0004 |
| | Criptônio | 0,00005 |
| | Xenônio | 0,000006 |

FONTE - SEN⁽²⁴⁾.

Desses componentes químicos do ar atmosférico, pode-se considerar apenas duas frações representativas:

a) Oxidante (oxigênio) = 20,99% em volume (ou moles)

b) Inertes (nitrogênio e outros gases) = 79,01%

Para o cálculo da combustão, o ar é considerado como sendo composto de 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Nessa base volumétrica chega-se à conclusão de que, para cada kmol de O₂, estão envolvidos $79/21 = 3,76$ kmol de N₂. Então:

$$\tau = 3,76 \text{ kmol N}_2/\text{kmol O}_2 \quad (3.12)$$

A combustão é uma reação química que ocorre entre o oxigênio e as substâncias contidas no combustível. O nitrogênio e demais componentes do ar não reagem com o combustível, contribuindo portanto para baixar as temperaturas ao longo da chama e aumentar as perdas associadas aos gases de exaustão [TILLMAN et al⁽²⁰⁾]. VAN WYLEN & SONNTAG⁽²⁵⁾, entretanto, observam que sob altas temperaturas ocorre alguma reação entre o nitrogênio e o oxigênio, causando a poluição do ar pelos óxidos

de nitrogênio eventualmente presentes nos gases de combustão. Tendo em vista as temperaturas máximas observáveis em sistemas de combustão de lenha até 1200°C, esse fenômeno pode ser desprezado.

c) Teor molar da umidade do ar em relação ao oxigênio (α)

A psicrometria lida com a determinação das propriedades termodinâmicas do ar úmido, que é uma mistura binária de ar seco e vapor d'água. Assim, tem-se:



Considera-se neste trabalho, como usualmente se procede, que tanto o ar seco como o ar úmido comportam-se como gases perfeitos, justificando o manuseio das relações de gás perfeito. Essa simplificação não traz erros significativos nos cálculos das propriedades psicrométricas como, por exemplo, umidade, entalpia e volume específico.

Pode-se definir a umidade relativa (UR) como sendo a razão entre a pressão parcial do vapor d'água contido no ar úmido (P_v) e a pressão de saturação da água pura à mesma temperatura (P_s).

$$\text{UR} = \frac{P_v}{P_s} \quad (3.15)$$

Então:

$$P_v = \text{UR} \cdot P_s \quad (3.16)$$

A fração molar d'água no ar úmido (σ) pode ser definida como sendo a relação existente entre a pressão parcial do vapor d'água contido no ar úmido (P_v) e a pressão atmosférica ou barométrica (P_{atm}).

$$\sigma = \frac{P_v}{P_{\text{atm}}} \quad (3.17)$$

Combinando-se essas duas últimas equações, tem-se que:

$$\sigma = \frac{\text{UR} \cdot P_s}{P_{\text{atm}}} \quad (3.18)$$

Pode-se também definir a fração molar d'água σ como sendo a relação existente entre o número de moles de água no ar ($n_{\text{ag,ar}}$) e o número de moles total do ar úmido (n_{ar}).

$$\sigma = \frac{n_{\text{ag,ar}}}{n_{\text{ar}}} \quad (3.19)$$

Da equação (3.14), obtém-se:

$$\sigma = \frac{\alpha}{1+3,76+\alpha} = \frac{\alpha}{4,76+\alpha} \quad (3.20)$$

Finalmente, combinando-se as equações (3.18) e (3.20), tem-se:

$$\frac{UR \cdot P_s}{P_{atm}} = \frac{\alpha}{4,76+\alpha}$$

$$\alpha = \frac{4,76 UR \frac{P_s}{P_{atm}}}{1 - \left(UR \frac{P_s}{P_{atm}} \right)} \quad (3.21)$$

d) Massa de lenha seca (m_{ls}) e de lenha úmida (m_{lu}), em kg/kmol lenha seca

Define-se o número de moles da lenha seca (n_{ls}) como sendo a razão entre a massa de lenha seca em base molar (m_{ls}) e a respectiva massa molecular (M_{ls}). Então:

$$n_{ls} = \frac{m_{ls}}{M_{ls}} \quad (3.22)$$

Como na reação de combustão, equação (3.8), tem-se que $n_{ls} = 1$ kmol de lenha seca, a equação anterior se reduz a:

$$m_{ls} = M_{ls}$$

Obtém-se a massa molecular da lenha através da soma das massas moleculares dos elementos constituintes da lenha (C,H,O).

$$m_{ls} = 12x + y + 16z \quad (3.23)$$

onde 12, 1 e 16 são as massas atômicas de C, H e O, respectivamente, em kg do elemento/kmol do elemento.

Para encontrar a massa de lenha úmida (m_{lu}) é necessário conhecer a massa de água dessa lenha (m_{ag}), a qual pode ser obtida a partir da definição do conteúdo de umidade da lenha, em base úmida (w_{len}), dado em kg água/kg lenha úmida, com base na equação (3.1), como segue:

$$w_{len} = \frac{m_{ag}}{m_{ls} + m_{ag}} \quad (3.24)$$

Então:

$$m_{ag} = \frac{w_{len} \cdot m_{ls}}{1 - w_{len}} \quad (3.25)$$

Conclui-se, enfim, que:

$$m_{lu} = m_{ls} + m_{ag}$$

$$m_{lu} = 12x + y + 16z + \frac{w_{len} \cdot m_{ls}}{1 - w_{len}} \quad (3.26)$$

onde m_{lu} é dada em kg lenha úmida/kmol lenha seca.

e) Teor molar da umidade da lenha (R_2), em kmol água/kmol lenha seca

Por definição, o número de moles da umidade da lenha é a relação existente entre o número de moles da água contida na lenha e o número de moles da lenha seca. Então:

$$r_2 = \frac{n_{ag, len}}{n_{ls}} \quad (3.27)$$

Sabe-se que $n_{ls} = 1$ kmol de lenha seca, então:

$$r_2 = n_{ag, len} = \frac{m_{ag}}{M_{ag}} \quad (3.28)$$

onde:

$m_{ag, len}$ = massa da umidade da lenha (kg água/kmol lenha seca).

M_{ag} = massa ou peso molecular da água (18 kg água/kmol água).

Assim, tem-se que:

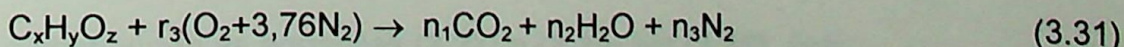
$$r_2 = \frac{m_{ag}}{18} \quad (3.29)$$

Substituindo a equação (3.25) na equação (3.29), vem:

$$r_2 = \frac{w_{len} \cdot m_{ls}}{18(1 - w_{len})} \quad (3.30)$$

f) Teor molar do ar de combustão estequiométrico (r_3), em kmol ar/kmol lenha seca, ou seja, da relação ar/combustível em base molar.

Da equação genérica da combustão completa e sem excesso de ar:



Efetuando o balanço de massa dessa última equação, tem-se que:

-Balanço de carbono:

$$n_1 = x \quad (3.32)$$

-Balanço de hidrogênio:

$$y = 2n_2 \rightarrow n_2 = y/2 \quad (3.33)$$

-Balanço de oxigênio:

$$z + 2r_3 = 2n_1 + n_2$$

$$r_3 = n_1 + \frac{n_2}{2} - \frac{z}{2} \quad (3.34)$$

Equação (3.32) e (3.33) em (3.34), tem-se:

$$r_3 = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2} \quad (3.35)$$

g) Teor molar de carvão residual (p_5), em kmol carvão/kmol lenha seca.

Sendo conhecida ou estimada experimentalmente a produção mássica de carvão residual (χ) em relação ao consumo mássico de lenha seca, tem-se:

$$\chi = \frac{m_{\text{car}}}{m_{\text{ls}}} \rightarrow m_{\text{car}} = \chi \cdot m_{\text{ls}} \quad (3.36)$$

onde:

m_{car} = massa relativa de carvão residual (kg carvão/kmol lenha seca).

m_{ls} = massa relativa de lenha seca (kg lenha seca/kmol lenha seca).

Combinando-se as equações (3.23) e (3.36), vem que:

$$m_{\text{car}} = \chi(12x + y + 16z) \quad (3.37)$$

Por definição:

$$p_5 = \frac{m_{\text{car}}}{M_{\text{car}}} \quad (3.38)$$

onde:

M_{car} = massa ou peso molecular equivalente do carvão (kg carvão/kmol carvão)

$$M_{\text{car}} = 12x' + y' + 16z' \quad (3.39)$$

Substituindo as equações (3.37) e (3.39) em (3.38), fica:

$$p_5 = \chi \frac{12x+y+16z}{12x'+y'+16z'} \quad (3.40)$$

KLAR⁽²⁶⁾ representa o carvão segundo a fórmula química empírica C_8H_5O . TILLMAN et al⁽²⁰⁾ fazem referência à fórmula química do carvão conforme descrita por BRADBURY & SHAFIZADEH⁽²⁷⁾ - $C_{6,7}H_{3,3}O$. Neste trabalho, considerar-se-á a equação referenciada por KLAR⁽²⁶⁾, que parece corresponder melhor a um carvão produzido sob alta temperatura, como é o caso do resíduo de combustão da lenha. Assim:

$$p_5 = \chi \frac{12x+y+16z}{12.8+5+16}$$

$$p_5 = \chi \frac{12x+y+16z}{117} \quad (3.41)$$

h) Número de moles de gás carbônico (CO_2) dos gases de exaustão (p_1), por kmol de combustível.

Efetuando o balanço de massa da equação (3.8) para o carbono:

$$x = p_1 + p_5 \cdot x'$$

$$p_1 = x - p_5 \cdot x' \quad (3.42)$$

i) Número de moles da água presente nos gases de exaustão (p_3), por kmol de combustível.

Balanço de massa de hidrogênio da equação (3.8):

$$y + 2r_2 + 2\lambda r_3 \alpha = 2p_3 + p_5 y'$$

$$p_3 = r_2 + \lambda r_3 \alpha + \frac{y}{2} - p_5 \frac{y'}{2} \quad (3.43)$$

j) Número de moles de oxigênio dos gases de combustão (p_2), por kmol de combustível.

Efetuando o balanço molar da equação (3.8) para o oxigênio atômico:

$$z + r_2 + 2\lambda r_3 + \lambda r_3 \alpha = 2p_1 + 2p_2 + p_3 + p_5 y' \quad (3.44)$$

Substituindo as equações (3.42) e (3.43) em (3.44), vem:

$$z+r_2+2\lambda r_3+\lambda r_3\alpha = 2x-2p_5x'+2p_2+r_2+\lambda r_3\alpha + \frac{y}{2} - p_5\frac{y'}{2} + p_5z'$$

$$z+2\lambda r_3 = 2x-2p_5x'+2p_2 + \frac{y}{2} - p_5\frac{y'}{2} + p_5z'$$

$$\frac{z}{2} + \lambda r_3 = x + p_2 + \frac{y}{4} - p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right)$$

$$p_2 = \lambda r_3 - x - \frac{y}{4} + \frac{z}{2} + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right)$$

Mas, como $r_3 = x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}$, tem-se então:

$$p_2 = \lambda r_3 - r_3 + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right)$$

$$p_2 = r_3(\lambda - 1) + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) \quad (3.45)$$

l) Número de moles do nitrogênio dos gases de exaustão (p_4), por kmol de combustível

Com a equação (3.8), o balanço de massa de nitrogênio é dado por:

$$\lambda r_3 \tau = p_4$$

$$p_4 = 3,76 \lambda r_3 \quad (3.46)$$

Conhecendo-se, assim, todas as variáveis condicionantes da equação da combustão da lenha, torna-se possível determinar o coeficiente de excesso de ar. O modelo adotado neste trabalho para determinar tal coeficiente leva em consideração a análise dos produtos de combustão efluentes do sistema, em base seca⁶, em função do teor (fração volumétrica) de CO₂ ou de O₂ presente neles.

Por definição, o teor de CO₂ dos fumos é a razão entre o número de moles de CO₂ e o número de moles total dos componentes gasosos considerados, inclusive CO₂ e exclusive vapor d'água. Dessa forma, da equação (3.8), tem-se que:

⁶ Há vários métodos experimentais pelos quais tal análise pode ser feita, utilizando-se vários instrumentos hoje existentes, que determinam a composição volumétrica considerando os principais componentes dos gases de exaustão, exceto o vapor d'água. Daí a razão da denominação "em base seca".

$$\%CO_2 = \frac{p_1}{p_1 + p_2 + p_4} \quad (3.47)$$

Substituindo as variáveis p_1 , p_2 e p_4 , anteriormente deduzidas, fica:

$$\%CO_2 = \frac{x - p_5 x'}{x - p_5 x' + r_3(\lambda - 1) + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) + 3,76 \lambda r_3}$$

$$\%CO_2 = \frac{x - p_5 x'}{x + p_5 \left(\frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) + 4,76 \lambda r_3 - r_3}$$

$$\lambda = \frac{x - p_5 x' - \%CO_2 \left[x - r_3 + p_5 \left(\frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) \right]}{4,76 \cdot \%CO_2 \cdot r_3} \quad (3.48)$$

Agindo da mesma forma para o O_2 dos fumos, tem-se que:

$$\%O_2 = \frac{p_2}{p_1 + p_2 + p_4} \quad (3.49)$$

$$\%O_2 = \frac{r_3(\lambda - 1) + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right)}{x - p_5 x' + r_3(\lambda - 1) + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) + 3,76 \alpha r_3}$$

$$\%O_2 = \frac{\lambda r_3 - r_3 + p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right)}{x + p_5 \left(\frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) + 4,76 \lambda r_3 - r_3}$$

$$\lambda = \frac{p_5 \left(x' + \frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) - r_3 - \%O_2 \left[x - r_3 + p_5 \left(\frac{y'}{4} - \frac{z'}{2} \right) \right]}{r_3(4,76 \cdot \%O_2 - 1)} \quad (3.50)$$

Observe-se que a determinação experimental da %CO₂ é mais simples e direta que a %O₂, que pode contudo ser efetuada com equipamento eletrônico e eventualmente ser mais precisa. É interessante observar também que, devido a análise dos teores de CO₂ e O₂ ser em base seca, o coeficiente de excesso de ar independe do conteúdo de umidade tanto da lenha quanto do ar de combustão.

No intuito de verificar a sensibilidade de λ em relação a alguns parâmetros de combustão, simulou-se o seu comportamento em função das flutuações dos valores absolutos de: a) idade de uma mesma espécie de árvore; b) espécie de árvore; c) quantidade de carvão residual presente nas cinzas. As simulações computacionais do comportamento do coeficiente de excesso de ar em relação à flutuação dos valores absolutos desses parâmetros (idade, espécie e presença de carvão residual) encontram-se condensadas nas tabelas que se seguem. Utilizou-se como aparato computacional, o modelo constante no Anexo 5.1.

A Tabela 15 exhibe os teores de celulose, hemicelulose e lignina do *Eucalyptus saligna* referentes a quatro faixas etárias distintas. A Tabela 16 apresenta o

TABELA 15
Composição do *Eucalyptus saligna*

| IDADE (ano) | % | | |
|-------------|----------|--------------|---------|
| | CELULOSE | HEMICELULOSE | LIGNINA |
| 5 | 50,8 | 18,9 | 24,3 |
| 8 | 49,5 | 16,2 | 24,5 |
| 10 | 47,5 | 16,9 | 24,4 |
| 20 | 45,8 | 16,8 | 27,8 |

FONTE - KLING⁽¹⁴⁾.

efeito da variação da idade dessa espécie de árvore sobre as relações que fornecem o coeficiente de excesso de ar para vários teores de CO₂ e O₂ dos produtos de combustão. Nota-se a insignificante variação de λ , em média menos de 0,5%, na maioria dos casos até inexistente, principalmente para os teores de O₂.

TABELA 16
Efeito da idade da árvore sobre o coeficiente de excesso de ar

| %CO ₂ | IDADE (ano) | | | | %O ₂ | IDADE(ano) | | | |
|------------------|-------------|------|------|------|-----------------|------------|------|------|------|
| | 5 | 8 | 10 | 20 | | 5 | 8 | 10 | 20 |
| 4 | 4,75 | 4,74 | 4,74 | 4,73 | 0 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 6 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 3,16 | 2 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,07 |
| 8 | 2,38 | 2,38 | 2,38 | 2,37 | 4 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| 10 | 1,91 | 1,91 | 1,91 | 1,90 | 6 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| 12 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 8 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 |
| 14 | 1,37 | 1,37 | 1,37 | 1,36 | 10 | 1,84 | 1,84 | 1,84 | 1,84 |
| 16 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,19 | 12 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,25 |
| 18 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,06 | 14 | 2,88 | 2,88 | 2,88 | 2,88 |

Espécie: *Eucalyptus saligna*.

Carvão residual: 0,020 kg/kg lenha úmida.

Conclui-se portanto que a idade de uma mesma espécie não interfere de forma significativa na determinação de λ .

No que se refere ao efeito exercido pelas espécies de árvore que estão relacionadas na Tabela 17, sobre λ , a Tabela 18 mostra que o coeficiente de excesso de ar varia muito pouco para um determinado valor de CO_2 dos gases efluentes, em média menos de 1%, não demonstrando variação sensível para os teores de O_2 .

TABELA 17
Composição de algumas espécies de árvore

| REFER. | ESPÉCIE | CELULOSE | HEMICELULOSE | LIGNINA |
|--------|-------------------------------|----------|--------------|---------|
| 1 | <i>Eucalyptus grandis</i> | 55,0 | 17,3 | 26,2 |
| 2 | <i>Eucalyptus decaisneana</i> | 52,7 | 18,9 | 23,6 |
| 3 | <i>Pinus banksiana</i> | 47,5 | 16,2 | 27,4 |
| 4 | <i>Betula papyrifera</i> | 41,0 | 27,3 | 18,5 |

NOTA: Dados transportados da Tabela 9.

TABELA 18
Efeito da espécie de árvore sobre o coeficiente de excesso de ar

| %CO ₂ | ESPÉCIE | | | | %O ₂ | ESPÉCIE | | | |
|------------------|---------|------|------|------|-----------------|---------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 4 | 4,75 | 4,75 | 4,73 | 4,77 | 0 | 0,97 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| 6 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 3,17 | 2 | 1,07 | 1,07 | 1,07 | 1,07 |
| 8 | 2,38 | 2,38 | 2,37 | 2,39 | 4 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,20 |
| 10 | 1,91 | 1,91 | 1,90 | 1,92 | 6 | 1,35 | 1,35 | 1,35 | 1,35 |
| 12 | 1,59 | 1,59 | 1,59 | 1,60 | 8 | 1,56 | 1,56 | 1,56 | 1,56 |
| 14 | 1,37 | 1,37 | 1,36 | 1,37 | 10 | 1,84 | 1,84 | 1,84 | 1,84 |
| 16 | 1,20 | 1,20 | 1,19 | 1,20 | 12 | 2,25 | 2,25 | 2,25 | 2,24 |
| 18 | 1,07 | 1,07 | 1,06 | 1,07 | 14 | 2,88 | 2,88 | 2,88 | 2,88 |

Espécies: Idem Tabela 17.

Carvão residual: 0,020 kg/kg lenha úmida.

Já a variação da produção de carvão residual combustível, remanescente no cinzeiro de um sistema de combustão, implica em sensível variação de λ , de acordo com os dados da Tabela 19.

TABELA 19
Efeito da produção de carvão sobre o coeficiente de excesso de ar

| %CO ₂ | PRODUÇÃO (kg/kg lenha) | | | | %O ₂ | PRODUÇÃO (kg/kg lenha) | | | |
|------------------|------------------------|-------|-------|-------|-----------------|------------------------|-------|-------|-------|
| | 0 | 0,020 | 0,040 | 0,060 | | 0 | 0,020 | 0,040 | 0,060 |
| 4 | 4,87 | 4,73 | 4,60 | 4,46 | 0 | 1,00 | 0,97 | 0,94 | 0,92 |
| 6 | 3,25 | 3,16 | 3,07 | 2,98 | 2 | 1,10 | 1,07 | 1,04 | 1,01 |
| 8 | 2,44 | 2,37 | 2,31 | 2,24 | 4 | 1,23 | 1,20 | 1,16 | 1,13 |
| 10 | 1,96 | 1,90 | 1,85 | 1,79 | 6 | 1,39 | 1,35 | 1,31 | 1,28 |
| 12 | 1,64 | 1,59 | 1,54 | 1,50 | 8 | 1,61 | 1,56 | 1,51 | 1,47 |
| 14 | 1,40 | 1,36 | 1,32 | 1,28 | 10 | 1,89 | 1,84 | 1,79 | 1,73 |
| 16 | 1,23 | 1,19 | 1,16 | 1,13 | 12 | 2,31 | 2,25 | 2,18 | 2,11 |
| 18 | 1,09 | 1,06 | 1,03 | 1,00 | 14 | 2,97 | 2,88 | 2,80 | 2,71 |

Espécie: *Eucalyptus saligna*.

É evidente que a maior ou menor geração de carvão residual também está intimamente relacionada com o tipo e o desenho da grelha do sistema de combustão. Grelhas com maiores espaçamentos possibilitam a passagem de carvões de maiores dimensões, em relação às grelhas com espaçamentos menores. Da mesma forma, as grelhas móveis induzem à geração de maior quantidade de carvão, não querendo afirmar, com isso, que sejam menos eficientes que as grelhas fixas. Pelo contrário, as grelhas móveis fazem com que a carga inerte (cinzas) seja repassada, em grande parte, para o cinzeiro, além de promover maior intimidade entre o combustível sólido e o comburente.

A Figura 32 apresenta curvas de sensibilidade de λ relativas a dois níveis de presença de carvão residual, em função de teores variados de CO_2 dos gases de exaustão. Verifica-se que λ é função inversa do teor de CO_2 e que há um declínio acentuado de λ nos índices inferiores de CO_2 . Quanto mais elevado for o teor de CO_2 , menor será λ .

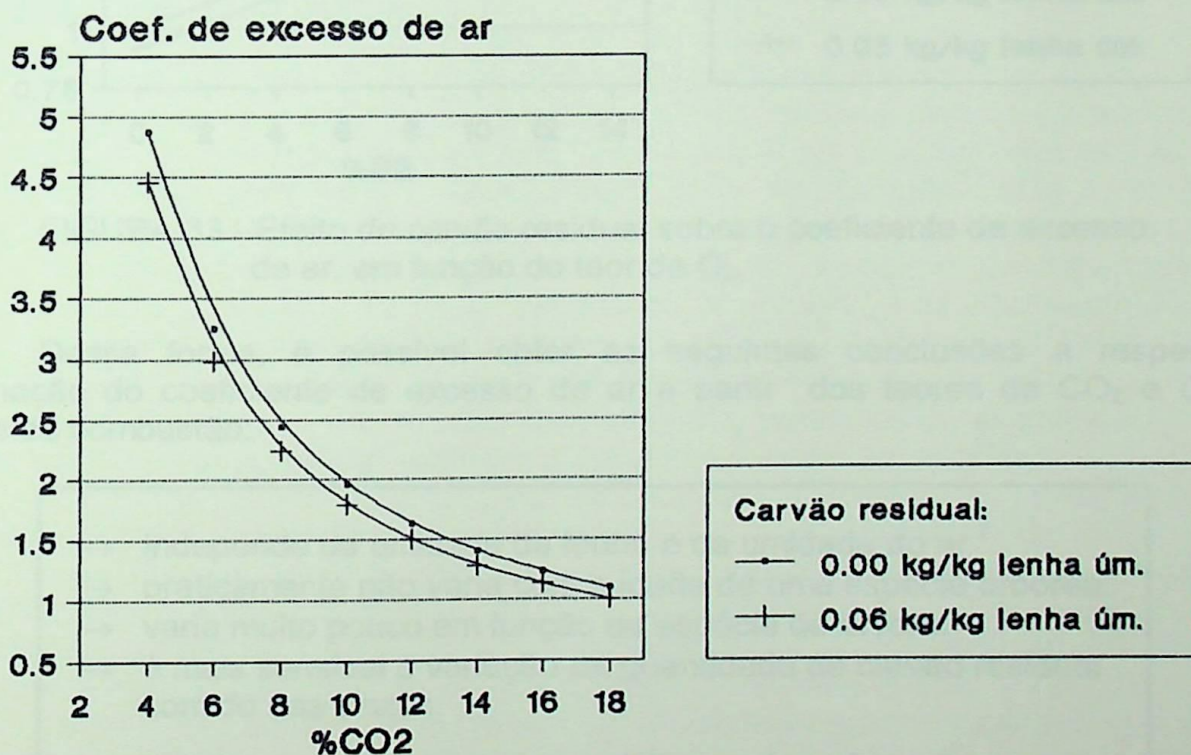


FIGURA 32 - Efeito do carvão residual sobre o coeficiente de excesso de ar, em função do teor de CO_2

A Figura 33 também apresenta curvas de sensibilidade de λ relativas a dois níveis de presença de carvão residual, só que em função de teores variados de O_2 dos gases de chaminé. Verifica-se que λ é proporcional ao teor de O_2 e que há uma inclinação mais acentuada nos índices superiores de O_2 , ao contrário do que se verificou para o teor de CO_2 dos gases de exaustão. Quanto mais elevado for o teor de O_2 , maior será o coeficiente de excesso de ar. Quanto mais elevado for o teor de CO_2 , menor será o coeficiente de excesso de ar.

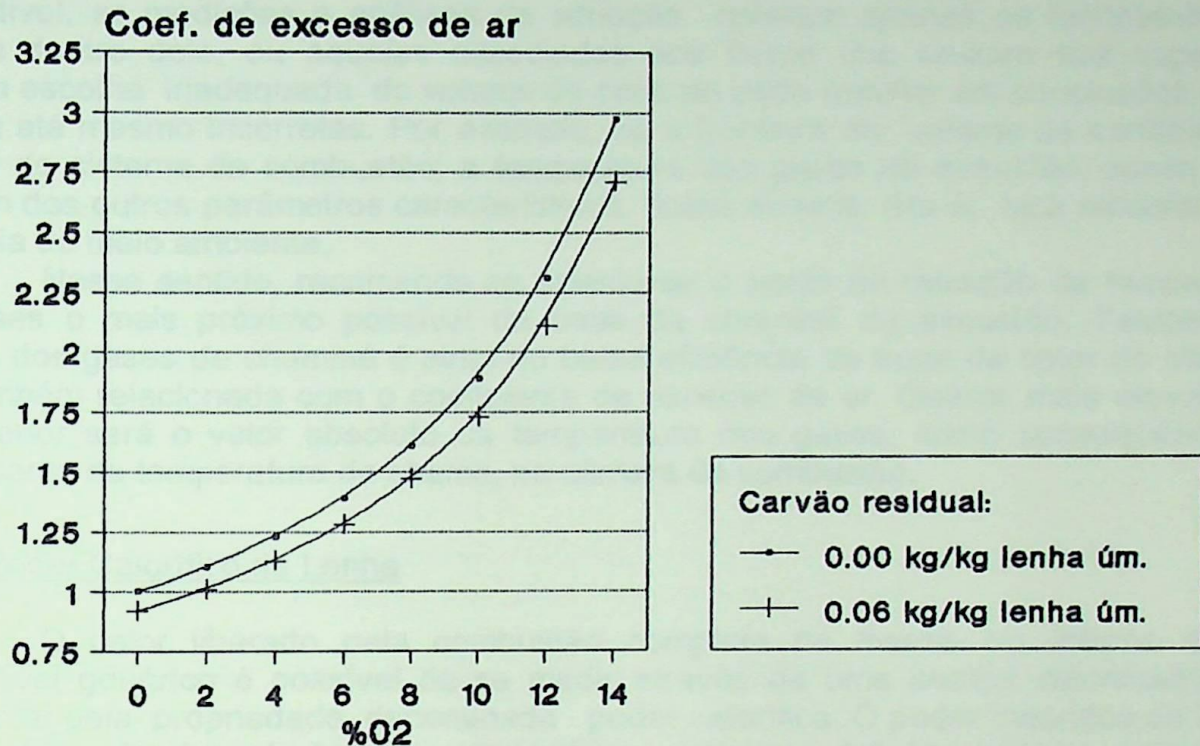


FIGURA 33 - Efeito do carvão residual sobre o coeficiente de excesso de ar, em função do teor de O₂.

Dessa forma, é possível obter as seguintes conclusões a respeito da determinação do coeficiente de excesso de ar a partir dos teores de CO₂ e O₂ nos produtos de combustão:

- independe da umidade da lenha e da umidade do ar ⁷.
- praticamente não varia com a idade de uma espécie arbórea.
- varia muito pouco em função da espécie de árvore.
- é mais sensível à variação da quantidade de carvão residual contido nas cinzas.

3.5.2 - Temperatura dos Gases de Exaustão

A temperatura dos produtos de combustão que abandonam o sistema é de fundamental importância para o cálculo do desempenho. Erros em sua medição podem incorrer em erros significativos no cálculo do desempenho. Portanto, devem ser tomadas algumas precauções durante o procedimento de sua medição. A principal delas consiste em se estabelecer o local adequado para a instalação do instrumento de medição, que deve ser orientado segundo o volume de controle adotado no modelo. Uma vez

⁷ A análise dos gases de exaustão é feita em base seca.

definido esse volume, que delimita a região de efetiva utilização da energia do combustível, as medições e análises de situação refletem apenas os fenômenos que ocorrem dentro dele, ou aqueles associados aos fluxos que cruzam sua superfície. Assim, a escolha inadequada do volume de controle pode resultar em conclusões pouco úteis ou até mesmo incorretas. Por exemplo, se a fronteira do volume de controle ficar distante do sistema de combustão, a temperatura dos gases de exaustão, assim como cada um dos outros parâmetros característicos, ficará afetada, isto é, terá recebido forte influência do meio ambiente.

Nesse sentido, recomenda-se selecionar o ponto de medição da temperatura dos gases o mais próximo possível da base da chaminé de exaustão. Temperatura elevada dos gases de chaminé é sinal de baixa eficiência de troca de calor do sistema. Está também relacionada com o coeficiente de excesso de ar. Quanto mais elevado for este, menor será o valor absoluto da temperatura dos gases, como consequência do abaixamento da temperatura de chama, na câmara de combustão.

3.5.3 - Poder Calorífico da Lenha

O calor liberado pela combustão completa da massa ou volume de um combustível genérico é possível de se medir através de uma bomba calorimétrica e representar pela propriedade denominada poder calorífico. O poder calorífico da lenha, como é determinado pela bomba calorimétrica, pode ser definido como o número de unidades de calor liberado pela massa unitária da lenha, quando queimada em atmosfera contendo gás oxigênio em excesso, sob volume constante. Essa é uma medida do calor liberado quando a lenha é queimada, e constitui importante indicador do potencial energético da lenha de uma determinada espécie de árvore. O poder calorífico depende da composição química da lenha, da qualidade e da natureza dos depósitos de outras matérias orgânicas e inorgânicas, existindo uma ampla variação nesse valor entre espécies, dentro de uma mesma espécie, e até mesmo numa única árvore.

A grande maioria dos combustíveis contém hidrogênio e umidade em sua composição química. Sabe-se que o hidrogênio dos combustíveis pode reagir com o oxigênio do ar, durante a combustão, produzindo água, que acrescida da umidade do combustível, passa a fazer parte dos produtos de combustão. Se a água total resultante da combustão estiver na fase líquida, o poder calorífico é dito superior (PCS). Caso contrário, se estiver vaporizada, diz-se que o poder calorífico é inferior (PCI).

Tanto o PCI como o PCS podem ser utilizados no cálculo do desempenho de sistemas de combustão. A diferença está no fato de PCI deduzir a parcela relativa à entalpia de evaporação da massa total de água passada aos produtos de combustão, por já considerá-la no estado vapor. Portanto, sendo dado o PCS da lenha, para o combustível seco, tem-se que:

$$PCI_s = PCS_s - (m_{af} \cdot h_{lv}) \quad (3.51)$$

onde:

PCI_s = poder calorífico inferior da lenha seca (kJ/kg lenha seca).

PCS_s = poder calorífico superior da lenha seca (kJ/kg lenha seca).

m_{af} = massa de água formada na combustão, pela reação química do hidrogênio da lenha com o oxigênio do ar de combustão (kmol de água/kmol de lenha seca).

h_{lv} = entalpia de vaporização da água à temperatura ambiente (kJ/kg).

Na oxidação do hidrogênio são formados 18 kg de água para cada 2 kg de hidrogênio, logo:

$$m_{af} = 18 \frac{y}{2} \rightarrow m_{af} = 9y \quad (3.52)$$

onde y é a fração de hidrogênio da lenha seca, conforme a equação (3.2), em kmol H_2 /kmol de lenha seca.

Considerando a parcela de carvão não convertido e dividindo o subtraendo da equação (3.51) pela massa de lenha seca (m_{ls}), em kg de lenha seca/kmol de lenha seca (no intuito de apropriar as unidades), tem-se:

$$PCI_s = PCS_s - 9(y - p_5 \cdot y') \frac{h_{lv}}{m_{ls}} \quad (3.53)$$

onde:

p_5 = fração molar do carvão (kmol carvão/kmol lenha seca).

y' = número de moles de hidrogênio do carvão (kmol H/kmol carvão)

Encontra-se o valor correspondente a m_{ls} através da solução da equação (3.23).

Em base úmida, isto é, considerando a lenha com uma certa umidade, o respectivo poder calorífico superior fica:

$$PCS_u = PCS_s(1 - w_{len}) \quad (3.54)$$

onde:

PCS_u = poder calorífico superior, em base úmida (kJ/kg lenha úmida).

w_{len} = conteúdo de umidade da lenha (kg água/kg lenha úmida).

Para se determinar o poder calorífico inferior em base úmida (PCI_u), deve-se deduzir do PCS_u , além da água formada durante o processo de combustão, a parcela equivalente à própria umidade da lenha. Então:

$$PCI_u = PCS_u - (m_{af} \cdot h_{lv}) - (m_{ag} \cdot h_{lv}) \quad (3.55)$$

$$PCI_u = PCS_u - (m_{af} + m_{ag}) \frac{h_{lv}}{m_{lu}} \quad (3.56)$$

onde:

m_{ag} = massa de água na lenha, em base molar (kg água/kmol lenha seca)

m_{lu} = massa relativa de lenha úmida, em base molar (kg lenha úmida/kmol lenha seca)

Tomando por base a equação (3.29), obtém-se que;

$$m_{ag} = 18r_2 \quad (3.57)$$

Então:

$$PCI_u = PCS_u - 9(y - p_5 y' + 2r_2) \frac{h_{lv}}{m_{lu}} \quad (3.58)$$

Encontra-se o valor correspondente a m_{lu} através da solução da equação (3.26).

O carvão residual apresenta conteúdo energético apreciável. O poder calorífico superior, em base seca, assim como nos demais combustíveis, é determinado em bomba calorimétrica. O poder calorífico inferior, em base seca, é calculado subtraindo-se do PCS_s a parcela referente à massa de água formada na combustão, pela reação química do H_2 do carvão residual com o O_2 do ar de combustão. Assim, conforme a equação (3.8), tem-se que:

$$PCIC_s = PCS_c_s - 9p_5y' \frac{h_{lv}}{m_{ls}} \quad (3.59)$$

onde:

$PCIC_s$ = poder calorífico inferior do carvão, em base seca (kJ/kg carvão)

PCS_c_s = poder calorífico superior do carvão, em base seca (kJ/kg carvão)

Em base úmida, isto é, considerando o carvão ainda com uma certa umidade, embora muito pequena, o poder calorífico superior fica:

$$PCSC_u = PCSC_s(1 - w_{car}) \quad (3.60)$$

onde:

w_{car} = conteúdo de umidade do carvão, em base úmida (kg água/kg carvão residual úmido).

Deduzindo-se do $PCSC_s$ a parcela de água formada durante o processo de combustão e a parcela equivalente à própria umidade do carvão residual (ainda que pouco significativa), obtém-se o poder calorífico inferior do carvão, em base úmida.

$$PCIC_u = PCSC_u - 9p_5y' \frac{h_{lv}}{m_{lu}} - w_{car} \cdot h_{lv} \quad (3.61)$$

$$PCIC_u = PCSC_u - h_{lv} \left(\frac{9p_5y'}{m_{lu}} + w_{car} \right) \quad (3.62)$$

A Tabela 58, Anexo 4, apresenta o valor do poder calorífico usual de alguns energéticos renováveis e de outros esgotáveis.

3.5.4 - Consumo de Lenha

Uma das grandes dificuldades para se saber o nível de desempenho de um sistema de combustão a lenha reside nos critérios adotados para se obter o dado referente ao consumo de combustível.

Antes da lenha entrar na fornalha, a medição é muito simples e consiste ou na pesagem de sua massa em balança apropriada, ou então na sua cubagem (medição do volume). Este último procedimento impõe conhecer a densidade aparente da lenha, que pode variar bastante.

A partir do momento da alimentação da fornalha, o consumo torna-se extremamente opaco ao analista energético. Assim, determinar quando iniciar e quando terminar a medição não é trivial. O início do consumo de lenha é influenciado por uma

apreciável inércia térmica, ou seja, primeiro a lenha deve passar pelas etapas de secagem e pirólise para depois queimar nas fases gasosa e sólida. Além disso, no intervalo de combustão de uma determinada massa de lenha, concorre também a quantidade de lenha ainda não totalmente queimada, de alimentações anteriores.

A existência de fração combustível não queimada (carvão) representa um complicador nas medições de consumo de lenha, embora a sua consideração torne mais real o cálculo do desempenho. Esse aspecto foi tratado anteriormente, inclusive sendo geradas curvas de correção para o coeficiente de excesso de ar, em função de duas quantidades de carvão residual adotadas.

Capítulo 4

O DESEMPENHO DE SISTEMAS
DE COMBUSTÃO A LENHA

4 - O DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMBUSTÃO A LENHA

4.1 - Introdução

Este capítulo apresenta a situação corrente e perspectivas de desenvolvimento de sistemas de combustão a lenha e o estado da técnica de sistemas de combustão de madeira em geral. O objetivo principal é estabelecer uma base para a análise de desempenho de sistemas de combustão a lenha, com ênfase na eficiência energética e ambiental. A melhoria de eficiência implica diretamente na redução de custos de operação, redução de emissões e, simultaneamente, na redução proporcional dos impactos ambientais. A melhoria de eficiência implica diretamente na redução de custos de operação, redução de emissões e, simultaneamente, na redução proporcional dos impactos ambientais.

Este capítulo apresenta, de forma sucinta, a situação da técnica de sistemas de combustão a lenha e o estado da técnica de sistemas de combustão de madeira em geral. O objetivo principal é estabelecer uma base para a análise de desempenho de sistemas de combustão a lenha, com ênfase na eficiência energética e ambiental. A melhoria de eficiência implica diretamente na redução de custos de operação, redução de emissões e, simultaneamente, na redução proporcional dos impactos ambientais.

4.2 - Conceitos

Propõe-se aqui, o estudo analítico de alguns conceitos termodinâmicos importantes, que serão utilizados mais adiante nos cálculos preliminares de eficiência de sistemas de combustão de madeira e sistemas de combustão a lenha, sem necessariamente apresentar o assunto.

Talvez por ser uma ciência relativamente recente, a Termodinâmica encerra alguns conceitos sutis, de compreensão relativamente difícil, devido principalmente à forma abstrata de alguns dos seus efeitos se manifestarem, e ao aprofundamento de seu estudo - apenas no nível técnico-tecnológico especializado, que leva naturalmente ao uso da Termodinâmica clássica fundamentada nos dois Princípios (ou Lei). O primeiro, trata-se de uma lei que foi enunciada em 1782, segundo, em 1822, após de Sadi Carnot ter realizado o aprofundamento do conceito de conservação da energia (SZARGUT¹, SOUZA² e DEJAN³). A partir daí, surgiram os conceitos de conservação da energia e os experimentos de Joule, que passaram a ser conhecidos como o Primeiro Princípio da Termodinâmica.

O Primeiro Princípio da Termodinâmica é uma consequência direta das experiências de James Joule, que demonstrou a equivalência entre o trabalho mecânico e a quantidade de calor (SZARGUT¹). Como ambas representam formas de energia, o Primeiro Princípio é a conservação de energia quando em um sistema termodinâmico não há troca de energia com o exterior. Este princípio é de fácil aplicação e largamente utilizado, uma vez que se pode associar um estado físico aos seus estados. A técnica racional de análise de sistemas termodinâmicos é a análise energética, consiste no balanço das energias que entram e saem do volume de controle adotado para os sistemas, considerando-se também as perdas de energia identificadas na transferência entre volumes. A análise energética caracteriza-se assim por ser essencialmente conservativa, sendo pela qual o Primeiro Princípio é frequentemente referenciado como a Lei da Conservação de Energia. As duas

Capítulo 4

O DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMBUSTÃO A LENHA

4 - O DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMBUSTÃO A LENHA

4.1 - Introdução

Este capítulo apresenta os aspectos conceituais e metodológicos do desempenho de sistemas de combustão a lenha, ou seja, representa o núcleo do trabalho, oferecendo roteiros possíveis de se medir a eficiência desses sistemas. Observe-se que, além dos aspectos energéticos, a avaliação do desempenho possui uma conotação ambiental. A melhoria de eficiência implica diretamente na redução de cargas de poluentes lançados à atmosfera e, indiretamente, na redução proporcional dos impactos causados pelas fases anteriores do processo produtivo dos combustíveis utilizados.

Inicialmente, faz-se um breve comentário a respeito do conceito de análise exergética como importante elemento coadjuvante da análise energética. Após essas análises serem identificadas e diferenciadas, os métodos de determinação do desempenho são investigados em detalhe, obtendo-se as expressões matemáticas para cada método, que serão posteriormente submetidas a uma análise de sensibilidade, permitindo identificar as variáveis de processo que interferem significativamente no valor absoluto do desempenho. Para tanto, usa-se um modelo computacional (Anexo 5.3), elaborado em linguagem FORTRAN 77, aplicando a metodologia aqui desenvolvida.

4.2 - Conceitos

Propõe-se aqui, o estudo sintético de alguns conceitos termodinâmicos importantes, que serão utilizados mais adiante nas rotinas preliminares de cálculo das modalidades de desempenho dos sistemas de combustão a lenha; sem naturalmente pretender exaurir o assunto.

Talvez por ser uma ciência relativamente recente, a Termodinâmica encerra alguns conceitos sutis, de compreensão relativamente difícil, devido principalmente à forma abstrata de alguns de seus efeitos se manifestarem e ao aprofundamento de seu estudo apenas no meio técnico-tecnológico especializado, que lida rotineiramente com eles. A Termodinâmica clássica fundamenta-se basicamente em dois Princípios (ou Leis). O primeiro tem-se notícia que foi divulgado em 1840, e o segundo, em 1850; apesar de Sadi Carnot ter motivado o alicerçamento do Segundo Princípio em 1824 [SZARGUT⁽²⁸⁾, SOUZA⁽²⁹⁾ e BEJAN⁽³⁰⁾]. A partir daí, alavancaram-se os estudos das máquinas e equipamentos térmicos, que passaram a ser melhor entendidos.

