PRODERNA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia

Universidade Federal do Pará

Instituto de Tecnologia

TESE DE DOUTORADO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM LOCALIDADES ISOLADAS NA AMAZÔNIA UTILIZANDO BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO

Autor: Gonçalo Rendeiro

Orientadores: Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo

Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo

PRODERNA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM LOCALIDADES ISOLADAS NA AMAZÔNIA UTILIZANDO BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO

Gonçalo Rendeiro

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do titulo de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo
Prof. Dr. Wilson Negrão Macêdo

Belém
Agosto de 2011

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM LOCALIDADES ISOLADAS NA AMAZÔNIA UTILIZANDO BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO

GONÇALO RENDEIRO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA, (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:

_____
Prof. Emanuel Negrão Macêdo, D. Sc.
PRODERNA-ITEC/UFPA – Orientador

_____
Prof. Wilson Negrão Macêdo, D. Eng.
PPGEE-ITEC/UFPA – Orientador

_____
Prof. João Nazareno Nonato Quaresma, D. Sc.
PRODERNA-ITEC/UFPA – Membro

_____
Prof. André Luiz Amarante Mesquita, D. Ing.
PRODERNA-ITEC/UFPA - Membro

_____
Prof. João Tavares Pinho, D. Ing.
PPGEE-ITEC/UFPA - Membro

_____
Prof. Ednildo Andrade Torres, D. Eng.
PEI-EP/UFBA – Membro Externo

BELÉM – PA – BRASIL

AGOSTO DE 2011

Rendeiro, Gonçalo

Geração de Energia Elétrica em Localidades Isoladas na Amazônia Utilizando Biomassa como Recurso Energético / Gonçalo Rendeiro. – Belém: UFPA/PRODERNA, 2011.

XIII, 253 p.: il.; 29,7 cm

Orientadores: Emanuel Negrão Macêdo e Wilson Negrão Macêdo

Tese (doutorado) – UFPA/ITEC/ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, 2011.

Referências Bibliográficas: p. 245-252.

1. Fontes Renováveis de Energia. 2. Geração de Energia Elétrica. 3. Biomassa.

I. Rendeiro, Gonçalo. II. Universidade Federal do Pará, ITEC, programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia.

III. Geração de Energia Elétrica em Localidades Isoladas na Amazônia Utilizando Biomassa como Recurso Energético

"Não há boa árvore que dê mau fruto, nem má árvore que dê bom fruto.

Porque cada árvore se conhece pelo seu próprio fruto. O homem bom, do bom tesouro do seu coração, tira o bem"

Jesus Cristo

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado a graça de concluir este trabalho;

Ao meu orientador Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo, pelo grande apoio dedicado nos momentos mais necessários;

Ao meu amigo Wilson Negrão Macêdo do Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas – GEDAE, pelo apoio e companheirismo em todas as fases deste trabalho;

Ao meu amigo Guto Brasil, meu incentivador de todas as horas, meu muito obrigado por todos os seus ensinamentos;

A minha família pelo apoio e compreensão;

Aos meus amigos e colaboradores do Grupo de Energia, Biomassa e Meio Ambiente (EBMA), especialmente Elden, Robson, Valter e Lázaro pelo apoio, dedicação e companheirismo.

Agradeço também ao amigo Gilberto Figueiredo do GEDAE pelo apoio na fase experimental deste trabalho.

Aos demais amigos que sempre me incentivaram em todos os momentos, e à UFPA pela oportunidade de concluir este trabalho.

RESUMO

O atendimento às localidades isoladas fora do Sistema Interligado Nacional - SIN, em especial àquelas situadas na Região Amazônica, é um fator crítico no processo de universalização da energia elétrica, uma vez que os custos de operação e manutenção (O&M) e sua logística de implantação para atendimento a estes consumidores isolados são muito elevados, considerando as mesmas condições de fornecimento dos consumidores dos grandes centros e tendo em vista estarem localizados em locais remotos, de condições de acesso e comunicação difícil e logística de transporte complexa.

Neste sentido a presente pesquisa apresenta estudo e desenvolvimento de soluções tecnológicas maduras, acopladas a modelos de gestão alternativos, que sejam adequados à realidade destes consumidores. O custo acessível levou em consideração a disponibilidade de recursos naturais na região e as vantagens inerentes a essas fontes, como redução de consumo de óleo diesel e possibilidade de agregar à geração de energia processos produtivos para as comunidades isoladas, gerando emprego e renda.

Também é apresentado um estudo experimental de um microsistema a vapor utilizando biomassa como combustível, o qual se encontra em fase de desenvolvimento, com o intuito de atender pequenos grupos de consumidores isolados na Região Amazônica. Este microsistema objetiva proporcionar um menor custo/benefício, facilidade de instalação, manutenção e operação, para demandas de até 500 W.

ABSTRACT

The supply of electricity to Brazilian isolated places– specially those communities located in Amazon Region – is a critical factor to the process of the universality of electrical energy in Brazil since the operation and maintenance (O&M) costs are too high and logistic is complex to accomplish it. That, of course, we have to consider and compare those costs and complexity to the same conditions of the consumers of big cities.

In that sense, the present work shows a study and how the development of consolidated technological solutions attached to alternative management models are suitable to the electric energy consumers (with suitable costs), aiming the availability of natural resources in Amazon region and the advantages of using those resources, resulting in less diesel consumption and the possibility to aggregate value to the energy generation in productive processes of isolated communities, additionally with job creation and increase of monetary income for the population of those communities.

An experimental study is also presented in this work showing the application of a micro electrical generation system fueled by biomass and using steam turbine. The system was developed to supply energy for small groups of isolated consumers in Amazon region, aiming lower cost-benefit ease of installation, maintenance and operation for power demands as small as 500 W.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS ..... **xv**

LISTA DE TABELAS ..... **xx**

LISTA DE SÍMBOLOS ..... **xxii**

I- INTRODUÇÃO **1**

II- TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA **5**

2.1 Tecnologias Disponíveis para Geração de Energia com Biomassa de Resíduos 6

2.2 Processos de Conversão Energética da Biomassa 16

2.2.1 Diferença entre Combustão e Gasificação 16

2.2.2 Centrais a Combustão Utilizando Turbinas ou Motores a Vapor 17

2.2.3 Centrais com Gasificação Utilizando Motores do Ciclo Otto ou Diesel 19

2.2.4 Inconvenientes da Combustão e da Gasificação 21

2.2.5 Critérios para Escolha da Tecnologia 23

2.3 Centrais Térmicas a Vapor: Combustão e Ciclo Rankine 24

2.3.1 Descrição de ciclos a vapor 24

2.3.2 Balanço Energético 27

2.3.3 Consumo Específico de Biomassa de uma Planta a Vapor 30

2.3.4 Consumo Específico de Vapor de Turbinas e Motores 31

2.3.5 Consumo Específico de Caldeiras 32

2.3.6 Sequência para o Pré-Dimensionamento de uma Planta a Vapor 33

2.4 Procedimentos para Dimensionamento de uma Planta de Potência 34

2.4.1 Localização e Quantificação da Biomassa 34

2.4.2 Dimensionamento da Demanda Elétrica a ser Atendida pela Planta 39

2.4.2.1 Características da Localidade 40

2.4.2.2 Procedimento de Cálculo do Consumo de Energia Elétrica 41

2.4.2.3 Levantamento da Carga Elétrica.....45
2.4.2.4 Demanda Reprimida.....46
2.4.2.5 Curva de Carga.....47
2.4.2.6 Determinação da Capacidade da Planta 51
2.4.3 Critérios para Localização das Centrais Térmicas 51
2.4.4 Exemplo do Pré-Dimensionamento de uma Central a Vapor.....54
2.5 Vapor.....56
2.5.1 Ciclo a Vapor com Turbinas de Contrapressão.....56
2.5.2 Ciclo a Vapor com Turbinas de Condensação e Extração 56
2.6 Estado da Arte das Tecnologias para Geração de Energia com Turbinas e Máquinas a Vapor.....57
2.7 Gasificação.....58
2.8 Biogás 59
2.9 Células a combustível 60
2.9.1 Vantagens/ desvantagens das células de combustível 61
2.10 Potencial de Biomassa.....63
2.10.1 No Brasil.....63
2.10.2 Na Amazônia.....63
2.10.3 No Pará 64
III- DENSIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA 65
3.1 Metodologia.....66
3.2 Normatização 69
3.3 Resultados e Discussão 70
3.4 Comentários 79
IV- POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A BIOMASSA DO SETOR MADEIREIRO 80
4.1 Revisão e Histórico:.....81
4.1.1 Localização das Madeireiras 81

4.1.2 Período de Instalação.....81
4.1.3 Rendimento das Madeireiras.....81
4.1.4 Caracterização dos Resíduos 82
4.1.5 Importância do Uso da Madeira para Produção Energia Térmica e Elétrica 82
4.1.6 Inconveniências do Uso da Madeira para Energia 83
4.1.7 Características da Madeira para Combustão 83
4.1.8 Processos de Transformação da Madeira.....83
4.2 Metodologia de Avaliação do Potencial de Biomassa 84
4.2.1 Ensaios de Laboratório.....84
4.2.2 Tratamento dos Dados 85
4.2.3 Cálculos do Programa 87
4.3 Sistema de Informação Geográfica (SIG).....87
4.4 Tratamento dos Dados 88
4.4.1 Histogramas 91
4.4.2 Mapas Gerados.....92
4.4.3 As Mesorregiões 94
4.5 Metodologia dos Custos 95
4.5.1 Mapas das rotas.....101
4.5.1.1 Baixo Amazonas 101
4.5.1.2 Sudeste.....102
4.5.1.3 Sudoeste.....103
4.5.1.4 Marajó.....104
4.6 Resultados e Comentários 105
V- UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA EM QUEIMA DIRETA USANDO CICLO RANKINE 107
5.1 Ciclo Rankine 107
5.2 Equacionamento Termodinâmico para um Ciclo Rankine.....109

5.3 Cálculo das Propriedades Termodinâmicas da Água.....112

5.3.1 Formulações Matemáticas 112

5.3.1.1 Formulação para a Região de Vapor Saturado e Superaquecido 112

5.3.1.2 Energia Interna Específica.....115

5.3.1.3 Entalpia Específica 116

5.3.1.4 Entropia Específica.....116

5.3.1.5 Região de Saturação 117

5.3.1.6 Pressão de Saturação 117

5.3.1.7 Entalpia e Entropia de Vaporização.....117

5.3.1.8 Equação de Densidade de Líquido Saturado 118

5.3.1.9 Tratamento Especial na Região de Líquido Comprimido.....118

5.4 Biblioteca de Vinculo Dinâmico (DINAMIC LINK LIBRARY - DLL)...119

5.4.1 Escrevendo uma DLL em FORTRAN™ e Utilizando em VISUAL BASIC. 120

5.4.2 Descrição das Sub-Rotinas do Arquivo “PROPRIEDADES. DLL”.... 121

5.5 Simulação Computacional do Ciclo a Vapor Rankine 125

5.5.1 Formulação do Problema 125

5.5.2 Código Computacional 125

5.5.3 Simulação do Rankine Básico.....125

5.5.4 Validação do Código 127

5.5.5 Simulação Computacional do Ciclo Rankine Acoplado a um Sistema de Secagem 128

5.5.6 Análise de Resultados.....128

5.6 Comentários 130

VI- ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA 132

6.1 Descrição da Usina Piloto 133
6.2 Ensaios de Laboratório.....135
6.3 Análise Energética da Unidade Piloto 138
6.3.1 Biomassa Utilizada como Combustível na Caldeira 140
6.3.2 Metodologia do Ensaio 141
6.3.3 Potência Elétrica Gerada.....141
6.3.4 Eficiência Elétrica Medida 142
6.3.5 Eficiência Elétrica em função da Potência Gerada.....143
6.4 Comentários 144
VII- ESTUDO DE CASOS 145
7.1 Projeto MARAJÓ 146
7.1.1 Concepção do Projeto 148
7.1.2 Implantação do Projeto.....151
7.1.3 Operação.....152
7.1.4 Modelo de Gestão 153
7.1.5 Sustentabilidade do Projeto.....154
7.2 Projeto ENERMAD 155
7.2.1 Concepção do Projeto 157
7.2.2 Implantação do Projeto.....158
7.2.3 Operação.....160
7.2.4 Modelo de Gestão 160
7.2.5 Sustentabilidade do Projeto.....161
7.3 Projeto USINA FLUTUANTE- MME.....162
7.3.1 Concepção do Projeto 164
7.3.2 Implantação do Projeto.....166
7.3.3 Operação.....166
7.3.4 Modelo de Gestão 166

7.3.5 Sustentabilidade do Projeto.....167

7.4 Projeto ELETROBRÁS/BURITI 168

7.4.1 Concepção do Projeto 170

7.4.2 Implantação do Projeto.....172

7.4.3 Operação.....173

7.4.4 Modelo de Gestão 173

7.4.5 Sustentabilidade do Projeto.....173

VIII- PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO MICROTURBINA A VAPOR 175

8.1 Tecnologias de Conversão de Biomassa em Pequena e Micro Escala 176

8.2 Descrição Detalhada do Micro Sistema a Vapor 179

8.3 Sistema de Aquisição e Visualização dos Dados.....186

8.4 Resultados Experimentais.....189

8.4.1 Resultados Experimentais 1.....190

8.4.2 Resultados Experimentais 2.....196

8.5 Simulação.....197

IX- CONCLUSÕES.....202

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 204

ANEXOS.....211

Anexo I – Software Banco Madeireiras (CD).....211

Anexo II – Software Ciclo Rankine (CD) 211

Anexo III – Trabalhos Publicados.....211

Anexo IV – Procedimentos Operacionais da Micro UTE 212

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Máquina a vapor 18
Figura 2.2- Turbina a vapor concebida por De La Val em Estocolmo em 1888 18
Figura 2.3 - Sistema de geração de eletricidade por gasificação de biomassa viking 19
Figura 2.4 - Eficiência de uma caldeira de biomassa medida em novembro de 2009 21
Figura 2.5 - Esquema de um ciclo a vapor 24
Figura 2.6 - Perfil típico do consumo específico de biomassa para suprir as necessidades de usinas de geração de energia elétrica a vapor com potência na faixa de 50 a 2.000 kWe 31
Figura 2.7 - Localização de empresas produtoras de resíduos vegetais no Estado do Pará, EBMA/UFPA 2005 35
Figura 2.8 - Resultado do volume disponível de resíduos vegetais no Estado do Pará por município 37
Figura 2.9 - Mapa representativo do potencial de resíduos gerados pelo setor madeireiro no Estado do Pará 38
Figura 2.10 - Curva de carga representativa da comunidade tomada como exemplo, obtida para o período de 24 horas, segundo o Cenário de Consumo de Energia Elétrica 49
Figura 2.11 - Comportamento da demanda diária de uma comunidade hipotética 50
Figura 2.12 - Perfil do consumo de biomassa para suprir as necessidades de usinas de geração de energia elétrica a vapor com potência na faixa de 50 a 1.000 kW 55
Figura 2.13 - Eficiência para diversos sistemas de geração a biomassa 58
Figura 3.1 - Amostra de Casca de Castanha (a) Seca (b) Úmida 68
Figura 3.2 - Amostra de Fibra de Dendê (a) Seca (b) Úmida 68
Figura 3.3 - Umidificação das amostras 69
Figura 3.4 - Resultados dos ensaios de umidade 70
Figura 3.5 - Resultado de poder calorífico superior e inferior 70

Figura 3.6 - Variação do poder calorifico inferior das amostras de resíduos vegetal com a umidade base úmida 71
Figura 3.7 - Resultados dos ensaios de análise química imediata 72
Figura 3.8 - Resultados dos ensaios de umidade 73
Figura 3.9 - Resultados do poder calorífico inferior 73
Figura 3.10 - Resultados dos ensaios de densidade a granel 73
Figura 3.11 - Resultados dos ensaios de densidade energética 74
Figura 3.12 - Resultados dos ensaios de umidade das misturas 75
Figura 3.13 - Resultados do poder calorífico inferior das misturas 75
Figura 3.14 - Resultados dos ensaios de densidade a granel das misturas ... 76
Figura 3.15 - Resultados dos ensaios de densidade energética das misturas 76
Figura 3.16 - Resultados do ensaios de umidade com variação da umidade . 77
Figura 3.17 - Resultados do poder calorífico inferior com variação de umidade 78
Figura 3.18 - Resultados dos ensaios de densidade a granel com variação de umidade 78
Figura 3.19 - Resultados dos ensaios de densidade energética com variação da úmida 78
Figura 4.1 - Tela de visualização do Banco de Dados 85
Figura 4.2 - Cálculo de Potencial Energético por Empresa Pesquisada 86
Figura 4.3 - Tela de visualização do Software Arcview 3.2 88
Figura 4.4 - Empresas Visitadas 89
Figura 4.5 - Volume Produzido 90
Figura 4.6 - Resíduo Gerado 90
Figura 4.7 - Potência anual Disponível 91
Figura 4.8 - Histograma do Volume Produzido 91
Figura 4.9 - Histograma do Resíduo Produzido 92
Figura 4.10 - Histograma da Potência Anual Disponível 92
Figura 4.11 - Mapa do Resíduo Disponível 93
Figura 4.12 - Mapa da Potência Anual Disponível 93
Figura 4.13 - Mapa das Mesorregiões 94
Figura 4.14 - Mapa com as rotas para Breu Branco e em seguida para Porto de Moz 102