O Primeiro Princípio da Termodinâmica foi essencialmente apoiado nas experiências de James Joule, que demonstrou a conversão de trabalho em calor [SZARGUT⁽²⁸⁾]. Como ambos representam formas de energia, comprovou-se então a conservação de energia quando um sistema sofre uma mudança de estado. Este princípio é de fácil aceitação e largamente difundido, uma vez que se pode associar um sentido físico aos seus efeitos. A técnica tradicional de avaliação de sistemas térmicos, isto é, a análise energética, consiste no balanço das energias que entram e saem do volume de controle adotado para os sistemas, considerando-se também as perdas de energia identificadas na transposição desse volume. A análise energética caracteriza-se assim, por ser essencialmente conservativa, razão pela qual o Primeiro Princípio ser freqüentemente referenciado como a Lei da Conservação da Energia. As duas

importantes conclusões a serem tiradas aqui é que, primeiro, a energia não pode ser criada nem destruída, mas transformada de uma forma em outra; segundo, todo processo térmico é analisado apenas no aspecto quantitativo dos fluxos de energia que atravessam a fronteira do sistema. Assim, as perdas de energia são avaliadas só em função de valores absolutos de sua ocorrência.

O Segundo Princípio da Termodinâmica, por outro lado, permite avaliar as perdas de energia de forma não apenas quantitativa, mas também qualitativa [BEJAN⁽³⁰⁾]. Dá-se o enfoque qualitativo aos sistemas térmicos graças à evolução do conceito de disponibilidade, que conduz à definição da propriedade termodinâmica exergia¹ e dos conceitos a ela vinculados [GALLO & MILANEZ⁽³¹⁾]. RANT⁽³²⁾ definiu exergia como a parcela de energia possível de ser totalmente convertida em outra modalidade de energia. Corresponde à energia útil máxima que um sistema pode liberar. Como se sabe, a geração de entropia se deve às irreversibilidades do processo, sendo a entropia a propriedade termodinâmica responsável pela abstração conferida a este princípio. Ao contrário da energia, que se conserva, a exergia é destruída pelas irreversibilidades. O conceito de exergia esclarece onde se pode obter melhorias efetivas em um processo térmico e as respectivas magnitudes dessas melhorias; isto é, indica a economia máxima que pode ser atingida usando-se novas tecnologias ou novos processos [WALL⁽³³⁾].

A análise exérgica é de fundamental importância, complementando a análise energética e avaliando as condições ótimas de operação de um sistema funcional, através da indicação da maneira que se deve melhor utilizar a energia disponível. Por intermédio da análise exérgica pode-se perceber claramente a distinção entre as perdas de energia para o meio ambiente² e aquelas próprias do processo, ou seja, as irreversibilidades³ internas ao processo. Quanto menor forem essas perdas, melhor será a qualidade⁴ do processo.

Pode-se simplificar o equacionamento da exergia da seguinte maneira⁵ :

$$ex = h - h_0 - T_0 (s - s_0) \quad (4.1)$$

onde:

ex = exergia específica (kJ/kg)

h = entalpia específica do estado considerado (kJ/kg)

h₀ = entalpia específica de referência (kJ/kg)

T₀ = temperatura de referência (K)

s = entropia do estado considerado (kJ/kg K)

s₀ = entropia de referência (kJ/kg K)

Energia (e) é definida como a variação de entalpia entre o estado considerado e o de referência (meio).

$$e = h - h_0 \quad (4.2)$$

¹ Também chamada de disponibilidade ou energia disponível.

² A exergia é a propriedade de um sistema combinado, qual seja o sistema em análise e o ambiente. Quando um sistema atinge o equilíbrio com o ambiente, não mais possui capacidade de produzir trabalho, isto é, não mais possui exergia. Então o ambiente é o estado limite ou estado morto dos sistemas termodinâmicos. A fim de se calcular a exergia, o ambiente necessariamente deve ser especificado.

³ A análise energética não percebe as irreversibilidades.

⁴ Essa qualidade diz respeito ao desenvolvimento tecnológico.

⁵ Na realidade, a equação (4.1) corresponde à exergia física.

Pode-se definir anergia (a_n) como a parcela de energia incapaz de se transformar em trabalho, e equacioná-la como:

$$a_n = T_0 (s - s_0) \quad (4.3)$$

Combinando-se essas equações, tem-se:

$$e = ex + a_n \quad (4.4)$$

A conclusão interessante a ser extraída dessa equação é que a energia é composta de duas parcelas: exergia, que pode ser convertida em trabalho, e anergia, que não pode ser convertida em trabalho. O equacionamento dos fluxos de energia típicos dos sistemas de combustão a lenha será tratado com detalhes no item seguinte.

Excluindo-se os efeitos nucleares, magnéticos, elétricos e de tensão superficial, a exergia referente ao fluxo de substância pode ser fracionada em quatro componentes distintas (Figura 34): exergia cinética, exergia potencial, exergia física e exergia química [SZARGUT⁽²⁸⁾ e KOTAS⁽³⁴⁾]. A exergia térmica contém as exergias física e química.

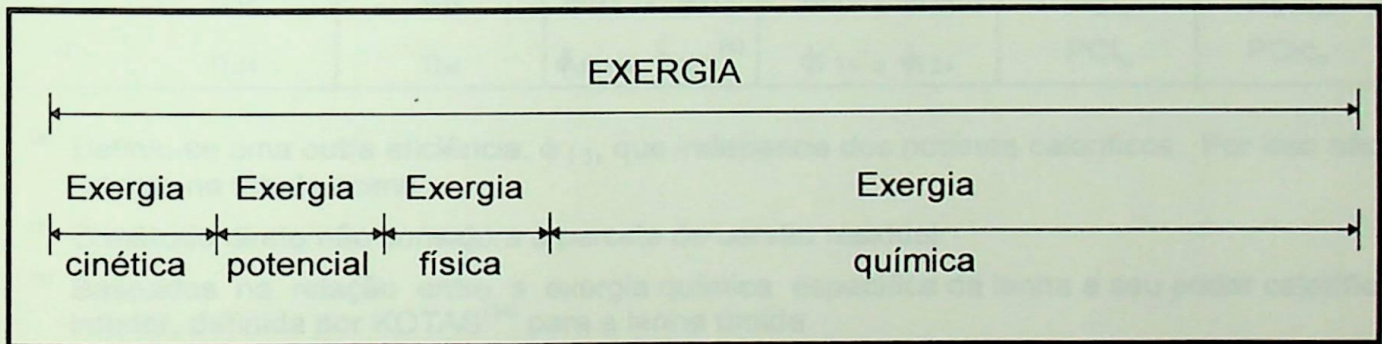


FIGURA 34 - Componentes da exergia.

FONTE - SZARGUT⁽²⁸⁾.

As energias cinética e potencial de um fluxo de substância são completamente transformadas em trabalho. Quando avaliadas em relação ao estado de referência ambiental, elas são iguais às exergias cinética e potencial, respectivamente. A exergia física é igual à quantidade máxima de trabalho obtida quando o fluxo de substância é trazido de seu estado original, definido pela pressão P e temperatura T , até o estado de referência (ambiente, definido pela pressão P_0 e temperatura T_0), em processos físicos envolvendo apenas interação térmica com o ambiente. A exergia química é igual à quantidade máxima de trabalho obtida quando a substância em estudo é trazida do estado de referência (P_0, T_0) ao estado morto irrestrito⁶, em processos envolvendo transferência de calor e troca de substância apenas com o ambiente.

⁶ Quando a substância se encontra em equilíbrio térmico, químico e mecânico com o ambiente. Por exemplo, o estado morto do carbono é como CO_2 , que já não reage mais. Em suma, o estado morto irrestrito é atingido através de variações de pressão, temperatura e reações químicas.

4.3 - Métodos de Cálculo do Desempenho

Especificamente para geradores de vapor, a norma PTC-4.1 [ASME⁽³⁵⁾] e o IPT⁽³⁶⁾ recomendam o poder calorífico superior para o cálculo do desempenho. Neste trabalho serão deduzidas algumas expressões do desempenho de um sistema de combustão a lenha genérico⁷, que pode ser um gerador de vapor ou então um aquecedor de água ou de ar (secador), com base nos poderes caloríficos superior e inferior, cada qual em base úmida e em base seca, objetivando observar os desvios de cada versão metodológica entre si (Tabela 20).

TABELA 20

Convenção dos desempenhos energéticos e exergéticos em função dos poderes caloríficos utilizados (métodos direto e indireto)

| CASO | ANÁLISE ENERGÉTICA | | ANÁLISE EXERGÉTICA | | PODER CALORÍFICO | |
|------|--------------------|---------------|--|------------------------------|------------------|-----------------------|
| | Mét. direto | Mét. indireto | Mét. direto | Mét. indireto ^(a) | Lenha | Carvão ^(b) |
| 1 | η_{d1} | η_{i1} | — | ϕ_{i11} e ϕ_{i21} | PCS _s | PCSC _s |
| 2 | η_{d2} | η_{i2} | — | ϕ_{i12} e ϕ_{i22} | PCS _u | PCSC _u |
| 3 | η_{d3} | η_{i3} | ϕ_{d11} e ϕ_{d12} | ϕ_{i13} e ϕ_{i23} | PCI _s | PCIC _s |
| 4 | η_{d4} | η_{i4} | ϕ_{d21} e ϕ_{d22} ^(c) | ϕ_{i14} e ϕ_{i24} | PCI _u | PCIC _u |

^(a) Definiu-se uma outra eficiência, ϕ_{i3} , que independe dos poderes caloríficos. Por isso não consta na tabela acima.

^(b) O método direto não considera a parcela de carvão residual.

^(c) Baseados na relação entre a exergia química específica da lenha e seu poder calorífico inferior, definida por KOTAS⁽³⁴⁾ para a lenha úmida.

Nota: 1) η_{d1} significa: desempenho energético, método direto, base no PCS_s.

2) η_{i2} significa: desempenho energético, método indireto, base no PCS_u.

3) ϕ_{i13} significa: desempenho exergético, método indireto, base no PCI_s, versão 1.

4) ϕ_{d22} significa: desempenho exergético, método direto, base no PCI_u, versão 2.

A Figura 35 mostra o esquema dos fluxos de massa e calor na entrada e saída de um sistema genérico de combustão a lenha, que será utilizado nas análises energética e exergética. Cada uma dessas análises será abordada segundo os métodos direto e indireto, duas medidas distintas de se avaliar o desempenho. O método direto caracteriza-se pela necessidade de se obter o valor do efeito útil do sistema. Já o método indireto baseia-se na determinação das perdas de energia/ exergia identificadas na transposição da fronteira do volume de controle.

⁷ Excetuam-se fornos e aquecedores de fluido (óleo) térmico.

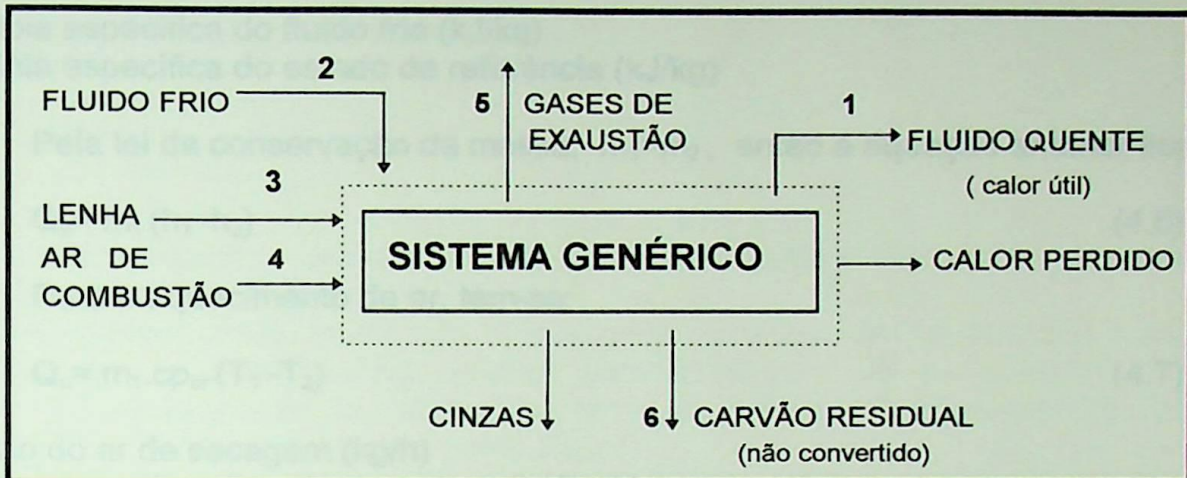


FIGURA 35 - Esquema simplificado do volume de controle referente ao sistema de combustão a lenha genérico.

Convém salientar que o ar de combustão pode ser pré-aquecido por uma fonte de calor qualquer (gases de exaustão, por exemplo), no entanto, o modelo idealizado para este trabalho considera que o fluxo de ar que cruza a fronteira do volume de controle está à temperatura de referência. Nesse caso, a energia e a exergia do ar de exaustão são nulas no ponto 4. O mesmo acontece com a eventualidade de se usar parte do vapor gerado para sopragem de fuligem. Em ambos os casos portanto, o pré-aquecedor de ar e o soprador de fuligem estão dentro do volume de controle proposto,

4.3.1 Análise Energética

4.3.1.1 Método direto

Define-se desempenho ou eficiência energética de sistemas de combustão pelo método direto como sendo a relação existente entre o efeito energético útil produzido pelo sistema e o consumo associado a esse efeito. Ou seja:

$$\eta_d = \frac{\text{Efeito energético útil}}{\text{Consumo de energia associado ao efeito}}$$

O efeito útil corresponde ao calor contido no fluxo mássico do fluido quente que sai do Volume de Controle- V.C., descontando-se o calor contido no fluxo mássico do fluido frio que entra no V.C. Para a geração de vapor e o aquecimento de água, tem-se que esse calor é equivalente a:

$$Q_u = m_1 (h_1 - h_0) - m_2 (h_2 - h_0) \quad (4.5)$$

onde:

Q_u = calor útil produzido pelo sistema de combustão (kJ/h)

m_1 = taxa de fluido quente (kg/h)

h_1 = entalpia específica do fluido quente (kJ/kg)

m_2 = taxa de fluido frio (kg/h)

h_2 = entalpia específica do fluido frio (kJ/kg)

h_0 = entalpia específica do estado de referência (kJ/kg)

Pela lei da conservação da massa, $m_1 = m_2$, então a equação anterior fica:

$$Q_u = m_1 (h_1 - h_2) \quad (4.6)$$

Para o aquecimento de ar, tem-se:

$$Q_u = m_1 \cdot c_{p_{ar}} (T_1 - T_2) \quad (4.7)$$

onde:

m_1 = vazão do ar de secagem (kg/h)

$c_{p_{ar}}$ = calor específico do ar de secagem (kJ/kg K)

T_1 = temperatura do ar quente, na saída (K)

T_2 = temperatura do ar frio, na entrada (K)

O consumo energético associado ao efeito útil corresponde ao aporte de calor gerado pela combustão da lenha.

$$Q_3 = m_3 \cdot q_3 \quad (4.8)$$

onde:

Q_3 = fornecimento total de calor do combustível para o sistema (kJ/h)

m_3 = fluxo mássico de combustível (kg/h)

q_3 = calor fornecido ao sistema por unidade de massa do combustível (kJ/kg)

$$q_3 = c_{p_{len}} (T_3 - T_0) + PC_{len} \quad (4.9)$$

onde:

$c_{p_{len}}$ = calor específico da lenha (kJ/kg K)

T_3 = temperatura da lenha (K)

T_0 = temperatura de referência (K)

PC_{len} = poder calorífico genérico da lenha (kJ/kg)

Como $T_3 = T_0$, então o calor fornecido ao sistema de combustão é equivalente ao poder calorífico da lenha.

$$q_3 = PC_{len} \quad (4.10)$$

Substituindo esta equação na (4.8), obtém-se:

$$Q_3 = m_3 \cdot PC_{len} \quad (4.11)$$

Dessa forma, o desempenho energético dos sistemas de combustão a lenha, pelo método direto e especificamente para os casos de geração de vapor e aquecimento de água, assume a seguinte expressão:

$$\eta_d = \frac{m_1 (h_1 - h_2)}{m_3 \cdot PC_{len}} \quad (4.12)$$

Para o aquecimento de ar, tem-se:

$$\eta_d = \frac{m_1 \cdot c_{p,ar}(T_1 - T_2)}{m_3 \cdot PC_{len}} \quad (4.13)$$

Neste trabalho, calculam-se os calores específicos dos gases com base em RIVKIN⁽³⁷⁾ e IRVINE et al⁽³⁸⁾.

O método direto apresenta dificuldades na coleta de informações requeridas para o cálculo do desempenho, válidas para qualquer tipo de gerador de calor, principalmente na avaliação do consumo de lenha e do efeito útil produzido. Em fornos e secadores, esta última dificuldade é ainda maior.

4.3.1.2 Método indireto

O método indireto baseia-se na determinação das perdas de energia identificadas na fronteira do volume de controle do sistema considerado.

$$\eta_i = \frac{\text{Consumo energético} - \text{Perdas de energia}}{\text{Consumo energético}}$$

então:

$$\eta_i = 1 - \frac{\text{Perdas de energia}}{\text{Consumo energético}} \quad (4.14)$$

Entende-se por perdas, o somatório das modalidades de energia que são perdidas pela interação do ambiente, ou não utilizadas para incrementar a temperatura dos gases de combustão [SKAAR⁽¹⁶⁾]. Classificam-se como as principais perdas de calor que ocorrem no sistema de combustão a lenha: perdas associadas aos gases de exaustão e perdas através das paredes superficiais do sistema. Pode-se citar outras perdas, de menor relevância, como as perdas associadas ao resíduo carbonífero encontrado nas cinzas, as perdas devido às frações combustíveis sólidas (fuligem) presentes na chaminé e, no caso de geradores de vapor, as perdas por purgas, vapor de nebulização e vapor de sopragem de fuligem. Deduzem-se a seguir, algumas dessas perdas, referidas à lenha.

a) Perdas pela chaminé (P_{ch})

Essas perdas podem ser subdivididas em duas componentes: perdas associadas aos gases secos de exaustão e perdas associadas ao vapor d'água presente na chaminé.

$$P_{ch} = P_{gs} + P_{vap} \quad (4.15)$$

onde:

P_{gs} = perdas associadas aos gases secos de exaustão (kJ/kg lenha seca)

P_{vap} = perdas associadas ao vapor d'água na chaminé (kJ/kg lenha seca)

As perdas associadas aos gases secos de exaustão podem ser expressas da seguinte forma:

$$P_{gs} = m_5 \cdot cp_{gs} (T_5 - T_0) \quad (4.16)$$

onde:

m_5 = fluxo mássico de gases secos de chaminé (kg gases secos/kg lenha seca)

cp_{gs} = calor específico médio dos gases secos de chaminé (kJ/kg K)

T_5 = temperatura dos gases de chaminé (K)

T_0 = temperatura de referência (K)

O calor específico médio dos gases secos de exaustão pode ser determinado como sendo a média ponderada dos calores específicos dos produtos secos de exaustão. Considerando a equação química de combustão da lenha (3.8), tem-se que:

$$cp_{gs} = \frac{p_1 \cdot M_{CO_2} \cdot cp_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} \cdot cp_{O_2} + p_4 \cdot M_{N_2} \cdot cp_{N_2}}{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_4 \cdot M_{N_2}} \quad (4.17)$$

onde:

p_1, p_2, p_4 = frações volumétricas ou molares de CO_2 , O_2 e N_2 , respectivamente, dos fumos (kmol de gás/kmol de lenha úmida)

$M_{CO_2}, M_{O_2}, M_{N_2}$ = pesos moleculares de CO_2 , O_2 e N_2 , respectivamente (kg/kmol)

Obtém-se o fluxo de gases secos de chaminé através da soma dos fluxos individuais de cada gás considerado.

$$m_5 = m_{CO_2} + m_{O_2} + m_{N_2} \quad (4.18)$$

$$m_5 = n_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + n_{O_2} \cdot M_{O_2} + n_{N_2} \cdot M_{N_2}$$

$$p_1 = \frac{n_{CO_2}}{n_{I_s}}, \quad p_2 = \frac{n_{O_2}}{n_{I_s}}, \quad p_4 = \frac{n_{N_2}}{n_{I_s}}$$

onde $n_{I_s} = 1$ kmol de lenha seca; então:

$$p_1 = n_{CO_2}, \quad p_2 = n_{O_2}, \quad p_4 = n_{N_2}$$

$$m_5 = p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_4 \cdot M_{N_2} \quad (4.19)$$

O fluxo de gases secos de chaminé (m_5), dado por essa equação, está expresso em kg gases secos/kmol de lenha seca. Para apropriá-lo à unidade kg gases secos/kg lenha seca, deve-se dividi-lo pela massa relativa da lenha, em base molar (m_{I_s}), dada pela equação (3.23). Assim:

$$m_5 = \frac{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_4 \cdot M_{N_2}}{m_{I_s}} \quad (4.20)$$

Substituindo as equações (4.17) e (4.20) em (4.16), vem que:

$$P_{gs} = \left(p_1 \cdot M_{CO_2} \cdot cp_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} \cdot cp_{O_2} + p_4 \cdot M_{N_2} \cdot cp_{N_2} \right) \frac{T_5 - T_0}{m_{ls}} \quad (4.21)$$

As perdas devido à presença de vapor d'água nos gases e exaustão podem ser expressas, considerando a equação química e combustão da lenha (3.8), assim:

$$P_{vap} = \frac{p_3 \cdot M_{ag} \cdot h_{lv}}{m_{ls}} \quad (4.22)$$

onde:

p_3 = fração volumétrica ou molar de vapor d'água na chaminé (kmol água/kmol lenha seca)

M_{ag} = peso molecular da água (kg água/kmol água)

h_{lv} = entalpia de vaporização da água (kJ/kg água)

m_{ls} = massa relativa de lenha seca, em base molar (kg lenha seca/kmol lenha seca)

Considerando que $M_{ag} = 18$ kg/kmol, tem-se que:

$$P_{vap} = \frac{18 \cdot p_3 \cdot h_{lv}}{m_{ls}} \quad (4.23)$$

b) Perdas pelas paredes do sistema de combustão (P_{par}), em kJ/kg lenha seca

Essas perdas representam o fluxo de calor por radiação e convecção para o ambiente, que ocorre através das paredes dos sistemas de combustão. Para caldeiras podem ser utilizados os ábacos da ASME⁽³⁵⁾, que as determinam em função da carga e do porte do sistema. Devido este trabalho pretender oferecer um suporte computacional para o cálculo do desempenho de sistemas de combustão a lenha, obrigatório se faz estabelecer uma rotina de cálculo dessas perdas, porém abordando de maneira simplificada o complexo processo de transferência de calor envolvido. Nesse sentido, orientou-se este trabalho para quantificar as perdas por convecção natural havida nas paredes do sistema de combustão considerado, perdas essas equivalentes ao fluxo de calor por convecção natural, cuja expressão usualmente adotada é:

$$q = k \cdot A \cdot (T_{mp} - T_0) \quad (4.24)$$

onde:

q = fluxo de calor por convecção natural (W)

k = coeficiente de transferência de calor (W/m² K)

A = área da parede considerada (m²)

T_{mp} = temperatura média da parede (K)

T_0 = temperatura de referência (K)

Considerando que $W = J/s$, tem-se que:

$$P_{par} = 3,6 \sum_i k_i \cdot A_i \cdot (T_{mpi} - T_0) \quad (4.25)$$

onde:

P_{par} = perdas médias de calor por convecção natural através das paredes do sistema de combustão (kJ/h)

i = quantidade considerada de paredes do sistema

Para transformar a unidade da equação anterior de kJ/h para kJ/kg lenha seca, deve-se multiplicá-la pelo consumo horário de lenha. Via de regra, o método indireto não exige a medição dos fluxos mássicos havidos na transposição do volume de controle considerado. Então, neste caso único de fluxo de calor através do V.C., será utilizado um dado teórico disponível em catálogos técnicos e mesmo em algumas placas de identificação dos equipamentos geradores de calor: o consumo nominal de lenha⁸. É evidente que vários fabricantes estipulam o consumo nominal com base em dados bibliográficos de consumo específico. O Capítulo 5 tratará da aplicação do modelo matemático do desempenho em sistemas de combustão a lenha reais, oportunidade em que será verificado também, à parte, o comportamento do desempenho em duas situações: a primeira, quando o consumo nominal de lenha corresponder ao dado teórico de catálogos técnicos, e a segunda, quando corresponder ao próprio consumo medido de lenha (característica do método direto). Poder-se-á verificar, então, o desvio que porventura exista no artifício de se adotar o consumo nominal no método indireto.

O dado do consumo nominal de lenha (CNL) é relativo à lenha úmida. Daí, o consumo nominal de lenha seca, em kg/h, fica:

$$CNL_s = CNL(1-w_{len}) \quad (4.26)$$

onde w_{len} é a umidade relativa da lenha (kg água/kg lenha úmida)

Então, as perdas médias de calor por convecção natural através das paredes do sistema de combustão, em kJ/kg lenha seca, ficam assim expressas:

$$P_{par} = \frac{3,6 \sum k_i A_i (T_{mp_i} - T_0)}{CNL_s} \quad (4.27)$$

O coeficiente de transferência de calor (k) pode ser determinado através das equações simplificadas para convecção natural de várias superfícies, para o ar à pressão atmosférica, apresentadas na tabela seguinte.

TABELA 21
Equações simplificadas do coeficiente de transferência de calor

| SUPERFÍCIE | REGIME | |
|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| | Laminar | Turbulento |
| Cilindro horizontal | $k = 1,32 (\Delta T/d)^{1/4}$ | $k = 1,24 (\Delta T)^{1/3}$ |
| Cilindro ou placa vertical | $k = 1,42 (\Delta T/a)^{1/4}$ | $k = 0,95 (\Delta T)^{1/3}$ |
| Placa horizontal | $k = 1,32 (\Delta T/l)^{1/4}$ | $k = 1,43 (\Delta T)^{1/3}$ |

FONTE - HOLMAN⁽³⁹⁾.

NOTA: d = diâmetro (m) a = altura (m) l = comprimento (m)

Observe-se que, em função das condições que tipicamente ocorrem nas unidades que utilizam lenha, o ar não se apresenta estagnado. Dessa forma, o regime pode ser considerado turbulento.

⁸ Representa o consumo de energético referente a uma instalação geradora de calor a plena carga (p.ex., kg lenha/kg vapor).

c) Perdas associadas ao carvão residual (P_{car}), em kJ/kg lenha seca

Sendo dada a produção específica de carvão residual em relação à massa de lenha úmida (χ), essas perdas podem ser assim expressadas:

$$P_{car} = \chi \cdot PC_{car} \quad (4.28)$$

onde PC_{car} representa o poder calorífico do carvão residual encontrado nas cinzas (kJ/kg carvão). Devido à grande variedade de desenhos de grelhas dos sistemas de combustão direta da lenha, à dificuldade de medições práticas e à pouca disponibilidade de informações específicas, torna-se complicado avaliar corretamente o valor da produção específica de carvão residual χ .

Dessa forma, o desempenho energético dos sistemas de combustão a lenha, pelo método indireto, assume a seguinte expressão:

$$\eta_i = 1 - \frac{P_{ch} + P_{par} + P_{car}}{q_3}$$

$$\eta_i = 1 - \frac{P_{ch} + P_{par} + P_{car}}{PC_{len}} \quad (4.29)$$

As perdas mais importantes, de maior magnitude, estão aqui consideradas (P_{ch} e P_{par}). Todavia, como foi dito anteriormente, outras perdas identificadas na transposição da fronteira do volume de controle adotado poderiam ser consideradas, como as associadas com: cinzas, frações combustíveis sólidas (fuligem) e gasosas (CO) nos gases de exaustão e purgas (no caso de sistemas de geração de vapor). Devido, primeiro, à dificuldade de se obter, na prática, o valor energético de cada uma dessas perdas, e segundo, à pouca importância delas em relação às perdas totais, acredita-se não se incorrer em grande erro no valor do desempenho, desprezando-as. Há geradores de vapor que consomem parte do vapor produzido para melhorar o processo de transferência de calor (soprador de fuligem). Considerando que isso venha ocorrer dentro do volume de controle, sem cruzar a sua fronteira, e que as perdas só são identificadas quando a transpõem, não serão consideradas perdas, e sim melhorias tecnológicas do sistema de combustão.

4.3.2 Análise Exergética

Encontram-se, na literatura, vários tipos de expressão para o desempenho exergético. Neste trabalho serão definidas duas versões de desempenho exergético pelo método direto e três versões pelo método indireto.

4.3.2.1 Método direto

Numa primeira versão, define-se desempenho exergético⁹ de sistemas de combustão pelo método direto como a razão entre a variação exergética útil produzida

⁹ Vários são os nomes que se dão ao desempenho exergético: eficiência exergética, eficiência de segunda lei, eficiência racional, eficiência termodinâmica relativa e efetividade.

pelo sistema e o somatório das exergias associadas à transferência de calor para o fluido de trabalho.

$$\phi_d = \frac{\text{Exergia útil produzida}}{\text{Aporte de exergia do sistema}}$$

Considerando o volume de controle adotado, o efeito exerético útil, para os sistemas de geração de vapor e aquecimento de água e ar, pode ser:

$$Ex_u = m_1 \cdot ex_1 - m_2 \cdot ex_2 \quad (4.30)$$

onde:

Ex_u = exergia total útil do sistema de combustão (kJ/h)

m_1 = vazão de fluido quente (kg/h)

ex_1 = exergia específica do fluido quente (kJ/kg)

m_2 = vazão de fluido frio (kg/h)

ex_2 = exergia específica do fluido frio (kJ/kg)

Pela lei da conservação da massa, $m_1 = m_2$, então a equação anterior fica:

$$Ex_u = m_1 (ex_1 - ex_2) \quad (4.31)$$

Para geradores de vapor d'água e aquecedores de água, a variação de exergia específica pode ser assim escrita:

$$ex_1 = h_1 - h_0 - T_0 (s_1 - s_0)$$

$$ex_2 = h_2 - h_0 - T_0 (s_2 - s_0)$$

$$ex_1 - ex_2 = h_1 - h_2 - T_0 (s_1 - s_2) \quad (4.32)$$

onde s_1 e s_2 são as entropias específicas de entrada e saída do fluido (kJ/kg K).

Para o aquecimento de ar, a variação de exergia específica fica [RANT⁽³²⁾]:

$$ex_1 = c_{p_{ar}} \left(T_1 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_2} \right) + R_{ar} \ln \frac{P_1}{P_0}$$

$$ex_2 = c_{p_{ar}} \left(T_2 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_2}{T_0} \right) + R_{ar} \ln \frac{P_2}{P_0}$$

$$ex_1 - ex_2 = c_{p_{ar}} \left[T_1 - T_2 - T_0 \left(\ln \frac{T_1}{T_0} - \ln \frac{T_2}{T_0} \right) \right] + T_0 \cdot R_{ar} \left(\ln \frac{P_1}{P_0} - \ln \frac{P_2}{P_0} \right)$$

$$ex_1 - ex_2 = c_{p_{ar}} \left(T_1 - T_2 - T_0 \ln \frac{T_1}{T_2} \right) + T_0 \cdot R_{ar} \ln \frac{P_1}{P_2} \quad (4.33)$$

onde R_{ar} é a constante do ar (0,2871 kJ/kg K).

O aporte de exergia do sistema corresponde à exergia da lenha consumida no processo de combustão.

$$Ex_{ap} = Ex_3 \quad (4.34)$$

onde:

Ex_{ap} = exergia aportada ou consumo exergético total (kJ/h)

Ex_3 = exergia total da lenha (kJ/h)

De acordo com KOTAS⁽³⁴⁾, existe uma relação (ε) entre a exergia química específica de um combustível e seu poder calorífico inferior, dada por:

$$ex_{comb} = \varepsilon_3 \cdot PCI_{comb} \quad (4.35)$$

então:

$$Ex_3 = m_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot PCI_s \quad (4.36)$$

Essa exergia se refere à lenha seca. Para a lenha úmida, deve-se acrescentar ao poder calorífico a parcela do conteúdo de umidade da lenha [KOTAS⁽³⁴⁾].

$$Ex_3 = m_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot PCI_s + w_{len} \cdot h_{lv} \quad (4.37)$$

onde:

w_{len} = umidade da lenha (kg água/kg lenha)

h_{lv} = entalpia de evaporação da água, à temperatura de referência T_0 (kJ/kg água)

SZARGUT⁽²⁸⁾, baseado em RANT⁽³²⁾, mostra que para a lenha em particular, o fator ε pode ser assim expressado:

$$\varepsilon_3 = \frac{1,0438 + 0,1882(HI/CI) - 0,2509[1 + 0,7256(HI/CI)] + 0,0383(NI/CI)}{1 - 0,3035(OI/CI)} \quad (4.38)$$

onde CI, HI, OI, NI são as frações mássicas, respectivamente, de C, H₂, O₂ e N₂ da lenha,

Dessa forma, o desempenho exergético dos sistemas de combustão a lenha, pelo método direto e especificamente para os casos de geração de vapor e de água quente, assume a seguinte expressão:

$$\phi_{d1} = \frac{m_1 [h_1 - h_2 - T_0 (s_1 - s_2)]}{m_3 \cdot \varepsilon_3 (PCI_s + w_{len} \cdot h_{lv})} \quad (4.39)$$

onde:

m_1 = vazão de vapor ou de água quente (kg/h).

Para a geração de ar quente, tem-se que:

$$\phi_{d1} = \frac{m_1 \{c_{par} [T_1 - T_2 - T_0 \ln(T_1/T_2)] + T_0 \cdot R_{ar} \ln(P_1/P_2)\}}{m_3 \cdot \varepsilon_3 \cdot PCI_s + w_{len} \cdot h_{lv}} \quad (4.40)$$

onde:

m_1 = vazão de ar quente (kg/h).

A segunda versão do desempenho exergético de sistemas de combustão pelo método direto relaciona o efeito exergético útil produzido pelo sistema com a exergia associada à transferência de calor para o fluido de trabalho, deduzidas as demais parcelas de exergia de saída consideradas (Ex_s).

$$\phi_{d2} = \frac{Ex_u}{Ex_3 - Ex_s} \quad (4.41)$$

$$Ex_s = Ex_5 + Ex_{par} + Ex_6 \quad (4.42)$$

onde:

Ex_5 = exergia total dos gases de exaustão (kJ/h)

Ex_{par} = exergia total perdida pelas paredes do sistema térmico (kJ/h)

Ex_6 = exergia total do carvão residual presente nas cinzas (kJ/h)

$$\phi_{d2} = \frac{Ex_u}{Ex_3 - (Ex_5 + Ex_{par} + Ex_6)} \quad (4.43)$$

A exergia útil total (Ex_u) já foi deduzida anteriormente, assim como a exergia total referente à lenha (Ex_3). A exergia térmica dos gases de exaustão (Ex_5) corresponde à soma de suas exergias física (Ex_f) e química (Ex_q).

$$Ex_5 = Ex_f + Ex_q \quad (4.44)$$

Expressa-se a exergia física dos gases úmidos de exaustão do seguinte modo [SZARGUT⁽²⁸⁾, KOTAS⁽³⁴⁾].

$$Ex_f = m_{5u} \left[cp_{gu} \left[T_5 - T_0 \left(1 + \ln \frac{T_5}{T_0} \right) \right] + R_{ch} \cdot T_0 \cdot \ln \frac{P_5}{P_0} \right] \quad (4.45)$$

onde:

m_{5u} = fluxo mássico de gases úmidos de chaminé (kg gases úmidos/kg lenha úmida)

cp_{gu} = calor específico médio dos gases úmidos de chaminé (kJ/kg K)

R_{ch} = constante dos gases úmidos de chaminé (kJ/kmol K)

P_5 = pressão dos gases de chaminé

P_0 = pressão de referência

Em situações práticas, $P_5 = P_0$; daí, a equação anterior fica:

$$Ex_f = m_{5u} \cdot cp_{gu} \{ T_5 - T_0 [1 + \ln(T_5/T_0)] \} \quad (4.46)$$

O fluxo e o calor específicos dos gases úmidos de exaustão podem ser assim expressados:

$$m_{5u} = \frac{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_3 \cdot M_{H_2O} + p_4 \cdot M_{N_2}}{m_{lu}} \quad (4.47)$$

$$c_{p_{gu}} = \frac{p_1 \cdot M_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2}} + p_2 \cdot M_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} + p_3 \cdot M_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + p_4 \cdot M_{N_2} \cdot c_{p_{N_2}}}{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_3 \cdot M_{H_2O} + p_4 \cdot M_{N_2}} \quad (4.48)$$

Combinando-se essas três últimas equações, tem-se a expressão final da exergia física dos gases úmidos de exaustão. Ou seja:

$$Ex_f = \left(\frac{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_3 \cdot M_{H_2O} + p_4 \cdot M_{N_2}}{m_{lu}} \right) \left(\frac{p_1 \cdot M_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2}} + p_2 \cdot M_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} + \dots}{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + \dots} \right. \\ \left. \dots \frac{+ p_2 \cdot M_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + p_2 \cdot M_{N_2} \cdot c_{p_{N_2}}}{+ p_3 \cdot M_{O_2} + p_4 \cdot M_{N_2}} \right) \left[T_5 - T_0 \left(1 + \ln \frac{T_5}{T_0} \right) \right] \\ Ex_f = \frac{p_1 \cdot M_{CO_2} \cdot c_{p_{CO_2}} + p_2 \cdot M_{O_2} \cdot c_{p_{O_2}} + p_3 \cdot M_{H_2O} \cdot c_{p_{H_2O}} + p_4 \cdot M_{N_2} \cdot c_{p_{N_2}}}{m_{lu}} \left[T_5 - T_0 \left(1 + \ln \frac{T_5}{T_0} \right) \right] \quad (4.49)$$

A exergia química desses gases pode ser assim expressa [30,37]:

$$Ex_q = m_{5u} \cdot R_{ch} \cdot T_0 \sum_i y_i \cdot \ln \frac{y_i}{y_i^0} \quad (4.50)$$

onde:

y_i = fração molar dos componentes principais nos gases de exaustão (kmol componente/kmol gases combustíveis úmidos)

y_i^0 = fração molar desses componentes no ambiente de referência (kmol componente/kmol ar atmosférico)

As frações molares y_i^0 são referentes à Tabela 14 (Capítulo 3).

Considerando o modelo de combustão da lenha adotado neste trabalho, a equação anterior para gases úmidos [SZARGUT⁽²⁸⁾] fica:

$$Ex_q = m_{5'} \cdot R_{ch} \cdot T_0 \left[y_{CO_2} \cdot \ln \frac{y_{CO_2}}{y_{CO_2}^0} + y_{O_2} \cdot \ln \frac{y_{O_2}}{y_{O_2}^0} + y_{N_2} \cdot \ln \frac{y_{N_2}}{y_{N_2}^0} + y_{H_2O} \cdot \ln \frac{y_{H_2O}}{X_{gu}} + \ln(1 + X_{gu}) \right] \quad (4.51)$$

onde X_{gu} é a umidade absoluta molar dos gases de exaustão úmidos (kmol água/kmol gases secos), que pode ser interpretada da seguinte maneira:

$$X_{gu} = \frac{p_3}{p_1 + p_2 + p_4} \quad (4.52)$$

Define-se a constante R de um gás qualquer como sendo a relação existente entre a constante universal dos gases e o peso molecular do gás em estudo. Para os gases de exaustão, tem-se que:

$$R_{ch} = \frac{R}{M_{ch}} \quad (4.53)$$

onde:

R_{ch} = constante dos gases de exaustão (kJ/kg K)

R = constante universal dos gases (8,314 kJ/kmol K)

M_{ch} = peso molecular médio dos gases de exaustão (kg/kmol gases úmidos)

$$M_{ch} = \sum_i y_i \cdot M_i \quad (4.54)$$

$$M_{ch} = y_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + y_{O_2} \cdot M_{O_2} + y_{H_2O} \cdot M_{H_2O} + y_{N_2} \cdot M_{N_2} \quad (4.55)$$

Combinando-se as equações (4.53) e (4.55), obtém-se a expressão final da constante dos gases de chaminé.

$$R_{ch} = \frac{8,314}{y_{CO_2} \cdot M_{CO_2} + y_{O_2} \cdot M_{O_2} + y_{H_2O} \cdot M_{H_2O} + y_{N_2} \cdot M_{N_2}} \quad (4.56)$$

Associando-se as equações (4.47), (4.52) e (4.56) à equação (4.51), obtém-se a exergia química dos gases de exaustão (Ex_q) que, por sua vez, somada à exergia física dos gases de exaustão (Ex_f) fornece a exergia térmica (Ex_s) desses gases.

$$Ex_q = \left(\frac{p_1 \cdot M_{CO_2} + p_2 \cdot M_{O_2} + p_3 \cdot M_{H_2O} + p_4 \cdot M_{N_2}}{m_{lu}} \right) \left(\frac{8,314}{y_{CO_2} M_{CO_2} + y_{O_2} M_{O_2} + y_{H_2O} M_{H_2O} + y_{N_2} M_{N_2}} \right) \\ \dots \left[y_{CO_2} \cdot \ln \frac{y_{CO_2}}{y_{CO_2}^0} + y_{O_2} \cdot \ln \frac{y_{O_2}}{y_{O_2}^0} + y_{N_2} \cdot \ln \frac{y_{N_2}}{y_{N_2}^0} + y_{H_2O} \cdot \ln \frac{y_{H_2O}}{p_3 / (p_1 + p_2 + p_4)} + \ln \left(1 - \frac{p_3}{p_1 + p_2 + p_4} \right) \right] \quad (4.57)$$

A exergia perdida pelas paredes do sistema térmico pode ser assim equacionada:

$$Ex_{par} = \sum_i Q_{par_i} [1 - (T_0 / T_{mp_i})] \quad (4.58)$$

onde:

Q_{par_i} = fluxo médio de calor através das paredes, por convecção natural (kJ/h)

T_{mp_i} = temperatura média das paredes (K)

$$Q_{par_i} = P_{par} \quad (4.59)$$

onde P_{par} é a perda total de calor pelas paredes.

A exergia do carvão residual presente nas cinzas pode ser tratada de forma análoga à exergia da lenha. Então, para o carvão seco tem-se que:

$$Ex_6 = m_6 \cdot \varepsilon_6 \cdot PCIC_s \quad (4.60)$$

Daí, para o carvão úmido:

$$Ex_6 = m_6 \cdot \varepsilon_6 (PCI_{C_s} + w_{car} \cdot h_{lv}) \quad (4.61)$$

onde w_{car} corresponde à umidade do carvão (kg água/kg carvão)

$$m_6 = \chi \cdot m_3 \quad (4.62)$$

onde χ é a produção específica de carvão (kg carvão/kg lenha úmida)

Assim,

$$Ex_6 = \chi \cdot m_3 \cdot \varepsilon_6 (PCI_{C_s} + w_{car} \cdot h_{lv}) \quad (4.63)$$

Conhecidos os fluxos exergéticos considerados e substituindo-os na equação (4.43), obtém-se o desempenho exergético dos sistemas de combustão a lenha, pelo método direto e especificamente para os casos de geração de vapor e de água quente¹⁰.

$$\phi_{d2} = \frac{m_1 [h_1 - h_2 - T_0 (s_1 - s_2)]}{Ex_3 + Ex_4 - (Ex_5 + Ex_{par} + Ex_6)} \quad (4.64)$$

Para o aquecimento de ar, tem-se que:

$$\phi_{d2} = \frac{m_1 \{c_{p_{ar}} [T_1 - T_2 - T_0 \ln(T_1/T_2)] + T_0 \cdot R_{ar} \ln(P_1/P_2)\}}{Ex_3 + Ex_4 - (Ex_5 + Ex_{par} + Ex_6)} \quad (4.65)$$

4.3.2.2 Método indireto

A motivação básica do método indireto reside no fato de independer da obtenção dos valores das vazões mássicas ocorridas no sistema de combustão, por serem geralmente difíceis de avaliar, gerando imprecisões significativas nos cálculos de desempenho, sobretudo tendo-se em conta que o regime de operação desses sistemas não é permanente. Por isso, torna-se necessário determinar todos os fluxos exergéticos considerados no sistema em função de uma variável específica, que seria eliminada no desenvolvimento da equação do desempenho por constar em todos os fatores do numerador e do denominador da razão. Obviamente essa variável será o aporte de calor do sistema, isto é, o calor fornecido pelo combustível.

$$Ex_3 = Ex_u + Ex_s + Ex_{deg} \quad (4.66)$$

onde:

Ex_u = exergia útil do sistema (kJ/h)

Ex_s = soma das parcelas restantes de exergia de saída do sistema (kJ/h), dada pela equação (4.42)

Ex_{deg} = exergia total degradada (kJ/h)

$$Ex_3 = Ex_u + Ex_s + Ex_{par} + Ex_6 + Ex_{deg} \quad (4.67)$$

¹⁰ Devido à grande extensão da equação final de ϕ_{d2} , evitou-se colocá-las no texto. No programa computacional, as parcelas exergéticas são calculadas individualmente e depois inseridas na equação final.

A degradação de exergia (Ex_{deg}) representa uma perda exérgica do sistema. As irreversibilidades presentes no uso de combustíveis são essencialmente devidas a dois fatores: transferência de calor com diferenças finitas de temperatura e irreversibilidades próprias da combustão.

$$Ex_{deg} = Ex_{tc} + Ex_{ic} \quad (4.68)$$

onde:

Ex_{tc} = parcela da exergia degradada devido à transferência de calor com grandes diferenças de temperatura (kJ/h)

Ex_{ic} = parcela da exergia degradada devido às irreversibilidades típicas da combustão (kJ/h)

Assim, pela 2ª Lei, uma câmara de combustão atua como produtora de entropia. Ou seja, a combustão é um fenômeno irreversível. Uma forma de avaliar a distribuição das irreversibilidades da combustão é através do conceito de temperatura efetiva de chama [BEJAN⁽³⁰⁾, NOGUEIRA⁽⁴⁰⁾]. Tal temperatura, que corresponde à temperatura da fonte quente para um ciclo de Carnot associado à câmara de combustão, permite avaliar a influência da forma de utilizar a energia liberada pelo combustível.

$$Ex_{tc} = Q_3 \left(\frac{T_0}{T_t} - \frac{T_0}{T_{ef}} \right) \quad (4.69)$$

onde:

Q_3 = calor total fornecido pelo combustível, no caso a lenha (kJ/h)

T_t = temperatura média termodinâmica do fluido de trabalho (K)

T_{ef} = temperatura efetiva de chama (K)

$$Ex_{ic} = Ex_3 - Ex_g \quad (4.70)$$

onde Ex_g corresponde à exergia total dos gases na câmara de combustão (kJ/h)

$$Ex_{ic} = \varepsilon_3 \cdot Q_3 - Q_3 [1 - (T_0/T_{ef})]$$

$$Ex_{ic} = Q_3 [\varepsilon_3 - 1 + (T_0/T_{ef})] \quad (4.71)$$

Substituindo as equações (4.69) e (4.71) em (4.68), obtém-se a exergia degradada total.

$$Ex_{deg} = Q_3 [(T_0/T_t) - (T_0/T_{ef})] + Q_3 [\varepsilon_3 - 1 + (T_0/T_{ef})]$$

$$Ex_{deg} = Q_3 [\varepsilon_3 - 1 + (T_0/T_t)] \quad (4.72)$$

A temperatura média termodinâmica de um fluido é a relação existente entre o salto entálpico do fluido e a variação de entropia havida nesse processo. Ou seja,

$$T_t = (h_1 - h_2)/(s_1 - s_2) \quad (4.73)$$

Para o caso típico de aquecimento de ar, essa equação pode ser desenvolvida da seguinte forma:

$$T_t = \frac{m_1 \cdot c_{p_{ar}}(T_1 - T_2)}{m_1 [c_{p_{ar}} \cdot \ln(T_1/T_2) - R_{ar} \cdot \ln(P_1/P_2)]} \quad (4.74)$$

A exergia total da lenha, baseada na equação (4.36), pode ser:

$$EX_3 = \varepsilon_3 \cdot Q_3 \quad (4.75)$$

As exergias restantes (EX_5 , EX_{par} e EX_6) podem ser obtidas considerando-se o esquema simplificado da Figura 36.

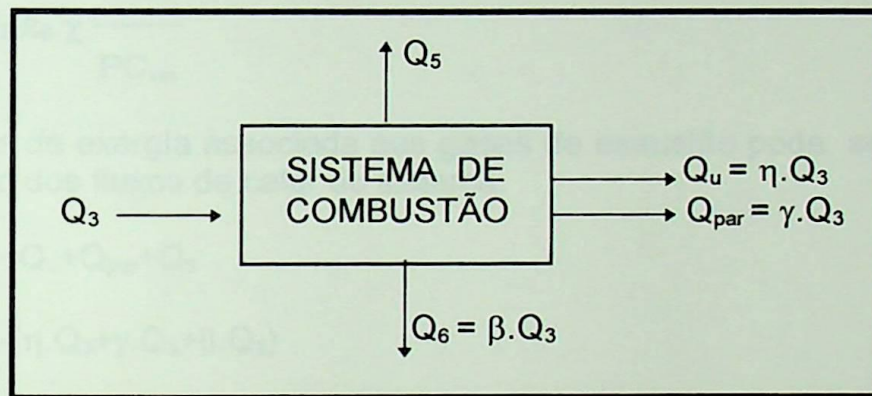


FIGURA 36 - Esquema simplificado dos fluxos de calor para o sistema de combustão a lenha genérico

onde:

η = fração do calor da lenha incorporada pelo fluido de trabalho (%)

γ = fração do calor da lenha perdida pelas paredes do sistema (%)

β = fração do calor da lenha perdida através do carvão residual (%)

Nota-se que a fração η corresponde à eficiência energética pelo método indireto.

Assim, a exergia perdida pelas paredes do sistema fica:

$$EX_{par} = \sum_i Q_{par_i} [1 - (T_0/T_{mp_i})]$$

Mas:

$$Q_{par} = \gamma \cdot Q_3$$

Então:

$$EX_{par} = Q_3 \sum_i \gamma_i [1 - (T_0/T_{mp_i})] \quad (4.76)$$

Na realidade, a fração γ é a relação existente entre as perdas de calor pelas paredes do sistema e o poder calorífico do combustível.

$$\gamma_i = \frac{P_{par_i}}{PC_{len}} \quad (4.77)$$

Já a perda de exergia associada ao carvão residual pode ser expressa do seguinte modo:

$$Ex_6 = \varepsilon_6 \cdot Q_6 \quad ; \text{ ou então:}$$

$$Ex_6 = \varepsilon_6 \cdot \beta \cdot Q_3$$

$$\text{Mas: } \beta = \frac{Q_6}{Q_3} = \frac{m_6 \cdot PC_{car}}{m_3 \cdot PC_{len}} = \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}}$$

$$\text{Então: } Ex_6 = Q_3 \cdot \varepsilon_6 \cdot \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}} \quad (4.78)$$

A perda de exergia associada aos gases de exaustão pode ser obtida através do balanceamento dos fluxos de calor do sistema.

$$Q_3 = Q_5 + Q_u + Q_{par} + Q_6$$

$$Q_5 = Q_3 - (\eta \cdot Q_3 + \gamma \cdot Q_3 + \beta \cdot Q_3)$$

$$Q_5 = Q_3(1 - \eta - \gamma - \beta) \quad (4.79)$$

$$Ex_5 = Q_5 [1 - (T_0/T_5)] \quad (4.80)$$

Combinando-se essas duas últimas equações, tem-se que:

$$Ex_5 = Q_3(1 - \eta - \gamma - \beta) [1 - (T_0/T_5)] \quad (4.81)$$

A exergia útil do sistema (Ex_u) é determinada pela equação (4.67), uma vez que se conhece o equacionamento das demais exergias consideradas. Assim,

$$Ex_u = Ex_3 - (Ex_5 + Ex_{par} + Ex_6 + Ex_{deg}) \quad (4.82)$$

A partir de agora, há condições de se chegar à expressão final do desempenho exergético pelo método indireto. Neste trabalho, serão definidos três casos distintos de abordagem desse desempenho. O primeiro, bastante comum, relaciona o fluxo de exergia útil e o aporte (entrada) de exergia de um volume de controle.

$$\phi_{i1} = \frac{Ex_u}{Ex_3} \quad (4.83)$$

O segundo caso considera que seja retirada da exergia do combustível, a parcela referente às exergias de saída do volume de controle, a menos da exergia útil.

$$\phi_{i2} = \frac{Ex_u}{Ex_3 - Ex_s} \quad (4.84)$$

O terceiro e último caso considerado estabelece a relação entre os fluxos exergéticos de saída, a menos da exergia degradada, e o aporte exergético do sistema.

$$\phi_{i3} = \frac{EX_u + EX_s}{EX_3} \quad (4.85)$$

Definidos esses três casos, torna-se possível desenvolvê-los. Em primeiro lugar a equação (4.83).

$$\phi_{i1} = \frac{EX_u}{EX_3} = \frac{EX_3 - (EX_5 + EX_{par} + EX_6 + EX_{deg})}{EX_3}$$

$$\phi_{i1} = 1 - \frac{EX_5 + EX_{par} + EX_6 + EX_{deg}}{EX_3}$$

$$\phi_{i1} = 1 - \frac{Q_3 (1 - \eta - \gamma - \beta) \left(1 - \frac{T_0}{T_5}\right) + Q_3 \sum_i \gamma_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mpi}}\right) + Q_3 \cdot \epsilon_6 \cdot \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}} + Q_3 \cdot \epsilon_3 \cdot \left(1 + \frac{T_0}{T_t}\right)}{\epsilon_3 \cdot Q_3}$$

$$\phi_{i1} = 1 - \frac{(1 - \eta - \gamma - \beta) \left(1 - \frac{T_0}{T_5}\right) + \sum_i \gamma_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mpi}}\right) + \epsilon_6 \cdot \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}} + \epsilon_3 \cdot 1 + \frac{T_0}{T_t}}{\epsilon_3}$$

$$\phi_{i1} = \frac{1 - \frac{T_0}{T_t} - (1 - \eta - \gamma - \beta) \left(1 - \frac{T_0}{T_5}\right) + \sum_i \gamma_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mpi}}\right) + \epsilon_6 \cdot \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}}}{\epsilon_3} \quad (4.86)$$

Desenvolvendo a equação (4.84) obtém-se a expressão do desempenho exergético, método indireto, caso 2.

$$\phi_{i2} = \frac{EX_u}{EX_3 - EX_s} = \frac{EX_u}{EX_u + EX_{deg}} = 1 - \frac{EX_{deg}}{EX_u + EX_{deg}}$$

$$\phi_{i2} = 1 - \frac{EX_{deg}}{EX_3 - EX_s - EX_{deg} + EX_{deg}} = 1 - \frac{EX_{deg}}{EX_3 - EX_5 + EX_{par} + EX_6}$$

$$\phi_{i2} = 1 - \frac{Q_3 \left(\varepsilon_3 - 1 + \frac{T_0}{T_t} \right)}{\varepsilon_3 \cdot Q_3 - Q_3 \left[(1 - \eta - \gamma - \beta) \left(1 - \frac{T_0}{T_5} \right) + \sum_i \gamma_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mpi}} \right) + \varepsilon_6 \cdot \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}} \right]}$$

$$\phi_{i2} = 1 - \frac{\varepsilon_3 - 1 + \frac{T_0}{T_t}}{\varepsilon_3 - \left[(1 - \eta - \gamma - \beta) \left(1 - \frac{T_0}{T_5} \right) + \sum_i \gamma_i \left(1 - \frac{T_0}{T_{mpi}} \right) + \varepsilon_6 \cdot \chi \frac{PC_{car}}{PC_{len}} \right]}$$

(4.87)

Por fim, desenvolvendo-se a equação (4.85) vem que:

$$\phi_{i3} = \frac{EX_u + EX_s}{EX_3} = \frac{EX_3 - EX_{deg}}{EX_3} = 1 - \frac{EX_{deg}}{EX_3}$$

$$\phi_{i3} = 1 - \frac{Q_3 \left(\varepsilon_3 - 1 + \frac{T_0}{T_t} \right)}{\varepsilon_3 \cdot Q_3} = 1 - \frac{\varepsilon_3 - 1 + \frac{T_0}{T_t}}{\varepsilon_3} = 1 - \left[1 - \frac{1 - (T_0/T_t)}{\varepsilon_3} \right]$$

$$\phi_{i3} = \frac{1 - (T_0/T_t)}{\varepsilon_3}$$

(4.88)

4.4 Análise da Sensibilidade do Desempenho

Propõe-se, neste tópico, realizar uma análise comportamental dos desempenhos energéticos e exergeticos, cujas expressões já foram anteriormente deduzidas, através da variação simulada de valores básicos estabelecidos para os fatores característicos envolvidos no processo de combustão. O Anexo 5.3 contém a rotina computacional empregada, que, por sua vez, encontra-se embutida no programa computacional que analisa a magnitude dos desempenhos. Para isso, utiliza-se a linguagem Fortran 77, em versão Fortran 5.0 para microcomputadores.

Importante notar que a flutuação dos valores adotada foi de -10% a 10% do valor básico considerado. Na Tabela 22 estão discriminadas as variáveis simuladas com

seus respectivos valores básicos e valores extremos obtidos, isto é, o campo operacional de trabalho. O sistema escolhido para análise é uma unidade geradora de vapor hipotética.

A série de tabelas adiante mostra o comportamento dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação dos fatores apresentados nesta tabela.

TABELA 22
Variáveis usadas na simulação da sensibilidade do desempenho

| VARIÁVEIS | VALOR BASE ADOTADO | VARIÇÕES EXTREMAS | |
|---|-----------------------|-------------------|--------|
| | | -10% | 10% |
| Condições ambientes: TBS (°C) | 30 | 27 | 33 |
| TBU (°C) | 27 | 24,3 | 29,7 |
| Produção de vapor (kg/h) | 3.000 | 2.700 | 3.300 |
| Pressão absoluta de vapor (kgf/cm ²) | 7 | 6,3 | 7,7 |
| Temperatura da água de alimentação (°C) | 50 | 45 | 55 |
| Consumo medido de lenha (m ³ /h) | 2,18 | 1,95 | 2,4 |
| Umidade da lenha, base úmida (%) | 35 | 31,5 | 38,5 |
| Consumo nominal de lenha (m ³ /h) | 2,3 | 2,07 | 2,53 |
| Poder calorífico da lenha (kJ/kg) ^(a) | 18.500 | 16.650 | 20.350 |
| Massa específica da lenha (kg/m ³) ^(b) | 390 | 351 | 429 |
| Carvão residual (kg carvão/kg lenha) | 0,03 | 0,027 | 0,033 |
| Poder calorífico do carvão (kJ/kg) ^(a) | 31.395 | 28.256 | 34.534 |
| Umidade do carvão, base úmida (%) | 3 | 2,7 | 3,3 |
| Temperatura dos gases de exaustão (°C) | 250 | 225 | 275 |
| Teor de CO ₂ dos gases (%) | 13 | 11,7 | 14,3 |
| Temperatura (°C) das superfícies: 1 | 70 | 63 | 77 |
| 2 | 80 | 72 | 88 |
| 3 | 120 | 108 | 132 |
| 4 | 110 | 99 | 121 |
| 5 | 140 | 126 | 154 |
| Fórmula molecular da lenha: | | | |
| -Celulose/Hemicelulose: x ₁ | 6 | 5,4 | 6,6 |
| y ₁ | 10 | 9 | 11 |
| z ₁ | 5 | 4,5 | 5,5 |
| -Lignina: x ₂ | 47 | 42,3 | 51,7 |
| y ₂ | 52 | 46,8 | 57,2 |
| z ₂ | 16 | 14,4 | 17,6 |
| Fórmula molecular do carvão: x' | 8 | 7,2 | 8,8 |
| y' | 5 | 4,5 | 5,5 |
| z' | 1 | 0,9 | 1,1 |

^(a) Superior seco (determinação em bomba calorimétrica)

^(b) Lenha homogênea (eucalipto)

Analisando inicialmente a Tabela 23, pode-se constatar que os desempenhos energéticos obtidos pelo método direto (η_{d1} e η_{d3}) são inflexíveis perante o maior ou menor conteúdo de umidade da lenha, obviamente porque os respectivos poderes caloríficos estão em base seca (PCS_s e PCI_s). Já η_{d2} e η_{d4} , cujos poderes caloríficos estão em base úmida (PCS_u e PCI_u , respectivamente), acompanham diretamente as

oscilações do conteúdo de umidade da lenha. Quanto maior este, maiores serão η_{d2} e η_{d4} . Isso porque a umidade concorre para a diminuição do PCS_u e do PCI_u , e como a eficiência energética é função inversa do poder calorífico, será teoricamente maior quanto maior for o conteúdo de umidade, considerando que os demais fatores permaneçam constantes. Neste momento, podem surgir questionamentos a esses

TABELA 23
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do conteúdo de umidade da lenha

Unidade: %

| DESEMPENHO | VARIAÇÃO (%) | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|-------|-------|-------|------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d2} | -5,1 | -4,1 | -3,1 | -2,1 | -1,1 | 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,5 | 5,7 |
| η_{d3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d4} | -6,2 | -5 | -3,8 | -2,6 | -1,3 | 1,3 | 2,7 | 4,2 | 5,6 | 7,1 |
| η_{i1} | 1,2 | 1 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | -5 | -0,5 | -0,8 | -1,1 | -1,4 |
| η_{i2} | 7,4 | 6 | 4,6 | 3,1 | 1,6 | -1,6 | -3,3 | -5 | -6,8 | -8,8 |
| η_{i3} | 1,4 | 1,1 | 0,8 | 0,6 | 0,3 | -0,3 | -0,6 | -0,9 | -1,2 | -1,5 |
| η_{i4} | 11,8 | 9,6 | 7,3 | 4,9 | 2,5 | -2 | -5,3 | -6 | -10,9 | -13,9 |
| ϕ_{d11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d12} | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,3 | -0,4 | -0,5 |
| ϕ_{d21} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d22} | 0,5 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,3 | -0,4 | -0,5 |
| ϕ_{i11} | 3,3 | 2,7 | 2 | 1,4 | 0,7 | -0,7 | -1,4 | -2,2 | -2,9 | -3,7 |
| ϕ_{i12} | 57,1 | 46,3 | 35,2 | 23,8 | 12,1 | -12,4 | -25,2 | -38,4 | -51,9 | -65,9 |
| ϕ_{i13} | 4 | 3,2 | 2,4 | 1,6 | 0,8 | -0,9 | -1,7 | -2 | -3,5 | -4,4 |
| ϕ_{i14} | 312,7 | 254,1 | 193,5 | 131,1 | 66,6 | -68,8 | -139,9 | -213,4 | -289,5 | -368,2 |
| ϕ_{i21} | 2,9 | 2,3 | 1,8 | 1,2 | 0,6 | -0,6 | -1,3 | -1,9 | -2,6 | -3,3 |
| ϕ_{i22} | 53,7 | 43,7 | 33,4 | 22,7 | 11,5 | -12 | -24,5 | -37,4 | -50,9 | -65 |
| ϕ_{i23} | 3,5 | 2,8 | 2,2 | 1,5 | 0,7 | -0,8 | -1,5 | -2,3 | -3,1 | -3,9 |
| ϕ_{i24} | 306,4 | 250,3 | 191,8 | 130,7 | 66,8 | -69,9 | -143,2 | -220,1 | -300,9 | -385,8 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

resultados, tais como: Se a eficiência energética aumenta proporcionalmente com a umidade da lenha, para que se preocupar em utilizá-la com o menor teor de umidade possível? E mais, para que há sistemas de secagem da lenha, se para obter maior eficiência deve-se empregá-la com a maior presença de umidade, de acordo com a conclusão parcial deste trabalho? Isso contraria a prática, o senso. Cabe, então, oportunamente evidenciar o objetivo desta análise de sensibilidade e reforçar a metodologia adotada.

O objetivo desta análise é verificar o grau de variação do desempenho caso haja um provável desvio na determinação, ou estimativa, de uma variável específica de processo. Essa hipótese torna-se factível principalmente no âmbito das unidades industriais que não dispõem de procedimentos confiáveis de aquisição de dados. Por exemplo, a umidade da lenha. Se não houver meios de determiná-la, esta variável de processo deverá ser estimada. Uma das alternativas consiste em recorrer às bibliografias congêneres. Evidente que há chance maior do valor encontrado não corresponder à

realidade, e isso acabará por mascarar o resultado final do cálculo do desempenho, mas não se sabe a ordem de grandeza desse desvio. Se o valor estimado for, digamos, 10% maior que o representativo da lenha utilizada, qual será o desvio existente no desempenho? Pode ser que haja um grande desvio, assim como pode ser que não. O meio que indicará a magnitude do desvio é a análise de sensibilidade, que se propõe a realizar neste tópico.

De acordo com a metodologia adotada, cada grandeza considerada (umidade, poder calorífico, etc) variará de -10% a 10% do seu valor base estimado. Quando uma determinada grandeza estiver sendo analisada (variada), as demais grandezas permanecem imutáveis, ou seja, com o mesmo valor base inicial.

Voltando à análise de sensibilidade dos desempenhos η_{d2} e η_{d4} , em função da umidade da lenha, cujos resultados conflitantes com a prática ensejam polêmica, deduz-se que a variável umidade da lenha deve ser cuidadosamente determinada, no sentido de se evitar margens de erro significativas. Nota-se que uma variação de 10% no valor do conteúdo de umidade da lenha induz uma variação de 7,1% no valor do desempenho energético com base no PCI_u (η_{d4}). Na média, pode-se afirmar que a cada variação de 1% no conteúdo de umidade da lenha ocorre em torno de 0,71% de variação em η_{d4} . Em outras palavras, a cada 1% de erro no valor do conteúdo de umidade da lenha há um erro de 0,71% em η_{d4} . Caso o erro seja a menos do valor real do conteúdo de umidade da lenha, tem-se a proporção -0,62:-1, isto é, um desvio de -0,62% em η_{d4} para cada 1% de desvio a menos na umidade. Vê-se que para η_{d2} as proporções são menores: 0,57:1 e -0,51:-1.

Por sua vez, a análise energética pelo método indireto demonstra um nível maior de desvio dos desempenhos (η_{i2} a η_{i4}) em função do desvio do conteúdo de umidade da lenha, do que os desvios verificados pelo método direto. Observa-se também que os desempenhos energéticos indiretos são função inversa do conteúdo de umidade da lenha. Quanto maior este, menores serão aqueles; o que é coerente.

Os desempenhos exergéticos, método direto, apresentam-se pouco sensíveis à umidade da lenha, e assim mesmo apenas aqueles calculados em base úmida (ϕ_{d12} e ϕ_{d22}), em contraste com os desempenhos exergéticos, método indireto, cuja sensibilidade é bem maior em base úmida. Observe que os desempenhos ϕ_{i14} e ϕ_{i24} , com base no PCI_u , estão suscetíveis a terem em torno de 34% de erro para cada 1% de erro no valor da umidade da lenha, o que é bastante significativo. A exceção é o desempenho ϕ_{i3} que não varia.

A Tabela 24 apresenta a importância relativa do poder calorífico da lenha para os desempenhos energéticos e exergéticos. A análise energética, método direto, mostra que a relação média variacional existente entre o poder calorífico da lenha e os desempenhos é da ordem de 1:1, ou seja, cada 1% de erro no poder calorífico da lenha corresponde a 1% de erro nos desempenhos energéticos diretos. Verifica-se também que esses desempenhos são função inversa do poder calorífico da lenha. Quanto maior este, menores são aqueles; ao contrário do método indireto, cujos desempenhos aumentam com o aumento do poder calorífico. Observa-se que os desempenhos energéticos indiretos calculados segundo poderes caloríficos em base úmida (η_{i2} e η_{i4}) apresentam maior sensibilidade à variação do poder calorífico da lenha do que os desempenhos energéticos indiretos em base seca (η_{i1} e η_{i3}).

TABELA 24
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função
da variação do poder calorífico da lenha

Unidade: %

| DESEM- PENHO | VARIACÃO (%) | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|--------|--------|--------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | 11,1 | 8,7 | 6,4 | 4,2 | 2 | -2 | -3,8 | -5,7 | -7,4 | -9,1 |
| η_{d2} | 11,1 | 8,7 | 6,4 | 4,2 | 2 | -2 | -3,8 | -5,7 | -7,4 | -9,1 |
| η_{d3} | 12 | 9,4 | 6,9 | 4,5 | 2,2 | -2,1 | -4,1 | -6,1 | -7,9 | -9,7 |
| η_{d4} | 13,2 | 10,3 | 7,5 | 4,9 | 2,4 | -2,3 | -4,4 | -6,5 | -8,5 | -10,4 |
| η_{i1} | -5,3 | -4,2 | -3,1 | -2 | -1 | 0,9 | 1,8 | 2,7 | 3,6 | 4,4 |
| η_{i2} | -11 | -8,6 | -6,3 | -4,1 | -2 | 1,9 | 3,8 | 5,6 | 7,3 | 9 |
| η_{i3} | -6,4 | -5 | -3,7 | -2,4 | -1,2 | 1,1 | 2,2 | 3,2 | 4,2 | 5,2 |
| η_{i4} | -17,9 | -14 | -10,2 | -6,6 | -3,2 | 3,1 | 6,1 | 8,9 | 11,6 | 14,2 |
| ϕ_{d11} | 12 | 9,4 | 6,9 | 4,5 | 2,2 | -2,1 | -4,1 | -6,1 | -7,9 | -9,7 |
| ϕ_{d12} | 11,4 | 8,9 | 6,5 | 4,3 | 2,1 | -2 | -3,9 | -5,8 | -7,6 | -9,3 |
| ϕ_{d21} | 12,6 | 9,9 | 7,2 | 4,7 | 2,3 | -2,2 | -4,3 | -6,3 | -8,2 | -10,1 |
| ϕ_{d22} | 11,9 | 9,3 | 6,8 | 4,5 | 2,2 | -2,1 | -4,1 | -6 | -7,9 | -9,6 |
| ϕ_{i11} | -15,3 | -12 | -8,8 | -5,7 | -2,8 | 2,7 | 5,3 | 7,8 | 10,2 | 12,5 |
| ϕ_{i12} | -85,5 | -66,9 | -49,1 | -32,1 | -15,7 | 15,1 | 29,6 | 43,6 | 57 | 69,9 |
| ϕ_{i13} | -19,9 | -15,5 | -11,4 | -7,4 | -3,6 | 3,5 | 6,8 | 10 | 13,1 | 16 |
| ϕ_{i14} | -482,9 | -376,5 | -275,3 | -179 | -87,4 | 83,4 | 163,1 | 239,4 | 312,4 | 382,4 |
| ϕ_{i21} | -13,6 | -10,6 | -7,8 | -5 | -2,5 | 2,3 | 4,6 | 6,7 | 8,8 | 10,8 |
| ϕ_{i22} | -85 | -66 | -48,1 | -31,2 | -15,2 | 14,4 | 28,1 | 41,2 | 53,6 | 65,5 |
| ϕ_{i23} | -18 | -14 | -10,2 | -6,6 | -3,2 | 3,1 | 6 | 8,7 | 11,4 | 13,9 |
| ϕ_{i24} | -512,1 | -384,8 | -285,8 | -184,1 | -89 | 83,6 | 162,1 | 236,1 | 306 | 372,1 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

A sensibilidade dos desempenhos exergéticos diretos à variação do poder calorífico da lenha é similar à dos desempenhos energéticos diretos. Já os desempenhos exergéticos indiretos mostram-se mais sensíveis, principalmente aqueles que consideram o poder calorífico inferior em base úmida (ϕ_{i14} e ϕ_{i24}), da ordem de 40% de variação para desvios positivos de PC_{len} e de 47% de variação para desvios negativos. O desempenho ϕ_{i3} é a exceção, independentemente de PC_{len} .

Na Tabela 25, vê-se a lógica de apenas os desempenhos obtidos pelo método direto mostrarem-se sensíveis à variação do consumo medido de lenha. Observa-se a homogeneidade dos resultados da análise de sensibilidade, cuja relação, de uma maneira geral, fica em 1:1, sendo os desempenhos energéticos e exergéticos diretos funções inversas desse fator.

A Tabela 26 mostra que a sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos diretos em relação à massa específica da lenha é igual à sensibilidade deles em relação ao consumo medido de lenha, tratada na análise da Tabela 25. Ao contrário dos desempenhos diretos, os indiretos são função direta da massa específica da lenha. Os desempenhos energéticos indiretos são muito pouco sensíveis à variação desse fator; entretanto os desempenhos exergéticos indiretos são mais influenciados pela oscilação da massa específica da lenha, principalmente ϕ_{i14} e ϕ_{i24} . O desempenho ϕ_{i3} permanece invariável.

Considerando a Tabela 27, pode-se afirmar que o conteúdo de umidade do carvão residual (normalmente quase nulo) não exerce dependência sobre os desempenhos diretos, influenciando muito pouco os desempenhos indiretos. A variação da umidade do carvão é mais sentida pelos desempenhos ϕ_{i14} e ϕ_{i24} na proporção aproximada de 0,3:1; ou seja, cada desvio de 1% no valor do conteúdo de umidade do carvão presente nas cinzas implica um desvio médio de 0,3% em ϕ_{i14} e ϕ_{i24} .

TABELA 27

Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação do conteúdo de umidade do carvão

%

| DESEMPENHO | VARIAÇÃO (%) | | | | | | | | | |
|--------------|--------------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i4} | -0,1 | -0,1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,1 | 0,1 |
| ϕ_{d11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d21} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d22} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i12} | -0,6 | -0,5 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,5 | 0,5 |
| ϕ_{i13} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i14} | -2,9 | -2,3 | -1,7 | -1,2 | -0,6 | 0,6 | 1,2 | 1,7 | 2,3 | 2,9 |
| ϕ_{i21} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i22} | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,2 | -0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,5 |
| ϕ_{i23} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i24} | -2,9 | -2,4 | -1,8 | -1,2 | -0,6 | 0,6 | 1,2 | 1,8 | 2,4 | 2,9 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

As Tabelas 28 e 29 podem ser analisadas conjuntamente, uma vez que apresentam uma certa similaridade entre os resultados numéricos registrados. Em primeira análise, tem-se a destacar que os desempenhos energéticos diretos, os desempenhos exergéticos diretos ϕ_{d11} e ϕ_{d12} e o desempenho exergético indireto ϕ_{i3} não são função do poder calorífico do carvão e nem da quantidade de carvão gerada pelo sistema de combustão. Esses dois fatores exercem pouca influência sobre os desempenhos energéticos indiretos e sobre os desempenhos exergéticos diretos ϕ_{d21} e ϕ_{d22} . Já os desempenhos exergéticos indiretos, à exceção de ϕ_{i31} , são mais sensíveis a esses dois fatores, principalmente aqueles desempenhos com base no PCI_u da lenha e do carvão (ϕ_{i14} e ϕ_{i24}). Em todos os casos exergéticos indiretos a função é inversa aos fatores considerados.

A Tabela 30 mostra que os desempenhos energéticos e exergéticos diretos, além de ϕ_{i3} , independem da temperatura dos gases, de chaminé. O restante dos desempenhos é inversamente proporcional a T_{ch} . Os desempenhos energéticos indiretos são os que apresentam menos sensibilidade, ao contrário dos desempenhos exergéticos indiretos (exceto ϕ_{i3}), cuja relação de variação percentual mínima desempenho x fator é de 0,7:1 e a máxima de aproximadamente 21:1.

TABELA 30
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da temperatura dos gases de chaminé

| DESEM- PENHO | V A R I A Ç Ã O (%) | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|--------|--------|-------|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i1} | 1 | 0,8 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,5 | -0,7 | -0,8 |
| η_{i2} | 2,1 | 1,6 | 1,2 | 0,8 | 0,4 | -0,4 | -0,7 | -1 | -1,4 | -1,6 |
| η_{i3} | 1,1 | 0,9 | 0,6 | 0,4 | 0,2 | -0,2 | -0,4 | -0,6 | -0,7 | -0,9 |
| η_{i4} | 2,9 | 2,2 | 1,7 | 1,1 | 0,5 | -0,5 | -1 | -1,4 | -1,7 | -2,3 |
| ϕ_{d11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d21} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d22} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i11} | 8,3 | 6,6 | 4,9 | 3,2 | 1,6 | -1,6 | -3,1 | -4,6 | -6,1 | -7,6 |
| ϕ_{i12} | 46,7 | 37,1 | 27,6 | 18,2 | 9 | -8,9 | -17,6 | -26,1 | -34,3 | -42,5 |
| ϕ_{i13} | 9,9 | 7,9 | 5,9 | 3,9 | 1,9 | -1,9 | -3,7 | -5,5 | -7,3 | -9 |
| ϕ_{i14} | 223,1 | 177,1 | 131,7 | 87,1 | 43,2 | -42,4 | -83,9 | -124,5 | -164,2 | -208 |
| ϕ_{i21} | 7,2 | 5,7 | 4,3 | 2,8 | 1,4 | -1,4 | -2,7 | -4,1 | -5,4 | -6,6 |
| ϕ_{i22} | 44,1 | 35,2 | 26,2 | 17,4 | 8,7 | -8,6 | -17 | -25,3 | -33,5 | -41,5 |
| ϕ_{i23} | 8,7 | 6,9 | 5,2 | 3,4 | 1,7 | -1,7 | -3,3 | -4,9 | -6,5 | -8,1 |
| ϕ_{i24} | 220,5 | 175,8 | 131,3 | 87,2 | 43,4 | -43 | -85,4 | -127,3 | -168,5 | -209 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Os desempenhos energéticos e exergéticos diretos e ϕ_{i3} também independem do teor de CO_2 dos gases de exaustão, conforme mostra a Tabela 31. Os demais desempenhos são diretamente proporcionais a esse fator, isto é, quanto maior o teor de CO_2 , maiores serão esses desempenhos a ele sensíveis, principalmente os desempenhos exergéticos indiretos ϕ_{i14} e ϕ_{i24} .

TABELA 31
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função
da variação do teor de CO₂ dos gases de chaminé

| DESEM- PENHO | V A R I A Ç Ã O (%) | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i1} | -2,4 | -1,9 | -1,4 | -0,9 | -0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,2 | 1,6 | 2 |
| η_{i2} | -5 | -3,9 | -2,9 | -1,9 | -0,9 | 0,9 | 1,7 | 2,6 | 3,4 | 4,1 |
| η_{i3} | -2,7 | -2,1 | -1,6 | -1 | -0,5 | 0,5 | 0,9 | 1,4 | 1,8 | 2,2 |
| η_{i4} | -7 | -5,5 | -4 | -2,6 | -1,3 | 1,2 | 2,4 | 3,6 | 4,7 | 5,7 |
| ϕ_{d11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d21} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d22} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i11} | -5,8 | -4,5 | -3,3 | -2,2 | -1,1 | 1 | 2 | 2,9 | 3,8 | 4,7 |
| ϕ_{i12} | -32,4 | -25,3 | -18,6 | -12,1 | -5,9 | 5,7 | 11,2 | 16,5 | 21,6 | 26,5 |
| ϕ_{i13} | -6,9 | -5,4 | -4 | -2,6 | -1,3 | 1,2 | 2,4 | 3,5 | 4,6 | 5,6 |
| ϕ_{i14} | -154,6 | -121 | -88,8 | -58 | -28,4 | 27,3 | 53,4 | 78,7 | 103 | 126,5 |
| ϕ_{i21} | -5,1 | -4 | -2,9 | -1,9 | -0,9 | 0,9 | 1,7 | 2,5 | 3,3 | 4,1 |
| ϕ_{i22} | -31,5 | -24,6 | -18 | -11,7 | -5,7 | 5,5 | 10,7 | 15,8 | 20,6 | 25,2 |
| ϕ_{i23} | -6,1 | -4,8 | -3,5 | -2,3 | -1,1 | 1,1 | 2,1 | 3,1 | 4 | 4,9 |
| ϕ_{i24} | -158,5 | -123,6 | -90,5 | -58,9 | -28,8 | 27,5 | 53,8 | 78,9 | 103 | 126,1 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

A Tabela 32 exhibe a sensibilidade dos desempenhos do sistema de combustão analisado em relação à produção de vapor, que, por ser um fator característico apenas do método direto, não exerce qualquer influência sobre os desempenhos energéticos e exergéticos indiretos. A sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos diretos é idêntica, igual a 1:1 e diretamente proporcional à produção de vapor. Um erro de 1%, a mais ou a menos, na determinação da produção de vapor gera um erro de 1%, a mais ou a menos, nos desempenhos diretos, tanto faz pelo método energético como pelo exergético.

Segundo os dados da Tabela 33, apenas os desempenhos energéticos indiretos não são sensíveis à pressão de vapor. Os demais desempenhos são diretamente proporcionais a esse fator, mas apenas os desempenhos exergéticos indiretos, dos métodos 1 e 2, possuem maior sensibilidade relativa. Observe que as relações de ϕ_{i14} e ϕ_{i24} com a pressão de vapor são semelhantes, situando-se por volta de 6,5:1.

TABELA 32
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função
da variação da produção de vapor

%

| DESEM- PENHO | VARIAÇÃO (%) | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|----|----|----|----|---|---|---|---|----|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d2} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d3} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d4} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{i1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d11} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ϕ_{d12} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ϕ_{d21} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ϕ_{d22} | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| ϕ_{i11} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i12} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i13} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i14} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i21} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i22} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i23} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i24} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

TABELA 33
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função
da variação da pressão de vapor

%

| DESEM- PENHO | VARIAÇÃO (%) | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | 0 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| η_{d2} | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | 0 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| η_{d3} | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | 0 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| η_{d4} | -0,2 | -0,1 | -0,1 | -0,1 | 0 | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| η_{i1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d11} | -2,1 | -1,6 | -1,2 | -0,8 | -0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 |
| ϕ_{d12} | -2,1 | -1,6 | -1,2 | -0,8 | -0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 |
| ϕ_{d21} | -2,1 | -1,6 | -1,2 | -0,8 | -0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 |
| ϕ_{d22} | -2,1 | -1,6 | -1,2 | -0,8 | -0,4 | 0,4 | 0,8 | 1,1 | 1,5 | 1,9 |
| ϕ_{i11} | -4,5 | -3,6 | -2,7 | -1,6 | -0,9 | 0,8 | 1,7 | 2,5 | 3,3 | 4,1 |
| ϕ_{i12} | -16,5 | -13,1 | -9,7 | -6,4 | -3,2 | 3,1 | 6,1 | 9,1 | 12 | 14,9 |
| ϕ_{i13} | -5 | -4 | -3 | -1,9 | -1 | 0,9 | 1,9 | 2,8 | 3,7 | 4,5 |
| ϕ_{i14} | -68 | -53,8 | -39,9 | -26,3 | -13 | 12,7 | 25,2 | 37,4 | 49,4 | 61,2 |
| ϕ_{i21} | -4,5 | -3,6 | -2,7 | -1,6 | -0,9 | 0,8 | 1,7 | 2,5 | 3,3 | 4,1 |
| ϕ_{i22} | -16,5 | -13,1 | -9,7 | -6,4 | -3,2 | 3,1 | 6,1 | 9,1 | 12 | 14,9 |
| ϕ_{i23} | -5 | -4 | -3 | -1,9 | -1 | 0,9 | 1,9 | 2,8 | 3,7 | 4,5 |
| ϕ_{i24} | -68 | -53,8 | -39,9 | -26,3 | -13 | 12,7 | 25,2 | 37,4 | 49,4 | 61,2 |
| ϕ_{i3} | -1,9 | -1,5 | -1,1 | -0,7 | -0,4 | 0,4 | 0,7 | 1 | 1,4 | 1,7 |

A variação da temperatura da água de alimentação do gerador de vapor só não interfere nos desempenhos energéticos indiretos, de acordo com a Tabela 34. Para os desempenhos energéticos e exergéticos diretos, observa-se que diminuem de valor com o acréscimo da temperatura da água, e que esta produz pouco efeito sobre aqueles. Já os desempenhos exergéticos indiretos são inversamente proporcionais à T_{ag} e, excetuando ϕ_{i3} , são mais sensíveis à sua variação, principalmente ϕ_{i14} e ϕ_{i24} .

TABELA 34
Sensibilidade dos desempenhos energéticos e exergéticos em função da variação da temperatura da água de alimentação %

| DESEM- PENHO | V A R I A Ç Ã O (%) | | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|
| | -10 | -8 | -6 | -4 | -2 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
| η_{d1} | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,5 | -0,7 | -0,8 |
| η_{d2} | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,5 | -0,7 | -0,8 |
| η_{d3} | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,5 | -0,7 | -0,8 |
| η_{d4} | 0,8 | 0,7 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | -0,2 | -0,3 | -0,5 | -0,7 | -0,8 |
| η_{i1} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i2} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i4} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d11} | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 |
| ϕ_{d12} | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 |
| ϕ_{d21} | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 |
| ϕ_{d22} | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0 | 0 | -0,1 | -0,1 | -0,2 | -0,2 |
| ϕ_{i11} | -1,6 | -1,3 | -0,9 | -0,6 | -0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,6 |
| ϕ_{i12} | -5,8 | -4,6 | -3,4 | -2,3 | -1,1 | 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,4 | 5,5 |
| ϕ_{i13} | -1,8 | -1,4 | -1 | -0,7 | -0,3 | 0,3 | 0,7 | 1 | 1,3 | 1,7 |
| ϕ_{i14} | -23,7 | -18,8 | -14,1 | -9,3 | -4,6 | 4,6 | 9,2 | 13,7 | 18,1 | 22,6 |
| ϕ_{i21} | -1,6 | -1,3 | -0,9 | -0,6 | -0,3 | 0,3 | 0,6 | 0,9 | 1,2 | 1,6 |
| ϕ_{i22} | -5,8 | -4,6 | -3,4 | -2,3 | -1,1 | 1,1 | 2,2 | 3,3 | 4,4 | 5,5 |
| ϕ_{i23} | -1,8 | -1,4 | -1 | -0,7 | -0,3 | 0,3 | 0,7 | 1 | 1,3 | 1,7 |
| ϕ_{i24} | -23,7 | -18,8 | -14,1 | -9,3 | -4,6 | 4,6 | 9,2 | 13,7 | 18,1 | 22,6 |
| ϕ_{i3} | -0,7 | -0,5 | -0,4 | -0,3 | -0,1 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 |

As temperaturas de bulbo seco e úmido praticamente não produzem efeito algum sobre os desempenhos energéticos diretos e muito pouco sobre os indiretos, como mostra a Tabela 35. Os desempenhos exergéticos diretos, assim como ϕ_{i3} , variam na ordem de 0,25% para cada variação de 1% nas condições ambientes de temperatura. Já os demais desempenhos exergéticos indiretos variam na faixa de 0,4% a 3,6% para cada 1% de desvio na TBS/TBU. Todos os desempenhos são inversamente proporcionais a esse fator.

A Tabela 36 mostra que a temperatura média superficial das paredes do sistema de combustão não tem influência sobre os desempenhos energéticos diretos, nem sobre os desempenhos exergéticos diretos ϕ_{d11} e ϕ_{d12} , e nem sobre o desempenho exergético ϕ_{i3} . Produz pouco efeito sobre os desempenhos energéticos indiretos e sobre os exergéticos diretos ϕ_{d21} e ϕ_{d22} . Sua variação é mais sentida pelos desempenhos exergéticos indiretos, exceto ϕ_{i3} . Por ser uma perda de energia do sistema, estes desempenhos tendem a ser menores à medida que essa temperatura se eleva. As relações percentuais são muito variadas, desde 0,4:1 até 12,5:1.