Figura 4.15 - Mapa com as rotas de Porto de Moz para os demais municípios isolados do Baixo Amazonas 102
Figura 4.16 - Mapa com as rotas para os municípios isolados do Sudeste Paraense 103
Figura 4.17 - Mapa com as rotas para os municípios isolados do Sudoeste Paraense 103
Figura 4.18 - Mapa com as rotas para Ananindeua e depois para os municípios isolados do Marajó 104
Figura 4.19 - Mapa com as rotas para os municípios isolados do Marajó 104
Figura 5.1 - Diagrama Simplificado do Ciclo Rankine (convencional) 108
Figura 5.2 - Tela de visualização do local da dll 121
Figura 5.3 - Fluxograma da Sub-rotina CALCULOS 124
Figura 6.1 - Usina Piloto da UFPA. 134
Figura 6.2 - Diagrama esquemático da planta de potência a vapor da Unidade Piloto 139
Figura 6.3 - Eficiência do Ciclo para mixe de biomassa ensaiado 140
Figura 6.4 - Gráfico da dispersão da Potência elétrica em função do número de eventos.(dados experimentais) 142
Figura 6.5 - Gráfico da dispersão da eficiência elétrica em função do número de eventos (dados experimentais). 143
Figura 6.6 - Curva eficiência elétrica em função da potência (dados experimentais) 144
Figura 7.1 - Localização de Breves no Estado do Pará 147
Figura 7.2 - Localização do Projeto Marajó: S 01º 47,658’ W 50º 19,343’...148
Figura 7.3 - Arranjo do Projeto Marajó 149
Figura 7.4 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 200 kW 149
Figura 7.5 - Fábrica de Extração de Óleo Vegetal 150
Figura 7.6 - Fábrica de Gelo e Câmara Frigorífica 150
Figura 7.7 - Vista Geral do Projeto Marajó 152
Figura 7.8 - Localização do Projeto ENERMAD: S 00° 59' 54.1"W 50° 53' 11.7" 156
Figura 7.9 - Arranjo do Projeto ENERMAD 157
Figura 7.10 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 200 kW 158
Figura 7.11 - Vista Geral do Projeto ENERMAD 159

Figura 7.12 - Localização de Breves no Estado do Pará 163
Figura 7.13 - Localização do Projeto USINA FLUTUANTE- MME: S 00° 51' 47.2" 163
Figura 7.14 - Arranjo do Projeto USINA FLUTUANTE.....164
Figura 7.15 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 50 kW 165
Figura 7.16 - Unidade: Fábrica de Extração de Óleo Vegetal.....165
Figura 7.17 - Localização de Muaná no Estado do Pará 169
Figura 7.18 - Localização do Projeto ELETROBRÁS/BURITI -Palheta I: S 01°32'44.16" W 49° 4'50.25" . Palheta II: S 01°32'42.18" W 49° 4'52.20" 170
Figura 7.19 - Arranjo do Projeto ELETROBRÁS/BURITI 171
Figura 7.20 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 50 kW 171
Figura 7.21 - Fábrica de Extração de Óleo Vegetal 172
Figura 8.1 - Configuração básica do micro sistema de geração de eletricidade a vapor: (a) Vista geral do conjunto (b) Vista frontal do conjunto (c) Detalhe em perspectiva do conjunto micro turbina mais alternador 180
Figura 8.2 - Detalhe da tubulação de alimentação de água da caldeira e instrumentação: (a) Tubulação e medidor de fluxo de saída de água do tanque, medidor de nível de água no tanque; (b) Vista do injetor a vapor de água da caldeira, visor de nível e do Pt-100.....181
Figura 8.3 - Detalhe da tubulação de saída de vapor da caldeira para a microturbina.Válvula de controle de fluxo de vapor a partir da caldeira, medidores de temperatura e pressão do vapor, bicos de injeção de vapor 182
Figura 8.4 - Vistas explodidas do conjunto turbogerador.....183
Figura 8.5 - Micro sistema a vapor instalado no laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA: (a) Vista geral do protótipo; (b) Gerador de vapor (caldeira + fornalha) 184
Figura 8.6 - Sistema de alimentação de água do gerador de vapor: (a) Reservatório d’água; (b) Injetor d’água na caldeira.....184
Figura 8.7 - Detalhes do sistema de produção e transporte do vapor: (a)Manômetro e válvula de segurança da caldeira; (b) Tubulação de interligação do gerador de vapor a microturbina com a instrumentação de medida da pressão e temperatura do vapor; (c) Tubulação de escape de vapor 185
Figura 8.8 - Detalhes do turbogerador: (a) Turbina aberta com os bicos de injeção de vapor; (b) Acoplamento entre a turbina e o alternador.....185

Figura 8.9 - Interface gráfica desenvolvida para o sistema de aquisição de dados 187
Figura 8.10 - Vista geral do Sistema de Aquisição de Dados 187
Figura 8.11 - Tela de entrada do Sinótico.....188
Figura 8.12 - Tela dos parâmetros elétricos mostrados no Sinótico 188
Figura 8.13 - Banco de carga com lâmpadas incandescentes 189
Figura 8.14 - Variação da potência gerada e da energia acumulada ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minuto; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundo. 191
Figura 8.15 - Variação da pressão e temperatura do vapor de entrada na microturbina ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minuto; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundo.....191
Figura 8.16 - Variação da rotação e do torque resultante no eixo da microturbina ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minuto; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundo.....192
Figura 8.17 - Variação Comportamento da rotação da microturbina ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 10 minutos; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundos 193
Figura 8.18 - Curva de Consumo Específico da Turbina extrapolada para até 50 kW 196
Figura 8.19 - Teste operacional com gerador de baixa rotação.....197
Figura 8.20 - Simulação numérica para os dados de entrada do: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minutos; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundos 198
Figura 8.21 - Simulação numérica para os dados de entrada do: (a) Aumento de 1 % na eficiência da microturbina; (b) Aumento de 2 % na eficiência da microturbina.....200
Figura 8.22 - Simulação numérica para os dados de entrada do: (a) Aumento de 1 % na eficiência da microturbina; (b) Aumento de 2 % na eficiência da microturbina.....201

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Processos de conversão energética da biomassa.....7
Tabela 2.2 - Características típicas de tecnologias de geração elétrica com biomassa.....9
Tabela 2.3 - Consumos específicos típicos de tecnologias de geração elétrica com biomassa.....10
Tabela 2.4 - Níveis de produção dos principais contaminantes de diferentes gasificadores.....11
Tabela 2.5 - Composição dos gases produzidos por um gasificador, após a remoção do alcatrão, particulado e água em base seca volumétrica.....22
Tabela 2.6 - Resumo dos critérios de seleção entre sistemas de vapor e sistemas de gasificação.....23
Tabela 2.7 - Índices adotados nos cálculos.....37
Tabela 2.8 - Potência elétrica média típica de vários equipamentos domésticos.....42
Tabela 2.9 - Perfil de uso de eletrodoméstico em uma residência típica.....44
Tabela 2.10 - Equipamentos almejados pela comunidade (Demanda Reprimida).....46
Tabela 2.11 - Resumo das Variáveis a Serem Avaliadas e Considerações...54
Tabela 3.1 - Variação do PCI com a Umidade.....72
Tabela 4.1- Parâmetros utilizados nos cálculos.....86
Tabela 4.2 - Dados das Empresas/Mesorregião.....94
Tabela 4.3 - Demanda e potenciais dos municípios isolados.....96
Tabela 4.4 – Potencial a ser fornecido e distâncias.....97
Tabela 4.5 - Quantidade de resíduos e custos.....100
Tabela 5.1 - Valores das constantes para a equação 5.16.....114
Tabela 5.2 - Constantes da Equação 5.17.....115
Tabela 5.3 - - Constantes da equação.....117
Tabela 5.4 - Resultados da simulação comparados com a literatura.....127
Tabela 6.1 - Especificações técnicas dos principais equipamentos.....134
Tabela 6.2 - Relação de Sensores Instalados na Usina Piloto.....135
Tabela 6.3 - Propriedades das biomassas.....141

Tabela 6.4 - Tratamento Estatístico dos resultados experimentais 142
Tabela 6.5 - Tratamento Estatístico dos resultados experimentais 143
Tabela 8.1 - Resumo das informações do dia 24.11.2010.....194
Tabela 8.2 - Resumo das informações do dia 17.01.2011.....194

LISTA DE SÍMBOLOS

A	área
a	umidade base úmida
C	carga de energia
Ca	símbolo do elemento químico cálcio
CF	percentual de resíduo
CO	monóxido de carbono
CO_2	dióxido de carbono
C_oE_s	consumo especifico
CT	custo total
C_xH_y	combustível hidrocarboneto
d	diâmetro
DLL	dinamic link library (Biblioteca de link dinâmico)
F_p	fator depotencia
Fe	símbolo do elemento químico ferro
h	entalpia por unidade de área
H	altura
h	percentual de hidrogênio
H_2	gás hidrogênio
H_2O	fórmula molecular da água
HF	entalpia liquido saturado
HG	entalpia de vapor saturado
IAB	índice de aproveitamento de beneficiamento
IAL	índice de aproveitamento de laminado
ITAB	índice de aproveitamento da tora
K	símbolo do elemento químico potássio
$\dot{m}$	vazão mássica
Mg	símbolo do elemento químico magnésio
MRD	massa de resíduo disponível
MV	percentual de voláteis
N_2	gás nitrogênio

Na	símbolo do elemento químico sódio
NBR	denominação de norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)
NOx	óxidos de nitrogênio
NR	norma regulamentadora
O_2	gás oxigênio
Pot	potência do equipamento
P	símbolo do elemento químico fósforo
PCI	poder calorífico Inferior
PCS	poder calorífico superior
PMTA	pressão máxima de trabalho admissível
q	energia do combustível
$\dot{Q}$	taxa de transferência de calor
Q	transferência de calor
QTD	quantidade total de resíduo
s	entropia
SF	entropia de liquido saturado
SG	entropia de vapor saturado
Si	símbolo do elemento químico silício
SO_2	dióxido de enxofre
t	tempo
u	energia interna
v	velocidade superficial
V	volume
VB	volume de beneficiado
VF	volume especifico de liquido saturado
VG	volume especifico de vapor saturado
VL	volume de laminado
VRD	volume de resíduo disponível
VT	volume de tora
W	trabalho
X	fração molar

Letras Gregas

Δ	variação
η	eficiência
ρ	massa especifica
Σ	somatório
Ψ	taxa especifica de gasificação

Subscritos

b	bomba
bio	biomassa
ctv	central térmica a vapor
e	entrada
g	gás
gv	gerador de vapor
lv(25°C)	vaporização da água a 25°C
m	media
r	reator
s	saída
Sat	saturado
transp	transporte
turb	turbina
u	úmido
vc	volume de controle

Sobescritos

‘	base seca isenta de cinza
°	propriedade no estado ou na pressão padrão

I- INTRODUÇÃO

A questão energética nas comunidades isoladas da Amazônia está relacionada ao suprimento de eletricidade e ao fornecimento de combustíveis, para os quais a disponibilidade do recurso e a viabilidade técnica são essenciais na determinação de opções tecnológicas adequadas e eficientes. Não há dúvida que o uso de grupos-geradores movidos a óleo diesel apresenta uma tecnologia consolidada nestas regiões. Entretanto, sua sustentabilidade econômica é difícil, se não impossível. Torna-se necessário, então, o desenvolvimento de alternativas energéticas técnica e economicamente viáveis para estas situações.

Na Amazônia o uso de fontes renováveis é raro, à exceção de alguns pequenos aproveitamentos hidráulicos e de sistemas fotovoltaicos comunitários oriundos principalmente de projetos de pesquisas. Isto acontece não apenas por causa do custo mais elevado de implantação dessas energias ecológicas (quando comparado com motores a diesel ou a gasolina), mas principalmente em razão de a tecnologia ser mais complexa e geralmente desconhecida na região.

A energia hidráulica é considerada a melhor das fontes renováveis, por se tratar de uma energia densa, e que pode ser facilmente retirada do estoque para utilização na produção de energia elétrica (hidroeletricidade). Seu investimento é similar às energias renováveis mais utilizadas, e sua fonte primária está disponível sem custo. Ela apresenta como vantagens adicionais a simplicidade da tecnologia e o fato de o Brasil possuir o domínio sobre a mesma. Apesar disso, ainda são necessários ajustes para que os projetos se adequem à realidade social e ecológica de cada local, pois quando é construída de modo ambientalmente aceitável, e adequada com a realidade do local, suas despesas de operação são inferiores às demais alternativas energéticas. No entanto, a sazonalidade do regime fluvial em algumas regiões da Amazônia pode acarretar a redução ou até mesmo a interrupção da produção de energia, que, por se tratar de atendimento isolado, obriga a implantação de alguma outra fonte renovável ou mesmo de geração diesel que possa suprir esta deficiência.

Já o aproveitamento eólico é bastante atrativo tanto do ponto de vista ambiental como da ótica econômica, desde que implantado em locais adequados. Na Região Amazônica estas ocorrências são raras, e, quase todas, localizadas no litoral atlântico. Esta tecnologia é bastante simples, mas no Brasil ainda não temos o domínio na construção destes equipamentos, conhecidos como aerogeradores. Entretanto, nos últimos anos, têm se alcançado grandes avanços no sentido da nacionalização desta tecnologia, inclusive adequando melhor suas características à realidade de intensidade do vento no território brasileiro. Por se tratar de uma fonte primária intermitente, seu emprego em atendimentos isolados requer a existência de meios para estocar a energia produzida, e também um arranjo híbrido que possa suprir os períodos em que o vento não atende a demanda. Assim, para a geração complementar podem ser citadas as opções: solar fotovoltaico, hidroeletricidade, geração diesel, entre outras.

A energia solar fotovoltaica é a alternativa que apresenta custo de implantação mais elevado dentre as fontes renováveis comumente utilizadas. No Brasil, essa tecnologia já é conhecida, mas a produção industrial ainda é incipiente. Como se trata de uma fonte de energia intermitente se faz necessário, também, o emprego de outro tipo de geração ou armazenamento ou ambas, para manter a continuidade do fornecimento durante os períodos de pouca incidência de radiação solar.

O uso da biomassa como fonte primária de energia vem logo após a hidroeletricidade e pode significar uma ótima escolha, mesmo considerando o elevado custo inicial. Além de ser uma energia renovável, essa alternativa tem como grande vantagem ativar a economia local pela geração de postos de trabalho, em razão do uso de produtos energéticos nativos e/ou cultivados. Seus equipamentos mais comuns são a caldeira e a turbina a vapor, que apresentam tecnologia perfeitamente dominada pelo Brasil. A produção nacional comercializa modelos bastante adequados à realidade amazônica.

A classificação das tecnologias de produção de energia elétrica a partir da biomassa está associada a necessidade ou não de conversão da biomassa antes de sua combustão. Assim, um primeiro grupo de tecnologias de produção de energia se baseia na combustão direta da biomassa, enquanto que o segundo grupo de

tecnologias se baseia na queima do combustível líquido ou gasoso derivados da biomassa.

No primeiro grupo estão as tecnologias que se baseiam os ciclos a vapor, também conhecidos como ciclo Rankine. No segundo grupo estão as tecnologias que se baseiam na gasificação, biodigestão e na pirólise da biomassa.

Uma análise criteriosa do estado da arte destas tecnologias tem mostrado que somente o primeiro grupo está tecnologicamente consolidado, onde a indústria nacional já oferece todos os componentes de uma planta de potência desde 50 kW até 100 MW (Tolmasquim, M. T. – 2003) e já são consideradas como tecnologia de baixo risco.

Para o segundo grupo, exceto a biodigestão, todas as tecnologias disponíveis ainda estão em estágio de desenvolvimento e apresenta na maioria dos casos, uma inviabilidade econômica pelo elevado valor do kWh gerado.

No contexto do atendimento da demanda de energia elétrica das localidades isoladas na Amazônia a partir da biomassa, objetivo desta pesquisa, deve-se primordialmente atentar para a disponibilidade e qualidade da biomassa versus a demanda atual e reprimida de cada localidade a ser atendida. Pelos estudos e levantamentos já realizados, a potência a ser instalada nestas localidades está entre 50 kW a no máximo 200 kW, resultando em sistemas de pequeno porte com o custo projetado para a energia elétrica gerada entre R$ 0,15 e R$ 0,28 o kWh produzido e investimentos na implantação dos sistemas na faixa de R$5.000,00 à R$ 15.000,00 por kW elétrico, dependendo do nível de automação e da potência(Nogueira, M. F. M., et all. – 2008).

Alternativas de fontes renováveis como o óleo vegetal ou os gasificadores ainda estão em fase de desenvolvimento, porém alguns Projetos Piloto vêm apresentando resultados encorajadores (EBMA – Relatório Técnico ELETROBRÁS, 2011). Ressalta-se que os limites ecológicos têm de ser cuidadosamente respeitados por se tratar de sistemas energéticos destinados a ambientes onde prevalece à floresta tropical úmida.

O gás natural é outra modalidade de geração de energia para uso isolado. Sua tecnologia é consolidada embora, na região, esteja pouco testado, em especial quanto aos possíveis impactos ecológicos.

Por último, com previsão mais remota para serem utilizados, encontram-se as células a combustível e o uso do vetor hidrogênio, que apresentam tecnologias ainda incipientes e as quais ainda não possuem estudos significativos aplicados em comunidades isoladas da Amazônia.