Por fim, tem-se que os desempenhos energéticos e exergéticos não têm relação sensível de dependência com as fórmulas moleculares da lenha e do carvão. Não se viu a necessidade de inserir duas tabelas de valores invariáveis e nulos.

4.5 - Comentários

Algumas conclusões interessantes podem ser extraídas dessa análise de sensibilidade dos vários tipos de desempenhos equacionados. Para isso, tomemos por base a Tabela 37, que condensa os resultados médios variacionais dos desempenhos, obtidos nas tabelas anteriores, e que diz respeito à oscilação de 1% das variáveis consideradas. O intuito é saber quantos pontos percentuais cada desempenho estudado será variado (se for variado) de seu valor base, quando ocorrer uma determinada variação de cada um dos fatores (variáveis) escolhidos previamente. Ou seja, qual será a margem de erro no valor do desempenho de um sistema de combustão a lenha se houver um provável erro percentual em alguns parâmetros característicos do processo de geração térmica. Isso é naturalmente possível se forem levadas em conta algumas particularidades, como a própria precisão dos instrumentos de medição (termômetros, analisadores de gases, etc) e a utilização de dados bibliográficos que podem distorcer a realidade, por exemplo, o poder calorífico, o conteúdo de umidade, a massa específica do combustível, etc.

Conclui-se que os desempenhos energéticos diretos (η_{d1} a η_{d4}) são sensíveis, na proporção média de 1:1, ao poder calorífico da lenha (variável 2), ao consumo medido de lenha (variável 3), à massa específica da lenha (variável 4) e à produção de vapor (variável 10). Significa que um erro da ordem de 10% na medição do consumo de lenha, por exemplo, gera um erro também de 10% no desempenho energético direto. Ora, esse desvio na demanda de lenha pode ser considerado esperado, uma vez que a prática de sua medição é complicada, sujeita até mesmo a erros maiores que 10%. A umidade da lenha (variável 1) também influencia o desempenho de sistemas de combustão, só que em escala menor que as variáveis retrocitadas e apenas nos desempenhos que consideram o poder calorífico da lenha em base úmida (η_{d2} e η_{d4}). Não obstante, deve-se ter o cuidado de, em se adotando o poder calorífico em base úmida, saber realmente qual o conteúdo de umidade da lenha, pois um erro de 10%, que não é muito significativo¹¹, pode acarretar um desvio de até 17% no desempenho. Já os desempenhos energéticos indiretos (η_{i1} a η_{i4}) são mais sensíveis ao poder calorífico da lenha. A umidade da lenha e o teor de CO₂ dos gases efluentes do sistema têm um certo peso somente nos casos onde se leva em conta o poder calorífico em base úmida (η_{i2} e η_{i4}).

Torna-se necessário esclarecer, antes de passar à análise exérgica, um fato que, a princípio, pode ser interpretado como equívoco do modelo matemático ou do programa computacional. Sabe-se que a atração do método indireto é a sua independência com relação à obtenção dos valores das vazões mássicas ocorridas no cruzamento da fronteira delimitada do sistema. Observa-se na Tabela 37 em análise, uma pequena sensibilidade dos desempenhos energéticos indiretos em função da

¹¹ Imaginando uma lenha contendo realmente 30 kg de água para cada 100 kg de matéria úmida, um erro de 10% significa que essa lenha poderá ser considerada ou com 33% de umidade, ou com 27% de umidade.

variação da massa específica da lenha, esta uma propriedade utilizada no método direto para conversão de unidade do consumo medido de lenha. A explicação é simples. No equacionamento das perdas de calor através das paredes do sistema de combustão, aparece a variável denominada de consumo nominal de lenha (CNL), que se for dada em base volumétrica (m^3/h), deve ser convertida para base mássica (kg/h) usando-se o dado da massa específica da lenha. Caso CNL seja dado em base mássica, ver-se-á que a relação de sensibilidade desses desempenhos em função da massa específica da lenha será nula. Da mesma forma acontecerá com os desempenhos energéticos diretos, caso o consumo medido de lenha seja dado em base mássica.

TABELA 37

Quadro resumo da sensibilidade média percentual dos desempenhos em função da variação unitária percentual dos fatores considerados

| n/φ | VARIÁVEIS | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------|-----------|------|----|-----|-----|------|------|-------|-----|----|-----|------|------|-------|----|----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| η_{d1} | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | .02 | -.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d2} | .5 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | .02 | -.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d3} | 0 | -1.1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | .02 | -.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{d4} | .7 | -1.2 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | .02 | -.1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| η_{i1} | -.1 | .5 | 0 | .04 | 0 | -.06 | -.06 | -.1 | .2 | 0 | 0 | 0 | -.02 | -.05 | 0 | 0 |
| η_{i2} | -.8 | 1 | 0 | .06 | 0 | -.15 | -.1 | -.2 | .4 | 0 | 0 | 0 | -.05 | -.1 | 0 | 0 |
| η_{i3} | -.1 | .6 | 0 | .04 | 0 | -.09 | -.06 | -.1 | .2 | 0 | 0 | 0 | -.02 | -.06 | 0 | 0 |
| η_{i4} | -1,3 | 1,6 | 0 | ,09 | 0 | -.2 | -.2 | -.2 | ,6 | 0 | 0 | 0 | -.05 | -.2 | 0 | 0 |
| ϕ_{d11} | 0 | -1.1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | .2 | -.02 | -.2 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d12} | -.05 | -1 | -1 | -1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | .2 | -.02 | -.2 | 0 | 0 | 0 |
| ϕ_{d21} | 0 | -1 | -1 | -1 | 0 | .04 | .04 | 0 | 0 | 1 | .2 | -.02 | -.2 | -.01 | 0 | 0 |
| ϕ_{d22} | -.05 | -1 | -1 | -1 | 0 | .04 | .04 | 0 | 0 | 1 | .2 | -.02 | -.2 | -.01 | 0 | 0 |
| ϕ_{i11} | -.4 | 1.3 | 0 | .2 | 0 | -.03 | -.3 | -.8 | .5 | 0 | .4 | .2 | -.4 | -.5 | 0 | 0 |
| ϕ_{i12} | 6.1 | 7.7 | 0 | .9 | .6 | -1.8 | -1.7 | -4.4 | 2.9 | 0 | 1.5 | .6 | -1.1 | -2.6 | 0 | 0 |
| ϕ_{i13} | -.4 | 1.8 | 0 | .2 | 0 | -.4 | -.4 | -1 | .6 | 0 | .5 | .2 | -.5 | -.5 | 0 | 0 |
| ϕ_{i14} | -34 | 43 | 0 | 4.3 | .03 | -8.7 | -8 | -21.3 | 14 | 0 | 6.5 | 2.3 | -3.5 | -12.5 | 0 | 0 |
| ϕ_{i21} | -,3 | 1,2 | 0 | ,1 | 0 | -,3 | -,2 | -,7 | ,5 | 0 | ,4 | ,2 | -,4 | -,4 | 0 | 0 |
| ϕ_{i22} | -6 | 7.5 | 0 | .8 | .5 | -1.8 | -1.6 | -4.3 | 2.8 | 0 | 1.5 | .6 | -1.2 | -2.5 | 0 | 0 |
| ϕ_{i23} | -.4 | 1.6 | 0 | .2 | 0 | -.4 | -.3 | -.8 | .6 | 0 | .5 | .2 | -.4 | -.5 | 0 | 0 |
| ϕ_{i24} | -34 | 44 | 0 | 4.3 | .03 | -8.8 | -8 | -21.5 | 14 | 0 | 6.5 | 2.3 | 3.5 | -12.6 | 0 | 0 |
| ϕ_{i3} | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | .2 | .06 | -.2 | 0 | 0 | 0 |

Variáveis:

- | | |
|-------------------------------|--|
| 1- Umidade da lenha | 9 -Teor de CO ₂ dos gases de exaustão |
| 2- Poder calorífico da lenha | 10 -Produção de vapor |
| 3- Consumo medido de lenha | 11 -Pressão de vapor |
| 4- Massa específica da lenha | 12 -Temperatura da água de alimentação |
| 5- Umidade do carvão | 13 -Condições ambientes (TBS/TBU) |
| 6- Poder calorífico do carvão | 14 -Temp. média paredes do sistema |
| 7- Presença de carvão | 15 -Fórmula molecular da lenha |
| 8- Temperatura gases exaustão | 16 -Fórmula molecular do carvão |

Os desempenhos exergéticos diretos diferenciam-se dos desempenhos energéticos diretos apenas em relação à sensibilidade quanto a umidade da lenha, sendo a variação desta quase imperceptível àqueles primeiros. À exceção de ϕ_{13} , os desempenhos exergéticos indiretos são sensíveis a grande parte do elenco de variáveis consideradas no estudo, particularmente quando se trata do desempenho cujo poder calorífico está em base úmida, principalmente ϕ_{14} e ϕ_{24} que utilizam o PCI_u , tanto para a lenha como para o carvão residual.

Uma outra conclusão importante a ser tirada dessa tabela é que o poder calorífico da lenha (variável 2) representa o agente que mais sensibiliza os desempenhos, só não interferindo em ϕ_{13} . Este, inclusive, apresenta pequena sensibilidade em relação apenas à pressão de vapor e às condições ambientes.

Por último, convém colocar que esta análise de sensibilidade dos desempenhos se refere exclusivamente à unidade geradora de vapor considerada. Para outros casos, provavelmente os valores finais resultantes diferirão dos aqui contabilizados, principalmente se for considerado um gerador de vapor de grande porte, onde são encontradas eficiências bem mais elevadas do que aquelas relativas a geradores de vapor de pequeno porte. Entretanto, a importância relativa de cada fator enumerado para com os desempenhos não deve variar.

5 - ESTUDOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Introdução

O objetivo do presente capítulo é verificar a confiabilidade do modelo matemático desenvolvido para determinar o desempenho do sistema de cogeração a partir de situações reais de uso, sistemas pertencentes a unidades industriais existentes e em operação normal. Ao todo foram estudadas as situações de geração de vapor de cinco empresas industriais: Marquês Ltda e Super-Plástico Indústria Ltda, ambas localizadas no município de Itapetininga-MG, a Alvores S/A Indústria Têxtil, Mourão Nordeste S/A Indústria Têxtil, e Têxtil Nordeste do Brasil S/A, localizadas no município de Fortaleza-CE, apresentadas a seguir.

TABELA 30
Caracterização das Unidades Industriais Estudadas

| Nº | INDÚSTRIA | LOCAL | ATIVIDADE | LINHA DE PRODUÇÃO |
|----|-------------------------------|-----------------|-----------------|------------------------------------|
| 1 | Marquês Ltda | Itapetininga-MG | Alumínio | Químico |
| 2 | Super-Plástico Indústria Ltda | Itapetininga-MG | Plástico | Recuperação e produção de grânulos |
| 3 | Alvores S/A Indústria Têxtil | Fortaleza-CE | Textil e têxtil | Alfombras, tecidos e outros |
| 4 | Mourão Nordeste S/A | Fortaleza-CE | Textil e têxtil | Fios para tecidos |
| 5 | Têxtil Nordeste do Brasil S/A | Fortaleza-CE | Textil e têxtil | Fios de algodão e outros |

Capítulo 5

ESTUDOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Apresentação dos Dados Experimentais Relativos a seis Unidades Industriais

Como se mostra na Tabela 30, as empresas que colaboraram com este estudo produzem grandes quantidades de vapor saturado a partir de 12 tons de vapor diárias. Os dados das empresas estudadas estão na Tabela 30 e do mesmo modo estão disponíveis os dados das mesmas unidades.

5 - ESTUDOS EXPERIMENTAIS

5.1 - Introdução

Objetiva-se neste capítulo verificar o comportamento do modelo matemático criado para determinar o desempenho de sistemas de combustão a lenha em situação real, ou seja, sistemas pertencentes a unidades industriais existentes e em operação produtiva. Ao todo foram estudados os sistemas de geração de vapor de cinco empresas industriais: Laticínio Mantiqueira Ltda e Super-Recap Itajubá Ltda, ambas localizadas no município de Itajubá-MG, e Juosas S/A Indústria Têxtil, Vicunha Nordeste S/A Indústria Têxtil e Fiação Nordeste do Brasil S/A, localizadas no município de Fortaleza-CE, conforme tabela a seguir.

TABELA 38
Caracterização das Unidades Industriais Visitadas

| Nº | INDÚSTRIA | LOCAL | ATIVIDADE | LINHA DE PRODUÇÃO |
|----|-------------------------------|--------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 1 | Laticínio Mantiqueira Ltda | Itajubá/MG | Alimentos | Queijos |
| 2 | Super-Recap Itajubá Ltda | Itajubá/MG | Vulcanização | Recapagem e recauchutagem de pneus |
| 3 | Juosas S/A Indústria Têxtil | Fortaleza/CE | Malharia e beneficiamento químico | Malhas planas e tubulares |
| 4 | Vicunha Nordeste S/A | Fortaleza/CE | Tecelagem e beneficiamento químico | Tecido jeans (índigo blue) |
| 5 | Fiação Nordeste do Brasil S/A | Fortaleza/CE | Fiação e beneficiamento químico | Fios de algodão e poliéster |

Os resultados do modelo são confrontados para se verificar o desvio existente entre as metodologias de cálculo estabelecidas e se determinar quais dessas metodologias têm melhor aplicabilidade. Analisa-se, também, o desvio havido no método indireto de cálculo do desempenho devido ao emprego do parâmetro empírico do consumo nominal de lenha.

5.2 - Apresentação dos Casos Experimentais Estudados e dos Resultados Obtidos

Como se mostra na Tabela 39, as empresas que colaboraram com este trabalho possuem geradores de vapor simples, de pequeno porte, até 11 t/h de vapor saturado. Os números das empresas constam da Tabela 38 e doravante serão usados como referências dos sistemas estudados.

TABELA 39
Características gerais dos geradores de vapor estudados

| DADOS DO GERADOR DE VAPOR | GERADOR DE VAPOR | | | | |
|---|------------------|--------------------|------------|------------|------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Fabricante | Inbrasmatal | Heatmaster | Sabroe | Ata | Ata |
| Tipo | flamotubul. | flamotubul. | flamotub. | flamotub. | flamotub. |
| Ano de fabricação | — ^(a) | 1982 | 1987 | 1983 | 1987 |
| Vapor | saturado | saturado | saturado | saturado | saturado |
| Produção nominal de vapor (kg/h) | 420 | 265 | 10.000 | 11.000 | 5.000 |
| Pressão máxima nominal (kgf/cm ²) | 8 | 8 | 9,5 | 10,5 | 10,5 |
| Consumo nominal de lenha: (kg/h) | 120 | — | 2.500 | 2.760 | 1.700 |
| (m ³ /h) | — | 0,2 | — | — | — |
| Superfície de aquecimento (m ²) | — ^(b) | 15 | 260,5 | 270,72 | 165 |
| Produção específica, nominal, de vapor: | | | | | |
| (kg/kg lenha) | 3,5 | 3,4 ^(c) | 4 | 4 | 2,9 |
| (kg/m ² de tubulação) | — | 17,6 | 38,4 | 40,6 | 30,3 |
| Tipo de tiragem | natural | natural | induzida | induzida | induzida |
| Projetada para lenha | sim | sim | sim | sim | sim |
| Tipo de grelha | plana/fixa | plana/fixa | plana/fixa | plana/fixa | plana/fixa |

(a) Dado não registrado na placa de identificação do gerador de vapor, porém trata-se de um modelo não muito antigo, provavelmente construído no início da década de 80 (avaliação pessoal do autor).

(b) Dado não registrado na placa de identificação do gerador de vapor.

(c) Considerando a massa específica da lenha igual a 300 kg/m³.

A Tabela 40 contém os dados, medidos e estimados, dos sistemas de combustão a lenha estudados. Os dois primeiros casos empregam lenha homogênea (eucalipto); os demais, lenha heterogênea ou catada. Os dados referentes à massa específica, conteúdo de umidade e poder calorífico foram arbitrados, ou seja, não foram determinados em laboratório. A quantidade de carvão residual contida nas cinzas também foi arbitrada devido à impossibilidade de medição no local. Tais estimativas, que refletem as limitações típicas em situações reais de determinação do desempenho de equipamentos de combustão a lenha, não são tão grosseiras quanto possam parecer, e os eventuais desvios nestas propriedades podem ser minimizados. Assim, a umidade, de efetiva relevância, pode ser estimada com o auxílio de curvas que apresentam sua variação com o tempo, situando-se entre 50% para a lenha recém-cortada e 25% para a lenha com mais de três meses de secagem natural, como mostra a Figura 37.

TABELA 40
Dados medidos e estimados dos sistemas de combustão a lenha estudados

| DADOS | SISTEMA DE COMBUSTÃO ^(a) | | | | |
|---|-------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <u>ESTIMADOS</u> | | | | | |
| Altitude (m) | 844 | 844 | 0 | 0 | 0 |
| Consumo nominal de lenha: (kg/h) | 120 | — | 2.500 | 2.760 | 1.700 |
| (m ³ /h) | — | 0,2 | — | — | — |
| Massa específica da lenha (kg/m ³) | 390 | 390 | 300 | 300 | 300 |
| Umidade da lenha, base úmida (%) | 30 | 35 | 30 | 30 | 30 |
| PCS _s da lenha (kJ/kg) ^(b) | 19.700 | 19.700 | 13.814 | 13.814 | 13.814 |
| PCS _s do carvão (kJ/kg) | 31.395 | 31.395 | 31.395 | 31.395 | 31.395 |
| Carvão (kg/kg lenha úmida) | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 | 0,050 |
| Umidade do carvão, base úmida (%) | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| <u>MEDIDOS</u> | | | | | |
| Condições ambiente: TBS (°C) | 26 | 31 | 30 | 30 | 31 |
| TBU(°C) | 22 | 25 | 20,5 | 27 | 24 |
| Produção de vapor (kg/h) ^(c) | 330 | 250 | 4.000 | 6.000 | 3.000 |
| Pressão absoluta do vapor (kgf/cm ²) ^(d) | 8 | 7 | 7,5 | 8,4 | 7 |
| Temperatura da água de alimentação (°C) | 26 | 78,8 | 95 | 60 | 66 |
| Consumo medido de lenha: (kg/h) | 110 | — | 1.200 | 1.890 | 849 |
| (m ³ /h) | — | 0,182 | — | — | — |
| Temperatura dos gases de exaustão (°C) | 320 | 326 | 208 | 177 | 263 |
| Teor de CO ₂ dos gases de exaustão (%) | 12 | 12 | 14 | 14 | 15 |
| Superfícies (m ²): | | | | | |
| 1 | 0,9 | 0,6 | 22,8 | 22 | 13 |
| 2 | 0,9 | 1,4 | 22,8 | 22 | 13 |
| 3 | 0,9 | 0,9 | 57 | 45 | 32,5 |
| 4 | 1,44 | 0,5 | 57 | 45 | 32,5 |
| 5 | 1,44 | 1,5 | 36 | 30,6 | 16,9 |
| 6 | — | 1,5 | — | — | — |
| Temperatura média das superfícies (°C): | | | | | |
| 1 | 52 | 61 | 80 | 175 | 140 |
| 2 | 51 | 55 | 240 | 94 | 115 |
| 3 | 150 | 47 | 79 | 83 | 96 |
| 4 | 162 | 62 | 97 | 86 | 79 |
| 5 | 250 | 206 | 101 | 105 | 88 |
| 6 | — | 97 | — | — | — |

(a) Refere-se às empresas estudadas, conforme a Tabela 38.

(b) Lenha homogênea (eucalipto): PCS_s = 19.700 kJ/kg
Lenha catada (nativa): PCS_s = 13.814 kJ/kg

(c) Calculada com base no desnível de água do reservatório de alimentação dos geradores de vapor.

(d) Pressão média do vapor, observada através do manômetro (pressão manométrica) e transformada para pressão absoluta.

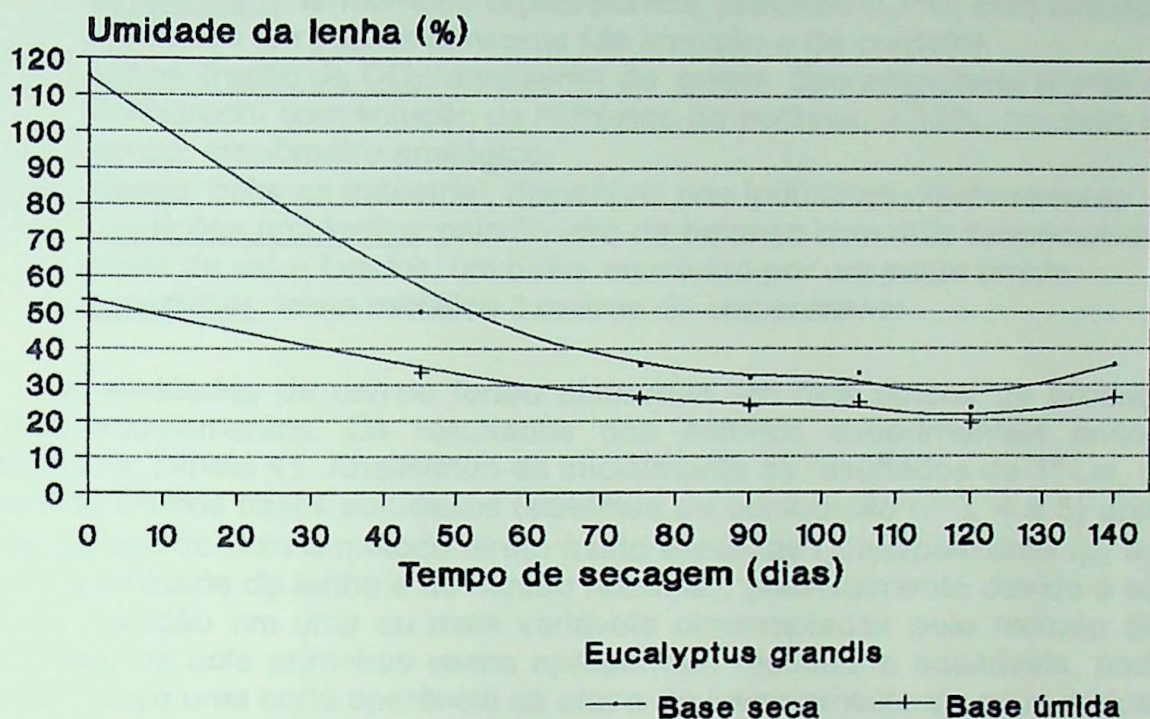


FIGURA 37 - Variação da umidade da madeira após o corte.
 FONTE - RESENDE⁽⁴¹⁾.

Neste trabalho, estima-se a umidade da lenha em 30 kg água/ kg lenha úmida, com exceção do sistema de combustão nº 2, cuja lenha aparentava estar mais úmida. Os demais sistemas consumiam lenha aparentemente com a mesma umidade.

O método indireto requer a determinação da temperatura média superficial do gerador de vapor para encontrar o valor das perdas associadas à transferência de calor para o meio. Evidentemente que se deve dividir o gerador de vapor em áreas mais homogêneas possíveis, em termos de nível de temperatura, e em cada uma delas efetuar a medição de temperatura no maior número de pontos diferentes que se julgar necessário. A média dessas temperaturas pode muito bem ser considerada como a temperatura representativa daquela seção em estudo, desde que não haja um desvio significativo de seu valor em relação às temperaturas pontuais obtidas. Assim, dividiram-se os geradores de vapor em cinco seções: anterior (fornalha), posterior, duas seções laterais e uma superior. O gerador nº 2 é exceção devido ao seu desenho em particular, sendo seccionado em seis partes.

É fundamental perceber ainda que uma das principais finalidades da determinação de desempenho desses sistemas é acompanhar sua operação, reduzindo as perdas e avaliando as ações de manutenção. Neste sentido é relevante uma comparação de índices de desempenho, perdendo valor o significado absoluto dos indicadores. Em resumo, interessa mais neste cenário, saber se houve uma variação na eficiência e não no seu valor em si. Por tais motivos, estimativas de densidades, poder calorífico e umidade são toleráveis, o que de forma alguma exclui sua avaliação cuidadosa conforme a literatura.

As medições realizadas em campo empregaram a seguinte instrumentação:

- temperatura: termômetro digital portátil, precisão 0,1°C, com termopares montados em pontas sensoras (de imersão e de contato).
- concentração de CO₂: analisador de gases tipo ampulheta (Fyrite ou Bacharach) com solução de hidróxido de potássio a 33%, precisão de 0,5%.
- tempo: cronômetro analógico.
- massa: balança industrial, disponível nas indústrias colaboradoras.
- condições ambientes: psicrômetro de balanço com dois termômetros de haste de vidro fixados, um deles envolvido por um pavio úmido.
- superfícies: trena metálica 3 metros de comprimento.

As atividades de campo foram efetuadas em dias típicos de produção, sem parada nos equipamentos. Os resultados dos estudos experimentais encontram-se condensados na Tabela 41. Analisando-se inicialmente os resultados de 1ª Lei, constata-se que os três últimos casos estudados (sistemas de combustão nº 3, 4 e 5) apresentam eficiências de acordo com o método direto muito elevadas (principalmente η_{d2} e η_{d4} , que consideram a umidade da lenha e do carvão residual), possivelmente devido à existência de erros de medição em uma ou mais variáveis contempladas pelo método direto. Ao contrário disso, os dois primeiros casos apresentam resultados aceitáveis, podendo-se concluir que houve uma certa coerência na etapa de levantamento de seus dados.

TABELA 41
Quadro resumo de resultados dos estudos experimentais

| DESEMPENHO | SISTEMA DE COMBUSTÃO | | | | |
|---------------------------|----------------------|------|------|------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| <u>ENERGÉTICOS</u> | | | | | |
| <u>Diretos:</u> | | | | | |
| η_{d1} | 40,5 | 43,5 | 57,1 | 57,9 | 63,6 |
| η_{d2} | 57,9 | 66,9 | 81,6 | 82,7 | 90,8 |
| η_{d3} | 43,3 | 46,5 | 62,9 | 63,7 | 70,0 |
| η_{d4} | 65,6 | 77,0 | 98,0 | 99,3 | 109,0 |
| <u>Indiretos:</u> | | | | | |
| η_{i1} | 66,1 | 65,8 | 60,0 | 60,4 | 59,1 |
| η_{i2} | 51,8 | 47,6 | 43,2 | 43,7 | 41,9 |
| η_{i3} | 63,7 | 63,4 | 56,0 | 56,4 | 55,0 |
| η_{i4} | 45,3 | 39,7 | 31,9 | 32,4 | 30,2 |
| <u>EXERGÉTICOS</u> | | | | | |
| <u>Diretos:</u> | | | | | |
| ϕ_{d11} | 11,4 | 12,3 | 17,2 | 17,2 | 18,3 |
| ϕ_{d12} | 11,0 | 11,8 | 16,3 | 16,3 | 17,3 |
| ϕ_{d21} | 12,2 | 13,2 | 19,0 | 19,0 | 20,2 |
| ϕ_{d22} | 11,7 | 12,5 | 17,9 | 17,8 | 19,0 |
| <u>Indiretos:</u> | | | | | |
| ϕ_{i11} | 8,3 | 8,8 | 9,0 | 10,1 | 6,1 |
| ϕ_{i12} | 0,7 | -0,6 | 1,4 | 3,1 | 2,2 |
| ϕ_{i13} | 7,0 | 7,6 | 7,2 | 8,4 | 4,1 |
| ϕ_{i14} | -2,7 | -4,6 | -3,8 | -1,7 | -7,9 |
| ϕ_{i21} | 10,1 | 10,7 | 11,0 | 12,2 | 7,7 |
| ϕ_{i22} | 0,9 | -0,8 | 1,9 | 4,0 | 3,1 |
| ϕ_{i23} | 8,7 | 9,3 | 9,0 | 10,3 | 5,3 |
| ϕ_{i24} | -3,8 | -6,7 | -5,6 | -2,4 | -12,0 |
| ϕ_{i3} | 26,4 | 26,5 | 27,4 | 27,0 | 26,2 |

Por sua vez, o método indireto, aplicado conforme a expressão 4.29, indica eficiências compatíveis com as características dos sistemas de combustão em questão. Nota-se a diferença sensível existente entre os métodos direto e indireto dessa análise energética. A Tabela 42 estabelece um paralelo entre as eficiências desses métodos, mostrando o desvio havido entre elas. A inconsistência dos resultados do método direto dos três últimos casos leva a desvios também inconsistentes, por isso a análise dessa tabela fica limitada aos sistemas de combustão 1 e 2. Adotando-se esse critério restritivo, observa-se a maior magnitude dos resultados do método indireto em relação aos do método direto, quando se considera o combustível seco (PCS_s e PCI_s), em contradição

TABELA 42

Desvios entre os desempenhos energéticos diretos e indiretos

| SISTEMA | BASE | DESEMPENHO ENERGÉTICO (%) | | DESvio (%) ⁽¹⁾ |
|---------|---------|---------------------------|-----------------|---------------------------|
| | | Método Direto | Método Indireto | |
| 1 | PCS_s | 40,5 | 64,1 | 58,3 |
| | PCS_u | 57,9 | 49,1 | -15,2 |
| | PCI_s | 43,3 | 61,7 | 42,5 |
| | PCI_u | 65,6 | 42,4 | -35,4 |
| 2 | PCS_s | 43,5 | 65,8 | 51,2 |
| | PCS_u | 66,9 | 47,6 | -28,8 |
| | PCI_s | 46,5 | 63,4 | 36,3 |
| | PCI_u | 77,0 | 40,0 | -48,0 |
| 3 | PCS_s | 57,1 | 64,0 | 12,1 |
| | PCS_u | 81,6 | 48,8 | -40,2 |
| | PCI_s | 63,0 | 60,4 | -4,0 |
| | PCI_u | 98,2 | 38,5 | -60,8 |
| 4 | PCS_s | 57,9 | 60,4 | 4,3 |
| | PCS_u | 82,7 | 43,7 | -47,2 |
| | PCI_s | 63,7 | 56,3 | -11,6 |
| | PCI_u | 99,3 | 32,4 | -67,4 |
| 5 | PCS_s | 63,6 | 59,1 | -7,0 |
| | PCS_u | 90,8 | 41,9 | -53,8 |
| | PCI_s | 70,0 | 55,0 | -21,4 |
| | PCI_u | 109,0 | 30,2 | -72,3 |

às situações que consideram o combustível úmido (PCS_u e PCI_u), cujas eficiências pelo método direto são mais acentuadas que as indiretas. As Figuras 38 e 39, que apresentam os resultados dos desempenhos energéticos diretos e indiretos desses dois sistemas, permitem a visualização dos desvios.

Retomando a Tabela 41, verifica-se que os resultados das eficiências exergéticas diretas não se apresentam tão dispersos para um dado sistema de combustão. Pode-se trabalhar, então, com a média desses valores sem contudo incorrer em erro apreciável. Nesses termos, chega-se às eficiências médias exergéticas diretas

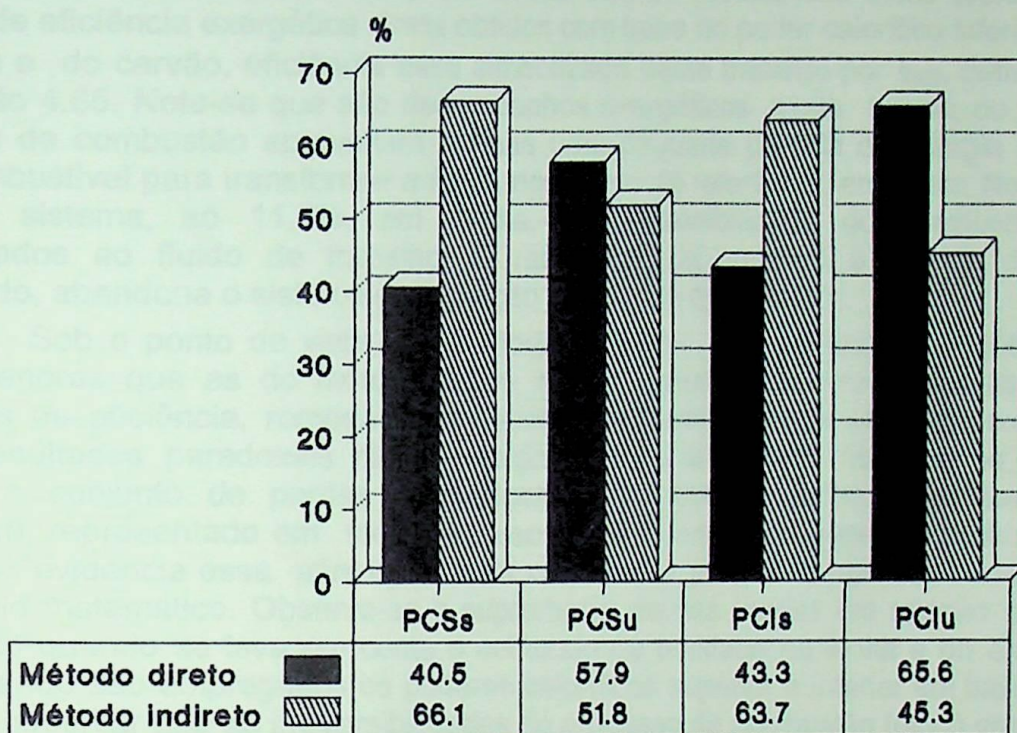


FIGURA 38 - Desempenhos energéticos do sistema de combustão 1

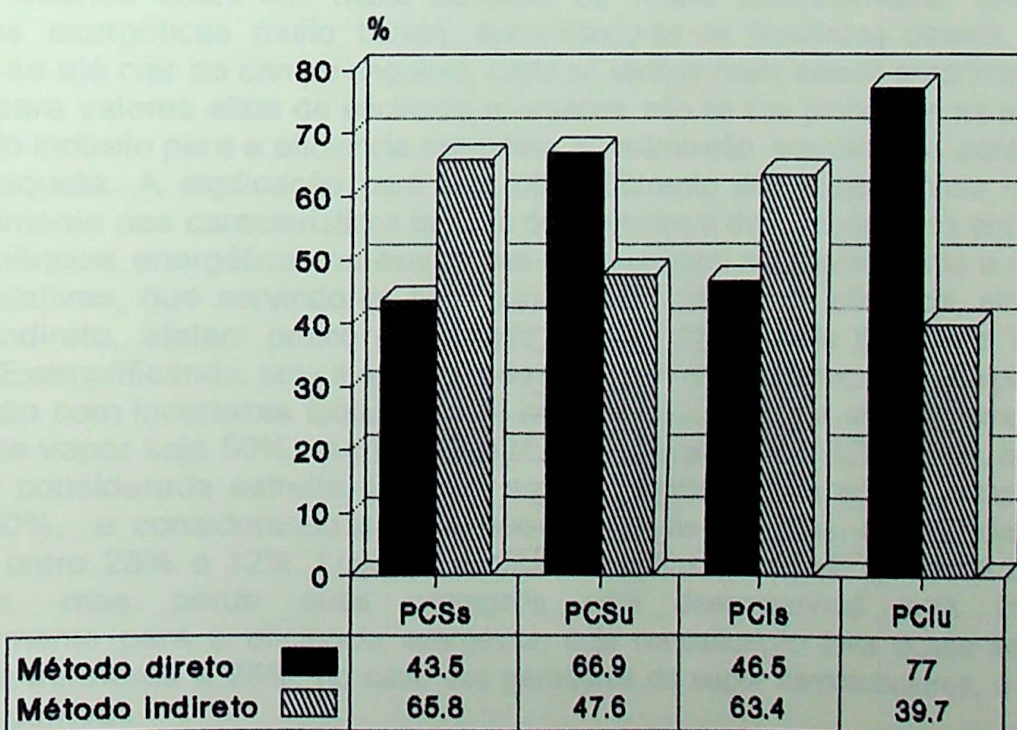


FIGURA 39 - Desempenhos energéticos do sistema de combustão 2

da ordem de 11,7%, 12,4%, 17,2%, 17,6% e 18,7%, referentes respectivamente aos cinco sistemas de combustão listados. Esses valores médios são muito próximos dos valores de eficiência exergética direta obtidos com base no poder calorífico inferior úmido da lenha e do carvão, eficiência essa simbolizada neste trabalho por ϕ_{d22} , definida pela expressão 4.65. Nota-se que são desempenhos exergéticos muito baixos, ou seja, os sistemas de combustão aproveitam apenas uma pequena parcela da exergia aportada pelo combustível para transformar a água, no estado de referência, em vapor. No caso do primeiro sistema, só 11,7%, em média, da disponibilidade do combustível são incorporados ao fluido de trabalho. O restante, que constitui a parcela de maior significado, abandona o sistema na condição de perdas exergéticas.

Sob o ponto de vista do método indireto, as eficiências exergéticas são ainda menores que as do método direto, sendo inclusive registrados alguns valores negativos de eficiência, rompendo com todos os paradigmas de eficiência existentes. Esses resultados paradoxais não têm significado prático, uma vez que só ocorrem quando o conjunto de perdas exergéticas do sistema for superior ao seu ganho exergético, representado em todos os casos pelo aporte exergético do combustível. A Tabela 43 evidencia essa afirmação. Nela constam as perdas exergéticas consideradas no modelo matemático. Observa-se a supremacia dessas perdas em relação ao ganho exergético quando se leva em conta o conteúdo de umidade da lenha e do carvão, ou seja, quando são empregados os poderes caloríficos superior e inferior em base úmida. Pode-se observar que as irreversibilidades do processo de combustão (ex_{deg}) constituem-se a parcela mais representativa das perdas exergéticas dos sistemas, seguidas das exergias associadas aos gases de exaustão (ex_5) e ao carvão residual (ex_6), respectivamente, e em menor escala, das perdas de exergia através das paredes do sistema (ex_{par}). A eficiência exergética mantém relação inversa com as perdas do sistema. Quando estas são muito elevadas, ou mesmo superestimadas, determinam eficiências exergéticas muito baixas, aumentando-se as incertezas desses valores, podendo-se até cair no campo negativo, como se verifica neste estudo experimental. Em síntese, para valores altos de eficiência energética, não se tem problemas na aplicação do método indireto para a eficiência exergética, o mesmo não acontecendo para valores baixos daquela. A explicação para este comportamento dos desempenhos radica-se essencialmente nas características básicas dos métodos e das propriedades em análise. Altas eficiências energéticas ou exergéticas correspondem necessariamente a menores perdas relativas, que servindo de base para a determinação da eficiência, através do método indireto, afetam pouco o resultado. E naturalmente vale também a situação inversa. Exemplificando, seja a aplicação do método indireto, empregando equipamentos de medição com incertezas totais de 10% nos resultados. Caso a eficiência medida do gerador de vapor seja 80%, seu resultado real poderá estar entre 82% e 78%, faixa que pode ser considerada estreita. Contudo, se a eficiência medida é 20%, suas perdas somam 80%, e considerando a imprecisão inerente às medições, a eficiência deverá situar-se entre 28% e 12%. Logo, para eficiências altas, o método indireto é bastante adequado, mas perde suas vantagens para desempenhos mais limitados. Particularmente para a eficiência exergética, cuja conceituação leva quase sempre a resultados inferiores a 25%, no caso dos geradores de vapor flamotubulares, o método indireto é sofrível.

TABELA 43
Representatividade das perdas exergéticas dos sistemas de combustão a lenha estudados

| PC ^(a) | SC ^(b) | ex ₅ | | ex _{par} | | ex ₆ | | ex _{deg} | | TOTAL kJ/kg |
|-------------------|-------------------|-----------------|------|-------------------|-----|-----------------|------|-------------------|------|----------------|
| | | kJ/kg | % | kJ/kg | % | kJ/kg | % | kJ/kg | % | |
| PCS _s | 1 | 0,1203 | 11,6 | 0,0147 | 1,4 | 0,0828 | 8,0 | 0,8160 | 79,0 | 1,0338 |
| | 2 | 0,1247 | 12,3 | 0,0079 | 0,8 | 0,0637 | 6,3 | 0,8152 | 80,6 | 1,0115 |
| | 3 | 0,1039 | 10,7 | 0,0112 | 1,1 | 0,0545 | 5,6 | 0,8051 | 82,6 | 0,9747 |
| | 4 | 0,0900 | 9,0 | 0,0071 | 0,7 | 0,0908 | 9,1 | 0,8090 | 81,2 | 0,9969 |
| | 5 | 0,1251 | 12,0 | 0,0062 | 0,6 | 0,0908 | 8,7 | 0,8189 | 78,7 | 1,0410 |
| PCS _u | 1 | 0,1718 | 15,3 | 0,0211 | 1,9 | 0,1159 | 10,3 | 0,8160 | 72,5 | 1,1248 |
| | 2 | 0,1919 | 17,2 | 0,0122 | 1,1 | 0,0960 | 8,6 | 0,8152 | 73,1 | 1,1153 |
| | 3 | 0,1484 | 14,2 | 0,0159 | 1,5 | 0,0763 | 7,3 | 0,8051 | 77,0 | 1,0457 |
| | 4 | 0,1286 | 12,0 | 0,0102 | 1,0 | 0,1272 | 11,3 | 0,8090 | 75,2 | 1,0750 |
| | 5 | 0,1787 | 15,8 | 0,0088 | 0,8 | 0,1272 | 11,2 | 0,8189 | 72,2 | 1,1336 |
| PCI _s | 1 | 0,1285 | 12,3 | 0,0158 | 1,5 | 0,0883 | 8,4 | 0,8160 | 77,8 | 1,0486 |
| | 2 | 0,1313 | 12,8 | 0,0085 | 0,8 | 0,0680 | 6,7 | 0,8152 | 79,7 | 1,0230 |
| | 3 | 0,1146 | 11,6 | 0,0123 | 1,2 | 0,0601 | 6,0 | 0,8051 | 81,2 | 0,9921 |
| | 4 | 0,0991 | 9,8 | 0,0079 | 0,8 | 0,0999 | 9,8 | 0,8090 | 79,6 | 1,0159 |
| | 5 | 0,1377 | 13,0 | 0,0068 | 0,6 | 0,0999 | 9,4 | 0,8189 | 77,0 | 1,0633 |
| PCI _u | 1 | 0,1946 | 16,7 | 0,0239 | 2,1 | 0,1309 | 11,2 | 0,8160 | 70,0 | 1,1654 |
| | 2 | 0,2208 | 19,0 | 0,0140 | 1,2 | 0,1102 | 9,5 | 0,8152 | 70,3 | 1,1602 |
| | 3 | 0,1786 | 16,3 | 0,0192 | 1,8 | 0,0916 | 8,3 | 0,8051 | 73,6 | 1,0945 |
| | 4 | 0,1545 | 13,7 | 0,0123 | 1,1 | 0,1523 | 13,5 | 0,8090 | 71,7 | 1,1281 |
| | 5 | 0,2146 | 18,0 | 0,0106 | 0,9 | 0,1523 | 12,7 | 0,8189 | 68,4 | 1,1964 |

(a) Poder calorífico (b) Sistema de combustão

NOTA: As exergias específicas associadas aos gases de exaustão (ex₅), à paredes do sistema (ex_{par}), ao carvão residual (ex₆) e às irreversibilidades do processo de combustão (ex_{deg}) são dadas em kJ/kg lenha, conforme a interpretação da Figura 36, Capítulo 4.

Há que se fazer uma ressalva com relação aos valores muito elevados ou muito baixos detectados para alguns desempenhos. É notório que esses valores não têm significado em si mesmos, entretanto podem servir a uma análise comparativa e possivelmente de melhora de desempenho. Por exemplo, em um determinado sistema de combustão verificou-se 105% de desempenho energético. Após algumas melhorias no equipamento ou mesmo no procedimento operacional, e utilizando as mesmas instrumentações e mesma metodologia de cálculo que antes, verifica-se 110% de desempenho energético. Ora, independente do valor estar acima de 100%, o que deve interessar no caso é saber que houve um incremento real de 5% na eficiência do sistema, representando uma economia de recurso energético. da mesma forma, se a eficiência exergética anterior era de -5% e, após as mudança, verifica-se 0% da mesma eficiência, ter-se-á obtido êxito na implementação das medidas de racionalização energética.

No Capítulo 4, foi utilizado o parâmetro consumo nominal de lenha (CNL) no cálculo das perdas pelas paredes do sistema de combustão, que representam o fluxo de calor por convecção para o ambiente, através das paredes do sistema, sem no entanto se preocupar com a margem de erro que a introdução desse fator poderia propiciar. A análise das tabelas seguintes ajuda a esclarecer esse fato. As Tabelas 44 e 45 indicam que utilizando o consumo nominal de lenha com valor até quase 50% a mais do que o consumo medido de lenha (sistemas 1, 2 e 4), os desempenhos energéticos e

exergéticos indiretos praticamente não são afetados, apresentando variações entre 0,1% a 1,9%. Por exemplo, no sistema de combustão 4 o consumo nominal de lenha equivale a 46% a mais do consumo medido de lenha (Tabela 44). Se for usado o CNL,

TABELA 44
Diferença entre os valores do consumo nominal de lenha e do consumo medido de lenha

| SISTEMA | CONSUMO DE LENHA | | | | DIFERENÇA | | |
|---------|------------------|-------------------|--------|-------------------|-----------|-------------------|-------|
| | Nominal | | Medido | | kg/h | m ³ /h | % (*) |
| | kg/h | m ³ /h | kg/h | m ³ /h | | | |
| 1 | 120 | — | 110 | — | 10 | — | 9,1 |
| 2 | — | 0,20 | — | 0,182 | — | 0,018 | 9,9 |
| 3 | 2.500 | — | 1.200 | — | 1.300 | — | 108,3 |
| 4 | 2.760 | — | 870 | — | 870 | — | 46,0 |
| 5 | 1.700 | — | 851 | — | 851 | — | 100,2 |

(*) Referente ao consumo medido de lenha

chega-se ao resultado de 60,4% para o desempenho energético indireto η_{i11} (Tabela 45), enquanto que se for utilizado o consumo medido de lenha no seu lugar, esse desempenho η_{i1} assume o valor de 60%, registrando, pois, uma pequena diferença que pode ser perfeitamente desprezada. Os desempenhos indiretos calculados para os sistemas de combustão 3 e 5 também não apresentam acréscimo significativo no valor quando se adota o CNL, cujo valor nesses dois casos dobra em relação ao consumo medido de lenha. O desempenho exergético indireto ϕ_{i3} permanece inalterado para os dois métodos, por isso não consta da tabela abaixo.

TABELA 45
Comportamento dos desempenhos indiretos devido à utilização do conceito de consumo do conceito de consumo nominal de lenha

| SC (a) | MÉTODO (b) | DESEMPENHOS INDIRETOS (%) | | | | | | | | | | | |
|-----------|---------------|---------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | | Energéticos | | | | Exergéticos | | | | | | | |
| | | η_{i1} | η_{i2} | η_{i3} | η_{i4} | ϕ_{i11} | ϕ_{i12} | ϕ_{i13} | ϕ_{i14} | ϕ_{i21} | ϕ_{i22} | ϕ_{i23} | ϕ_{i24} |
| 1 | A | 64,1 | 49,1 | 61,7 | 42,4 | 6,8 | -1,4 | 5,4 | -5,1 | 8,4 | -2,0 | 6,9 | -7,4 |
| | B | 64,0 | 48,9 | 61,6 | 42,2 | 6,7 | -1,6 | 5,3 | -5,3 | 8,3 | -2,2 | 6,7 | -7,7 |
| | A-B | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 |
| 2 | A | 65,8 | 47,6 | 63,4 | 39,7 | 8,8 | -0,6 | 7,6 | -4,6 | 10,7 | -0,8 | 9,3 | -6,7 |
| | B | 65,7 | 47,4 | 63,3 | 39,6 | 8,7 | -0,7 | 7,5 | -4,7 | 10,6 | -0,9 | 9,2 | -6,9 |
| | A-B | 0,1 | 0,2 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,2 |
| 3 | A | 64,0 | 48,8 | 60,4 | 38,5 | 12,1 | 5,7 | 10,6 | 1,3 | 14,3 | 7,3 | 12,7 | 1,8 |
| | B | 62,9 | 47,2 | 59,1 | 36,5 | 11,0 | 4,2 | 9,3 | -0,6 | 13,2 | 5,4 | 11,4 | -0,8 |
| | A-B | 1,1 | 1,6 | 1,3 | 2,0 | 1,1 | 1,5 | 1,3 | 1,9 | 1,1 | 1,9 | 1,3 | 2,6 |
| 4 | A | 60,4 | 43,7 | 56,3 | 32,4 | 10,1 | 3,1 | 8,4 | -1,7 | 12,2 | 4,0 | 10,3 | -2,4 |
| | B | 60,0 | 43,2 | 56,0 | 31,9 | 9,8 | 2,6 | 8,1 | -2,2 | 11,8 | 3,5 | 10,0 | -3,2 |
| | A-B | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,8 |
| 5 | A | 59,1 | 41,9 | 55,0 | 30,2 | 6,1 | -2,2 | 4,1 | -7,9 | 7,7 | -3,1 | 5,3 | -12,0 |
| | B | 58,4 | 41,0 | 54,2 | 29,1 | 5,6 | -3,0 | 3,5 | -8,8 | 7,0 | -4,2 | 4,5 | -13,6 |
| | A-B | 0,7 | 0,9 | 0,8 | 1,1 | 0,5 | 0,8 | 0,6 | 0,9 | 0,7 | 1,1 | 0,8 | 1,6 |

(a) Sistema de combustão.

(b) A: modelo matemático proposto, utilizando o conceito de consumo nominal de lenha (CNL).
B: utilizando no lugar do CNL, o consumo medido de lenha do método direto.

Também no Capítulo 4, foi feita uma análise de sensibilidade dos desempenhos fundamentada em um caso hipotético criado para essa finalidade. Os casos reais podem ser submetidos à mesma análise, no sentido de se verificar a provável variação que os desempenhos acusariam quando os valores absolutos de alguns fatores porventura fossem estimados equivocadamente. A Figura 40 representa a flutuação dos desempenhos energéticos diretos em decorrência da pressuposição de existência de um campo variacional (erro) de 10% no conteúdo de umidade da lenha. Embora alguns casos estudados apresentem características bastante divergentes, nota-se que não há desvios significativos entre as curvas de desempenho. Torna-se interessante, portanto, recomendar que em outros trabalhos verifique-se se essa homogeneidade prevalece para uma série maior de casos, de preferência com características mais dispersantes que

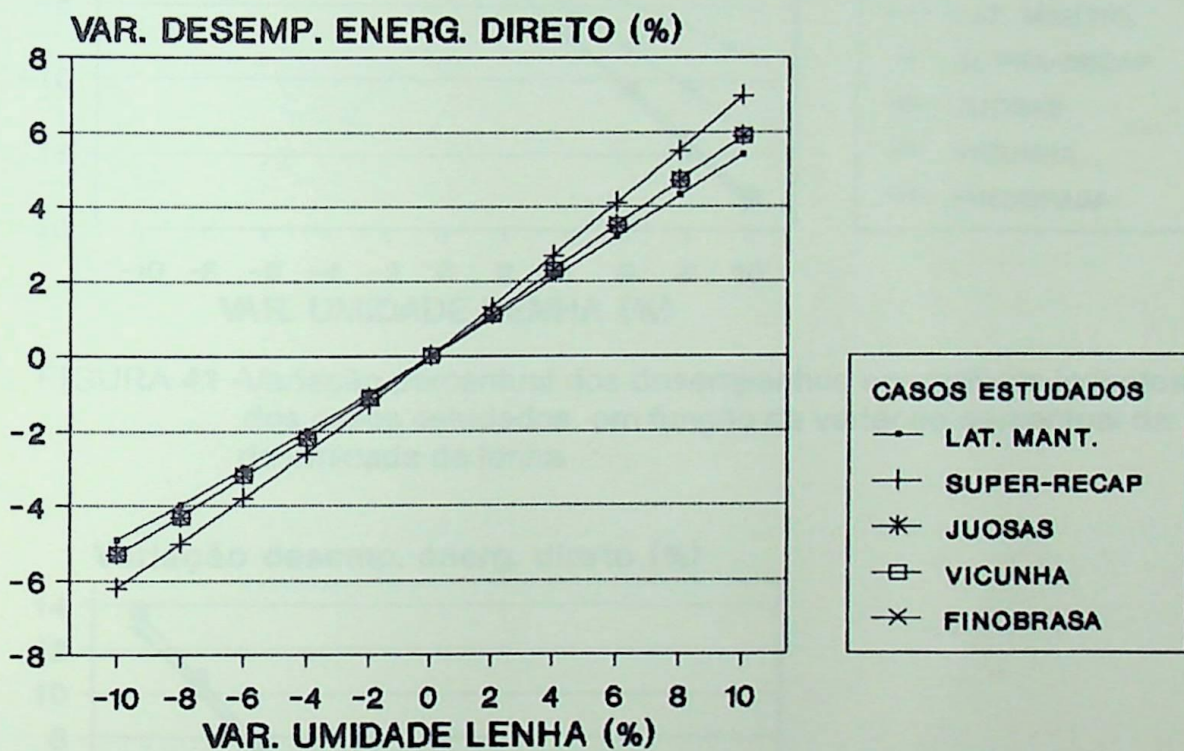


FIGURA 40 - Variação percentual dos desempenhos energéticos diretos dos casos estudados, em função da variação percentual da umidade da lenha.

os atualmente em questão. As curvas dos desempenhos energéticos indiretos mostram-se menos agrupadas, com maior desvio em relação às curvas dos desempenhos energéticos diretos, conforme a Figura 41. A divergência maior, conforme pode-se observar, ficou por conta do quinto caso estudado. Os demais permaneceram mais agrupados, destacando-se o terceiro e o quarto casos, que apresentaram variações idênticas, por isso a superposição de suas curvas representativas.

Tomando-se agora como referência o poder calorífico da lenha, as curvas dos desempenhos energéticos diretos geradas pela variação do valor base desta variável do processo de combustão, praticamente derivam-se para uma única curva, como pode ser visto na Figura 42. Isso demonstra que independente do caso experimental analisado, para cada erro de 1% na estimativa do poder calorífico da lenha utilizada em geradores de vapor, tem-se uma correspondência de 1% (às vezes um pouco mais) de variação no desempenho energético direto.

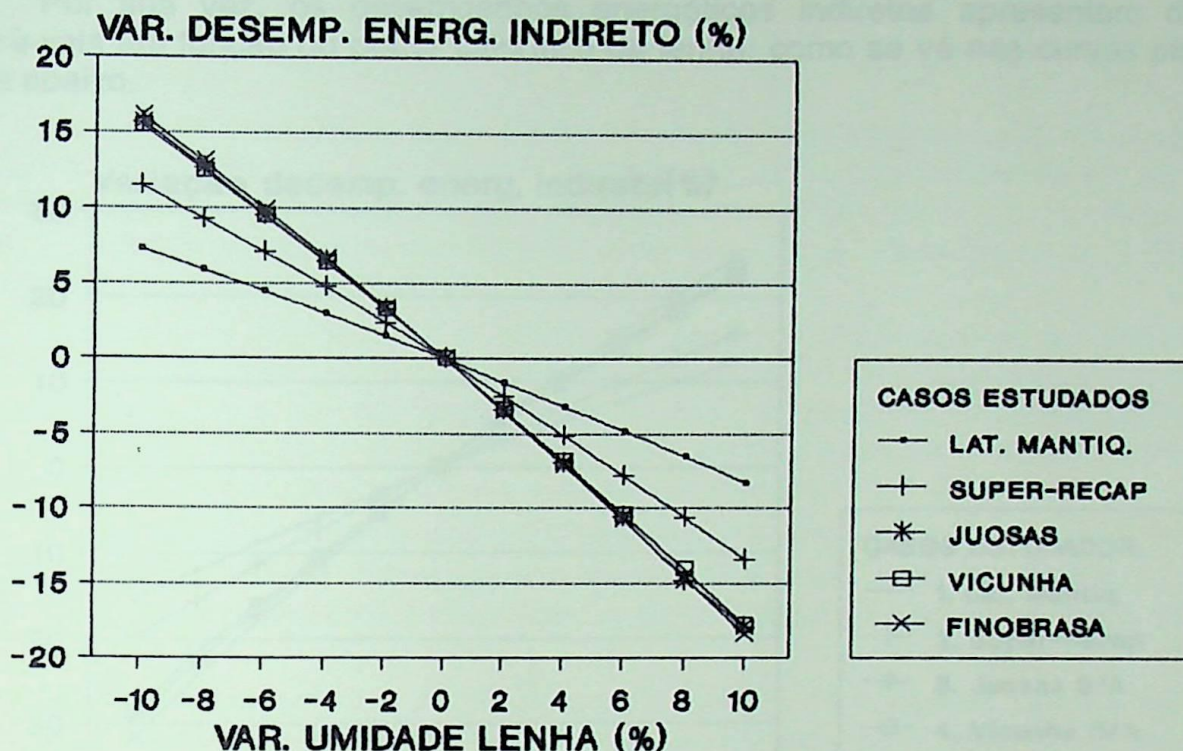


FIGURA 41 -Variação percentual dos desempenhos energéticos indiretos dos casos estudados, em função da variação percentual da da umidade da lenha

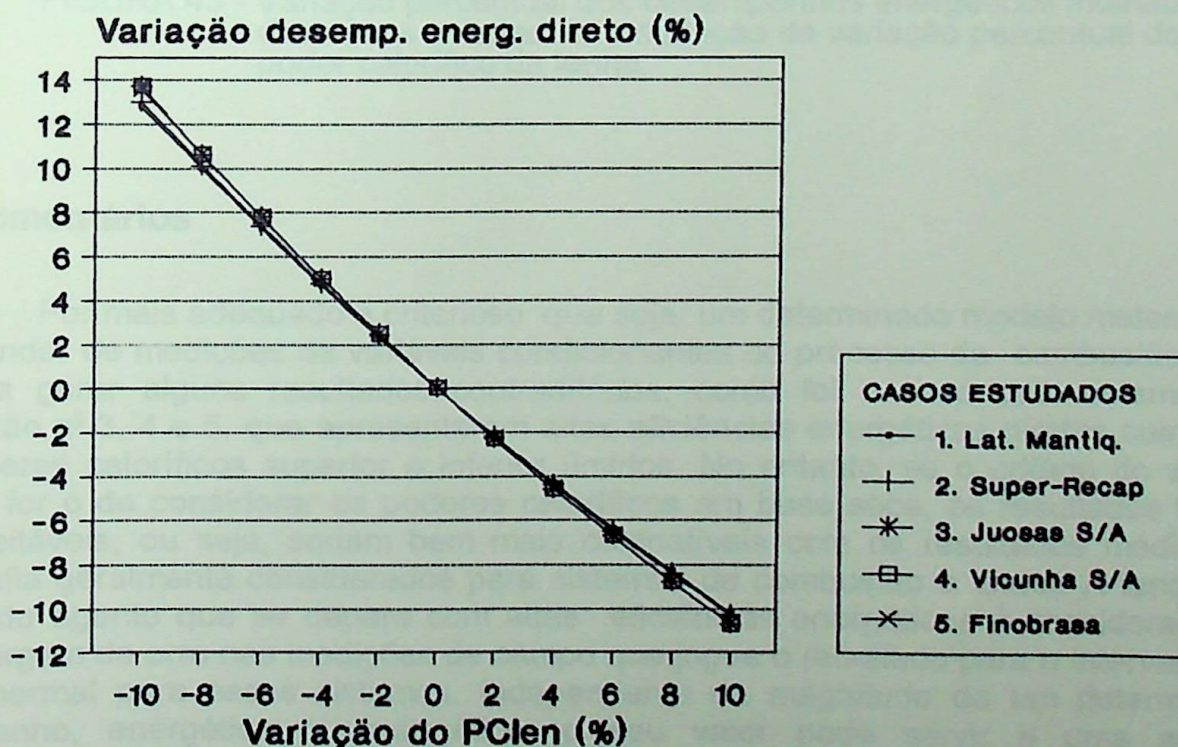


FIGURA 42 -Variação percentual dos desempenhos energéticos diretos dos casos estudados, em função da variação percentual do poder calorífico da lenha

Por sua vez, os desempenhos energéticos indiretos apresentam desvios consideráveis em função do poder calorífico da lenha, como se vê nas curvas plotadas na figura abaixo.

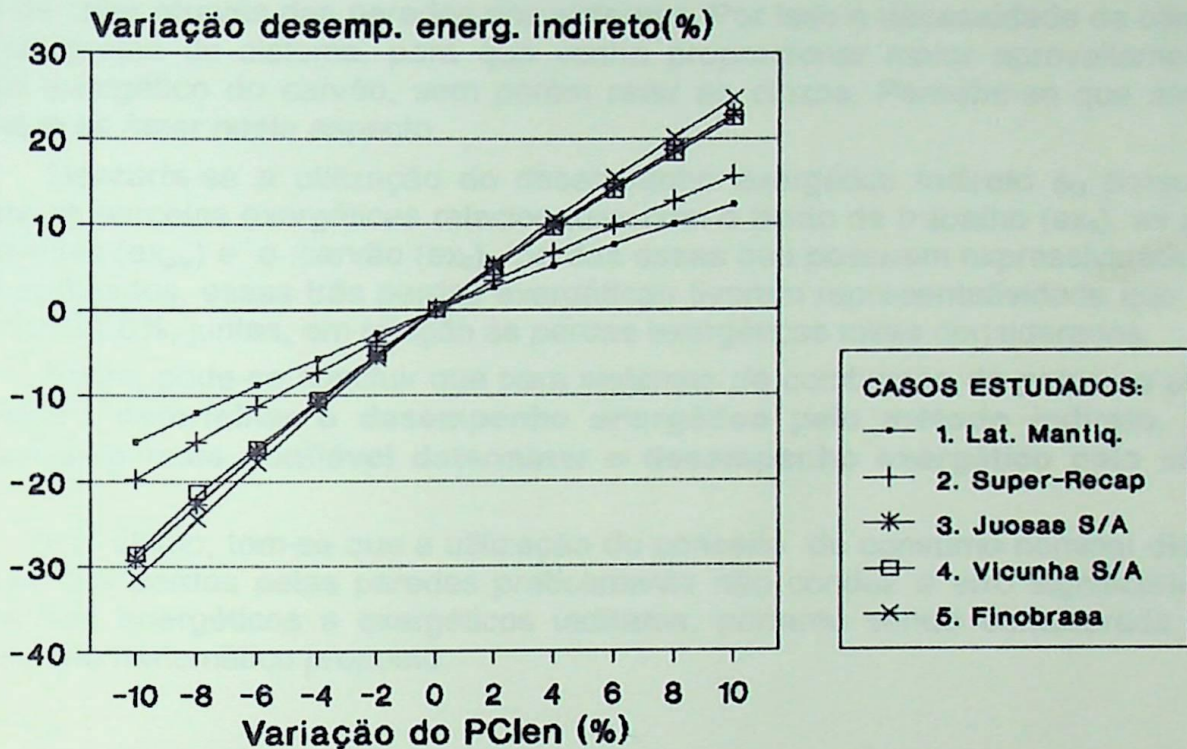


FIGURA 43 - Variação percentual dos desempenhos energéticos indiretos dos casos estudados, em função da variação percentual do poder calorífico da lenha.

5.3 - Comentários

Por mais adequado e criterioso que seja um determinado modelo matemático, se depender de medições de variáveis condicionantes do processo de combustão está sujeito a gerar alguns resultados contraditórios, como foi o caso dos sistemas de combustão n^o 3, 4 e 5, que apresentaram altas eficiências energéticas diretas com base nos poderes caloríficos superior e inferior úmidos. No entanto, se o critério do agente analista for o de considerar os poderes caloríficos em base seca, os resultados teriam sido aceitáveis, ou seja, seriam bem mais compatíveis com os resultados médios de bibliografia geralmente considerados para sistemas de combustão a lenha. A tendência comum do agente que se depara com altas eficiências energéticas é considerar uma certa margem de erro nas medições de campo que jogue o resultado para o intervalo tido como normal para esses sistemas. Independente da magnitude de um determinado desempenho, energético ou exergético, o seu valor pode servir a uma análise comparativa de medidas de racionalização de energia.

Recomenda-se calcular o desempenho com base no poder calorífico inferior úmido do combustível e da fração sólida residual, uma vez que considera a participação

da umidade como agente sorvedor de parte de sua densidade energética, sem não entanto repassá-la para o fluido de trabalho. Isto é, representa o poder calorífico líquido dos combustíveis.

As perdas exergéticas associadas ao carvão são maiores que as associadas ao fluxo de calor através das paredes dos sistemas. Por isso a necessidade de otimizar o projeto da grelha do sistema, para que venha proporcionar maior aproveitamento do conteúdo energético do carvão, sem porém reter as cinzas. Percebe-se que ainda há muito o que se fazer neste aspecto.

Descarta-se a utilização do desempenho exergético indireto ϕ_{i3} porque não considera as parcelas exergéticas relacionadas com o fluido de trabalho (ex_5), as perdas pelas paredes (ex_{par}) e o carvão (ex_6), perdas essas que possuem expressividade. Nos estudos realizados, essas três perdas exergéticas tiveram representatividade que variou de 17,4% a 31,6%, juntas, em relação às perdas exergéticas totais consideradas.

Enfim, pode-se concluir que para sistemas de combustão de pequeno porte, **é mais seguro determinar o desempenho energético pelo método indireto, assim como torna-se mais confiável determinar o desempenho exergético pelo método direto.**

Por último, tem-se que a utilização do conceito de consumo nominal de lenha no cálculo das perdas pelas paredes praticamente não conduz a erro significativo dos desempenhos energéticos e exergéticos indiretos, portanto sendo considerada válida para o modelo matemático proposto.

6 - COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O estudo de uso da laser para monitorar o processo de combustão em motores diesel sempre figurou como um desafio tecnológico devido ao fato de que o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de combustão em motores diesel requer a utilização de técnicas avançadas de óptica e eletrônica. Entretanto, a utilização de lasers para monitorar o processo de combustão em motores diesel apresenta vantagens significativas, tais como a possibilidade de obtenção de informações em tempo real sobre o processo de combustão, a possibilidade de obtenção de informações sobre a distribuição espacial da temperatura e da velocidade do gás, a possibilidade de obtenção de informações sobre a formação de produtos de combustão, etc. Este trabalho apresenta os resultados obtidos em um estudo de uso da laser para monitorar o processo de combustão em um motor diesel. Os resultados obtidos mostram que a utilização de lasers para monitorar o processo de combustão em motores diesel é uma técnica viável e que pode fornecer informações importantes sobre o processo de combustão.

Os resultados obtidos mostram que a utilização de lasers para monitorar o processo de combustão em motores diesel é uma técnica viável e que pode fornecer informações importantes sobre o processo de combustão. A utilização de lasers para monitorar o processo de combustão em motores diesel apresenta vantagens significativas, tais como a possibilidade de obtenção de informações em tempo real sobre o processo de combustão, a possibilidade de obtenção de informações sobre a distribuição espacial da temperatura e da velocidade do gás, a possibilidade de obtenção de informações sobre a formação de produtos de combustão, etc. Este trabalho apresenta os resultados obtidos em um estudo de uso da laser para monitorar o processo de combustão em um motor diesel. Os resultados obtidos mostram que a utilização de lasers para monitorar o processo de combustão em motores diesel é uma técnica viável e que pode fornecer informações importantes sobre o processo de combustão.

Este trabalho estudou o desempenho de um motor diesel com a utilização de uma tecnologia de sensores de combustão de última geração. A utilização de sensores de combustão de última geração permite a obtenção de informações importantes sobre o processo de combustão em tempo real. Os resultados obtidos mostram que a utilização de sensores de combustão de última geração é uma técnica viável e que pode fornecer informações importantes sobre o processo de combustão.

Capítulo 6

COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos mostram que a utilização de sensores de combustão de última geração é uma técnica viável e que pode fornecer informações importantes sobre o processo de combustão. A utilização de sensores de combustão de última geração permite a obtenção de informações importantes sobre o processo de combustão em tempo real. Os resultados obtidos mostram que a utilização de sensores de combustão de última geração é uma técnica viável e que pode fornecer informações importantes sobre o processo de combustão.

6 - COMENTÁRIOS E RECOMENDAÇÕES

O estudo do uso da lenha como combustível demonstra que esse energético renovável sempre figurou como um agente indispensável ao processo de desenvolvimento do país, participando expressivamente em vários segmentos do cenário sócio-econômico brasileiro. Entretanto, equivocadamente tem-se atribuído a responsabilidade pela devastação das florestas nativas particularmente à exploração florestal para fins energéticos, quer seja na forma de lenha ou na forma de carvão vegetal. Existe sem dúvida alguma relação, sobretudo naqueles contextos onde ainda não prevalece a produção florestal sustentada, porém, a expansão agropecuária e as queimadas são os principais responsáveis pela redução da cobertura florestal nativa no Brasil. É evidente que não se pretende com isso, ignorar o impacto ambiental advindo do uso florestal energético ou mesmo incentivar o incremento desagregado da participação da lenha na matriz energética. Os alertas a respeito da extração e uso impróprios da lenha devem não só ser mantidos como também reforçados. Deve-se inclusive estimular a participação mais intensa de outras fontes energéticas renováveis, como forma de minimizar a situação da lenha no país.

Mantida a tendência cronológica de redução do consumo de lenha, ou mesmo havendo estagnação desse consumo, e desencadeando-se programas regionais integrados de educação ambiental que contemplem, ao mesmo tempo, o uso sustentado da cobertura vegetal e sensibilizem a população para a missão de preservá-la, haverá chances de se reverter o quadro florestal crítico de algumas regiões mais afetadas pela intensidade da exploração predatória, sem a necessidade de criar situações que resultem em desestímulo ao emprego da lenha e seus subprodutos combustíveis, no objetivo de poupar recursos naturais imprescindíveis à sobrevivência humana.

Este trabalho voltou-se fundamentalmente para o estabelecimento de uma metodologia de cálculo do desempenho de sistemas térmicos a lenha baseado na combustão simultânea da celulose, hemicelulose e lignina, os três elementos principais de constituição de sua parede celular. Apesar da dependência criteriosa, viu-se que os vários tipos de desempenho energético e exergético não apresentaram flutuação quando a fórmula química da lenha foi variada em até 10% do valor originalmente estipulado. O mesmo, porém, não se pode dizer para outros fatores condicionantes do processo de combustão, principalmente em relação ao poder calorífico da lenha, o fator que mais sensibiliza os desempenhos energéticos e exergéticos. Da análise feita no Capítulo 4, chegou à conclusão que, para o caso hipotético apresentado, os desempenhos energéticos e exergéticos diretos variaram praticamente na mesma proporção da variação percentual do poder calorífico da lenha, porém em ordem inversa. Ou seja, cada 1% de imprecisão a mais no valor do poder calorífico adotado para a lenha reflete um erro de -1% no valor dos desempenhos energéticos e exergéticos diretos. Os desempenhos de Segunda Lei não seguem essa regra. São diretamente proporcionais ao poder calorífico da lenha, contudo apresentam uma grande dispersão dos valores representativos dessa relação mantida com o PC_{len} . A título de exemplo, a menor proporção não nula encontrada foi de 0,5:1 para a eficiência energética indireta η_{i1} (0,5% de variação para cada 1% de oscilação do PC_{len}). A maior, 44:1, evidenciada para a eficiência exergética indireta ϕ_{i24} .

A análise dos sistemas térmicos das unidades industriais reais possibilitou concluir que em alguns casos houve imprecisão nas medições de alguns fatores, razão pela qual chegou-se a alguns resultados impossíveis para as eficiências energéticas, totalmente dependentes do levantamento de dados das instalações. Este fato vem realçar a tese de que esta etapa é crítica devido à operação tipicamente variável dos sistemas térmicos e à impossibilidade comum de obtenção de medidas simultâneas de grandezas utilizando-se instrumentos de medição portáteis, não interligados automaticamente a um sistema de aquisição de dados. Isso sem contar a provável descalibração desses instrumentos.

No presente trabalho desenvolveram-se também critérios de desempenho baseados simultaneamente na Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, através do método exerético.

De uma maneira geral, os resultados exeréticos obtidos nos estudos experimentais apresentaram-se muito baixos, notadamente quando se usa o poder calorífico em base úmida, obtendo-se valores negativos, sem sentido físico. A razão disso acontecer não é de fácil compreensão, e diz respeito aos valores superestimados das perdas do sistema, já que estavam associados ao método indireto. Como a eficiência exerética é função inversa das perdas, o valor exagerado delas pode levar essa eficiência para um campo indesejável de grandezas negativas. Todos os sistemas estudados são de pequeno porte, sujeitos a grandes perdas, ao contrário dos sistemas de grande porte, mais racionalizados. Deduz-se, assim, que a análise exerética destes tende a traduzir com maior fidelidade a sua situação operacional, entretanto a determinação de desempenhos pelo método indireto impõe cuidados adicionais nos procedimentos experimentais.

Assim, recomenda-se para sistemas de combustão a lenha de pequeno porte:

- O desempenho energético deve ser determinado pelo método indireto.
- O desempenho exerético deve ser determinado pelo método direto.

Sinteticamente, pode-se considerar como contribuições do presente estudo os seguintes aspectos:

- O estudo paramétrico dos critérios de desempenho de sistemas de combustão de lenha, evidenciando a sensibilidade das eficiências aos parâmetros de caracterização do combustível.

- A comparação dos critérios de desempenho de sistemas de combustão da lenha, especificados em base energética e exerética segundo métodos direto e indireto, baseados no Poder Calorífico Superior ou Inferior e aplicados a equipamentos reais em operação.

Como possíveis desdobramentos e seqüências desta dissertação, poderiam ser citados os seguintes tópicos, a respeito dos quais muito pouco se encontrou na literatura consultada:

- Acompanhamento de unidades consumidoras de lenha, em levantamentos sistemáticos ao longo do tempo, buscando avaliar práticas operacionais e a variação transiente do desempenho.

- Estudo da formação dos desvios e erros experimentais na medição do desempenho de sistemas de combustão a lenha, caracterizando a influência dos instrumentos e parâmetros adotados.

SUMÁRIO

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balço energético nacional**. Brasília, 1988 e 1992. 140p.
- [2] BRASIL. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. **Sinótese preliminar do censo demográfico de 1991**.
- [3] NOGUEIRA, L.A.H., SANTOS, A.H.M. Costos y precios en dendroenergia: aspectos generales y valores para Brasil. In: REUNIÓN DE LA RED LATINOAMERICA DE COOPERACIÓN TÉCNICA EN DENDROENERGIA Y SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE LOS SISTEMAS DENDROENERGÉTICOS OPTIMIZADOS PARA EL DESARROLLO RURAL SOSTENIBLE, 1, 1993, Tegucigalpa. **Contribución técnica**...Tegucigalpa: FAO, 1993, p.1-15.
- [4] AGÊNCIA PARA APLICAÇÃO DE ENERGIA (CESP/CPFL/ELETROPAULO/ COMGÁS). **Informação sobre o uso racional de energia**. São Paulo, boletins bimensais desde 1990.
- [5] SUMA ECONÔMICA. Consultoria e Publicações. São Paulo: Editora Tama Ltda., jun.1991.
- [6] ELETROBRÁS. Companhia Hidroelétrica do São Francisco. BRASCEP Engenharia Ltda. **Biomassa florestal (madeira)**. Rio de Janeiro, 1987, v.III (Planejamento).
- [7] GALLO MENDOZA, G., SUÁREZ, C.E. Energia y deforestación. **Desarrollo y energia**, Argentina, v.3, n.5, p.39-50, 1994.
- [8] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DE SÃO PAULO. **Tecnologia, ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: 1992. 103p.
- [9] WENZEL, H.F.J. **The chemical technology of wood**. New York: Academic Press, 1970.
- [10] MENDES, A.P.C.S. Fisiologia da síntese dos constituintes da madeira. **Uso da madeira para fins energéticos**, Belo Horizonte, p.143-158, 1980 (Série de Publicações Técnicas,1).
- [11] MARTINS, Herbert, Madeira como fonte de energia. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, p.11-26, 1980 (Série de Publicações Técnicas, 1).
- [12] GOLDSTEIN, I.S. **Wood technology: chemical aspects**. Washington: American Chemical Society, 1977, 372p, apud MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. **Uso da madeira para fins térmicos**, Belo Horizonte, p.11-25, 1980.
- [13] SHAFIZADEH, F., CHIN, P.P.S. Thermal deterioration of wood. In: GOLDSTEIN, I.S., 1.ed **Wood technology: chemical aspects**. Washington D.C., ACS Press, 1977, p.57-81.
- [14] KLING, Sérgio Hélio. Etanol a partir da madeira. **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, p.85-99, 1980 (Série de Publicações Técnicas, 1).

NOTA: Este capítulo foi baseado em FRANÇA⁽⁴²⁾, que segue a orientação da NBR-6023 (antiga NB-66), aprovada pela ABNT em agosto de 1989.

- [15] ELETROBRÁS. Companhia Hidroelétrica do São Francisco. BRASCEP Engenharia Ltda. **Biomassa florestal (madeira)**. Rio de Janeiro, 1987, v.I. (Caracterização e Potencial).
- [16] SKAAR, C. **Water in wood**. New York: Syracuse University Press, 1972, apud DADKHAH-NIKOO, A., BUSHNELL, D.J. Analysis of wood combustion based on the first and second laws of thermodynamics. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.109, n.3, p.129-14, sep.1987.
- [17] DADKHAH-NIKOO, A., BUSHNELL, D.J. Analysis of wood combustion based on the first and second laws of thermodynamics. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.109, n.3, p.129-141, sep.1987.
- [18] JUNGE, D.C., OSWALD, K.D. **Drying wood and bark fuels with boiler exhaust gases**. Oregon: Oregon State University, 1980, apud DADKHAH NIKOO, A., BUSHNELL, D.J. Analysis of wood combustion based on the first and second laws of thermodynamics. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.109, n.3, p.129-141, sep.1987.
- [19] GURGEL ARAÚJO IND. COM.-GASA. **Biomassa**. 1.ed. São Paulo, 19184.
- [20] TILLMAN, David A., ROSSI, Amadeo J., KITTO, William D. **Wood Combustion; principles, processes, and economics**. 1.ed. New York: Academic Press, 1981. 208p.
- [21] EDWARDS, J. **Combustion: formation and emission of trace species**. Michigan: Ann Arbor Science Publ., 1974, apud TILLMAN, D.A., ROSSI, A.J., KITTO, W.D. **Wood combustion; principles, processes, and economics**. 1.ed. New York: Academic Press, 1981. 208p.
- [22] KANURY, A.M. Rate of burning of wood. **Combustion Science and Technology**, v.5, 1972, apud DADKHAH-NIKOO, A., BUSHNELL, D.J. Analysis of wood combustion based on the first and second laws of thermodynamics. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.109, n.3, p.129-141, sep.1987.
- [23] KANURY, A.M., BLACKSHEAR, P.L. Some considerations pertaining to the problem of wood burning. **Combustion Science and Technology**, v.1, 1970, apud DADKHAH-NIKOO, A., BUSHNELL, D.J. Analysis of wood combustion based on the first and second laws of thermodynamics. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v.109, n.2, p.129-141, sep.1987.
- [24] SEN, Tapan K. **Combustão**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá, 1990. (Notas de aula).
- [25] VAN WYLEN, Gordon J., SONNTAG, Richard E. **Fundamentos da Termodinâmica clássica**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1976. 565p.
- [26] KLAR, M. Technologie de la distillation du bois. Librairie Polytechnique, Paris, 1925, 498p, apud OLIVEIRA, J.B. et al. Produção de carvão vegetal- aspectos técnicos. **Produção e utilização de carvão vegetal**, Belo Horizonte, p. 61-73, 1982 (Série de Publicações Técnicas, 8).
- [27] BRADBURY, A.G.W., SHAFIZADEH, F. Role of oxygen chemisorption in low-temperature ignition of cellulose. **Combustion and Flame**, New York, v.37, p.85-89. 1980.
- [28] SZARGUT, Jan, MORRIS, David R., STEWARD, Frank R. **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes**. 1.ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 332p.

- [29] SOUZA, Z. **Elementos de máquinas térmicas**. 1.ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1980. 198p.
- [30] BEJAN, Adrian. **Advanced engineering thermodynamics**. 1.ed. New York: John Wiley & Sons, 1988. 759p.
- [31] GALLO, W.L.R., MILANEZ, L.F. Eficiência exergética: conceitos e aplicações. In: ENCONTRO NACIONAL DE CIÊNCIAS TÉRMICAS, 3, 1990, Itapema. **ANAIS...** Itapema: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, 1990. p.1045-1050.
- [32] RANT, Z. Exergy and anergy (in German). **Wiss. Z. Tech. Univ. Dresden**, Dresden, v.13, n.4, p.1145-1149, 1964, apud SZARGUT, Jan, MORRIS, David R., STEWARD, Frank R. **Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes**. 1.ed. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1988. 332p.
- [33] WALL, Göran. **Exergy**: a useful concept. Physical Resource Theory Group, 1986.
- [34] KOTAS, Tadeusz J. **The exergy method of thermal plant analysis**. 1.ed. London: Butterworths, 1985. 296p.
- [35] THE AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Performance test code for steam generating units**. PTC 4.1. New York, 1964. 79p.
- [36] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Conservação de energia na indústria de celulose e papel**. São Paulo, 1985. 493p. (Publicação IPT n. 1628).
- [37] RIVKIN, S.L. **Propiedades termodinámicas de los gases**. Trad. G. Lozhkin. Moscú: Editorial Mir, 1979. 260p. Original russo.
- [38] IRVINE Jr., Thomas F., LILEY, Peter E. **Steam and gas tables with computer equations**. 1.ed. Orlando: Academic Press, 1984, 185p.
- [39] HOLMAN, Jack Philip. **Transferência de calor**. 6.ed. Trad. Luiz Fernando Milanez. São Paulo: McGraw-Hill, 1983. 639p. Tradução de: Heat transfer.
- [40] NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta. **Termodinâmica avançada**. Itajubá: Escola Federal de Engenharia de Itajubá. 1991 (Notas de aula)
- [41] RESENDE, G.C. Implantação e produtividade de florestas para fins energéticos. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1981 (Série de Publicações Técnicas).
- [42] FRANÇA, Júnia Lessa et al. **Manual para normalização de publicações técnico-científicas**. 1.ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1990. 168p.
- [43] MOREIRA, Alexandre C.M., NOGUEIRA, Luiz A.H. Geração de energia elétrica a partir da lenha para o interior do Amazonas. **Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico**. Itajubá, v.16, n.2, p. 41-48, jun.1990.
- [44] BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Plano nacional de energia elétrica 1987/2010**. Relatório geral. Rio de Janeiro, 1987.
- [45] INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Conservação de energia na indústria têxtil**; manual de recomendações. São Paulo, 1982. 395p. (Publicação IPT n.1208)
- [46] COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ. **Potencialidades energéticas do Estado do Ceará**; primeira abordagem. Fortaleza, 1987. 86p.

TABELAS AUXILIARES DO CAPÍTULO 2

TABELA 46

Consumo total de energia elétrica por setor econômico

| Setor | Energia Primária Transformada | | Energia Transmissa | | Energia Consumida | | TOTAL |
|-------|-------------------------------|-------|--------------------|------|-------------------|------|--------|
| | MWh | % | MWh | % | MWh | % | |
| 1970 | 10.200 | 100,0 | 9.800 | 96,1 | 9.500 | 93,1 | 10.200 |
| 1971 | 11.500 | 100,0 | 11.000 | 95,7 | 10.500 | 91,3 | 11.500 |
| 1972 | 13.000 | 100,0 | 12.500 | 96,2 | 12.000 | 92,3 | 13.000 |
| 1973 | 14.500 | 100,0 | 14.000 | 96,6 | 13.500 | 93,1 | 14.500 |

Fonte: Departamento de Energia Elétrica

TABELA 47

Consumo de energia elétrica por setor econômico

| Setor | Setor Comercial | | Setor Industrial | | Setor Público | | Setor Privado | | Outros | | TOTAL |
|-------|-----------------|------|------------------|------|---------------|------|---------------|------|--------|-----|--------|
| | MWh | % | MWh | % | MWh | % | MWh | % | MWh | % | |
| 1970 | 1.500 | 14,7 | 7.500 | 73,7 | 1.000 | 9,7 | 1.200 | 11,6 | 1.000 | 9,7 | 10.200 |
| 1971 | 1.800 | 15,7 | 8.500 | 73,9 | 1.200 | 10,4 | 1.400 | 12,0 | 1.000 | 8,7 | 11.500 |
| 1972 | 2.000 | 15,4 | 9.500 | 72,3 | 1.300 | 9,6 | 1.500 | 11,3 | 1.200 | 9,3 | 13.000 |
| 1973 | 2.200 | 15,2 | 10.500 | 72,8 | 1.400 | 9,7 | 1.600 | 11,1 | 1.300 | 9,0 | 14.500 |

Anexo 1

TABELAS AUXILIARES DO CAPÍTULO 2

TABELAS AUXILIARES DO CAPÍTULO 2

- ANEXO 1 -

TABELAS AUXILIARES DO CAPÍTULO 2

TABELA 46

Consumo total de fontes energéticas primárias (por década - 70/80)

| D É C | ENERGIA PRIMÁRIA RENOVÁVEL | | | | | ENERGIA PRIMÁRIA NÃO RENOVÁVEL | | | | | TOTAL 10 ⁶ tEP | | |
|-------------|----------------------------|-------------|---------------------|------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|-------------|---------------------|------------|------------------------------|---------------------|---|
| | Biomassa | | | | Energia Hidráulica | | Petróleo | | | | | Outras | |
| | Lenha (*) | | Outras | | | | | | | | | | |
| | 10 ⁶ tEP | % | 10 ⁶ tEP | % | 10 ⁶ tEP | % | 10 ⁶ tEP | % | 10 ⁶ tEP | % | | 10 ⁶ tEP | % |
| 70 | 313,4 | 30,6 | 55,0 | 5,4 | 210,3 | 20,5 | 408,5 | 39,9 | 37,0 | 3,6 | 1.024,2 | | |
| 80 | 314,2 | 19,3 | 169,2 | 10,4 | 484,0 | 29,7 | 555,1 | 34,0 | 108,3 | 6,6 | 1.630,8 | | |
| Soma | 627,6 | 23,6 | 224,2 | 8,4 | 694,3 | 26,2 | 963,6 | 36,3 | 145,3 | 5,5 | 2.655,0 | | |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

(*) Inclusive carvão vegetal.

Soma = soma das décadas (70+80).