Neste contexto e pela peculiaridade da região Amazônica, especialmente aquelas que não dispõem de elevação e cursos d’água técnicos e economicamente viáveis para implantação de sistemas hidroelétricos, esta pesquisa dá ênfase ao estudo de sistemas de geração de energia utilizando a energia química da biomassa como recurso energético, através do ciclo a vapor, procurando focar os aspectos técnicos, econômicos e sua sustentabilidade.

II- TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DA BIOMASSA

Existem diversas opções tecnológicas disponíveis para fazer uso de uma variedade de tipos de biomassa como fonte de energia renovável. Tecnologias de conversão podem liberar a energia diretamente, sob a forma de calor ou eletricidade, ou pode convertida para outras formas, tais como os biocombustíveis líquidos ou biogás combustível. Enquanto para algumas classes de recursos de biomassa pode haver um número de opções de uso, para outros pode haver apenas uma tecnologia apropriada.

Atualmente, várias tecnologias de aproveitamento de energia estão em fase de desenvolvimento e aplicação. De acordo com as perspectivas para tecnologia de conversão de energia para a produção de eletricidade global, a tendência é que a biomassa aumente sua parte atual de 1,3% para algo em torno de 3% a 5% em 2050, dependendo das suposições dos cenários (IEA, 2006). Em termos absolutos, o aumento líquido seria de cinco a oito vezes a produção atual.

Ao contrário da visão geral que se tem, o uso da biomassa deverá se manter estável ou até mesmo aumentar, devido a duas razões básicas: crescimento populacional; urbanização e melhoria nos padrões de vida. Um aumento nos padrões de vida faz com que pessoas de áreas rurais e urbanas de países em desenvolvimento passem a usar mais carvão vegetal e lenha, em lugar de resíduos (pequenos galhos de árvore, restos de materiais de construção, etc.). Ou seja, a urbanização não leva necessariamente à substituição completa da biomassa por combustíveis fósseis.

Em Lora et all - 2009, faz-se uma avaliação do potencial da geração de eletricidade e da disponibilidade de biomassa para diversos setores industriais. Em consequência, também é feita uma avaliação do potencial técnico para a geração de eletricidade baseada em combustíveis biológicos no Brasil. Além disso, apresenta modelos tecnológicos para conversão de eletricidade para diferentes biomassas.

2.1 Tecnologias Disponíveis para Geração de Energia com Biomassa de Resíduos

Existem diversas tecnologias para conversão da biomassa em combustível e para geração de energia elétrica. Neste tópico será apresentado o estágio de desenvolvimento das tecnologias disponíveis, a fim de situar, neste contexto, a conversão dos resíduos dos setores madeireiro e agroindustriais em energia elétrica, através do ciclo vapor.

Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em três grupos: processos físicos, termoquímicos e biológicos (Cortez, L. A. B., Et all. – 2008; Reis, L. B. – 2003). A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos processos de conversão da biomassa em energéticos, bem como as fontes de biomassa. Esta foi elaborada a partir de dados do Atlas de Energia Elétrica do Brasil e metodologia apresentado por (Nogueira, M. F. M., et all. – 2008).

Tabela 2.1 - Processos de conversão energética da biomassa

Tipo de Processo	Processo de Conversão	Descrição	Fonte de Biomassa	Energético
Físicos	Densificação	Processo realizado com o objetivo de aumentar a densidade de biomassa sólida e reduzir custos de armazenamento e transporte. Os pellets são obtidos por auto-aglomeração mediante a ação combinada de calor e pressão. Briquetes são os produtos de densificação que requerem aglomerantes.	Madeiras Resíduos agrícolas	Pellets, Briquetes
	Redução granulométrica	Processo realizado com o objetivo de aumentar a reatividade e a superfície específica da biomassa sólida, necessário para obtenção de boas condições de operação e elevado rendimento para tecnologias específicas, como por exemplo, fornalhas de queima em suspensão.	Madeiras	Aparas
	Prensagem mecânica	O óleo vegetal é obtido de sementes de espécies oleaginosas após processamento das sementes (secagem, trituração, aquecimento etc.), prensagem e filtragem do óleo. A torta resultante da prensagem pode ser utilizada para outras aplicações como, por exemplo, ração de animais e fabricação de carvão vegetal.	Vegetais não lenhosos Resíduos agrícolas	Óleo Vegetal
Termoquímicos	Combustão direta	Transformação da energia química dos combustíveis em calor, através das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia etc.) e caldeiras (geração de vapor etc.). Resumidamente, a reação de combustão de um combustível com ar pode ser representada segundo o seguinte esquema: Biomassa + Ar = CO_2 + SO_2 + H_2O + N_2 + O_2 + CO + H_2 + CH + fuligem + cinzas	Madeiras Resíduos (agrícolas, industriais e urbanos)	Calor Gases
	Gasificação	Processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, através de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo. Nos processos mais simples, o gás resultante contém cerca de 30% de nitrogênio e 20% de CO_2, o que significa um combustível de baixo conteúdo energético (cerca de 900 kcal/m^3)	Madeiras Resíduos (urbanos e industriais)	Gás combustível

Continuação da Tabela 2.1

Tipo de Processo	Processo de Conversão	Descrição	Fonte de Biomassa	Energético
Termoquímicos	Pirólise	O processo consiste em aquecer o material original (normalmente entre 300°C e 500°C), na "quase ausência" de ar, até que o material volátil seja retirado. O principal produto final (carvão) tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. Além de gás combustível, a pirólise produz alcatrão e ácido piro-lenhoso.	Madeiras Resíduos agrícolas	Gases combustíveis Líquidos (alcatrão, bioóleo, ácidos piro-lenhosos) Carvão
	Liquefação	Processo de produção de combustíveis líquidos por meio da reação da biomassa triturada em um meio líquido com monóxido de carbono em presença de um catalisador alcalino. (P=150-250 atm, T=300-350 °C, t=10-30 min; obtém-se um líquido viscoso que pode ser utilizado como combustível em fornos).	Madeiras Resíduos agrícolas	Bioóleo
	Craqueamento	Um reator trabalhando a altas temperaturas promove a quebra das moléculas do óleo vegetal e um catalisador remove os compostos oxigenados corrosivos.	Óleos vegetais	Biodiesel
	Transesterificação	O óleo vegetal (éster) reage com um álcool (metanol ou etanol) na presença de um catalisador, formando um éster, que é chamado de biodiesel. O biodiesel tem características físico-químicas muito semelhantes às do óleo diesel.	Óleos vegetais	Biodiesel
	Fermentação	Processo biológico anaeróbio, em que os açúcares de plantas como a batata, o milho, a beterraba e principalmente a cana-de-açúcar, são convertidos em álcool, por meio da ação de microrganismos (usualmente leveduras). Em termos energéticos, o produto final, o álcool, é composto por etanol e, em menor proporção, metanol, e pode ser usado como combustível (puro ou adicionado à gasolina – cerca de 20%) em motores de combustão interna	Vegetais não lenhosos Madeiras (após hidrólise) Resíduos agrícolas (após hidrólise)	Etanol
Biológicos	Digestão anaeróbica	O processo consiste na decomposição da biomassa pela ação de bactérias (microrganismos acidogênicos e metanogênicos). O tratamento e o aproveitamento energético de dejetos orgânicos (esterco animal, resíduos industriais, etc.) podem ser feitos através da digestão anaeróbia em biodigestores, onde o processo é favorecido pela umidade e aquecimento. Em termos energéticos, o produto final é o biogás, composto essencialmente por metano (50% a 75%) e dióxido de carbono. Seu conteúdo energético gira em torno de 5.500 kcal por metro cúbico. O efluente gerado pelo processo pode ser usado como fertilizante.	Resíduos agrícolas Vegetais não lenhosos (aquáticos) Resíduos industriais	Biogás

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. – 2008

As tecnologias de geração de energia elétrica a partir da biomassa podem ser divididas em dois grupos: aquelas que a utilizam como recurso energético primário por meio de sua combustão direta, e aquelas que fazem uso de combustíveis derivados da biomassa (gases ou líquidos).

Na primeira categoria estão as instalações baseadas em ciclos a vapor (caldeiras acopladas a máquinas ou turbinas a vapor) com queima exclusiva ou queima conjunta da biomassa com outro combustível, na segunda, estão incluídos os sistemas de gasificação da biomassa integrados a turbinas a gás, microturbina a gás, motores de combustão interna, motores Stirling ou células a combustível.

A geração de energia a partir de combustíveis derivados da biomassa traz algumas vantagens em relação à combustão direta, como por exemplo, a queima mais eficiente dos combustíveis (que são mais homogêneos) e a possibilidade de utilização de equipamentos para conversão da biomassa em energia elétrica mais eficiente tais como as turbinas a gás, os motores de combustão interna e as células a combustível. A Tabela 2.2 apresenta valores típicos relativos à potência instalada de uma usina, custo unitário de investimento (US$/kW) e o estágio de desenvolvimento das principais tecnologias aplicadas para geração de energia com biomassa.

Tabela 2.2 - Características típicas de tecnologias de geração elétrica com biomassa

Conversão da Biomassa	Tecnologia	Custo US$/kW	Potência Típica kW_e	Estágio de desenvolvimento
Combustão direta (Sem conversão)	Caldeiras + Turbinas a vapor (maior porte)	1.000	> 5.000	Disponível comercialmente
	Caldeiras + Turbinas a vapor (menor porte)	1.500 – 2.500	50 – 300	Disponível comercialmente
	Caldeiras + Motor a vapor (locomoveis)	800	< 1.000	Disponível comercialmente
Gasificação	Gasificador + Motor Stirling	2.000 - 5.000	< 40	Em desenvolvimento (incipiente)
	Gasificador + Motor combustão interna (gasogênio)	1.200	< 150	Disponível comercialmente (com restrições)
	Gasificador + Microturbina a gás	650 - 1.100	15 – 300	Em desenvolvimento (incipiente)
	Gasificador + turbina a gás	1.500 - 3.000	> 5.000	Em desenvolvimento
	Gasificador + Célula a combustível	3.000 - 4.000	250 - 5.000	Em desenvolvimento

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. – 2008

Das tecnologias para aproveitamento de biomassa apresentadas na Tabela 2.2, os sistemas que utilizam caldeiras acopladas a turbinas a vapor com porte acima de 1 MW e gasificadores de pequeno porte acoplados a motores de combustão interna, são as tecnologias cuja aplicação se tem maior experiência, com unidades geradoras operando com quantidade de horas significativas.Especialmente no ciclo a vapor, pode-se acrescentar também que apenas esta tecnologia deve ser considerada completamente desenvolvida e comercialmente disponível, uma vez que, mesmo no caso de gasificador acoplado a motor de combustão interna, em que há unidades sendo comercializadas há algum tempo, esta ainda encontra-se em fase de consolidação da tecnologia.

A Tabela 2.3 apresenta os consumos específicos para cada uma das tecnologias apresentadas (Nogueira, M. F. M., et all. – 2008).

Tabela 2.3 - Consumos específicos típicos de tecnologias de geração elétrica com biomassa

Conversão da Biomassa	Tecnologia	Consumo Específico $kg_{biomassa}/kWh$	Potência kW
Combustão direta (Sem conversão)	Caldeiras + Turbinas a vapor (maior porte)	2,5	> 1.000
	Caldeiras + Turbinas a vapor (menor porte)	8	<50
	Caldeiras + Motor a vapor (locomoveis)	5	< 1.000
Gasificação	Gasificador + Motor Stirling	0,91	200
	Gasificador + Motor combustão interna (gasogênio)	0,9	40
	Gasificador + Microturbina a gás	1,07	210
	Gasificador + turbina a gás	0,75	32.000
	Gasificador + Célula a combustível	0,58	200

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. – 2008

As tecnologias representadas por motor Stirling, microturbina a gás, célula a combustível e motor de combustão interna acoplado ao gasificador são tipicamente consideradas para faixas de potências pequenas.

Sistemas de produção de eletricidade com motores de combustão interna a partir de gasificação da biomassa já são comercializados há muito tempo (desde meados do século passado, utilizando especialmente como matéria-prima o carvão

vegetal), porém devem ser considerados em fase de desenvolvimento, em virtude de as tecnologias de limpeza dos gases ainda não terem atingido o nível de confiabilidade requerido para a operação comercial desses sistemas. Em função dessa restrição, a maioria dos fabricantes de motores não oferece garantias suficientes para unidades que são adquiridas para operar com gás de gasificação. As tecnologias de limpeza que atendem os níveis de concentração requeridos pelos motores de combustão, ou são muito caras para sistemas de pequena capacidade, ou pouco confiáveis, ou ainda, geram uma quantidade de efluentes líquidos contaminados que é inaceitável. A Tabela 2.4 apresenta os principais tipos de gasificadores de pequeno porte e os níveis de limpeza obtidos no gás resultante.

Tabela 2.4 - Níveis de produção dos principais contaminantes de diferentes gasificadores

Gasificador	Produção de Alcatrão (ppm)	Conteúdo de particulados
Contracorrente	50.000 – 200.000	Intermediário
Concorrente	100 – 1.000	Baixo
Leito Fluidizado	1.000 – 50.000	Alto

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. – 2008

Ainda quanto aos sistemas gasificador mais motor de combustão interna, existem duas alternativas tecnológicas: usar motores do ciclo Otto (gasolina), com ignição por centelhamento ou motores diesel adaptados. A opção de motores a diesel é a mais empregada em pequenos sistemas de geração com gasificadores, uma vez que os motores diesel são mais duráveis, além da maior disponibilidade no mercado. No entanto, os mesmos não podem funcionar apenas com o gás do gasificador, já que este substitui no máximo 85% do diesel. Então, na prática, deve-se contar com um percentual típico de substituição por volta de 70%. Sendo o consumo de madeira seca nestas condições de aproximadamente 1,2 kg/kWh, o consumo médio de diesel é estimado em 0,3 l/kWh. Em Nogueira et all. – 2008, são apresentados dados gerais de projetos recentes envolvendo geração de energia elétrica a partir de gasificadores acoplados a motores de combustão interna, que representam casos bem sucedidos. Nesse mesmo trabalho, são citadas as principais conclusões do “Programa de monitoramento de gasificadores de pequena escala para biomassa” iniciado em 1983 pelo Banco Mundial, a seguir:

- O consumo específico médio de biomassa dos gasificadores em operação é de 1,1 – 1,4 kg/kWh naqueles que utilizam madeira, 0,9 kg/kWh nos que utilizam carvão vegetal e 2,0 - 3,5 kg/kWh quando o combustível é a casca de arroz;
- A eficiência média do sistema gasificador - motor de combustão interna é de 13%, um valor menor que o prometido pela maioria dos fabricantes; • A fração de diesel substituída pelo gás é de 40 - 70%;
- O investimento específico em gasificadores de fabricação nacional, nos países em desenvolvimento é de 400 – 1.550 US$/ kWe, e em gasificadores importados 850 a 4.200 US$/kWe;
- Os gasificadores de biomassa para geração de potência, no geral não eram uma opção economicamente atrativa para preços do petróleo, na faixa de 15 a 20 US$/barril (preço do barril do petróleo na época da pesquisa).

A geração de energia baseada em gasificadores acoplados em motores Stirling, microturbina a gás e células a combustível, ainda não atingiram a mesma maturidade tecnológica e comercial dos sistemas com motores de combustão interna. Porém são consideradas alternativas promissoras entre as novas tecnologias com fontes alternativas.

Dependendo da tecnologia (motores Stirling, microturbina a gás e células a combustível) a limpeza requerida do gás é diferente, sendo que esta característica influencia diretamente no custo do sistema. As células a combustível são os sistemas que requerem maior nível de limpeza, visto que a maioria das pesquisas com células a combustível se baseia no uso do H_2. Para obter H_2 da biomassa através da gasificação é produzido gás com aproximadamente 20% de H_2, este gás deve ser submetido a uma limpeza e posterior reforma a fim de garantir a pureza do hidrogênio adequada, no entanto estas etapas encarecem o custo da instalação. Usando uma microturbina acoplada ao sistema gasificador, as exigências de pureza do gás são menores que para células a combustível, nos motores Stirlings as exigências de limpeza do gás são ainda menores, dadas a sua característica de aproveitar só o calor dos gases num trocador de calor. Nestes sistemas o problema das impurezas do gás pode ser resolvido com uma limpeza periódica da superfície externa das tubulações do trocador de calor.

Uma revisão do estágio de desenvolvimento das tecnologias mais incipientes representadas por motores Stirling, microturbina a gás e células a combustível, utilizando biomassa pode ser encontrada em (Sales, C. A. V. B - 2007), assim como análises de viabilidade técnico-econômica para estas tecnologias são apresentadas em (Goldemberg, J. e Villanueva, L.D. – 2003), (Cortez, L. A. B. et all – 2008) e (Nogueira, M. F. M., et all. – 2008).

A combustão direta da biomassa nos ciclos a vapor oferece a vantagem da conversão não ser tão influenciada pelo tipo, umidade e tamanho da biomassa, se comparado com a gasificação, onde estas características são bem definidas. Para pequeno porte são empregados majoritariamente motores a vapor e a pistão, no Brasil estes sistemas são chamados de “locomóveis”. Locomoveis são máquinas alternativas a vapor muito disseminadas no Brasil e também exportadas para vários países em desenvolvimento, são equipamentos pesados, de baixa eficiência e que apresentam problemas de contaminação da água pelo óleo lubrificante. O consumo de madeira se situa tipicamente por volta de 5 $kg_{biomassa}$/kWh gerado. O locomóvel incorpora motor e caldeira em uma única unidade, há também a possibilidade de montar sistemas com motor a vapor mais caldeira.