TABELA 47

Consumo de lenha no Brasil, por setor da economia (1970-1991)

| ANO | RESIDENCIAL | | INDUSTRIAL | | AGROPEC. | | TRANSFOR. | | OUTROS | | TOTAL 10 ³ t |
|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|-------------------|-----|----------------------------|
| | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | |
| 1970 | 61.542 | 59,2 | 14.407 | 13,9 | 15.815 | 15,2 | 11.316 | 10,9 | 806 | 0,8 | 103.886 |
| 71 | 61.503 | 59,2 | 13.590 | 13,1 | 15.200 | 14,6 | 12.884 | 12,4 | 773 | 0,7 | 103.950 |
| 72 | 61.309 | 58,6 | 13.020 | 12,4 | 14.600 | 14,0 | 14.930 | 14,3 | 756 | 0,7 | 104.615 |
| 73 | 60.003 | 58,2 | 12.340 | 12,0 | 14.100 | 13,7 | 15.844 | 15,4 | 720 | 0,7 | 103.007 |
| 74 | 59.304 | 56,4 | 11.980 | 11,4 | 13.500 | 12,8 | 19.748 | 18,8 | 667 | 0,6 | 105.199 |
| 75 | 57.892 | 54,1 | 11.870 | 11,1 | 13.000 | 12,2 | 23.606 | 22,0 | 623 | 0,6 | 106.991 |
| 76 | 56.336 | 54,8 | 11.920 | 11,6 | 12.600 | 12,2 | 21.433 | 20,8 | 597 | 0,6 | 102.886 |
| 77 | 53.684 | 54,0 | 11.210 | 11,3 | 12.200 | 12,2 | 21.789 | 21,9 | 583 | 0,6 | 99.466 |
| 78 | 50.497 | 52,5 | 11.166 | 11,6 | 11.600 | 12,1 | 22.317 | 23,2 | 569 | 0,6 | 96.149 |
| 79 | 49.481 | 50,5 | 10.721 | 10,9 | 11.000 | 11,2 | 26.264 | 26,8 | 556 | 0,6 | 98.022 |
| 1980 | 48.322 | 48,2 | 11.272 | 11,2 | 10.429 | 10,4 | 29.757 | 29,7 | 529 | 0,5 | 100.309 |
| 81 | 46.363 | 47,2 | 12.436 | 12,7 | 10.464 | 10,7 | 28.301 | 28,8 | 588 | 0,6 | 98.152 |
| 82 | 40.476 | 43,1 | 13.838 | 14,7 | 10.327 | 11,0 | 28.718 | 30,6 | 578 | 0,6 | 93.937 |
| 83 | 37.387 | 38,3 | 17.075 | 17,5 | 10.166 | 10,4 | 32.350 | 33,2 | 588 | 0,6 | 97.566 |
| 84 | 38.097 | 35,4 | 19.878 | 18,5 | 9.035 | 8,4 | 39.995 | 37,2 | 585 | 0,5 | 107.590 |
| 85 | 34.735 | 32,7 | 20.511 | 19,3 | 8.500 | 8,0 | 41.963 | 39,5 | 543 | 0,5 | 106.252 |
| 86 | 31.200 | 29,5 | 21.558 | 20,4 | 8.100 | 7,7 | 44.321 | 41,9 | 560 | 0,5 | 105.739 |
| 87 | 32.850 | 31,0 | 20.820 | 19,7 | 8.400 | 8,0 | 43.196 | 40,8 | 508 | 0,5 | 105.774 |
| 88 | 30.848 | 29,4 | 19.860 | 18,9 | 8.050 | 7,7 | 45.877 | 43,6 | 456 | 0,4 | 105.091 |
| 89 | 28.735 | 27,0 | 18.743 | 17,6 | 7.600 | 7,2 | 50.879 | 47,8 | 386 | 0,4 | 106.343 |
| 1990 | 25.687 | 27,9 | 17.386 | 18,9 | 7.000 | 7,6 | 41.632 | 45,2 | 386 | 0,4 | 92.091 |
| 91 | 25.583 | 28,9 | 17.295 | 19,5 | 6.800 | 7,7 | 38.495 | 43,5 | 361 | 0,4 | 88.534 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

TABELA 48
Consumo de lenha no Brasil (por década - 70/80)

| DÉC | RESIDENCIAL | | INDUSTRIAL | | AGROPEC. | | CARVÃO | | OUTROS | | TOTAL 10 ³ t |
|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|------------|----------------------------|
| | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | |
| 70 | 571.551 | 55,8 | 122.224 | 12,0 | 133.615 | 13,0 | 190.131 | 18,6 | 6.650 | 0,6 | 1.024.171 |
| 80 | 369.013 | 36,0 | 175.991 | 17,1 | 91.071 | 8,9 | 385.357 | 37,5 | 5.321 | 0,5 | 1.026.753 |
| Soma | 940.564 | 45,9 | 298.215 | 14,5 | 224.686 | 11,0 | 575.488 | 28,0 | 11.971 | 0,6 | 2.050.924 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾. Soma= soma das décadas de 70 e 80.

TABELA 49
Consumo de energia no setor residencial (1970-1991)

| A N O | ENERGIA RENOVÁVEL | | | | | | ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | | | | | | TOTAL 10 ³ tEP |
|-------------|---------------------|------|---------------------|-----|---------------------|------|-----------------------|------|---------------------|-----|--------|--|------------------------------|
| | Biomassa | | | | | | GLP | | | | | | |
| | Lenha | | Carvão | | Eletricidade | | GLP | | Outras | | | | |
| | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | | | |
| 1970 | 18.832 | 80,1 | 427 | 1,9 | 2.426 | 10,3 | 1.266 | 5,4 | 545 | 2,3 | 23.496 | | |
| 71 | 18.820 | 78,9 | 472 | 2,0 | 2.676 | 11,2 | 1.358 | 5,7 | 518 | 2,2 | 23.844 | | |
| 72 | 18.759 | 77,6 | 515 | 2,1 | 2.880 | 11,9 | 1.488 | 6,2 | 527 | 2,2 | 24.169 | | |
| 73 | 18.361 | 75,6 | 552 | 2,3 | 3.174 | 13,1 | 1.636 | 6,7 | 568 | 2,3 | 24.291 | | |
| 74 | 18.147 | 74,2 | 596 | 2,4 | 3.486 | 14,2 | 1.731 | 7,1 | 515 | 2,1 | 24.475 | | |
| 75 | 17.716 | 72,4 | 631 | 2,6 | 3.831 | 15,7 | 1.777 | 7,3 | 500 | 2,0 | 24.455 | | |
| 76 | 17.239 | 69,9 | 674 | 2,7 | 4.314 | 17,5 | 1.952 | 7,9 | 494 | 2,0 | 24.673 | | |
| 77 | 16.427 | 66,7 | 708 | 2,9 | 4.968 | 20,2 | 2.025 | 8,2 | 486 | 2,0 | 24.614 | | |
| 78 | 15.452 | 63,3 | 735 | 3,0 | 5.494 | 22,5 | 2.241 | 9,2 | 478 | 2,0 | 24.400 | | |
| 79 | 15.141 | 60,6 | 782 | 3,1 | 6.096 | 24,4 | 2.480 | 10,0 | 484 | 1,9 | 24.983 | | |
| 1980 | 14.787 | 58,1 | 810 | 3,2 | 6.746 | 26,5 | 2.694 | 10,6 | 414 | 1,6 | 25.451 | | |
| 81 | 14.187 | 55,5 | 827 | 3,3 | 7.265 | 28,4 | 2.880 | 11,3 | 387 | 1,6 | 25.546 | | |
| 82 | 12.386 | 50,1 | 826 | 3,3 | 7.850 | 31,8 | 3.269 | 13,2 | 371 | 1,5 | 24.702 | | |
| 83 | 11.440 | 46,4 | 853 | 3,4 | 8.623 | 35,0 | 3.399 | 13,8 | 350 | 1,4 | 24.665 | | |
| 84 | 11.657 | 46,2 | 879 | 3,5 | 8.969 | 35,6 | 3.372 | 13,4 | 334 | 1,3 | 25.211 | | |
| 85 | 10.629 | 42,6 | 837 | 3,4 | 9.464 | 37,9 | 3.680 | 14,8 | 329 | 1,3 | 24.939 | | |
| 86 | 9.547 | 38,2 | 784 | 3,1 | 10.369 | 41,6 | 3.945 | 15,8 | 312 | 1,3 | 24.957 | | |
| 87 | 10.052 | 38,0 | 762 | 2,9 | 11.130 | 42,1 | 4.164 | 15,8 | 306 | 1,2 | 26.414 | | |
| 88 | 9.441 | 35,4 | 735 | 2,8 | 11.755 | 44,0 | 4.464 | 16,7 | 304 | 1,1 | 26.699 | | |
| 89 | 8.793 | 32,4 | 688 | 2,5 | 12.681 | 46,7 | 4.712 | 17,3 | 293 | 1,1 | 26.167 | | |
| 1990 | 7.862 | 26,3 | 624 | 2,2 | 14.113 | 50,7 | 4.956 | 17,8 | 268 | 1,0 | 27.823 | | |
| 91 | 7.828 | 27,4 | 598 | 2,1 | 14.801 | 51,9 | 5.039 | 17,7 | 267 | 0,9 | 28.533 | | |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

TABELA 50
Consumo de energia no setor residencial (por década - 70/80)

| D É C | ENERGIA RENOVÁVEL | | | | | | ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | | | | | | TOTAL 10 ³ tEP |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|------------|---------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------|------------|----------------|--|------------------------------|
| | Biomassa | | | | | | GLP | | | | | | |
| | Lenha | | Carvão | | Eletricidade | | GLP | | Outras | | | | |
| | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | | | |
| 70 | 174.894 | 71,8 | 6.092 | 5,4 | 39.345 | 16,2 | 17.954 | 7,4 | 5.115 | 2,1 | 243.400 | | |
| 80 | 112.919 | 44,2 | 8.001 | 3,1 | 94.852 | 37,1 | 3.400 | 14,3 | 3.400 | 1,3 | 255.751 | | |
| Soma | 287.813 | 57,7 | 14.093 | 2,8 | 134.197 | 26,9 | 54.533 | 10,9 | 8.515 | 1,7 | 499.151 | | |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾. Soma= soma das décadas de 70 e 80.

TABELA 51
Consumo de energia no setor industrial (1970-1991)

| A N O | ENERGIA RENOVÁVEL | | | | | | | | ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | | | | TOTAL 10 ³ tEP |
|-------------|---------------------|------|---------------------|-----|---------------------|------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------|------|------------------------------|
| | Biomassa | | | | | | | Eletricidade 10 ³ tEP % | Óleo comb. | | Outras | | |
| | Lenha | | Carvão | | Outras | | 10 ³ tEP | | % | 10 ³ tEP | % | | |
| | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | | | | | | | |
| 70 | 4.408 | 20,8 | 1.074 | 5,0 | 3.160 | 15,0 | 5.664 | 26,7 | 5.117 | 24,2 | 1.759 | 8,3 | 21.182 |
| 71 | 4.158 | 17,9 | 1.242 | 5,4 | 3.396 | 14,6 | 6.466 | 27,9 | 6.135 | 26,4 | 1.759 | 7,8 | 23.201 |
| 72 | 3.984 | 15,7 | 1.480 | 5,8 | 3.871 | 15,3 | 7.339 | 29,0 | 6.651 | 26,3 | 1.804 | 7,9 | 25.330 |
| 73 | 3.776 | 13,3 | 1.566 | 5,5 | 4.193 | 14,7 | 8.559 | 30,1 | 8.189 | 28,8 | 2.005 | 7,6 | 28.445 |
| 74 | 3.666 | 11,8 | 2.056 | 6,6 | 4.219 | 13,6 | 9.726 | 31,4 | 8.972 | 28,9 | 2.162 | 7,7 | 31.014 |
| 75 | 3.632 | 11,0 | 2.548 | 7,7 | 3.803 | 11,5 | 10.715 | 32,5 | 9.475 | 29,8 | 2.375 | 8,5 | 32.964 |
| 76 | 3.647 | 9,9 | 2.200 | 5,9 | 4.393 | 11,9 | 12.381 | 33,5 | 11.067 | 28,9 | 2.791 | 8,9 | 36.983 |
| 77 | 3.430 | 8,4 | 2.210 | 5,4 | 5.315 | 13,0 | 13.990 | 34,2 | 11.579 | 28,4 | 3.295 | 10,6 | 40.848 |
| 78 | 3.417 | 7,8 | 2.250 | 5,2 | 4.895 | 11,2 | 15.797 | 36,2 | 12.515 | 28,7 | 4.324 | 10,9 | 43.614 |
| 79 | 3.281 | 6,9 | 2.745 | 5,8 | 4.817 | 10,2 | 17.890 | 37,8 | 13.003 | 27,4 | 5.619 | 11,9 | 47.355 |
| 80 | 3.449 | 6,8 | 3.281 | 6,4 | 5.494 | 10,6 | 19.783 | 38,9 | 12.785 | 25,2 | 6.047 | 11,9 | 50.839 |
| 81 | 3.805 | 8,0 | 3.053 | 6,4 | 5.809 | 12,2 | 19.626 | 41,4 | 9.518 | 20,0 | 5.680 | 12,0 | 47.491 |
| 82 | 4.234 | 8,8 | 3.150 | 6,5 | 5.971 | 12,2 | 20.417 | 41,8 | 8.696 | 17,8 | 6.313 | 12,9 | 48.781 |
| 83 | 5.225 | 10,3 | 3.673 | 7,3 | 6.344 | 12,6 | 21.838 | 43,2 | 6.398 | 12,7 | 7.046 | 13,9 | 50.524 |
| 84 | 6.083 | 10,8 | 4.796 | 8,6 | 6.285 | 11,2 | 25.285 | 15,0 | 5.365 | 9,6 | 8.336 | 14,8 | 56.150 |
| 85 | 6.276 | 10,5 | 5.113 | 8,5 | 6.131 | 10,2 | 27.909 | 46,6 | 5.351 | 8,9 | 9.151 | 15,3 | 59.931 |
| 86 | 6.597 | 10,3 | 5.504 | 8,6 | 6.249 | 9,7 | 30.265 | 47,2 | 5.847 | 9,1 | 9.669 | 15,1 | 64.131 |
| 87 | 6.371 | 9,6 | 5.355 | 8,0 | 6.973 | 10,5 | 30.425 | 45,7 | 6.603 | 9,9 | 10.824 | 16,3 | 66.551 |
| 88 | 6.077 | 8,8 | 5.794 | 8,4 | 6.522 | 9,5 | 32.321 | 47,0 | 6.520 | 9,5 | 11.539 | 16,8 | 68.773 |
| 89 | 5.736 | 8,3 | 6.585 | 9,5 | 5.887 | 8,5 | 33.217 | 48,0 | 6.701 | 9,7 | 11.040 | 16,0 | 69.166 |
| 90 | 5.320 | 8,1 | 5.297 | 8,1 | 6.064 | 9,3 | 32.579 | 49,8 | 6.346 | 9,7 | 9.844 | 15,0 | 65.450 |
| 91 | 5.292 | 7,8 | 4.868 | 7,2 | 6.183 | 9,2 | 33.362 | 49,5 | 6.355 | 9,4 | 11.387 | 16,9 | 67.447 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

TABELA 52
Consumo de energia no setor industrial (por década - 70/80)

| D É C | ENERGIA RENOVÁVEL | | | | | | | | ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | | | | TOTAL 10 ⁶ tEP |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|------------|---------------------|-------------|---------------------|---------------------------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-------------|------------------------------|
| | Biomassa | | | | | | | Eletricidade 10 ⁶ tEP % | Óleo comb. | | Outras | | |
| | Lenha | | Carvão | | Outras | | 10 ⁶ tEP | | % | 10 ⁶ tEP | % | | |
| | 10 ⁶ tEP | % | 10 ⁶ tEP | % | 10 ⁶ tEP | % | | | | | | | |
| 70 | 37,4 | 11,3 | 19,4 | 5,9 | 42,0 | 12,7 | 108,5 | 32,8 | 92,7 | 28,0 | 30,9 | 9,3 | 330,9 |
| 80 | 53,8 | 9,2 | 46,3 | 8,0 | 61,7 | 10,6 | 261,0 | 44,8 | 73,8 | 12,6 | 85,6 | 14,8 | 582,3 |
| Soma | 91,2 | 10,0 | 65,7 | 7,2 | 103,7 | 11,4 | 369,5 | 40,4 | 166,5 | 18,2 | 116,5 | 12,8 | 913,2 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾. Soma= soma das décadas de 70 e 80.

TABELA 53

Consumo de lenha nos segmentos industriais (1970-1991)

| ANO | CERÂMICA | | ALIMENTOS E BEBIDAS | | PAPEL E CELULOSE | | OUTROS | | TOTAL 10 ³ t |
|------|-------------------|------|---------------------|------|-------------------|------|-------------------|------|----------------------------|
| | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | |
| 1970 | 4.889 | 32,9 | 5.849 | 40,6 | 703 | 4,9 | 2.966 | 20,6 | 14.407 |
| 71 | 4.700 | 34,6 | 5.500 | 40,4 | 700 | 5,2 | 2.690 | 19,8 | 13.590 |
| 72 | 4.500 | 34,6 | 5.300 | 40,7 | 690 | 5,3 | 2.530 | 19,4 | 13.020 |
| 73 | 4.300 | 34,8 | 5.000 | 40,5 | 680 | 5,6 | 2.360 | 19,1 | 12.340 |
| 74 | 4.200 | 35,1 | 4.800 | 40,0 | 710 | 6,0 | 2.270 | 18,9 | 11.980 |
| 75 | 4.250 | 35,8 | 4.700 | 39,6 | 650 | 5,5 | 2.270 | 19,1 | 11.870 |
| 76 | 4.670 | 39,2 | 4.500 | 37,8 | 640 | 5,4 | 2.110 | 17,7 | 11.920 |
| 77 | 4.200 | 37,4 | 4.300 | 38,4 | 650 | 5,8 | 2.060 | 28,4 | 11.210 |
| 78 | 4.400 | 39,4 | 4.100 | 36,7 | 660 | 5,9 | 2.006 | 18,0 | 11.160 |
| 79 | 4.200 | 39,2 | 3.950 | 36,8 | 603 | 5,6 | 1.968 | 18,4 | 10.721 |
| 1980 | 4.362 | 38,7 | 3.857 | 34,2 | 1.076 | 9,6 | 1.977 | 17,5 | 11.272 |
| 81 | 4.718 | 37,9 | 3.938 | 31,7 | 1.505 | 12,1 | 2.275 | 18,3 | 12.436 |
| 82 | 4.484 | 32,4 | 4.680 | 33,8 | 1.858 | 13,4 | 2.816 | 20,3 | 13.838 |
| 83 | 5.440 | 31,9 | 5.963 | 34,9 | 2.475 | 14,5 | 3.197 | 18,7 | 17.075 |
| 84 | 5.953 | 29,9 | 6.654 | 33,5 | 2.942 | 14,8 | 4.329 | 21,8 | 19.878 |
| 85 | 5.744 | 28,0 | 7.031 | 34,3 | 3.167 | 15,4 | 4.569 | 22,3 | 20.511 |
| 86 | 6.444 | 28,9 | 7.300 | 33,9 | 2.956 | 13,7 | 4.858 | 22,5 | 21.558 |
| 87 | 6.270 | 30,1 | 7.120 | 34,2 | 2.505 | 12,0 | 4.925 | 23,7 | 20.820 |
| 88 | 5.917 | 29,8 | 6.950 | 35,0 | 2.714 | 13,7 | 4.279 | 21,5 | 19.860 |
| 89 | 5.888 | 31,4 | 6.540 | 34,9 | 2.369 | 12,6 | 3.946 | 21,0 | 18.743 |
| 1990 | 5.035 | 29,0 | 6.340 | 36,4 | 2.427 | 14,0 | 3.584 | 20,6 | 17.386 |
| 91 | 4.783 | 27,2 | 6.467 | 37,4 | 2.596 | 15,0 | 3.449 | 19,9 | 17.295 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

TABELA 54

Consumo de lenha nos segmentos industriais (por década-70/80)

| D É C | CERÂMICA | | ALIMENTOS E BEBIDAS | | PAPEL E CELULOSE | | OUTROS | | TOTAL 10 ³ t |
|-------------|-------------------|-------------|---------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------------|-------------|----------------------------|
| | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | 10 ³ t | % | |
| 70 | 44.309 | 36,2 | 47.999 | 39,3 | 6.686 | 5,5 | 23.230 | 19,0 | 122.224 |
| 80 | 55.220 | 31,4 | 60.033 | 34,1 | 23.567 | 13,4 | 37.176 | 21,1 | 175.991 |
| Soma | 99.529 | 33,4 | 108.032 | 36,2 | 30.253 | 10,2 | 60.401 | 20,2 | 298.215 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

Soma= soma das décadas de 70 e 80.

TABELA 55
Consumo de energia no setor agropecuário (1970-1991)

| A N O | ENERGIA RENOVÁVEL | | | | | | ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | | | | TOTAL 10 ³ tEP |
|-------------|---------------------|------|---------------------|-----|---------------------|------|-----------------------|------|---------------------|-----|------------------------------|
| | Biomassa | | | | Eletricidade | | Óleo diesel | | Outras | | |
| | Lenha | | Carvão | | | | | | | | |
| | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | |
| 1970 | 4.839 | 90,6 | 19 | 0,4 | 92 | 1,7 | 383 | 7,2 | 11 | 0,2 | 5.344 |
| 71 | 4.651 | 87,4 | 19 | 0,4 | 113 | 2,1 | 518 | 9,7 | 23 | 0,4 | 5.324 |
| 72 | 4.468 | 83,4 | 18 | 0,4 | 130 | 2,4 | 694 | 13,0 | 45 | 0,8 | 5.355 |
| 73 | 4.315 | 78,9 | 17 | 0,3 | 153 | 2,8 | 913 | 16,7 | 72 | 1,3 | 5.470 |
| 74 | 4.131 | 76,1 | 15 | 0,3 | 190 | 3,5 | 1.010 | 18,6 | 84 | 1,5 | 5.430 |
| 75 | 3.978 | 73,4 | 14 | 0,2 | 218 | 4,0 | 1.122 | 20,7 | 90 | 1,7 | 5.422 |
| 76 | 3.856 | 69,8 | 13 | 0,2 | 252 | 4,6 | 1.297 | 23,5 | 104 | 1,9 | 5.522 |
| 77 | 3.733 | 66,4 | 12 | 0,2 | 302 | 5,4 | 1.474 | 26,2 | 105 | 1,9 | 5.626 |
| 78 | 3.550 | 63,8 | 11 | 0,2 | 387 | 7,0 | 1.496 | 26,9 | 116 | 2,1 | 5.560 |
| 79 | 3.366 | 58,1 | 11 | 0,2 | 462 | 8,0 | 1.839 | 31,7 | 120 | 2,1 | 5.798 |
| 1980 | 3.191 | 52,5 | 10 | 0,2 | 591 | 9,7 | 2.174 | 35,7 | 116 | 1,9 | 6.082 |
| 81 | 3.202 | 52,2 | 10 | 0,2 | 723 | 11,8 | 2.100 | 34,2 | 101 | 1,6 | 6.136 |
| 82 | 3.160 | 50,7 | 9 | 0,1 | 800 | 12,8 | 2.199 | 35,3 | 67 | 1,1 | 6.235 |
| 83 | 3.111 | 48,2 | 9 | 0,1 | 934 | 14,5 | 2.382 | 36,9 | 25 | 0,4 | 6.461 |
| 84 | 2.765 | 43,1 | 9 | 0,1 | 1.112 | 17,3 | 2.506 | 39,0 | 26 | 0,4 | 6.418 |
| 85 | 2.601 | 38,0 | 9 | 0,1 | 1.298 | 18,9 | 2.928 | 42,7 | 24 | 0,3 | 6.860 |
| 86 | 2.479 | 36,1 | 8 | 0,1 | 1.451 | 21,1 | 2.900 | 42,2 | 26 | 0,4 | 6.864 |
| 87 | 2.571 | 34,4 | 13 | 0,2 | 1.704 | 22,8 | 3.149 | 42,1 | 35 | 0,5 | 7.472 |
| 88 | 2.463 | 32,0 | 11 | 0,1 | 1.805 | 23,4 | 3.383 | 43,9 | 36 | 0,5 | 7.698 |
| 89 | 2.326 | 30,2 | 13 | 0,2 | 1.844 | 24,0 | 3.478 | 45,2 | 29 | 0,4 | 7.690 |
| 1990 | 2.142 | 29,5 | 11 | 0,2 | 1.933 | 26,6 | 3.146 | 43,3 | 27 | 0,4 | 7.259 |
| 91 | 2.081 | 27,8 | 13 | 0,2 | 2.123 | 28,4 | 3.240 | 43,3 | 28 | 0,4 | 7.485 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾.

TABELA 56
Consumo de energia no setor agropecuário (por década - 70/80)

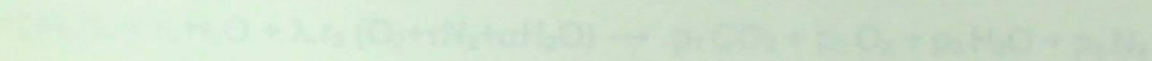
| D É C | ENERGIA RENOVÁVEL | | | | | | ENERGIA NÃO RENOVÁVEL | | | | TOTAL 10 ³ tEP |
|-------------|---------------------|-------------|---------------------|------------|---------------------|-------------|-----------------------|-------------|---------------------|------------|------------------------------|
| | Biomassa | | | | Eletricidade | | Óleo diesel | | Outras | | |
| | Lenha | | Carvão | | | | | | | | |
| | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | 10 ³ tEP | % | |
| 70 | 40.887 | 74,5 | 149 | 0,3 | 2.299 | 4,2 | 10.746 | 19,6 | 770 | 1,4 | 54.851 |
| 80 | 27.869 | 41,0 | 101 | 0,1 | 12.262 | 18,1 | 27.199 | 40,0 | 485 | 0,8 | 67.916 |
| Soma | 68.756 | 56,0 | 250 | 0,2 | 14.561 | 11,9 | 37.945 | 30,9 | 1.255 | 1,0 | 122.767 |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA ⁽¹⁾. Soma= soma das décadas de 70 e 80.

- ANEXO 2 -

A INFLUÊNCIA DO CO NA EQUAÇÃO DA COMBUSTÃO DA LENHA

Equação da Combustão da Lenha
(a) CO nos produtos



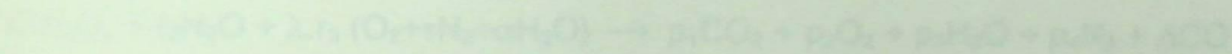
$$2 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4$$

$$n_2 = \frac{p_1}{2}$$

n_2 = número de moles totais dos produtos secos da combustão

$$0,14 = \frac{p_1}{2} \rightarrow p_1 = 0,28 \rightarrow n_2 = 0,14$$

Equação da Combustão da Lenha
(b) CO nos produtos



$$2 = p_1 + p_2 + p_3 + p_4 + \delta$$

$$4 = 2p_1 + 2p_2 + 2p_3 + 2p_4 + 2\delta$$

Concentração aceitável de CO: 250 ppm

Limite de 500 ppm

$$500 = 500 \text{ ppm} = \frac{500}{1.000.000} = 0,05\%$$

Anexo 2

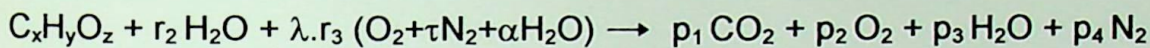
**A INFLUÊNCIA DO CO NA EQUAÇÃO
DA COMBUSTÃO DA LENHA**

Conclusão

A desconsideração de CO nos produtos de combustão praticamente não afeta o balanço material.

- ANEXO 2 -

A INFLUÊNCIA DO CO NA EQUAÇÃO DA COMBUSTÃO DA LENHA

Equação da Combustão da Lenha
(s/ CO nos produtos)

$$p_1 = x$$

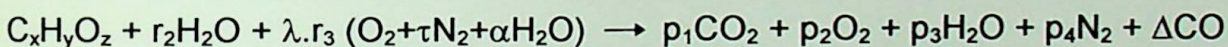
$$p_2 = r_3 (\lambda - 1) \quad ; \quad r_3 = x + y/4 - z/2$$

$$p_3 = r_2 + \lambda \cdot r_3 \cdot \alpha + y/2$$

$$p_4 = 3,76 \lambda \cdot r_3$$

$$\%CO_2 = \frac{p_1}{p_1 + p_2 + p_4} = \frac{p_1}{n_t} \quad ; \quad n_t = \text{número de moles total dos produtos secos de combustão}$$

$$\text{Supondo } \%CO_2 = 14\% \rightarrow n_t = \frac{6}{0,14} \rightarrow n_t = 42,85$$

Equação da Combustão da Lenha
(c/ CO nos produtos)

$$p_1 = x - \Delta$$

$$p_2 = r_3 (\lambda - 1) - \Delta/2$$

$$p_3 = r_2 + \lambda \cdot r_3 \cdot \alpha + y/2$$

$$p_4 = 3,76 \lambda \cdot r_3$$

Concentração aceitável de CO: até 60 ppm

Supondo %CO = 500 ppm

$$\%CO = 500 \text{ ppm} = \frac{500}{1.000.000} = 0,05\%$$

$$\%CO = \frac{\Delta}{n'_t} 100 = \frac{\Delta}{n_t - (\Delta/2)} 100 = \frac{100 \Delta}{42,85 - (\Delta/2)} \rightarrow 42,85 - (\Delta/2) = \frac{100 \Delta}{\%CO} \rightarrow \Delta = 0,021$$

$$\%CO_2 = \frac{x - \Delta}{n_t - (\Delta/2)} 100 = \frac{6 - 0,021}{42,85 - 0,0105} 100 \rightarrow \%CO_2 = 13,96 \%$$

Desvio relativo à situação s/ CO: 0,28 % de redução do valor de %CO₂ suposto inicialmente

Conclusão:

A desconsideração de CO nos produtos de combustão praticamente não altera o balanço material.

- ANEXO 3 -

A GERAÇÃO TERMOELÉTRICA A LENHA NO PLANO 2010 (Eletrobrás)

O Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010, em suas diversas partes, analisa a situação do setor elétrico e busca estabelecer a compatibilização entre a oferta e a demanda de energia elétrica até o ano de 2010, analisando principalmente:

- a) A evolução do setor elétrico;
- b) As alternativas possíveis de serem adotadas, inclusive instalações termoeletricas;
- c) A avaliação técnico-econômica de investimentos;
- d) O impacto sobre a sociedade e o meio ambiente.

Segundo o plano os que em 2010 haverá necessidade de geração térmica considerável, bem desenvolvida nas décadas anteriores. A utilização racional e viável, em termos de custos, de lenha de florestas nativas e de reflorestamentos (florestas energéticas) na geração de energia elétrica depende de estudos específicos e baseados em pesquisas de campo. Estudos PCTs existentes para essa finalidade e dos resultados potenciais a serem conhecidos depois do início de funcionamento de uma usina térmica a lenha, no município Nova MOREIRA 3 ROQUEIRA¹⁹⁸ destacam, em estudo sobre a geração termoelétrica a lenha, que a usina piloto do Estado do Amazonas localizada na cidade de Maracapurí é uma pequena central térmica-PCT a lenha picada, com capacidade de 13 MW, destinada ao suprimento de energia elétrica aos municípios de Maracapurí e Iranduba.

Em suma, o Plano 2010 não demonstrava entusiasmo pela utilização da lenha na geração de energia elétrica, em virtude, também, dos elevados custos finais de geração (Tabela 57), o que torna o empreendimento pouco atraente e pouco conveniente economicamente.

TABELA 57
Custos finais de geração térmica-CFGT (em US\$/MWh)

Anexo 3

| ENERGÉTICO | CFGT | OBSERVAÇÕES |
|--------------------|-------------|--|
| Energia nuclear | 20,0 | |
| Gás natural | 19,7 | |
| Óleo combustível | 23,0 | |
| Carvão mineral | 38,2 | Ced. aberta |
| | 40,0 a 48,0 | Subsolo |
| Bagaço de cana | 30,5 | Teor de umidade = 50% (b.u.) |
| Biomassa florestal | 124,0 | Pequena central térmica - PCT |
| | 79,0 | Usina termoeletrica - UTE de porte médio |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA¹⁹⁸

- ANEXO 3 -

A GERAÇÃO TERMOELÉTRICA A LENHA NO PLANO 2010 (ELETROBRÁS)

O Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010, em linhas gerais, retrata a situação do setor elétrico e busca estudar a compatibilização entre a oferta e a demanda de energia elétrica até o ano de 2010, analisando principalmente:

- a) A evolução do setor elétrico.
- b) As alternativas passíveis de serem adotadas, inclusive instalações termoeletricas.
- c) A avaliação técnico-econômica de investimentos.
- d) O impacto sobre a sociedade e o meio ambiente.

Afirma-se que em 2010 haverá necessidade de geração térmica confiável, bem desenvolvida nas décadas anteriores. A utilização racional e viável, em todos os sentidos, da lenha de florestas nativas e de reflorestamentos (florestas energéticas) na geração de energia elétrica depende de estudos específicos e concretos em pequenas centrais térmicas-PCT's existentes para essa finalidade e dos resultados patentes a serem fornecidos depois do início de funcionamento de uma usina térmica, a lenha, na região Norte. MOREIRA & NOGUEIRA⁽⁴³⁾ destacam, em estudo sobre a geração termoeletrica a lenha, que a usina piloto do Estado do Amazonas localiza-se na cidade de Manacapuru é uma pequena central térmica-PCT a lenha picada, com capacidade de 12 MW, destinada ao suprimento de energia elétrica aos municípios de Manacapuru e Iranduba.

Em suma, o Plano 2010 não demonstra entusiasmo pela utilização da lenha na geração de energia elétrica, em virtude, também, dos elevados custos finais de geração (Tabela 57), o que torna o empreendimento pouco atrativo e pouco competitivo economicamente.

TABELA 57

Custos finais de geração térmica-CFGT (em US\$/MWh)

| ENERGÉTICO | CFGT | OBSERVAÇÕES |
|--------------------|-------------|--|
| Energia nuclear | 50,0 | _____ |
| Gás natural | 50,0 | _____ |
| Óleo combustível | 69,7 | Geração ininterrupta |
| | 50,0 | Complementação térmica |
| Carvão mineral | 38,2 | Céu aberto |
| | 40,0 a 48,0 | Subsolo |
| Bagaço de cana | 30,5 | Teor de umidade= 50% (b.u.) |
| Biomassa florestal | 134,0 | Pequena central térmica- PCT |
| | 79,0 | Usina termelétrica- UTE de porte médio |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA⁽⁴⁴⁾.

- ANEXO 4 -

TABELA 09
 Poderes caloríficos de alguns energéticos

| ENERGETICO | PCS | PCI | OBSERVAÇÃO |
|--------------------------------------|--------|--------|-------------------------|
| Lenha nativa | 13.400 | 10.000 | Unidade= 30% |
| Lenha de refinamento | 16.744 | ... | Unidade= 30% |
| Carvão vegetal | 28.461 | ... | ... |
| Carvão mineral | 21.120 | 20.300 | Classe= 30% |
| Carvão de alta | 8.448 | ... | Unidade= 30% |
| Carvão de médio-baixa | 14.861 | ... | Unidade= 30% |
| Preparado de madeira-bela | 16.744 | ... | Unidade= 30% |
| Carvão de madeira | 15.256 | ... | ... |
| Carvão de madeira de faveira | 19.256 | ... | ... |
| Carvão de madeira (carvão) | 23.488 | ... | ... |
| Carvão de madeira (carvão) | 25.020 | ... | ... |
| Carvão de madeira (carvão) | 25.430 | ... | Unidade= 30% |
| Carvão de madeira de casca (resíduo) | 19.256 | ... | ... |
| Carvão de madeira-da-Pará | 16.837 | ... | ... |
| Carvão de madeira | 16.837 | ... | ... |
| Carvão de madeira | 11.395 | ... | ... |
| Carvão de madeira | 17.581 | ... | ... |
| Carvão de madeira | 18.455 | ... | ... |
| Carvão de soja | 10.465 | ... | ... |
| Carvão de dendê | 19.874 | ... | ... |
| Carvão de arroz | 14.651 | ... | ... |
| Carvão de soja urbano (SUA) | 4.604 | ... | ... |
| Óleo combustível tipo A (BPF) | 41.940 | 39.470 | ... |
| Óleo combustível tipo C (OC-4) | 44.330 | 41.510 | ... |
| Óleo combustível tipo d (BTE) | 43.870 | 41.270 | ... |
| Óleo diesel | 45.480 | 42.570 | ... |
| Gás natural de petróleo (GNP) | 45.780 | ... | PC em kgm^{-3} |
| Gás liquefeito de petróleo (GLP) | 49.155 | ... | PC em kgm^{-3} |
| Alcool etílico hidratado | 27.837 | ... | ... |
| Alcool etílico anidro | 29.878 | ... | ... |
| Energia solar | 1.130 | ... | ... |

Anexo 4

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA
 IPT
 COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ
 ELETROBRAS
 ELETROBRAS

**PODERES CALORÍFICOS
 DE ALGUNS ENERGÉTICOS**

¹ m³ → medida de volume referente a 1 m³ de gás, à temperatura de 20°C e pressão de 1 atm (760 mmHg)
² Nm³ → medida de volume referente a 1 m³ de gás, à temperatura de 0°C e pressão de 1 atm (760 mmHg)

- ANEXO 4 -

TABELA 58
Poderes caloríficos de alguns energéticos

| ENERGÉTICO | PCS | PCI | OBSERVAÇÃO |
|-------------------------------------|--------|--------|-------------------------------------|
| Lenha nativa | 13.400 | 10.800 | Umidade= 30% |
| Lenha de reflorestamento | 16.744 | ... | Umidade= 30% |
| Carvão vegetal | 28.464 | ... | |
| Carvão mineral | 21.120 | 20.300 | Cinzas= 35% |
| Bagaço de cana | 9.448 | ... | Umidade= 50% |
| Casca do coco-da-baía | 14.651 | ... | Umidade= 15% |
| Endocarpo do coco-da-baía | 16.744 | ... | Umidade= 13% |
| Casca do babaçu | 19.255 | ... | |
| Epicarpo (palha) do babaçu | 19.255 | ... | |
| Carvão de retorta (babaçu) | 33.488 | ... | |
| Alcatrão combustível (babaçu) | 23.023 | ... | |
| Alcatrão combustível (eucalipto) | 25.430 | ... | Umidade= 18% |
| Casca da castanha-de-caju (resíduo) | 19.256 | ... | |
| Casca da castanha-do-Pará | 18.837 | ... | |
| Resíduo de oiticica | 18.837 | ... | |
| Casca de amendoim | 13.395 | ... | |
| Casca de arroz | 17.581 | ... | |
| Casca de algodão | 10.465 | ... | |
| Casca de soja | 10.465 | ... | |
| Casca de dendê | 19.674 | ... | |
| Palha de arroz | 14.651 | ... | |
| Resíduo sólido urbano (lixo) | 4.604 | ... | |
| Óleo combustível tipo A (BPF) | 41.940 | 39.470 | |
| Óleo combustível tipo C (OC-4) | 44.330 | 41.610 | |
| Óleo combustível tipo d (BTE) | 43.870 | 41.270 | |
| Óleo diesel | 45.460 | 42.570 | $\rho = 838 \text{ kg/m}^3$ (1) |
| Gás natural de petróleo (GNP) | 43.760 | ... | PC em kJ/Nm^3 (2) |
| Gás liquefeito de petróleo (GLP) | 49.185 | ... | PC em kJ/Nm^3 |
| Álcool etílico hidratado | 27.837 | ... | $\rho = 809 \text{ kg/m}^3$ |
| Álcool etílico anidro | 29.678 | ... | $\rho = 791 \text{ kg/m}^3$ |
| Eletricidade | 3.132 | — | PC (equivalente) em kJ/kWh |

FONTE - MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA⁽¹⁾.
IPT⁽⁴⁵⁾.

COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ⁽⁴⁶⁾.
ELETROBRÁS⁽⁶⁾.
ELETROBRÁS⁽¹⁵⁾.

(1) m^3 → medida de volume referente a 1 m^3 de gás, à temperatura de 20°C e pressão de 1 atm (760 mmHg).

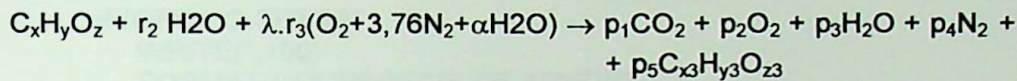
(2) Nm^3 → medida de volume referente a 1 m^3 de gás, à temperatura de 0°C e pressão de 1 atm (760 mm Hg).