Nas atuais condições do Brasil, a opção mais econômica para a geração elétrica com queima direta de biomassa, em escala relativamente pequena, é pela utilização do sistema de caldeira + turbina a vapor onde há diversos projetos instalados com estes sistemas (na Região Sul e Sudeste) para geração de eletricidade a partir de madeira, bagaço de cana ou outros resíduos agrícolas. No entanto, a disponibilização de pequenas turbinas a vapor no mercado nacional a preços razoáveis é relativamente recente e praticamente tirou o mercado potencial das locomóveis. Observa-se que o pequeno porte mencionado neste trabalho refere-se às potências acima de 50 kW, que foi o menor porte de turbina fabricada no Brasil no período da pesquisa.

Nos últimos anos linhas completas de equipamentos (caldeiras, turbinas, geradores, painéis, sistemas de proteção e transformadores), adequados às gerações termelétricas em pequenas escalas, foram desenvolvidas. Os conceitos construtivos de tais equipamentos foram igualmente direcionados aos setores agroindustriais, florestais e madeireiros. Analogamente as tecnologias de combustão

foram adaptadas às escalas predominantes nos empreendimentos no Brasil, de maneira que atualmente pode-se considerar a indústria nacional preparada para atender a quase totalidade dos casos passíveis de serem demandados em ciclos baseados em turbinas a vapor.

Apesar de ter havido grande progresso quanto à fabricação de turbinas nacionais com potências pequenas (atualmente há fabricantes fornecendo turbinas a vapor de 50 kW), deve-se ressaltar que para sistemas com caldeira e turbina a vapor de porte muito pequeno (menor que 200 kW), o consumo específico de biomassa ainda é bastante alto (em torno de 8 kg/kWh) e o custo da caldeira necessária, assim como os dos equipamentos auxiliares e instalações, não decrescem na mesma proporção da potência, o que ocasiona um alto custo de implantação. Estas condicionantes ainda restringem esta faixa de atendimento que estaria voltada principalmente para atender a demanda de comunidades isoladas da região amazônica, com a utilização de biomassa.

Para geração elétrica em grande escala as alternativas tecnológicas basicamente são os ciclos a vapor baseados na combustão da biomassa em caldeiras convencionais, cuja tecnologia está consolidada. Porém, a eficiência de conversão é baixa (no máximo 26%) e os ciclos com turbinas a gás (incluindo ciclos combinados) alimentadas por gasificadores de biomassa apresentam eficiências na faixa de 40 a 45% (Goldemberg, J. e Villanueva, L. D. – 2003).

Os ciclos térmicos com turbinas a gás, considerados mais promissores são os sistemas BIG/GT (Biomass Integrated Gasifier Gas Turbine), nestes sistemas a biomassa é gasificada e o gás produzido, uma vez limpo (de alcatrão, cinzas, metais alcalinos e etc.), é injetado na câmara de combustão da turbina a gás. A tecnologia BIG/GT não está totalmente desenvolvida. Os principais problemas a resolver são os seguintes:

- O gás obtido no gasificador necessita ser limpo, a fim de removerem-se os particulados, alcatrão, metais alcalinos e outros compostos que podem afetar a operação da turbina a gás;
- As turbinas a gás são geralmente projetadas para operar com gás natural, que possui um poder calorífico muito maior que o poder calorífico do gás produto da gasificação da biomassa. Assim, a turbina

a gás necessita de modificações construtivas na câmara de combustão a fim de operar com maior volume de gás para uma dada potência;

- Nos gasificadores pressurizados a alimentação da biomassa pode apresentar dificuldades.

Para maior porte os sistemas utilizados no Brasil são predominantemente ciclos a vapor operando em co-geração nas indústrias de cana e papel/celulose. Com estes sistemas a produção de energia elétrica da biomassa no ano de 2009 foi de 5,4% de toda a oferta interna de energia elétrica que totalizou 466,2 TWh. (https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2010.pdf)

As tecnologias dos ciclos a vapor são conhecidas e totalmente dominadas no Brasil. Em (Reis, L. B. – 2003) são feitos alguns comentários de caráter geral quanto à capacitação da indústria brasileira em suprir os principais equipamentos dos sistemas baseados em caldeiras e turbinas a vapor. Relativamente aos geradores de vapor, o país tem larga experiência na produção desses equipamentos, especialmente para bagaço de cana-de-açúcar, as faixas de capacidades mais usuais variam de 60 a 150 toneladas de vapor por hora, sendo as pressões de geração mais usuais 2,1 MPa, 4,2 MPa e 6,3 MPa, não há restrição tecnológica quanto ao nível de pressão. As temperaturas típicas variam entre 300 e 450°C. Geradores de vapor de maior capacidade são projetados com sistema de queima em suspensão, enquanto as unidades de menor capacidade são projetadas com sistema de queima em grelha, porém com controle automático. Todos os geradores de vapor podem operar com queima simultânea de biomassa e óleo ou gás natural. Quanto à produção de turbinas a vapor, existem no país fabricantes em condições de atender boa parte da demanda potencial. São fabricadas turbinas a vapor de simples e multi-estágio, contrapressão e condensação-extração, e ainda condensação a vácuo. Em resumo, para as configurações usuais a indústria de geradores de vapor e de turbinas a vapor está em condições de suprir os principais equipamentos.

2.2 Processos de Conversão Energética da Biomassa

Neste tópico são fornecidas informações para a escolha, entre as quatro tecnologias citadas abaixo, de qual melhor atende as necessidades de geração para um caso específico. São abordadas as vantagens e desvantagens das seguintes tecnologias:

- Combustão com turbina a vapor
- Combustão com motor a vapor
- Gasificador com motor ciclo Otto
- Gasificador com motor ciclo diesel

2.2.1 Diferença entre Combustão e Gasificação

A biomassa é um hidrocarboneto, assim como a gasolina e óleo diesel, com a diferença de que já traz oxigênio na sua estrutura química. Para liberar a energia contida nas ligações químicas desses combustíveis, é preciso fazê-las reagir na presença do ar. O oxigênio do ar reage com o carbono e hidrogênio do combustível produzindo CO_2 e H_2O respectivamente. Uma vez definido o tipo de combustível e a sua quantidade, também está definida a quantidade mínima de ar, a razão ar/combustível estequiométrica.

A reação entre o combustível e o ar só ocorre se houver condições favoráveis e isso significa temperatura, pressão e relação ar/combustível corretas. Se for colocado mais ar que o necessário estequiométrico, a temperatura da chama diminui podendo chegar ao apagamento. Neste caso a mistura é denominada ‘pobre’. No caso oposto, utilizando a razão ar/combustível menor que a razão estequiométrica (mistura rica) haverá falta de oxigênio na reação e, consequentemente, pouco calor vai ser liberado o que poderá acarretar novamente a baixa da temperatura da chama podendo chegar ao apagamento.

O processo de combustão ocorre com a razão ar/combustível próxima da estequiometria. Como garantia para consumir todo o combustível, os processos de

combustão devem utilizar mistura levemente pobre, ou seja, com um pequeno excesso de ar (recomenda-se 3% de excesso de oxigênio). O processo de gasificação acontece com misturas com muita falta de ar (misturas ricas), ou seja, com razões ar/combustível no valor de aproximadamente um terço da razão ar/combustível estequiométrico.

O processo de combustão libera calor e tem como produto final gases e sólidos inertes como CO_2, H_2O e cinzas. O calor liberado é utilizado em algum processo industrial, que neste caso é a geração de vapor de água. O processo de gasificação libera muito menos calor que a combustão e objetiva produzir gases capazes de posteriormente vir a reagir. O gás produto da gasificação é composto por CO, H_2 (estes dois denominados de gás de síntese), CH_4, alcatrão, além de gases inertes como o CO_2 e N_2. Esses gases podem ser utilizados tanto como insumo em processos químicos ou como combustível em motores de combustão interna.

2.2.2 Centrais a Combustão Utilizando Turbinas ou Motores a Vapor

Essas centrais são compostas por uma caldeira acoplada a uma máquina a vapor. A caldeira queima biomassa e parte do calor liberado é utilizada para transformar água da fase líquida para vapor. A máquina a vapor tanto pode ser um motor alternativo ou uma turbina a vapor.

O motor alternativo na Figura 2.1 expande o vapor com o movimento do embolo dentro de um cilindro, o qual está ligado a um eixo que gira acionando o gerador elétrico. A máquina a vapor é fabricada no Brasil com potências na faixa de 40-250 kW. Os rendimentos dessas máquinas variam com a potência entre 20 e 30%, trabalhando com pressões de vapor entre 1 e 1,6 MPa.