- ANEXO 5.1 -

PROGRAM COEXAR

Análise de sensibilidade do coeficiente de excesso de ar

Equação da combustão da lenha:



Celulose : a C_{x1}H_{y1}O_{z1}

Hemicelulose: b C_{x1}H_{y1}O_{z1} r₃= x+y/4-z/2

Lignina : c C_{x2}H_{y2}O_{z2}

Programador: Cláudio Antônio Peres

Editado em : 23/09/91

Última modificação: 10/10/94

```
REAL X,R3,P5,CSI(4),LAMBCO2(32),LAMBO2(32)
```

```
INTEGER I,J,M,N,OPC,AGE(4)
```

```
CHARACTER NAME(4)*25
```

```
OPEN(4,FILE='SAIDA',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
```

```
$ FORM='FORMATTED')
```

```
CONTINUE
```

```
M=1
```

```
N=1
```

```
WRITE(*,20)
```

```
FORMAT(///1X,'# SENSIBILIDADE DO COEFICIENTE DE EXCESSO DE AR ',
```

```
$ 'QUANTO A VARIACAO DA: #, //1X, '1- Idade de uma mesma especie de ',
```

```
$ 'arvore', /1x, '2- Especie de arvore', /1x, '3- Producao de carvao residual', /1x,
```

```
$ '4- Nenhuma das opcoes acima', //1X, 'Opcao numero:', 5(/))
```

```
READ(*,*)OPC
```

```
WRITE(*,*)'
```

```
IF(OPC.EQ.1)THEN
```

```
CSI(M)=.02
```

```
WRITE(*,30)
```

```
FORMAT(//1X,'ESPECIE DE ARVORE ?')
```

```
READ(*,*)NAME(M)
```

```
WRITE(*,40)
```

```
FORMAT(//1X,'NUMERO DE IDADES A ANALISAR ?')
```

```
READ(*,*)J
```

```
DO 60 I=1,J
```

```
WRITE(*,50)
```

```
FORMAT(//1X,'IDADE DA ARVORE ?')
```

```
READ(*,*)AGE(I)
```

```
CALL CALC(OPC,I,CSI,R3,P5,X)
```

```
CALL LAMBDA(X,R3,P5,M,N,LAMBCO2,LAMBO2)
```

```
CONTINUE
```

```
CALL IMP1(CSI,NAME,AGE,LAMBCO2,LAMBO2)
```

```
ELSE
```

```
IF(OPC.EQ.2)THEN
```

```
CSI(M)=.020
```

```
WRITE(*,70)
```

```
FORMAT(//1X,'QUANTAS ESPECIES A ANALISAR ?'),
```

```
READ(*,*)J
```

```

      DO 90 I=1,J
      WRITE(*,80)
80      FORMAT(/1X,'ESPECIE DE ARVORE ?')
      READ(*,*)NAME(I)
      CALL CALC(OPC,I,CSI,R3,P5,X)
      CALL LAMBDA(X,R3,P5,M,N,LAMBCO2,LAMBO2)
90      CONTINUE
      CALL IMP2(CSI,NAME,LAMBCO2,LAMBO2)
      ELSE
      IF(OPC.EQ.3)THEN
      WRITE(*,100)
100     FORMAT(/1X,'ESPECIE DE ARVORE ?')
      READ(*,*)NAME(M)
      WRITE(*,110)
110     FORMAT(/1X,'QUANTAS PRODUCOES DE CARVAO A ANALISAR ?')
      READ(*,*)J
      DO 130 I=1,J
      WRITE(*,120)
120     FORMAT(/1X,'PRODUCAO DE CARVAO RESIDUAL (kg/kg ',
      $      'lenha umida) ?')
      READ(*,*)CSI(I)
      CALL CALC(OPC,I,CSI,R3,P5,X)
      CALL LAMBDA(X,R3,P5,M,N,LAMBCO2,LAMBO2)
130     CONTINUE
      CALL IMP3(CSI,NAME,LAMBCO2,LAMBO2)
      END IF
      END IF
      END IF
      IF(OPC.LE.3)THEN
      GO TO 10
      END IF
      CLOSE(4,STATUS='KEEP')
      STOP
      END

C
C
C -----
C SUBROUTINE CALC(OPC,I,CSI,R3,P5,X)
C -----
C      Cálculos gerais
C
C      REAL A,B,C,CSI(1),R3,P5,X,Y,Z,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,MLS
C      INTEGER OPC,I,J
C      PARAMETER(X1=6.,Y1=10.,Z1=5.,X2=47.,Y2=52.,Z2=16.)
C
C      IF(OPC.LE.2)THEN
10      WRITE(*,10)
      $      FORMAT(/1X,'COMPOSICAO DE CELULOSE, HEMICELULOSE E LIGNINA ',
      ' (%) ?')
      READ(*,*)A,B,C
      A=A/100.
      B=B/100.
      C=C/100.
      J=1
      ELSE
      A=.5
      B=.2
      C=.3
      J=1

```



```

C
C      -----
C      Impressão de resultados do efeito da espécie de árvore sobre o coeficiente de
C      excesso de ar
C
C      REAL LAMBCO2(32),LAMBO2(32),CSI(4)
C      INTEGER I,K,L
C      CHARACTER NAME(4)*25
C      DATA K,L/2*1/
C
C      WRITE(4,10)CSI(K)
10     FORMAT(///5X,29('-'),/5X,' EFEITO DA ESPECIE DE ARVORE ',/5X,
$     29('-'),/5X,'Producao de carvao(kg/kg lenha umida): ',F5.3)
C      DO 30 I=1,4
C         WRITE(4,20)NAME(I)
20         FORMAT(//5X,'ESPECIE: ',A25)
C         CALL IMPRE(K,L,LAMBCO2,LAMBO2)
30     CONTINUE
C      RETURN
C      END
C
C      -----
C      SUBROUTINE IMP3(CSI,NAME,LAMBCO2,LAMBO2)
C      -----
C      Impressão de resultados do efeito do carvão residual sobre o coeficiente de
C      excesso de ar
C
C      REAL LAMBCO2(32),LAMBO2(32),CSI(4)
C      INTEGER I,K,L
C      CHARACTER NAME(4)*25
C      DATA K,L/2*1/
C
C      WRITE(4,10)NAME(K)
10     FORMAT(///5X,27('-'),/5X,' EFEITO DO CARVAO RESIDUAL ',/5X,
$     27('-'),/5X,'Especie: ',A25)
C      DO 30 I=1,4
C         WRITE(4,20)CSI(I)
20         FORMAT(//5X,'Producao de carvao(kg/kg lenha umida): ',F5.3)
C         CALL IMPRE(K,L,LAMBCO2,LAMBO2)
30     CONTINUE
C      RETURN
C      END
C
C      -----
C      SUBROUTINE IMPRE(K,L,LAMBCO2,LAMBO2)
C      -----
C
C      REAL LAMBCO2(32),LAMBO2(32),CO2,O2
C      INTEGER I,K,L
C
C      WRITE(4,10)
10     FORMAT(/6X,'%CO2 | LAMBDA',/5X,17('-'))
C      DO 30 I=4,18,2
C         CO2=I
C         WRITE(4,20)CO2,LAMBCO2(K)
20         FORMAT(6X,F4.1,2X,'|',2X,F5.2)
C         K=K+1
30     CONTINUE
C      WRITE(4,40)

```


- ANEXO 5.2 -

PROGRAM ARQUIVO

Cria os arquivos de dados que serão manuseados pelo programa que calcula os desempenhos energéticos e exergéticos de sistemas de combustão a lenha e verifica a sensibilidade desses desempenhos em relação à variação dos parâmetros que influenciam a combustão.

Objeto: Dissertação de Mestrado em Conversão de Energia.

Programador: Cláudio Antônio Peres.

Editado em: 07/01/92

Última alteração: 22/10/94

Declaracao de variaveis

```
REAL TBS,TBU,MFLU,PVAP,TE,TS,MLEN,WLEN,PCS,ROLEN,CSI,PE,PS,PCSC,
$ TCH,GAS,DM1(6),DM2(6),TMP(6),WCAR,CNL
INTEGER ALT,FL,UDF,BL,BC,SUP,COD(6),UDL,UDCNL,I,J,K,L,N
CHARACTER UI*40,FLD*14,BSL*5,BSC*5
```

Abertura dos arquivos de dados a serem gravados

```
CONTINUE
WRITE(*,10)
10 FORMAT(20(/),5X,## GERACAO DOS ARQUIVOS DE DADOS DO PROGRAMA',
$ ' DESEMP ##,///1X,'Qual arquivo de dados sera aberto?',//1x,'1- Arquivo 1 (referen',
$ 'te ao calculo dos desempenhos)',/1x,'2- Arquivo 2 (referente a sensibilidade dos ',
$ 'desempenhos)',/1x,'3- Nenhum (saida do programa)',10(/))
READ(*,*)L
IF(L.EQ.1)THEN
$ OPEN(1,FILE='DADO1',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
FORM='FORMATTED')
ELSE
IF(L.EQ.2)THEN
$ OPEN(2,FILE='DADO2',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
FORM='FORMATTED')
ELSE
STOP
END IF
END IF
```

Leitura de dados

```
WRITE(*,15)
15 FORMAT(//1X,'Quantos sistemas de combustao a registrar?')
READ(*,*)N
DO 90 K=1,N
20 WRITE(*,20)K
$ FORMAT(//1X,'Sistema de combustao numero ',I2,' :',//1X,
'Identificacao da Unidade Industrial (ate 40 caracteres):')
READ(*,*)UI
WRITE(*,*)'Altitude local (m)'
READ(*,*)ALT
WRITE(*,*)'TBS e TBU (C)'
READ(*,*)TBS,TBU
WRITE(*,*)'Fluido de trabalho: 1-Vapor saturado 2-Agua ',
```

```

$ 'quente 3-Ar quente'
  READ(*,*)FL
  WRITE(*,*)'Producao do fluido de trabalho?'
  READ(*,*)MFLU
  WRITE(*,*)'Unidade: 1-kg/h 2-m3/h'
  READ(*,*)UDF
  IF(FL.EQ.1)THEN
    FLD='VAPOR SATURADO'
    WRITE(*,*)'Pressao absoluta do vapor (kgf/cm2)?'
    READ(*,*)PVAP
    WRITE(*,*)'Temperatura da agua de alimentacao (C)?'
    READ(*,*)TE
  ELSE
    IF(FL.EQ.2)THEN
      FLD='AGUA QUENTE'
      WRITE(*,*)'Temperaturas de entrada e saida (C)?'
      READ(*,*)TE,TS
    ELSE
      FLD='AR QUENTE'
      WRITE(*,*)'Temperaturas de entrada e saida (C)?'
      READ(*,*)TE,TS
      WRITE(*,*)'Pressoes de entrada e saida (kgf/cm2)?'
      READ(*,*)PE,PS
    END IF
  END IF
  IF(L.EQ.1)THEN
    WRITE(*,*)'Lenha: Consumo medido?'
    READ(*,*)MLEN
    WRITE(*,*)'Unidade: 1-kg/h 2-m3/h'
    READ(*,*)UDL
  ELSE
    WRITE(*,*)'Lenha: Consumo medido (m3/h)?'
    READ(*,*)MLEN
    UDL=2
  END IF
  WRITE(*,*)'Umidade, base umida (%)?'
  READ(*,*)WLEN
  WLEN=WLEN/100.
  IF(L.EQ.1)THEN
    WRITE(*,*)'Consumo nominal?'
    READ(*,*)CNL
    WRITE(*,*)'Unidade: 1-kg/h 2-m3/h'
    READ(*,*)UDCNL
  ELSE
    WRITE(*,*)'Consumo nominal (m3/h)?'
    READ(*,*)CNL
    UDCNL=2
  END IF
  WRITE(*,*)'Poder calorifico da lenha (kJ/kg)?'
  READ(*,*)PCS
  WRITE(*,*)'Base: 1-seca 2-umida'
  READ(*,*)BL
  IF(BL.EQ.1)THEN
    BSL='SECA'
  ELSE
    BSL='UMIDA'
  END IF
  WRITE(*,*)'Massa especifica da lenha (kg/m3)?'

```

```

READ(*,*)ROLEN
WRITE(*,*)'Carvao residual: Producao (kg/kg lenha umida)?'
READ(*,*)CSI
WRITE(*,*)'Poder calorifico do carvao residual (kJ/kg)?'
READ(*,*)PCSC
WRITE(*,*)'Base: 1-seca 2-umida'
READ(*,*)BC
IF(BC.EQ.1)THEN
  BSC='SECA'
ELSE
  BSC='UMIDA'
END IF
WRITE(*,*)'Umidade, base umida (%)?'
READ(*,*)WCAR
WCAR=WCAR/100.
WRITE(*,*)'Gases de Exaustao: Temperatura (C)?'
READ(*,*)TCH
WRITE(*,*)'Analise efetuada: 1-CO2 2-O2'
READ(*,*)J
IF(J.EQ.1)THEN
  WRITE(*,*)'Teor de CO2?'
ELSE
  WRITE(*,*)'Teor de O2?'
END IF
READ(*,*)GAS
GAS=GAS/100.
WRITE(*,*)'Numero de superficies do sistema de combustao ',
$(max.=6)?'
READ(*,*)SUP
DO 30 I=1,SUP
  WRITE(*,*)'Codigo: 1-Cilindro horizontal 2-Cilindro ',
$( 'vertical'
  WRITE(*,*)' 3-Plano horizontal 4-Plano ver',
$( 'tical'
  WRITE(*,25)I
  FORMAT(/1X,'- Superficie ',I1,': Codigo?')
  READ(*,*)COD(I)
  IF(COD(I).EQ.1)THEN
    WRITE(*,*)'Diametro e comprimento do cilindro (m)?'
    READ(*,*)DM1(I),DM2(I)
  ELSE
    IF(COD(I).EQ.2)THEN
      WRITE(*,*)'Altura e diametro do cilindro (m)?'
      READ(*,*)DM1(I),DM2(I)
    ELSE
      IF(COD(I).EQ.3)THEN
        WRITE(*,*)'Dimensao maior ou comprimento (m)?'
        READ(*,*)DM1(I)
        WRITE(*,*)'Dimensao menor (m)?'
        READ(*,*)DM2(I)
      ELSE
        WRITE(*,*)'Altura e base do plano (m)?'
        READ(*,*)DM1(I),DM2(I)
      END IF
    END IF
  END IF
  WRITE(*,*)'Temperatura media da superficie (C)?'
  READ(*,*)TMP(I)

```

```
30      CONTINUE
C
C      Gravacao dos dados no arquivo
C
      WRITE(L,40)UI,ALT,TBS,TBU,FL,MFLU,UDF,FLD
40      FORMAT(A40,I4,2F4.1,I1,F7.1,I1,A5)
      IF(FL.EQ.1)THEN
50          WRITE(L,50)PVAP,TE
          FORMAT(2F5.1)
      ELSE
          IF(FL.EQ.2)THEN
              WRITE(L,50)TE,TS
          ELSE
60              WRITE(L,60)TE,TS,PE,PS
              FORMAT(4F5.1)
          END IF
      END IF
      WRITE(L,70)MLEN,UDL,WLEN,CNL,UDCNL,PCS,BL,BSL,ROLEN,CSI,
70      $      PCSC,BC,BSC,WCAR,TCH,J,GAS,SUP
      FORMAT(F9.3,I1,F5.3,F9.3,I1,F8.1,I1,A5,F6.1,F7.4,F8.1,I1,
80      $      A5,F6.4,F6.1,I2,F5.3,I1)
      WRITE(L,80)(COD(I),DM1(I),DM2(I),TMP(I),I=1,SUP)
80      FORMAT(I1,F4.1,F4.1,F5.1)
90      CONTINUE
      ENDFILE L
      CLOSE(L,STATUS='KEEP')
      GO TO 5
C
      STOP
      END
```

- ANEXO 5.3 -

PROGRAM DESEMP

Desempenhos energéticos e exergéticos de sistemas de combustão a lenha, aplicando-se os métodos direto e indireto.

Objeto: Dissertação de Mestrado em Conversão de Energia.

Programador: Cláudio Antônio Peres.

Editado em: 11/01/92

Última alteração: 22/11/94

```

REAL A,B,C,CL,CC,CSI,CPAR,CPCO2,CPO2,CPN2,CNL,DM1(6),DM2(6),
$ ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,EPSL,EPSC,
$ EX3S,EX3U,EXUTIL,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,
$ FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3,GAS,H1,H2,HL,HC,HLV,MAR,
$ MFLU,MLEN,MCO2,MO2,MH2O,MN2,MLS,MLU,NL,NC,OL,OC,PVAP,PCS,
$ PE,PS,PCSC,PCH,PCSS,PCSU,PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,
$ P1,P2,P3,P4,P5,PWALL(6),PPAR,Q,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,ROAR,RAR,
$ ROLEN,R2,R3,S(6),S1,S2,TBS,TBU,TE,TS,TCH,TMP(6),TAR,V,VA,
$ X1,X2,X3,WLEN,WCAR,Y,Y1,Y2,Y3,Z1,Z2,Z3
INTEGER ALT,FL,UDF,UDL,UDCNL,BL,BC,SUP,COD(6),OPC,J,K,I
CHARACTER UI*40,FLD*14,BSL*5,BSC*5,VAR*35
LOGICAL CH,TH
PARAMETER(MAR=28.97,MCO2=44.,MO2=32.,MH2O=18.,MN2=28.,RAR=.287,
$           A=.5,B=.2,C=.3)
DATA X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3/6.,10.,5.,47.,52.,16.,8.,5.,1./
DATA CL,HL,OL,NL,CC,HC,OC,NC/47.,5.7,44.,.3,96.,.5,2.5,.0/
CONTINUE
DATA CH,TH,VA,I,K/.FALSE.,.TRUE.,-1.,1,1/

C
C Apresentação do programa
C
CALL APRES(OPC)

C
C Entrada de dados
C
20 CONTINUE
CALL ARQ(K,OPC,UI,ALT,TBS,TBU,FL,FLD,MFLU,UDF,PVAP,TE,TS,PE,PS,
$           MLEN,UDL,WLEN,CNL,UDCNL,PCS,BL,BSL,ROLEN,CSI,PCSC,
$           BC,BSC,WCAR,TCH,J,GAS,SUP,COD,DM1,DM2,TMP)
IF(K.EQ.1)THEN
  GO TO 10
END IF

C
C Transformação de unidades de alguns dados de entrada
C
CALL UNID(TBS,TBU,TE,TS,TCH,PVAP,PE,PS,UDF,MFLU,UDL,MLEN,CNL,
$           UDCNL,ROLEN,SUP,TMP,ROAR,RAR,TAR,FL)

C
C Análise de sensibilidade do desempenho
C
30 CONTINUE
IF(OPC.EQ.2)THEN
  IF(VA.LE.0.08)THEN
    CALL SENSI(I,CH,FL,VA,VAR,WLEN,PCS,MLEN,ROLEN,WCAR,PCSC,CSI,
$           TCH,J,GAS,MFLU,PVAP,TE,TS,TBS,TBU,TMP,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,
$           X3,Y3,Z3,PE,PS,Q,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,V,UDF,ROAR,RAR,TAR,CNL)

```

```

ELSE
CALL REST(I,FL,WLEN,PCS,MLEN,ROLEN,WCAR,PCSC,CSI,TCH,GAS,
$      MFLU,ROAR,PVAP,TE,TS,TBS,TBU,TMP,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,
$      Z3,PE,PS,Q,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,UDF,CNL,RAR,TAR)
I=I+1
IF(FL.LE.2)THEN
IF(I.GT.16)THEN
GO TO 20
END IF
ELSE
IF(I.GT.18)THEN
GO TO 20
END IF
END IF
CH=.FALSE.
VA=-1.
GO TO 30
END IF
END IF

C
C
C      Balanceamento da equação química da combustão da lenha
C
CALL BALA(A,B,C,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3,ALT,TBS,TBU,WLEN,MAR,
$      MH2O,CSI,GAS,P1,P2,P3,P4,P5,R2,R3,Y,J,MLS,MLU)
C
C
C      Propriedades do fluido de trabalho
C
CALL PROP(FL,TE,TS,PVAP,TAR,TBS,H1,H2,S1,S2,MAR,CPAR)
C
C
C      Poderes caloríficos da lenha e do carvão residual
C
CALL PODER(PCS,BL,PCSC,BC,WLEN,WCAR,Y,Y3,P5,R2,TBS,MLS,MLU,PCSS,
$      PCSU,PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,HLV)
C
C
C      ***** DESEMPENHO ENERGÉTICO (método direto) *****
C
CALL ETAD(FL,MFLU,MLEN,H1,H2,CPAR,TE,TS,PCSS,PCSU,PCIS,PCIU,
$      ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4)
C
C
C      Perdas de calor pela chaminé (kJ/kg)
C
CALL PCHAM(TCH,TBS,P1,P2,P3,P4,MLS,MCO2,MO2,MN2,MH2O,CPCO2,CPO2,
$      CPN2,PCH)
C
C
C      Perdas de calor pelas paredes do sistema de combustão (kJ/kg)
C
CALL PAREDE(SUP,COD,DM1,DM2,TMP,TBS,CNL,WLEN,S,PWALL,PPAR)
C
C
C      ***** DESEMPENHO ENERGÉTICO (método indireto) *****
C
CALL ETAI(PCH,PPAR,CSI,PCSS,PCSU,PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,
$      PCIUC,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4)
C
C
C      ***** DESEMPENHO EXERGÉTICO (método direto 1) *****
C
CALL FID1(MLEN,PCIS,WLEN,HLV,FL,MFLU,H1,H2,S1,S2,TBS,TE,TS,PE,PS,
$      CPAR,RAR,CL,HL,OL,NL,EPSL,EX3S,EX3U,EXUTIL,FID11,FID12)
C

```

```

C      ***** DESEMPENHO EXERGÉTICO (método direto 2) *****
C
C      CALL FID2(TCH,TBS,MH2O,MCO2,MO2,MN2,P1,P2,P3,P4,MLU,CPCO2,CPO2,
C      $          CPN2,SUP,PWALL,TMP,CSI,MLEN,PCISC,WCAR,HLV,CC,HC,OC,
C      $          NC,EPSC,EX3S,EX3U,EXUTIL,FID21,FID22)
C
C      ***** DESEMPENHO EXERGÉTICO (métodos indiretos 1, 2 e 3) *****
C
C      CALL FII(FL,H1,H2,S1,S2,TBS,TE,TS,TCH,PE,PS,CPAR,RAR,PPAR,PCSS,PCSU,
C      $          PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,CSI,SUP,TMP,ETAI1,ETAI2,
C      $          ETAI3,ETAI4,EPSC,EPSC,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3)
C
C      Variação dos desempenhos em função da variação dos fatores e impressão dos
C      resultados da análise de sensibilidade
C
C      IF(OPC.EQ.2)THEN
C      $          CALL VARIA(TH,VA,VAR,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,
C      $          ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,
C      $          FII23,FII24,FII3)
C      ELSE
C
C      Impressão de dados e resultados do cálculo dos desempenhos
C
C      CALL IMPRES(J,UI,ALT,TBS,TBU,FL,FLD,MFLU,PVAP,TE,TS,PE,PS,MLEN,
C      $          UDL,WLEN,BSL,CNL,UDCNL,PCS,ROLEN,BSC,WCAR,PCSC,CL,HL,OL,NL,
C      $          CC,HC,OC,NC,CSI,TCH,GAS,SUP,TMP,S,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,
C      $          ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,
C      $          FII21,FII22,FII23,FII24,FII3)
C      END IF
C
C      Redirecionamento do programa segundo opção de entrada
C
C      IF(OPC.EQ.1)THEN
C      $          GO TO 20
C      ELSE
C      $          IF(I.EQ.4)THEN
C      $              MLEN=MLEN/V
C      $              CNL=CNL/V
C      $          END IF
C      $          GO TO 30
C      END IF
C      STOP
C      END
C
C      .....
C      SUBPROGRAMAS
C      .....
C
C      SUBROUTINE APRES(OPC)
C
C      Apresentação do programa no vídeo
C
C      INTEGER OPC
C
C      WRITE(*,10)

```

```

10  FORMAT(10(/)13X,52('*'),/13X,'*',18X,'PROGRAM DESEMP',18X,'*',
$ /13X,'*',50X,'*',/13X,'* O DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMBUS',
$ 'TAO A LENHA: */13X,'*',10X,'Analise Energetica e Exergetica',9X,'*',
$ /13X,'*',11X,'(metodos direto e indireto)',12X,'*',/13X,52('*'),3(/),15X,
$ 'Digite o numero correspondente a opcao desejada:',//13X,'1- Calculo ',
$ 'dos desempenhos energeticos e exergeticos',/13X,'2- Analise de sensi-',
$ 'bilidade do desempenho',/13X,'3- Saida do programa',5(/))
  READ(*,*)OPC
  IF(OPC.EQ.1)THEN
    OPEN(3,FILE='RESULT1',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
$      FORM='FORMATTED')
  ELSE
    IF(OPC.EQ.2)THEN
      OPEN(5,FILE='RESULT2',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
$      FORM='FORMATTED')
      OPEN(7,FILE='RESULT3',STATUS='NEW',ACCESS='SEQUENTIAL',
$      FORM='FORMATTED')
    ELSE
      CLOSE(3,STATUS='KEEP')
      CLOSE(5,STATUS='KEEP')
      CLOSE(7,STATUS='KEEP')
      STOP
    END IF
  END IF
  RETURN
  END

C
C
SUBROUTINE ARQ(K,L,UI,ALT,TBS,TBU,FL,FLD,MFLU,UDF,PVAP,TE,TS,PE,
$ PS,MLEN,UDL,WLEN,CNL,UDCNL,PCS,BL,BSL,ROLEN,CSI,PCSC,BC,BSC,
$ WCAR,TCH,J,GAS,SUP,COD,DM1,DM2,TMP)
C
C
C      Leitura dos arquivos de dados
C
REAL TBS,TBU,MFLU,PVAP,TE,TS,MLEN,WLEN,CNL,PCS,ROLEN,CSI,PE,PS,
$ PCSC,TCH,GAS,DM1(6),DM2(6),TMP(6),WCAR
INTEGER I,J,K,ALT,FL,UDF,BL,BC,SUP,COD(6),UDL,UDCNL,L
CHARACTER UI*40,FLD*14,BSL*5,BSC*5
C
IF(K.EQ.1)THEN
  IF(L.EQ.1)THEN
    OPEN(1,FILE='DADO1',STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL',
$     FORM='FORMATTED')
  ELSE
    OPEN(2,FILE='DADO2',STATUS='OLD',ACCESS='SEQUENTIAL',
$     FORM='FORMATTED')
  END IF
END IF
END IF
READ(L,10,END=60)UI,ALT,TBS,TBU,FL,MFLU,UDF,FLD
10  FORMAT(A40,I4,2F4.1,I1,F7.1,I1,A5)
IF(FL.EQ.1)THEN
  READ(L,20)PVAP,TE
20  FORMAT(2F5.1)
ELSE
  IF(FL.EQ.2)THEN
    READ(L,20)TE,TS
  ELSE
    READ(L,30)TE,TS,PE,PS

```

```

30      FORMAT(4F5.1)
      END IF
      END IF
      READ(L,40)MLEN,UDL,WLEN,CNL,UDCNL,PCS,BL,BSL,ROLEN,CSI,PCSC,BC,
$      BSC,WCAR,TCH,J,GAS,SUP
40      FORMAT(F9.3,I1,F5.3,F9.3,I1,F8.1,I1,A5,F6.1,F7.4,F8.1,I1,A5,F6.4,F6.1,I2,F5.3,I1)
      READ(L,50)(COD(I),DM1(I),DM2(I),TMP(I),I=1,SUP)
50      FORMAT(I1,2F4.1,F5.1)
      K=K+1
      GO TO 70
60      CONTINUE
      CLOSE(L)
      K=1
70      CONTINUE
      RETURN
      END

C
C
-----
$      SUBROUTINE UNID(TBS,TBU,TE,TS,TCH,PVAP,PE,PS,UDF,MFLU,UDL,MLEN,
$      CNL,UDCNL,ROLEN,SUP,TMP,ROAR,RAR,TAR,FL)
C
C      Transformação de unidades de alguns dados de entrada.
C
      REAL TBS,TBU,TE,TS,TCH,PVAP,PE,PS,MFLU,MLEN,CNL,ROLEN,TMP(6),
$      TAR,ROAR,RAR
      INTEGER I,UDF,UDL,UDCNL,SUP,FL

C      Temperatura (C para K)
C
      TBS=TBS+273.15
      TBU=TBU+273.15
      TE=TE+273.15
      TS=TS+273.15
      TCH=TCH+273.15
      DO 10 I=1,SUP
          TMP(I)=TMP(I)+273.15
10      CONTINUE

C      Pressão do vapor (kgf/cm2 para MPa)
C
      IF(FL.EQ.1)THEN
          PVAP=PVAP/10.195
      ELSE

C      Pressão do ar frio e quente (kgf/cm2 para Pa)
C
          PE=PE/10.195E-6
          PS=PS/10.195E-6
      END IF

C      Produção do fluido de trabalho (m3/h para kg/h)
C
      IF(UDF.EQ.2)THEN
          IF(FL.LE.2)THEN
              MFLU=MFLU*1.0E3
          ELSE
              CALL MFLUAR(TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,ROAR)
          END IF

```

```

C      END IF
C
C      Consumo medido e nominal de lenha (m3/h para kg/h)
C
C      IF(UDL.EQ.2)THEN
C          MLEN=MLEN*ROLEN
C      END IF
C      IF(UDCNL.EQ.2)THEN
C          CNL=CNL*ROLEN
C      END IF
C      RETURN
C      END
C
C
C      -----
C      SUBROUTINE MFLUAR(TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,ROAR)
C      -----
C          Calcula a produção de ar quente, em kg/h
C
C      REAL TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,PAR,ROAR
C
C      TAR=(TE+TS)/2
C      PAR=(PE+PS)/2
C      ROAR=PAR/(RAR*1.E3*TAR)
C      MFLU=MFLU*ROAR
C      RETURN
C      END
C
C
C      -----
C      SUBROUTINE SENSI(I,CH,FL,VA,VAR,WLEN,PCS,MLEN,ROLEN,WCAR,PCSC,
C      $      CSI,TCH,J,GAS,MFLU,PVAP,TE,TS,TBS,TBU,TMP,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,
C      $      Y3,Z3,PE,PS,Q,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,V,UDF,ROAR,RAR,TAR,CNL)
C      -----
C          Análise de sensibilidade do desempenho (faixa: -10% a 10%)
C
C      REAL VA,WLEN,PCS,MLEN,ROLEN,WCAR,PCSC,CSI,TCH,GAS,MFLU,PVAP,TE,
C      $      TS,TBS,TBU,TMP(6),X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3,PE,PS,Q,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,
C      $      Q6,V,V1,V2,V3,V4,V5,V6,ROAR,CNL,RAR,TAR
C      LOGICAL CH
C      INTEGER I,J,FL,UDF
C      CHARACTER VAR*35
C
C      IF(CH)THEN
C          VA=VA+0.02
C      ELSE
C          VA=-0.10
C          CH=.TRUE.
C          IF(I.EQ.1)THEN
C              VAR='UMIDADE DA LENHA'
C              Q=WLEN
C          END IF
C          IF(I.EQ.2)THEN
C              VAR='PODER CALORIFICO DA LENHA'
C              Q=PCS
C          END IF
C          IF(I.EQ.3)THEN
C              VAR='CONSUMO MEDIDO DE LENHA'
C              Q=MLEN
C          END IF

```

```
IF(I.EQ.4)THEN
  VAR='MASSA ESPECIFICA DA LENHA'
  Q=ROLEN
  MLEN=MLEN/Q
  CNL=CNL/Q
END IF
IF(I.EQ.5)THEN
  VAR='UMIDADE DO CARVAO'
  Q=WCAR
END IF
IF(I.EQ.6)THEN
  VAR='PODER CALORIFICO DO CARVAO'
  Q=PCSC
END IF
IF(I.EQ.7)THEN
  VAR='PRESENCA DE CARVAO RESIDUAL'
  Q=CSI
END IF
IF(I.EQ.8)THEN
  VAR='TEMPERATURA DOS GASES DE CHAMINE'
  Q=TCH-273.15
END IF
IF(I.EQ.9)THEN
  IF(J.EQ.1)THEN
    VAR='TEOR DE CO2 DOS GASES'
  ELSE
    VAR='TEOR DE O2 DOS GASES'
  END IF
  Q=GAS
END IF
IF(I.EQ.10)THEN
  VAR='PRODUCAO DO FLUIDO DE TRABALHO'
  IF(UDF.LE.2)THEN
    Q=MFLU/1.0E3
  ELSE
    Q=MFLU/ROAR
  END IF
END IF
IF(I.EQ.11)THEN
  IF(FL.EQ.1)THEN
    VAR='PRESSAO DE VAPOR'
    Q=PVAP*10.195
  ELSE
    VAR='TEMP. DE ENTRADA DO FLUIDO'
    Q=TE-273.15
  END IF
END IF
IF(I.EQ.12)THEN
  IF(FL.EQ.1)THEN
    VAR='TEMP. DA AGUA DE ALIMENTACAO'
    Q=TE-273.15
  ELSE
    VAR='TEMP. DE SAIDA DO FLUIDO'
    Q=TS-273.15
  END IF
END IF
IF(I.EQ.13)THEN
  VAR='CONDICOES AMBIENTES (TBS/TBU)'
```

```
Q1=TBS-273.15
Q2=TBU-273.15
END IF
IF(I.EQ.14)THEN
  VAR='TEMP. MEDIA DAS PAREDES DO SISTEMA'
  Q1=TMP(1)-273.15
  Q2=TMP(2)-273.15
  Q3=TMP(3)-273.15
  Q4=TMP(4)-273.15
  Q5=TMP(5)-273.15
  Q6=TMP(6)-273.15
END IF
IF(I.EQ.15)THEN
  VAR='FORMULA MOLECULAR DA LENHA'
  Q1=X1
  Q2=Y1
  Q3=Z1
  Q4=X2
  Q5=Y2
  Q6=Z2
END IF
IF(I.EQ.16)THEN
  VAR='FORMULA MOLECULAR DO CARVAO'
  Q1=X3
  Q2=Y3
  Q3=Z3
END IF
IF(I.EQ.17)THEN
  VAR='PRESSAO DE ENTRADA DO AR'
  Q=PE*10.195E-6
END IF
IF(I.EQ.18)THEN
  VAR='PRESSAO DE SAIDA DO AR'
  Q=PS*10.195E-6
END IF
END IF
IF(I.LE.12.OR.I.GE.17)THEN
  V=Q+(Q*VA)
  IF(I.EQ.1)THEN
    WLEN=V
  END IF
  IF(I.EQ.2)THEN
    PCS=V
  END IF
  IF(I.EQ.3)THEN
    MLEN=V
  END IF
  IF(I.EQ.4)THEN
    MLEN=MLEN*V
    CNL=CNL*V
  END IF
  IF(I.EQ.5)THEN
    WCAR=V
  END IF
  IF(I.EQ.6)THEN
    PCSC=V
  END IF
  IF(I.EQ.7)THEN
```

```
    CSI=V
  END IF
  IF(I.EQ.8)THEN
    TCH=V+273.15
  END IF
  IF(I.EQ.9)THEN
    GAS=V
  END IF
  IF(I.EQ.10)THEN
    IF(UDF.LE.2)THEN
      MFLU=V*1.0E3
    ELSE
      MFLU=V*ROAR
    END IF
  END IF
  IF(I.EQ.11)THEN
    IF(FL.EQ.1)THEN
      PVAP=V/10.195
    ELSE
      TE=V+273.15
      CALL MFLUAR(TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,ROAR)
    END IF
  END IF
  IF(I.EQ.12)THEN
    IF(FL.EQ.1)THEN
      TE=V+273.15
    ELSE
      TS=V+273.15
      CALL MFLUAR(TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,ROAR)
    END IF
  END IF
  IF(I.EQ.17)THEN
    PE=V/10.195E-6
  ELSE
    PS=V/10.195E-6
  END IF
ELSE
  IF(I.EQ.13)THEN
    V1=Q1+(Q1*VA)
    V2=Q2+(Q2*VA)
    TBS=V1+273.15
    TBU=V2+273.15
  END IF
  IF(I.EQ.14.OR.I.EQ.15)THEN
    V1=Q1+(Q1*VA)
    V2=Q2+(Q2*VA)
    V3=Q3+(Q3*VA)
    V4=Q4+(Q4*VA)
    V5=Q5+(Q5*VA)
    V6=Q6+(Q6*VA)
    IF(I.EQ.14)THEN
      TMP(1)=V1+273.15
      TMP(2)=V2+273.15
      TMP(3)=V3+273.15
      TMP(4)=V4+273.15
      TMP(5)=V5+273.15
      TMP(6)=V6+273.15
    ELSE
```

```

      X1=V1
      Y1=V2
      Z1=V3
      X2=V4
      Y2=V5
      Z2=V6
    END IF
  END IF
  IF(I.EQ.16)THEN
    V1=Q1+(Q1*VA)
    V2=Q2+(Q2*VA)
    V3=Q3+(Q3*VA)
    X3=V1
    Y3=V2
    Z3=V3
  END IF
END IF
RETURN
END

```

C
C

```

SUBROUTINE REST(I,FL,WLEN,PCS,MLEN,ROLEN,WCAR,PCSC,CSI,TCH,GAS,
$ MFLU,ROAR,PVAP,TE,TS,TBS,TBU,TMP,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3,PE,PS,Q,
$ Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,UDF,CNL,RAR,TAR)

```

C
C
C

Restauração dos valores iniciais das variáveis

```

REAL Q,Q1,Q2,Q3,Q4,Q5,Q6,WLEN,PCS,MLEN,ROLEN,WCAR,PCSC,CSI,TCH,
$ GAS,MFLU,PVAP,TE,TS,TBS,TBU,TMP(6),X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3,PE,
$ PS,ROAR,CNL,RAR,TAR
INTEGER I,FL,UDF

```

C

```

IF(I.EQ.1)THEN
  WLEN=Q
END IF
IF(I.EQ.2)THEN
  PCS=Q
END IF
IF(I.EQ.3)THEN
  MLEN=Q
END IF
IF(I.EQ.4)THEN
  MLEN=MLEN*Q
  CNL=CNL*Q
  ROLEN=Q
END IF
IF(I.EQ.5)THEN
  WCAR=Q
END IF
IF(I.EQ.6)THEN
  PCSC=Q
END IF
IF(I.EQ.7)THEN
  CSI=Q
END IF
IF(I.EQ.8)THEN
  TCH=Q+273.15

```

```
END IF
IF(I.EQ.9)THEN
  GAS=Q
END IF
IF(I.EQ.10)THEN
  IF(UDF.LE.2)THEN
    MFLU=Q*1.0E3
  ELSE
    MFLU=Q*ROAR
  END IF
END IF
IF(I.EQ.11)THEN
  IF(FL.EQ.1)THEN
    PVAP=Q/10.195
  ELSE
    TE=Q+273.15
    CALL MFLUAR(TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,ROAR)
  END IF
END IF
IF(I.EQ.12)THEN
  IF(FL.EQ.1)THEN
    TE=Q+273.15
  ELSE
    TS=Q+273.15
    CALL MFLUAR(TE,TS,PE,PS,RAR,TAR,MFLU,ROAR)
  END IF
END IF
IF(I.EQ.13)THEN
  TBS=Q1+273.15
  TBU=Q2+273.15
END IF
IF(I.EQ.14)THEN
  TMP(1)=Q1+273.15
  TMP(2)=Q2+273.15
  TMP(3)=Q3+273.15
  TMP(4)=Q4+273.15
  TMP(5)=Q5+273.15
  TMP(6)=Q6+273.15
END IF
IF(I.EQ.15)THEN
  X1=Q1
  Y1=Q2
  Z1=Q3
  X2=Q4
  Y2=Q5
  Z2=Q6
END IF
IF(I.EQ.16)THEN
  X3=Q1
  Y3=Q2
  Z3=Q3
END IF
IF(I.EQ.17)THEN
  PE=Q/10.195E-6
ELSE
  PS=Q/10.195E-6
END IF
RETURN
```

END

C
 SUBROUTINE BALA(A,B,C,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3,ALT,TBS,TBU,WLEN,
 \$ MAR,MH2O,CSI,GAS,P1,P2,P3,P4,P5,R2,R3,Y,J,MLS,MLU)

C
 C Balanceamento da equação química de combustão da lenha.

C
 REAL A,B,C,X1,Y1,Z1,X2,Y2,Z2,X3,Y3,Z3,X,Y,Z,MLS,WLEN,MAG,MLU,R2,CSI,
 \$ L,MCAR,MAR,R3,LAMBDA,TBS,TBU,MH2O,ALFA,P1,P2,P3,P4,P5,GAS
 INTEGER J,ALT

C
 C Número de moles dos elementos principais de constituição da lenha (kmol elemento/
 C kmol lenha seca)

C
 $X=(A+B)*X1+C*X2$
 $Y=(A+B)*Y1+C*Y2$
 $Z=(A+B)*Z1+C*Z2$

C
 C Massa de lenha seca (MLS) e úmida (MLU), em kg/kmol lenha, e número de moles da
 C umidade da lenha (R2)

C
 $MLS=12*X+Y+16*Z$
 $MAG=WLEN*MLS/(1-WLEN)$
 $MLU=MLS+MAG$
 $R2=MAG/MH2O$

C
 C Fração molar do carvão (P5), em kmol carvão/kmol de lenha seca

C
 $L=0.0000$
 IF(CSI.NE.L)THEN
 $MCAR=12*X3+Y3+16*Z3$
 $P5=CSI*MLS/MCAR$
 ELSE
 $P5=0.$
 END IF

C
 C Número de moles do ar estequiométrico (R3), em kmol ar/kmol de lenha seca, e
 C coeficiente de excesso de ar (LAMBDA)

C
 $R3=X+Y/4-Z/2$
 IF(J.EQ.1)THEN
 $LAMBDA=(X-P5*X3-GAS*(X+P5*(Y3/4-Z3/2)-R3))/(4.76*GAS*R3)$
 ELSE
 $LAMBDA=(P5*(X3+Y3/4-Z3/2)-R3-GAS*(X-R3+P5*(Y3/4-Z3/2)))/$
 \$ $(R3*(4.76*GAS-1))$
 END IF

C
 C Teor molar da umidade do ar em relação ao oxigênio (ALFA), em kmol H2O/kmol O2

C
 CALL PSICRO(ALT,TBS,TBU,MH2O,MAR,ALFA)

C
 C Fração molar de CO2 (P1), O2 (P2), H2O (P3) e N2 (P4) nos gases de exaustão, por
 C kmol de lenha

C
 $P1=X-P5*X3$
 $P2=R3*(LAMBDA-1)+P5*(X3+Y3/4-Z3/2)$
 $P3=R2+LAMBDA*R3*ALFA+Y/2-P5*Y3/2$
 $P4=3.76*LAMBDA*R3$

RETURN
END

C
C

SUBROUTINE PSICRO(ALT,TBS,TBU,MH2O,MAR,ALFA)

C
C
C

Teor molar da umidade do ar, em kmol H2O/kmol O2.

REAL TBS,TBU,MH2O,TBSC,TBUC,PVS,PVU,PB,UR,S,C,XS,XK,XU,MI,A(12),
\$ B(10),MAR,XM,ALFA

INTEGER ALT
INTRINSIC EXP

DATA A/0.104592E2,-0.404897E-2,-0.417520E-4,0.368510E-6,
\$ -0.10152E-8,0.865310E-12,0.903668E-15,-0.199690E-17,
\$ 0.779287E-21,0.191482E-24,-0.396806E4,0.395735E2/

C
C
C

Pressão atmosférica ou barométrica (Pa)

PB=101325*EXP(-1.221E-4*ALT)

C
C
C

Pressão de saturação do vapor d'água (Pa), com base na TBS (K)

S=.0

DO 10 J=0,9

I=J+1

B(I)=A(I)*TBS**J

S=S+B(I)

10

CONTINUE

C=A(11)/(TBS-A(12))

PVS=EXP(S+C)*1.0E6

C
C
C

Pressão de saturação do vapor d'água (Pa), com base na TBU (K)

S=.0

DO 20 J=0,9

I=J+1

B(I)=A(I)*TBU**J

S=S+B(I)

20

CONTINUE

C=A(11)/(TBU-A(12))

PVU=EXP(S+C)*1.0E6

C
C
C

Umidade relativa do ar(UR)

XS=conteúdo de umidade do pt. de saturação(kg H2O/kg ar seco), usando PVS.

XU=conteúdo de umidade do pt. de saturação(kg H2O/kg ar seco), usando PVU.

XK=conteúdo de umidade do pt. considerado(kg H2O/kg ar seco)

XM=conteúdo de umidade do pt. considerado(kmol H2O/kmol ar seco)

C
C
C

TBSC=TBS-273.15

TBUC=TBU-273.15

XS=0.62198*PVS/(PB-PVS)

XU=0.62198*PVU/(PB-PVU)

XK=((2501-2.381*TBUC)*XU-TBSC+TBUC)/(2501+1.805*TBSC-4.186*TBUC)

XM=XK*MAR/MH2O

MI=XK/XS

UR=MI/(1-(1-MI)*PVS/PB)

C

C Número de moles da umidade do ar em relação ao oxigênio (ALFA), em kmol H₂O/kmol O₂.

C
 C ALFA=4.76*(UR*PVS/PB)/(1-UR*PVS/PB)
 C RETURN
 C END

C
 C
 C -----
 C SUBROUTINE PROP(FL,TE,TS,PVAP,TAR,TBS,H1,H2,S1,S2,MAR,CPAR)
 C -----

C Propriedades do fluido de trabalho.
 C Entalpia em kJ/kg; Pressão em MPa; Temperatura em K.

C
 C REAL TE,TS,PVAP,TBS,H1,H2,CPAR,TAR,PSAT,HS,VS,MAR,AAR(9),CP,
 \$ PRES,HLIQ,VOLIQ,TEMP,HVAP,SVAP,SLIQ
 C INTEGER FL
 C DATA AAR/0.,2.9438265E1,-1.610822,-1.1991744E1,6.8828384E1,
 \$ -9.8239929E1,6.4883505E1,-2.090938E1,2.6652402/

C
 C IF(FL.EQ.1)THEN
 C PSAT=PRES(TE)
 C HS=HLIQ(TE)
 C VS=VOLIQ(TE)
 C H2=HS+VS*(PVAP-PSAT)*1.E3
 C TS=TEMP(PVAP)
 C H1=HVAP(TS)
 C S1=SVAP(TS)
 C S2=SLIQ(TE)
 C ELSE
 C IF(FL.EQ.2)THEN
 C H2=HLIQ(TE)
 C H1=HLIQ(TS)
 C S1=SLIQ(TS)
 C S2=SLIQ(TE)
 C ELSE
 C CPAR=CP(TAR,TBS,AAR,MAR)
 C END IF
 C END IF
 C RETURN
 C END

C
 C
 C -----
 C REAL FUNCTION PRES(T)

C
 C
 C -----
 C Calcula a pressão de saturação do vapor d'água (MPa)

C
 C REAL T,A(12),B(10)
 C INTRINSIC EXP
 C DATA A/0.104592E2,-0.404897E-2,-0.41752E-4,0.36851E-6,
 \$ -0.10152E-8,0.86531E-12,0.903668E-15,-0.19969E-17,
 \$ 0.779287E-21,0.191482E-24,-0.396806E4,0.395735E2/

C
 C S=.0
 C DO 10 J=0,9
 C I=J+1
 C B(I)=A(I)*T**J
 C S=S*B(I)
 C CONTINUE
 C C=A(11)/(T-A(12))

```

PRES=EXP(S+C)
RETURN
END

```

```

-----
REAL FUNCTION TEMP(P)
-----

```

Calcula a temperatura de saturação do vapor d'água (K)

```

REAL P,A,B,C
INTRINSIC ALOG

```

```

IF(P.LT.12.33)THEN

```

```

  A=0.426776E2

```

```

  B=-0.389270E4

```

```

  C=-0.948654E1

```

```

ELSE

```

```

  A=-0.387592E3

```

```

  B=-0.125875E5

```

```

  C=-0.152578E2

```

```

END IF

```

```

TEMP=A+(B/(ALOG(P)+C))

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

-----
REAL FUNCTION HVAP(T)
-----

```

Calcula a entalpia específica do vapor d'água (kJ/kg)

```

REAL T,A,B,C,D,E(7),Y,CTE

```

```

DATA A,B,C,D/1.,4.57874342E-1,5.08441288,-1.48513244/

```

```

DATA E/-4.81351884,2.69411792,-7.39064542,1.04961689E1,-5.46840036,.0,.0/

```

```

Y=CTE(A,B,C,D,E,T)

```

```

HVAP=Y*2.0993E3

```

```

RETURN

```

```

END

```

```

-----
REAL FUNCTION CTE(A,B,C,D,E,T)
-----

```

Calcula a relação entre uma propriedade e sua respectiva no ponto crítico.

```

REAL A,B,C,D,E(7),F(7),T,TCR,TC,A1,A2,A3,A4

```

```

TCR=647.3

```

```

TC=(TCR-T)/TCR

```

```

A1=B*TC**(1./3.)

```

```

A2=C*TC**(5./6.)

```

```

A3=D*TC**(7./8.)

```

```

A4=.0

```

```

DO 10 I=1,7

```

```

  F(I)=E(I)*TC**I

```

```

  A4=A4+F(I)

```

```

CONTINUE

```

```

CTE=A+A1+A2+A3+A4

```

```

RETURN

```

END

C
C

REAL FUNCTION HLIQ(T)

C
C Calcula a entalpia específica do líquido saturado (kJ/kg)
C

REAL T,A,B,C,D,E(7),Y,CTE

A=.0

B=.0

C=.0

D=.0

C
IF(T.LT.300.)THEN

E(1)=6.24698837E2

E(2)=-2.34385369E3

E(3)=-9.50812101E3

E(4)=7.16287928E4

E(5)=-1.63535221E5

E(6)=1.66531093E5

E(7)=-6.478544585E4

ELSE

IF(T.GE.300.0.AND.T.LT.600.)THEN

A=8.839230108E-1

E(1)=-2.67172935

E(2)=6.22640035

E(3)=-1.31789573E1

E(4)=-1.91322436

E(5)=6.87937653E1

E(6)=-1.24819906E2

E(7)=7.21435404E1

ELSE

IF(T.GE.600.0.AND.T.LE.647.3)THEN

A=1.

B=-4.41057805E-1

C=-5.52255517

D=6.43994847

E(1)=-1.64578795

E(2)=-1.30574143

DO 10 I=3,7

E(I)=0.0

10 CONTINUE

END IF

END IF

END IF
Y=CTE(A,B,C,D,E,T)

HLIQ=Y*2.0993E3

RETURN

END

C
C

REAL FUNCTION HLAT(T)

C
C Calor latente de vaporização/condensação (kJ/kg.
C

REAL T,A,B,C,D,E(7),Y,CTE

DATA A,B,C,D/.0,.779221,4.62668,-1.07931/

DATA E/-3.87446,2.94553,-8.06395,11.5633,-6.02884,.0,.0/

```

C
    Y=CTE(A,B,C,D,E,T)
    HLAT=Y*2500.9
    RETURN
    END

C
C
    -----
    REAL FUNCTION SVAP(T)
    -----
    Calcula a entropia específica do vapor saturado (kJ/kg K)

    REAL T,A,B,C,D,E(7),Y,CTE
    DATA E/-4.34839,1.34672,1.75261,-6.22295,9.99004,.0,.0/
    DATA A,B,C,D/1.,.377391,-2.7868,6.93135/

C
    Y=CTE(A,B,C,D,E,T)
    SVAP=Y*4.4289
    RETURN
    END

C
C
    -----
    REAL FUNCTION SLIQ(T)
    -----
    Calcula a entropia específica do líquido saturado (kJ/kg K), para temperatura de
    vapor de ate 599,9 K.

    REAL T,A,B,C,D,E(7),Y,CTE
    A=.0
    B=.0
    C=.0
    D=.0

C
    IF(T.LT.300.)THEN
        E(1)=-1.83692965E3
        E(2)=1.47066352E4
        E(3)=-4.31466046E4
        E(4)=4.86066733E4
        E(5)=7.99750960E3
        E(6)=-5.83339887E4
        E(7)=3.31400718E4
    ELSE
        A=9.1276291E-1
        E(1)=-1.75702956
        E(2)=1.68754095
        E(3)=5.82215341
        E(4)=-6.33354786E1
        E(5)=1.88076546E2
        E(6)=-2.52344531E2
        E(7)=1.28058531E2
    END IF
    Y=CTE(A,B,C,D,E,T)
    SLIQ=Y*4.4289
    RETURN
    END

C
C
    -----
    REAL FUNCTION VOLIQ(T)
    -----

```

```

C          Calcula o volume específico do líquido saturado (m3/kg)
C
REAL T,A,B,C,D,E(7),Y,CTE
DATA A,B,C,D/1.,-1.9153882,12.015186,-7.8464025/
DATA E/-3.888614,2.0582238,-2.0829991,8.2180004E-1,4.7549742E-1,.0,.0/
C
Y=CTE(A,B,C,D,E,T)
VOLIQ=Y*3.155E-3
RETURN
END
C
-----
C          REAL FUNCTION CP(TCH,TBS,A,M)
C          -----
C          Calcula o calor específico médio (P cte) de um gás (kJ/kg K)
C
REAL TBS,TCH,A(9),M,CPA(9)
INTRINSIC ALOG
C
CPA(1)=(1E3/(TCH-TBS))*A(1)*ALOG(TCH/TBS)
DO 10 I=2,9
  CPA(I)=CPA(I-1)+(1E3*((A(I)/(I-1))*(((TCH/1E3)**(I-1))-
    $      ((TBS/1E3)**(I-1))))/(TCH-TBS)
10 CONTINUE
CP=CPA(9)/M
RETURN
END
C
-----
C          SUBROUTINE PODER(PCS,BL,PCSC,BC,WLEN,WCAR,Y,Y3,P5,R2,TBS,MLS,
$          MLU,PCSS,PCSU,PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,HLV)
C          -----
C          Poderes caloríficos superior e inferior, seco e úmido, da lenha e do carvão residual (kJ/kg)
C
REAL PCS,PCSC,WLEN,WCAR,Y,Y3,HLV,TBS,MLS,MLU,PCSS,PCSU,PCIS,
$          PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,HLAT,R2
INTEGER BL,BC
C
Poderes caloríficos superiores da lenha
IF(BL.EQ.1)THEN
  PCSS=PCS
  PCSU=PCSS*(1-WLEN)
ELSE
  PCSU=PCS
  PCSS=PCSU/(1-WLEN)
END IF
C
Calor latente de vaporização da água à temp. ambiente (kJ/kg)
HLV=HLAT(TBS)
C
Poderes caloríficos inferiores da lenha
PCIS=PCSS-9*(Y-P5*Y3)*HLV/MLS
PCIU=PCSU-9*(Y-P5*Y3+2*R2)*HLV/MLU
C
Poderes caloríficos superiores do carvão residual

```

C

```

IF(BC.EQ.1)THEN
  PCSSC=PCSC
  PCSUC=PCSSC*(1-WCAR)
ELSE
  PCSUC=PCSC
  PCSSC=PCSUC/(1-WCAR)
END IF

```

C

C

C

Poderes caloríficos inferiores do carvão residual

```

PCISC=PCSSC-9*P5*Y3*HLV/MLS
PCIUC=PCSUC-HLV*(9*P5*Y3/MLU+WCAR)
RETURN
END

```

C

C

```

$ SUBROUTINE ETAD(FL,MFLU,MLEN,H1,H2,CPAR,TE,TS,PCSS,PCSU,PCIS,
  PCIU,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4)

```

C

C

C

Desempenho energético pelo método direto.

```

REAL MFLU,MLEN,H1,H2,CPAR,TE,TS,UTIL,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4
INTEGER FL

```

C

C

C

Efeito energético útil

```

IF(FL.NE.3)THEN
  UTIL=MFLU*(H1-H2)
ELSE
  UTIL=MFLU*CPAR*(TS-TE)
END IF

```

C

C

C

Desempenhos energéticos

```

ETAD1=(UTIL/(MLEN*PCSS))*100.
ETAD2=(UTIL/(MLEN*PCSU))*100.
ETAD3=(UTIL/(MLEN*PCIS))*100.
ETAD4=(UTIL/(MLEN*PCIU))*100.
RETURN
END

```

C

C

```

$ SUBROUTINE PCHAM(TCH,TBS,P1,P2,P3,P4,MLS,MCO2,MO2,MN2,MH2O,
  CPCO2,CPO2,CPN2,PCH)

```

C

C

C

Perdas pela chaminé (kJ/kg lenha seca)

```

REAL TCH,TBS,P1,P2,P3,P4,MLS,CPCO2,CPO2,CPN2,PGS,MCO2,MO2,MN2,
  MH2O,HLV,PVAP,PCH,ACO2(9),AO2(9),AN2(9),HLAT
$ DATA ACO2/0.,1.7640049E1,9.3726944E1,-1.3037466E2,1.5397055E2,
$ -1.3999603E2,8.3151862E1,-2.7578508E1,3.8298136/
$ DATA AO2/0.,3.3051759E1,-4.1834166E1,1.4802410E2,-2.0502229E2,
$ 1.4536800E2,-5.2290720E1,7.5770768,0./
$ DATA AN2/0.,2.8298404E1,1.2689906E1,-7.2418092E1,1.853629E2,
$ -2.2042323E2,1.3735517E2,-4.3809407E1,5.6619528/

```

C

C

Calor específico dos gases secos de chaminé (kJ/kg K)

```

C
C      CPCO2=CP(TCH,TBS,ACO2,MCO2)
C
C      CPO2=CP(TCH,TBS,AO2,MO2)
C      CPN2=CP(TCH,TBS,AN2,MN2)
C
C      Perdas associadas aos gases secos de chaminé (kJ/kg lenha seca)
C
C      PGS=(P1*MCO2*CPCO2+P2*MO2*CPO2+P4*MN2*CPN2)*(TCH-TBS)/MLS
C
C      Entalpia da água presente na chaminé (kJ/kg)
C
C      HLV=HLAT(TCH)
C
C      Perdas associadas ao vapor d'água na chaminé (kJ/kg lenha seca)
C
C      PVAP=P3*MH2O*HLV/MLS
C
C      Perdas totais pela chaminé (kJ/kg)
C
C      PCH=PGS+PVAP
C      RETURN
C      END
C
C
C      -----
C      SUBROUTINE PAREDE(SUP,COD,DM1,DM2,TMP,TBS,CNL,WLEN,S,PWALL,PPAR)
C      -----
C      Perdas de calor pelas paredes do gerador de calor (kJ/kg)
C
C      REAL DM1(6),DM2(6),TMP(6),S(6),PWALL(6),PPAR,TBS,CNL,WLEN,CNLS
C      INTEGER I,SUP,COD(6),REG(6)
C
C      Área superficial das paredes (m2)
C
C      DO 10 I=1,SUP
C          IF(COD(I).LE.2)THEN
C              S(I)=3.14159*DM1(I)*DM2(I)
C          ELSE
C              S(I)=DM1(I)*DM2(I)
C          END IF
C      CONTINUE
10
C
C      Regime de escoamento em cada parede
C
C      DO 20 I=1,SUP
C          CALL REGIME(TMP,TBS,I,DM1,REG)
20
C      CONTINUE
C
C      Perda total de calor pelas paredes (kJ/kg lenha umida)
C
C      PPAR=0.
C      DO 30 I=1,SUP
C          IF(COD(I).EQ.2.OR.COD(I).EQ.4)THEN
C              IF(REG(I).EQ.1)THEN
C                  H=1.42*((TMP(I)-TBS)/DM1(I)**0.25)
C              ELSE
C                  H=0.95*((TMP(I)-TBS)**(1./3.))
C              END IF
C          END IF
C      CONTINUE
30

```

```

ELSE
  IF(REG(I).EQ.1)THEN
    H=1.32*((TMP(I)-TBS)/DM1(I)**0.25)
  ELSE
    IF(COD(I).EQ.1)THEN
      H=1.24*((TMP(I)-TBS)**(1./3.))
    ELSE
      H=1.43*((TMP(I)-TBS)**(1./3.))
    END IF
  END IF
END IF
PWALL(I)=H*S(I)*(TMP(I)-TBS)
PPAR=PPAR+PWALL(I)
30 CONTINUE
CNLS=CNL*(1-WLEN)
PPAR=3.6*PPAR/CNLS
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE REGIME(TP,TBS,I,X,REG)

```

Verifica o regime de escoamento para convecção natural (laminar ou turbulento).

```

REAL CEV,TP(6),TBS,PR,RAY,NI,X,TMF
INTEGER I,REG(6)

```

Temperatura média de película (TMF) e coeficiente de expansão volumétrica (CEV)

```

TMF=(TP(I)+TBS)/2
CEV=1/TMF

```

Número de Prandtl (PR) e viscosidade cinemática (NI), em m²/s, referentes à TMF, por interpolação da Tabela A-5, pg.614, HOLMAN

```

PR=.708-2.2E-4*(TMF-300.)
NI=16.84E-6+7.84E-8*(TMF-300.)

```

Número de Rayleigh (Grashof x Prandtl)

```

RAY=(9.8*CEV*(TMF-TBS)*X**3./NI**2)*PR

```

Regime de escoamento (REG: 1-laminar 2-turbulento)

```

IF(RAY.GE.1.)THEN
  REG(I)=2
ELSE
  REG(I)=1
END IF
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE ETAI(PCH,PPAR,CSI,PCSS,PCSU,PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,
$ PCISC,PCIUC,ETA1,ETA2,ETA3,ETA4)

```

Desempenho energético pelo método indireto

```

REAL PCH,PPAR,CSI,PCAR1,PCAR2,PCAR3,PCAR4,PCSS,PCSU,PCIS,PCIU,
$ PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4

```

```

C
C Perdas associadas ao carvão residual não convertido (kJ/kg)
C

```

```

PCAR1=CSI*PCSSC
PCAR2=CSI*PCSUC
PCAR3=CSI*PCISC
PCAR4=CSI*PCIUC

```

```

C
ETAI1=(1-((PCH+PPAR+PCAR1)/PCSS))*100.
ETAI2=(1-((PCH+PPAR+PCAR2)/PCSU))*100.
ETAI3=(1-((PCH+PPAR+PCAR3)/PCIS))*100.
ETAI4=(1-((PCH+PPAR+PCAR4)/PCIU))*100.
RETURN
END

```

```

C
C
C SUBROUTINE FID1(MLEN,PCIS,WLEN,HLV,FL,M1,H1,H2,S1,S2,T0,T2,T1,
$ P2,P1,CPAR,RAR,CL,HL,OL,NL,EPSL,EX3S,EX3U,EXUTIL,FID11,FID12)
C

```

```

C Desempenho exergetico pelo método direto 1
C

```

```

REAL CL,HL,OL,NL,EPSL,EPSIL,MLEN,PCIS,WLEN,HLV,EX3S,EX3U,M1,H1,
$ H2,S1,S2,T0,T1,T2,P1,P2,CPAR,RAR,EXUTIL,FID11,FID12
INTEGER FL
INTRINSIC ALOG

```

```

C Correlação entre a exergia química e o PCIs da lenha
C

```

```

EPSL=EPSIL(CL,HL,OL,NL)

```

```

C Exergia química da lenha seca e umida (kJ/h)
C

```

```

EX3S=MLEN*EPSL*PCIS
EX3U=MLEN*EPSL*(PCIS+WLEN*HLV)

```

```

C Efeito exergetico útil (kJ/h) - geração de vapor e água quente
C

```

```

IF(FL.LE.2)THEN
  EXUTIL=M1*(H1-H2-T0*(S1-S2))
ELSE

```

```

C Efeito exergetico útil (kJ/h) - geração de ar quente
C

```

```

  EXUTIL=M1*(CPAR*(T1-T2-T0*ALOG(T1/T2))+T0*RAR*ALOG(P1/P2))
END IF

```

```

C
FID11=(EXUTIL/EX3S)*100.
FID12=(EXUTIL/EX3U)*100.
RETURN
END

```

```

C
C REAL FUNCTION EPSIL(C,H,O,N)
C

```

```

C Relação entre a exergia química e o PCIs do combustível solido
C

```

```

C      REAL C,H,O,N
C
C      EPSIL=(1.0438+.1882*H/C-.2509*(1+.7256*H/C)+.0383*N/C)/(1-
$      .3035*O/C)
C      RETURN
C      END
C
C      -----
C      SUBROUTINE FID2(TCH,T0,MH2O,MCO2,MO2,MN2,P1,P2,P3,P4,MLU,CPCO2,
$      CPO2,CPN2,SUP,PWALL,TMP,CSI,MLEN,PCISC,WCAR,HLV,CC,HC,OC,NC,
$      EPSC,EX3S,EX3U,EXUTIL,FID21,FID22)
C      -----
C      Desempenho exergetico pelo método direto 2
C
C      REAL TCH,T0,MH2O,MCO2,MO2,MN2,P1,P2,P3,P4,MLU,CPCO2,CPO2,CPN2,
$      TERM,EXTER,EXPAR,PWALL(6),TMP(6),CC,HC,OC,NC,EPSC,M6,CSI,
$      MLEN,PCISC,WCAR,HLV,EX3S,EX3U,EX6S,EX6U,EXUTIL,FID21,FID22
C      INTEGER I,SUP
C
C      Exergia térmica dos gases de exaustão (kJ/h)
C
C      EXTER=TERM(TCH,T0,MH2O,MCO2,MO2,MN2,P1,P2,P3,P4,MLU,CPCO2,CPO2,
$      CPN2)
C
C      Exergia perdida pelas paredes do gerador de calor (kJ/h)
C
C      EXPAR=.0
C      DO 10 I=1,SUP
C          EXPAR=EXPAR+PWALL(I)*(1-T0/TMP(I))
10      CONTINUE
C      EXPAR=3.6*EXPAR
C
C      Correlação entre a exergia química e o PCIs do carvão residual
C
C      EPSC=EPSIL(CC,HC,OC,NC)
C
C      Exergia química do carvão residual seco e úmido (kJ/h)
C
C      M6=CSI*MLEN
C      EX6S=M6*EPSC*PCISC
C      EX6U=M6*EPSC*(PCISC+WCAR*HLV)
C
C      FID21=(EXUTIL/(EX3S-EXTER-EXPAR-EX6S))*100.
C      FID22=(EXUTIL/(EX3U-EXTER-EXPAR-EX6U))*100.
C      RETURN
C      END
C
C      -----
C      REAL FUNCTION TERM(T5,T0,MH2O,MCO2,MO2,MN2,P1,P2,P3,P4,MLU,
$      CPCO2,CPO2,CPN2)
C      -----
C      Exergia térmica (física+química) dos gases de chaminé (kJ/h)
C
C      REAL T5,T0,AH2O(9),MH2O,MCO2,MO2,MN2,P1,P2,P3,P4,MLU,RUNIV,
$      CPCO2,CPO2,CPN2,CPH2O,M5,CPGU,EXFIS,NT,YCO2,YO2,YN2,YH2O,
$      MCH,RCH,XGU,EXQUI
C      INTRINSIC ALOG
C      PARAMETER(RUNIV=8.314)

```

```

DATA AH2O/7.31476E-1,2.7885805E1,8.4430197,1.1985297E1,
$      -1.6092233E1,1.3636273E1,-6.4729,1.1891256,0./
C
C      Fluxo mássico dos gases úmidos (kg gases úmidos/kg lenha umida)
C
      CPH2O=CP(T5,T0,AH2O,MH2O)
      M5=(P1*MCO2+P2*MO2+P3*MH2O+P4*MN2)/MLU
C
C      Calor específico médio dos gases úmidos de chaminé (kJ/kg K)
C
      CPGU=(P1*MCO2*CPCO2+P2*MO2*CPO2+P3*MH2O*CPH2O+P4*MN2*CPN2)/
$      (P1*MCO2+P2*MO2+P3*MH2O+P4*MN2)
C
C      Exergia física dos gases úmidos de exaustão (kJ/h)
C
      EXFIS=M5*CPGU*(T5-T0*(1+ALOG(T5/T0)))
C
C      Fração molar dos componentes principais dos gases (kmol/kmol gases úmidos)
C
      NT=P1+P2+P3+P4
      YCO2=P1/NT
      YO2=P2/NT
      YH2O=P3/NT
      YN2=P4/NT
C
C      Peso molecular médio dos gases úmidos (kg/kmol)
C
      MCH=YCO2*MCO2+YO2*MO2+YH2O*MH2O+YN2*MN2
C
C      Constante dos gases de exaustão (kJ/kg K)
C
      RCH=RUNIV/MCH
C
C      Umidade molar dos gases de exaustão (kmol H2O/kmol gases secos)
C
      XGU=P3/(P1+P2+P4)
C
C      Exergia química dos gases úmidos de exaustão (kJ/h)
C
      EXQUI=M5*RCH*T0*(YCO2*ALOG(YCO2/3.E-4)+YO2*ALOG(YO2/.2099)+
$      YN2*ALOG(YN2/.7803)+YH2O*ALOG(YH2O/XGU)+ALOG(1+XGU))
C
C      Exergia térmica dos gases úmidos de exaustão (kJ/h)
C
      TERM=EXFIS+EXQUI
      RETURN
      END
C
C
      SUBROUTINE FII(FL,H1,H2,S1,S2,T0,T2,T1,T5,P2,P1,CPAR,RAR,PPAR,PCSS,
$ PCSU,PCIS,PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,CSI,SUP,TMP,ETAI1,ETAI2,
$ ETAI3,ETAI4,EPSL,EPSC,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3)
C
C      Desempenho exergético (métodos indiretos 1, 2 e 3)
C
      REAL H1,H2,S1,S2,TMT,T0,T1,T2,T5,CPAR,RAR,PPAR,PCSS,PCSU,PCIS,
$ PCIU,PCSSC,PCSUC,PCISC,PCIUC,CSI,GAMA1,GAMA2,GAMA3,GAMA4,BETA1,
$ BETA2,BETA3,BETA4,CARNOT,TMP(6),PSI1,PSI2,PSI3,PSI4,ETA1,ETA2,

```

```

$ ETA3,ETA4,ETA11,ETA12,ETA13,ETA14,CT1,CT2,CT3,EP5L,EP5C,FII11,
$ FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3
INTEGER FL,SUP
INTRINSIC ALOG

```

```

C
C
C

```

Temperatura média termodinâmica do fluido de trabalho (K)

```

IF(FL.LE.2)THEN
  TMT=(H1-H2)/(S1-S2)
ELSE
  TMT=(CPAR*(T1-T2))/(CPAR*ALOG(T1/T2)-RAR*ALOG(P1/P2))
END IF

```

```

C
C
C
C

```

Fração do calor da lenha perdida pelas paredes do sistema (GAMA) e através do carvão residual (BETA)

```

GAMA1=PPAR/PCSS
GAMA2=PPAR/PC5U
GAMA3=PPAR/PCIS
GAMA4=PPAR/PCIU
BETA1=CSI*PCSSC/PCSS
BETA2=CSI*PCSUC/PC5U
BETA3=CSI*PCISC/PCIS
BETA4=CSI*PCIUC/PCIU

```

```

C
C
C

```

Produto da fração do calor da lenha perdida pelas paredes do sistema e da eficiência de Carnot

```

PSI1=.0
PSI2=.0
PSI3=.0
PSI4=.0
DO 10 I=1,SUP
  CARNOT=1-T0/TMP(I)
  PSI1=PSI1+GAMA1*CARNOT
  PSI2=PSI2+GAMA2*CARNOT
  PSI3=PSI3+GAMA3*CARNOT
  PSI4=PSI4+GAMA4*CARNOT

```

```

10 CONTINUE

```

```

C
C
C

```

Constantes do equacionamento do desempenho exerético

```

ETA1=ETA11/100.
ETA2=ETA12/100.
ETA3=ETA13/100.
ETA4=ETA14/100.
CT1=1-T0/TMT
CT2=1-T0/T5
CT3=EP5L-CT1

```

```

C
C
C

```

Desempenho exerético, método indireto 1 (%)

```

FII11=((CT1-(1-ETA1-GAMA1-BETA1)*CT2-PSI1-EP5C*BETA1)/EP5L)*100.
FII12=((CT1-(1-ETA2-GAMA2-BETA2)*CT2-PSI2-EP5C*BETA2)/EP5L)*100.
FII13=((CT1-(1-ETA3-GAMA3-BETA3)*CT2-PSI3-EP5C*BETA3)/EP5L)*100.
FII14=((CT1-(1-ETA4-GAMA4-BETA4)*CT2-PSI4-EP5C*BETA4)/EP5L)*100.

```

```

C
C
C

```

Desempenho exerético, método indireto 2 (%)

```

$ FII21=(1-(CT3/(EPSL-((1-ETA1-GAMA1-BETA1)*CT2+PSI1+EPSC*BETA1))
$ ))*100.
$ FII22=(1-(CT3/(EPSL-((1-ETA2-GAMA2-BETA2)*CT2+PSI2+EPSC*BETA2))
$ ))*100.
$ FII23=(1-(CT3/(EPSL-((1-ETA3-GAMA3-BETA3)*CT2+PSI3+EPSC*BETA3))
$ ))*100.
$ FII24=(1-(CT3/(EPSL-((1-ETA4-GAMA4-BETA4)*CT2+PSI4+EPSC*BETA4))
$ ))*100.

```

C
C
C

Desempenho exergetico, método indireto 3 (%)

```

FII3=(CT1/EPSL)*100.
RETURN
END

```

C
C

```

$ SUBROUTINE VARIA(TH,VA,VAR,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,
$ ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,
$ FII24,FII3)

```

C
C
C

Varição dos desempenhos em função da variação dos fatores

```

$ REAL VA,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,
$ FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3,ED1(11),
$ ED2(11),ED3(11),ED4(11),EI1(11),EI2(11),EI3(11),EI4(11),FD1(11),FD2(11),
$ FD3(11),FD4(11),FI1(11),FI2(11),FI3(11),FI4(11),FI5(11),FI6(11),FI7(11),
$ FI8(11),FI9(11),A1(11),A2(11),A3(11),A4(11),B1(11),B2(11),B3(11),B4(11),
$ C1(11),C2(11),C3(11),C4(11),D1(11),D2(11),D3(11),D4(11),D5(11),D6(11),
$ D7(11),D8(11),D9(11)

```

```

INTEGER J,K
CHARACTER VAR*35
LOGICAL TH
INTRINSIC ABS

```

C

```

$ CALL IMPSEN1(VA,VAR,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,
$ ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3)
IF(VA.EQ.-0.1)THEN
  J=1
ELSE
  J=J+1
END IF
ED1(J)=ETAD1
ED2(J)=ETAD2
ED3(J)=ETAD3
ED4(J)=ETAD4
EI1(J)=ETAI1
EI2(J)=ETAI2
EI3(J)=ETAI3
EI4(J)=ETAI4
FD1(J)=FID11
FD2(J)=FID12
FD3(J)=FID21
FD4(J)=FID22
FI1(J)=FII11
FI2(J)=FII12
FI3(J)=FII13
FI4(J)=FII14
FI5(J)=FII21

```

```

FI6(J)=FII22
FI7(J)=FII23
FI8(J)=FII24
FI9(J)=FII3
IF(J.EQ.11)THEN
  DO 10 K=1,11
    A1(K)=((ED1(K)-ED1(6))/ABS(ED1(6)))*100.
    A2(K)=((ED2(K)-ED2(6))/ABS(ED2(6)))*100.
    A3(K)=((ED3(K)-ED3(6))/ABS(ED3(6)))*100.
    A4(K)=((ED4(K)-ED4(6))/ABS(ED4(6)))*100.
    B1(K)=((E11(K)-E11(6))/ABS(E11(6)))*100.
    B2(K)=((E12(K)-E12(6))/ABS(E12(6)))*100.
    B3(K)=((E13(K)-E13(6))/ABS(E13(6)))*100.
    B4(K)=((E14(K)-E14(6))/ABS(E14(6)))*100.
    C1(K)=((FD1(K)-FD1(6))/ABS(FD1(6)))*100.
    C2(K)=((FD2(K)-FD2(6))/ABS(FD2(6)))*100.
    C3(K)=((FD3(K)-FD3(6))/ABS(FD3(6)))*100.
    C4(K)=((FD4(K)-FD4(6))/ABS(FD4(6)))*100.
    D1(K)=((F11(K)-F11(6))/ABS(F11(6)))*100.
    D2(K)=((F12(K)-F12(6))/ABS(F12(6)))*100.
    D3(K)=((F13(K)-F13(6))/ABS(F13(6)))*100.
    D4(K)=((F14(K)-F14(6))/ABS(F14(6)))*100.
    D5(K)=((F15(K)-F15(6))/ABS(F15(6)))*100.
    D6(K)=((F16(K)-F16(6))/ABS(F16(6)))*100.
    D7(K)=((F17(K)-F17(6))/ABS(F17(6)))*100.
    D8(K)=((F18(K)-F18(6))/ABS(F18(6)))*100.
    D9(K)=((F19(K)-F19(6))/ABS(F19(6)))*100.
10  CONTINUE
    CALL IMPSEN2(TH,VAR,A1,A2,A3,A4,B1,B2,B3,B4,C1,C2,C3,C4,D1,D2,D3,D4,
$          D5,D6,D7,D8,D9)
    END IF
    RETURN
    END
C
C
SUBROUTINE IMPSEN1(VA,VAR,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,
$  ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,
$  FII24,FII3)
C
C      Impressão de resultados da análise de sensibilidade
C
REAL VA,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,
$  FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3
CHARACTER VAR*35
C
IF(VA.EQ.-0.1)THEN
  WRITE(5,10)VAR
10  FORMAT(//2X,7('*'),' ANALISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPE',
$      'NHO ',7('*'),//2X,'VARIABEL: ',A35)
  END IF
  WRITE(5,20)VA*100.,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,
$  FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3
20  FORMAT(/2X,'VARIACAO=',F5.1,('%'),/2X,'ETAD1=',F6.2,2X,'ETAD2=',F6.2,2X,
$  'ETAD3=',F6.2,2X,'ETAD4=',F6.2,/2X,'ETAI1=',F6.2,2X,'ETAI2=',F6.2,2X,
$  'ETAI3=',F6.2,2X,'ETAI4=',F6.2,/2X,'FID11=',F6.2,2X,'FID12=',F6.2,2X,'FID21=',F6.2,2X,
$  'FID22=',F6.2,/2X,'FII11=',F6.2,2X,'FII12=',F6.2,2X,'FII13=',F6.2,2X,'FII14=',F6.2,
$  /2X,'FII21=',F6.2,2X,'FII22=',F6.2,2X,'FII23=',F6.2,2X,'FII24=',F6.2,/2X,'FII3 =',F6.2)
  RETURN

```

```

C      END
C
C      SUBROUTINE IMPSEN2(TH,VAR,A1,A2,A3,A4,B1,B2,B3,B4,C1,C2,C3,C4,D1,D2,
$      D3,D4,D5,D6,D7,D8,D9)
C
C      Impressão de resultados da análise de sensibilidade
C
C      REAL A1(11),A2(11),A3(11),A4(11),B1(11),B2(11),B3(11),B4(11),C1(11),C2(11),
$      C3(11),C4(11),D1(11),D2(11),D3(11),D4(11),D5(11),D6(11),D7(11),D8(11),D9(11)
C      INTEGER J
C      CHARACTER VAR*35
C      LOGICAL TH
C
C      IF(TH)THEN
5      WRITE(7,5)
$      FORMAT(/1X,15('*'),' ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO DESEMPENHO',
$      16('*'))
      TH=.FALSE.
      END IF
10     WRITE(7,10)VAR
$     FORMAT(/1X,'VARIÁVEL: ',A35,16X,'Unidade: %',/1X,71('-'),/35X,'VARIACAO (%)',
$     /1X,'DESEMP',65('-'),/11X,'-10',4X,'-8',4X,'-6',4X,'-4',4X,'-2',8X,'2',5X,'4',5X,'6',5X,'8',
$     4X,'10',/1X,71('-'))
15     WRITE(7,15)(A1(J),J=1,5),(A1(J),J=7,11)
      FORMAT(1X,'ETAD1',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,20)(A2(J),J=1,5),(A2(J),J=7,11)
20     FORMAT(1X,'ETAD2',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,25)(A3(J),J=1,5),(A3(J),J=7,11)
25     FORMAT(1X,'ETAD3',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,30)(A4(J),J=1,5),(A4(J),J=7,11)
30     FORMAT(1X,'ETAD4',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,35)(B1(J),J=1,5),(B1(J),J=7,11)
35     FORMAT(1X,'ETAI1',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,40)(B2(J),J=1,5),(B2(J),J=7,11)
40     FORMAT(1X,'ETAI2',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,45)(B3(J),J=1,5),(B3(J),J=7,11)
45     FORMAT(1X,'ETAI3',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,50)(B4(J),J=1,5),(B4(J),J=7,11)
50     FORMAT(1X,'ETAI4',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,55)(C1(J),J=1,5),(C1(J),J=7,11)
55     FORMAT(1X,'FID11',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,60)(C2(J),J=1,5),(C2(J),J=7,11)
60     FORMAT(1X,'FID12',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,65)(C3(J),J=1,5),(C3(J),J=7,11)
65     FORMAT(1X,'FID21',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,70)(C4(J),J=1,5),(C4(J),J=7,11)
70     FORMAT(1X,'FID22',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,75)(D1(J),J=1,5),(D1(J),J=7,11)
75     FORMAT(1X,'FII11',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,80)(D2(J),J=1,5),(D2(J),J=7,11)
80     FORMAT(1X,'FII12',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,85)(D3(J),J=1,5),(D3(J),J=7,11)
85     FORMAT(1X,'FII13',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,90)(D4(J),J=1,5),(D4(J),J=7,11)
90     FORMAT(1X,'FII14',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
      WRITE(7,95)(D5(J),J=1,5),(D5(J),J=7,11)
95     FORMAT(1X,'FII21',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))

```

```

100 WRITE(7,100)(D6(J),J=1,5),(D6(J),J=7,11)
    FORMAT(1X,'FII22',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
105 WRITE(7,105)(D7(J),J=1,5),(D7(J),J=7,11)
    FORMAT(1X,'FII23',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
110 WRITE(7,110)(D8(J),J=1,5),(D8(J),J=7,11)
    FORMAT(1X,'FII24',3X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
115 WRITE(7,115)(D9(J),J=1,5),(D9(J),J=7,11)
    FORMAT(1X,'FII3',4X,5(F6.1),3X,5(F6.1))
120 WRITE(7,120)
    FORMAT(1X,71('-',/))
    RETURN
    END
C
C
-----
SUBROUTINE IMPRES(J,UI,ALT,TBS,TBU,FL,FLD,MFLU,PVAP,TE,TS,PE,PS,
$ MLEN,UDL,WLEN,BSL,CNL,UDCNL,PCS,ROLEN,BSC,WCAR,PCSC,CL,HL,OL,
$ NL,CC,HC,OC,NC,CSI,TCH,GAS,SUP,TMP,S,ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,
$ ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14,FII21,
$ FII22,FII23,FII24,FII3)
C
C
C      Impressão de dados e resultados do cálculo dos desempenhos
C
REAL TBS,TBU,MFLU,PVAP,TE,TS,PE,PS,MLEN,WLEN,CNL,PCS,ROLEN,WCAR,
$ PCSC,CL,HL,OL,NL,CC,HC,OC,NC,CSI,TCH,GAS,TMP(6),S(6),ETAD1,ETAD2,
$ ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,
$ FII13,FII14,FII21,FII22,FII23,FII24,FII3
INTEGER I,J,ALT,FL,SUP,UDL,UDCNL
CHARACTER UI*40,FLD*14,BSL*5,BSC*5
C
C
C      Impressão de dados
C
WRITE(3,10)UI
10  FORMAT(/2X,'**O DESEMPENHO DE SISTEMA DE COMBUSTAO A LENHA**',
$      //2X,'DADOS:',//2X,'UNIDADE INDUSTRIAL: ',A40)
WRITE(3,20)ALT,TBS-273.15,TBU-273.15,FLD,MFLU
20  FORMAT(2X,'ALTITUDE(m):',I5,2X,'TBS(C):',F5.1,2X,'TBU(C):',F5.1,/2X,
$      'FLUIDO DE TRABALHO: ',A5,/2X,'PRODUCAO(kg/h):',F7.1)
IF(FL.EQ.1)THEN
30  WRITE(3,30)PVAP*10.195,TE-273.15
    FORMAT(2X,'PRESSAO ABSOLUTA DE VAPOR(kgf/cm2):',F5.1,/2X,
$      'TEMPERATURA DA AGUA DE ALIMENTACAO(C):',F5.1)
ELSE
40  WRITE(3,40)TE-273.15,TS-273.15
    FORMAT(2X,'TEMPERATURA DE ENTRADA(C):',F5.1,/2X,'TEMPERATU',
$      'RA DE SAIDA(C):',F5.1)
END IF
IF(FL.EQ.3)THEN
50  WRITE(3,50)PE*10.195E-6,PS*10.195E-6
    FORMAT(2X,'PRESSAO DE ENTRADA(kgf/cm2):',F5.1,/2X,'PRESSAO',
$      ' DE SAIDA(kgf/cm2):',F5.1)
END IF
IF(UDL.EQ.1)THEN
60  WRITE(3,60)MLEN
    FORMAT(2X,'CONSUMO MEDIDO DE LENHA(kg/h):',F7.1)
ELSE
    MLEN=MLEN/ROLEN
    WRITE(3,70)MLEN
70  FORMAT(2X,'CONSUMO MEDIDO DE LENHA(m3/h):',F9.3)

```

```

END IF
IF(UDCNL.EQ.1)THEN
  WRITE(3,80)CNL
80  FORMAT(2X,'CONSUMO NOMINAL DE LENHA(kg/h):',F7.1)
ELSE
  CNL=CNL/ROLEN
  WRITE(3,90)CNL
90  FORMAT(2X,'CONSUMO NOMINAL DE LENHA(m3/h):',F9.3)
END IF
WRITE(3,100)ROLEN,WLEN*100.,BSL,PCS,CL,HL,OL,NL
100  FORMAT(2X,'MASSA ESPECIFICA(kg/m3):',F6.1,/2X,'UMIDADE, BASE ',
$    'UMIDA(%):',F5.1,/2X,'PODER CALORIFICO SUPERIOR, BASE ',A5,
$    '(kJ/kg):',F8.1,/2X,'ANALISE ELEMENTAR: C=',F6.2,2X,'H=',F5.2,
$    2X,'O=',F5.2,2X,'N=',F5.2)
WRITE(3,110)CSI,WCAR*100.,BSC,PCSC,CC,HC,OC,NC
110  FORMAT(2X,'CARVAO RESIDUAL(kg/kg lenha umida):',F6.4,/2X,'UMID',
$    'ADE, BASE UMIDA(%):',F5.2,/2X,'PODER CALORIFICO SUPERIOR, BAS',
$    'E ',A5,'(kJ/kg):',F8.1,/2X,'ANALISE ELEMENTAR: C=',F6.2,2X,
$    'H=',F5.2,2X,'O=',F5.2,2X,'N=',F5.2)
WRITE(3,120)TCH-273.15
120  FORMAT(2X,'GASES DE EXAUSTAO:',/2X,'TEMPERATURA(C):',F6.1)
IF(J.EQ.1)THEN
  WRITE(3,130)GAS*100.
130  FORMAT(2X,'TEOR DE CO2(%):',F5.1)
ELSE
  WRITE(3,140)GAS*100.
140  FORMAT(2X,'TEOR DE O2(%):',F5.1)
END IF
WRITE(3,150)
150  FORMAT(2X,'PAREDES DO GERADOR DE CALOR:')
DO 170 I=1,SUP
  WRITE(3,160)I,S(I),TMP(I)-273.15
160  FORMAT(2X,'SUPERFICIE',I2,':',/2X,'Area(m2)=',F6.2,2X,'Temperatura',
$    '(C)=',F6.1)
170  CONTINUE
C
C  Impressão de resultados
C
WRITE(3,180)ETAD1,ETAD2,ETAD3,ETAD4,ETAI1,ETAI2,ETAI3,ETAI4,
$    FID11,FID12,FID21,FID22,FII11,FII12,FII13,FII14
180  FORMAT(/2X,'RESULTADOS:',/2X,'DESEMPENHOS ENERGETICOS (metodo',
$    ' direto):',/2X,'ETAD1=',F6.2,2X,'ETAD2=',F6.2,2X,'ETAD3=',F6.2,2X,'ETAD4=',
$    F6.2,/2X,'DESEMPENHOS ENERGETICOS (metodo indireto):',/2X,'ETAI1=',F6.2,
$    F6.2,2X,'ETAI2=',F6.2,2X,'ETAI3=',F6.2,2X,'ETAI4=',F6.2,/2X,'DESEMPENHO ',
$    'EXERGETICO (metodo direto 1):',/2X,'FID11=',F6.2,2X,'FID12=',F6.2,/2X,
$    'DESEMPENHOS EXERGETICOS (metodo direto 2):',/2X,'FID21=',F6.2,2X,
$    'FID22=',F6.2,/2X,'DESEMPENHOS EXERGETICOS (metodo indireto 1):',/2X,
$    'FII11=',F6.2,2X,'FII12=',F6.2,2X,'FII13=',F6.2,2X,'FII14=',F6.2)
WRITE(3,190)FII21,FII22,FII23,FII24,FII3
190  FORMAT(2X,'DESEMPENHOS EXERGETICOS (metodo indireto 2):',/2X,
$    'FII21=',F6.2,2X,'FII22=',F6.2,2X,'FII23=',F6.2,2X,'FII24=',F6.2,/2X,'DESEMPENHO ',
$    'EXERGETICO (metodo indireto 3):',/2X,'FII3 =',F6.2,/)
RETURN
END

```