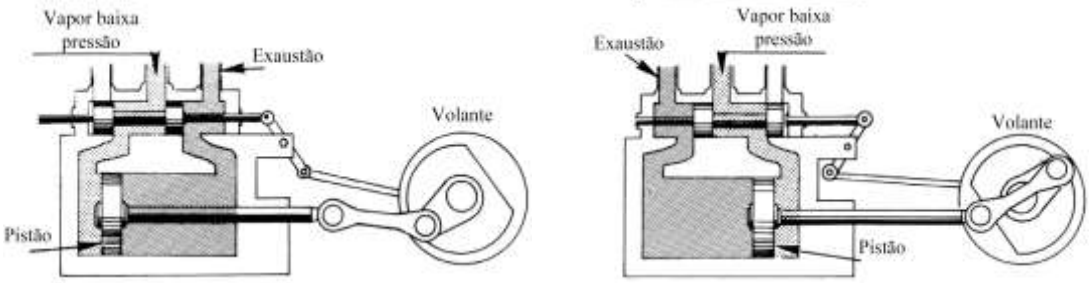


Figura 2.1 - Máquina a vapor

Turbinas a vapor possuem suas pás móveis fixadas num eixo, que por sua vez está acoplado ao eixo de um gerador. O vapor é injetado contra as pás fazendo-as girar e, por consequência, fazendo também o eixo girar. Essas turbinas são fabricadas no Brasil com potências variando entre 250 e 150.000 kW e pressão variando entre 2,2 e 12 MPa. Um exemplo do princípio de funcionamento de uma turbina a vapor pode ser visto na Figura 2.2.

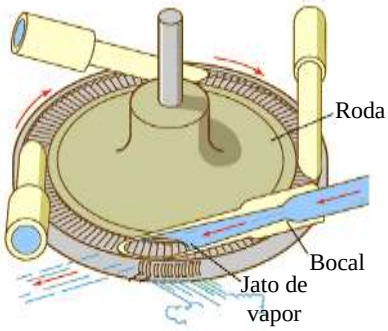


Figura 2.2- Turbina a vapor concebida por De La Val em Estocolmo em 1888

O conjunto caldeira-máquina a vapor é aplicado quando pequenas potências são requeridas na faixa de 40 - 300 kW. Este conjunto possui a eficiência e o custo de investimento de implantação inferior ao do conjunto caldeira-turbina a vapor. Por outro lado, o custo de operação e manutenção das máquinas a vapor é superior ao das turbinas a vapor.

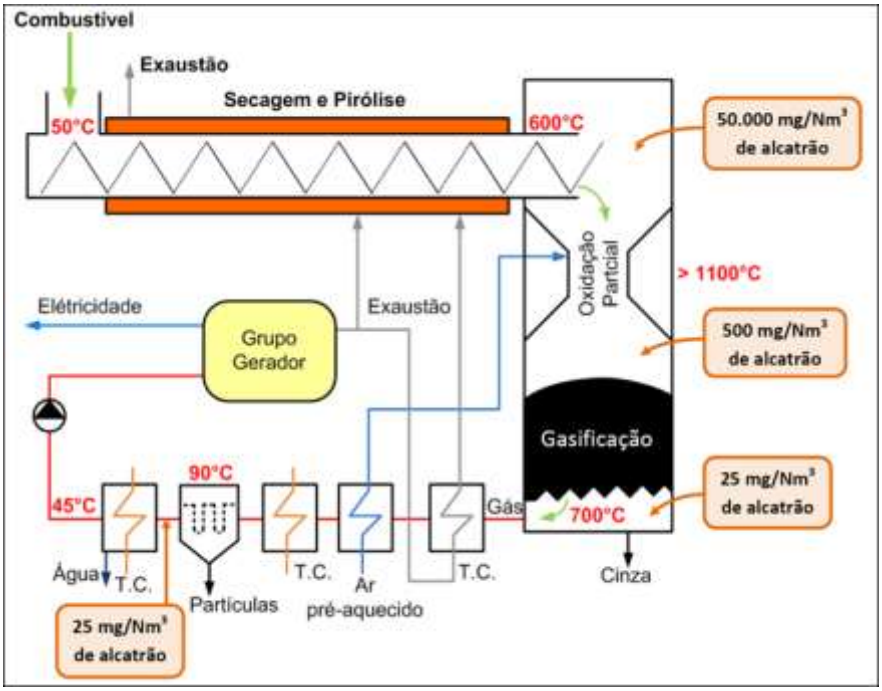
Máquinas a vapor devem ser aplicadas para gerações de pequena potência onde exista: abundância de biomassa para ser utilizada como combustível (devido a sua baixa eficiência), fácil acesso para as peças e serviços de manutenção, e ainda geração de eletricidade que possa ser intermitente ao longo do ano.

Turbinas a vapor devem ser aplicadas para potências maiores (de 200 kW a 150 MW) que requeiram uma operação contínua, eficiente e com baixo custo de operação e manutenção.

2.2.3 Centrais com Gasificação Utilizando Motores do Ciclo Otto ou Diesel

A tecnologia empregada nessas centrais ainda está em desenvolvimento, no presente momento encontra-se em estágio pré-comercial. A figura 2.3 mostra um diagrama de funcionamento de um sistema de geração de eletricidade por gasificação de biomassa.

Existem alguns fabricantes no Brasil e vários ao redor do mundo, mas todos com desempenho aquém das exigências mínimas para uma operação comercial de geração de energia elétrica. Basicamente, essas centrais possuem três componentes: o reator (gasificador), a unidade de limpeza dos gases e o grupo-gerador. No reator, a biomassa sólida é convertida em gases combustíveis quentes, ricos em alcatrão, água e particulados. O sistema de limpeza remove os poluentes e resfria o gás até a temperatura de 50°C. Esse gás é o combustível que alimenta o motor do grupo-gerador que converte a energia contida nos gases em energia elétrica.



Fonte: Knoef, H. A. M.-2005

Figura 2.3 - Sistema de geração de eletricidade por gasificação de biomassa viking

Quando operando com um motor do ciclo Otto, por centelha, o gás é injetado juntamente com o ar. Ele substitui integralmente a gasolina e qualquer motor produzido comercialmente pode ser utilizado com pequenas modificações. A dificuldade maior é encontrar grupos-geradores com motores acima de 30 kW. Isso faz com que essa tecnologia seja passível de aplicação para potências na faixa de 1-25 kW.

No caso de gasificadores operando como alimentadores de motores diesel, também o gás é introduzido juntamente com o ar, mas o diesel não é substituído integralmente, no mínimo 15% do consumo inicial de diesel ainda é injetado para iniciar a combustão dentro do cilindro, significando que esse sistema permite uma economia de 85% do consumo inicial de diesel. Essa alternativa é aplicável para potências acima de 25 kW e menor de 1 MW, por limitação tecnológica do gasificador.

Vale a pena salientar que apesar do poder calorífico do gás ser 10% do poder calorífico do diesel, os motores não têm sua potência nominal reduzida, pois a redução do poder calorífico é compensada pelo aumento do fluxo mássico do gás.

Cuidado especial se deve ter com os resíduos do gasificadores, ou seja, as cinzas, e com os resíduos do sistema de limpeza dos gases, matéria rica em particulados e alcatrão. Esses resíduos podem ser utilizados na agricultura e como insumo químico, mas por serem poluentes, não podem ser lançados no meio-ambiente.

Gasificadores acoplados a motores diesel estão disponíveis no mercado para serem aplicáveis na geração entre 1 e 500 kW que possam fornecer eletricidade de maneira intermitente. Para potências acima de 500 kW e menores de 1000 kW, os equipamentos são desenvolvidos em cooperação entre os fabricantes e os usuários(Nogueira, M. F. M., et all. - 2008).

2.2.4 Inconvenientes da Combustão e da Gasificação

As condições favoráveis para ocorrer um processo de combustão não são fáceis de serem produzidas uniformemente em todo o volume de uma câmara de combustão. Isso significa que localmente na câmara de combustão existem diferentes razões ar/combustível variando desde muito pobre até muito rica, mesmo sendo a razão ar/combustível total próximo da estequiométrica. Essa variação faz com que a composição dos gases na saída da chaminé de uma caldeira contenha além de CO_2 e H_2O, também CO, NO_x, C_xH_y e particulados. Essas quatro últimas espécies são poluentes e tóxicas. O particulado é o responsável pela formação de fumaça preta na exaustão dos gases. A caldeira também produz resíduo sólido da biomassa, composto de cinza (metais como K, Mg, Na, Ca, Si, Fe, P) e carvão residual. Quanto maiores forem esses dois resíduos, o gasoso e o sólido, menor a eficiência da combustão.

Em caldeiras industriais a eficiência nominal é de 85%, valor esse de difícil obtenção, facilmente se encontra eficiências menores de 70%, como pode ser visto na Figura 2.4.

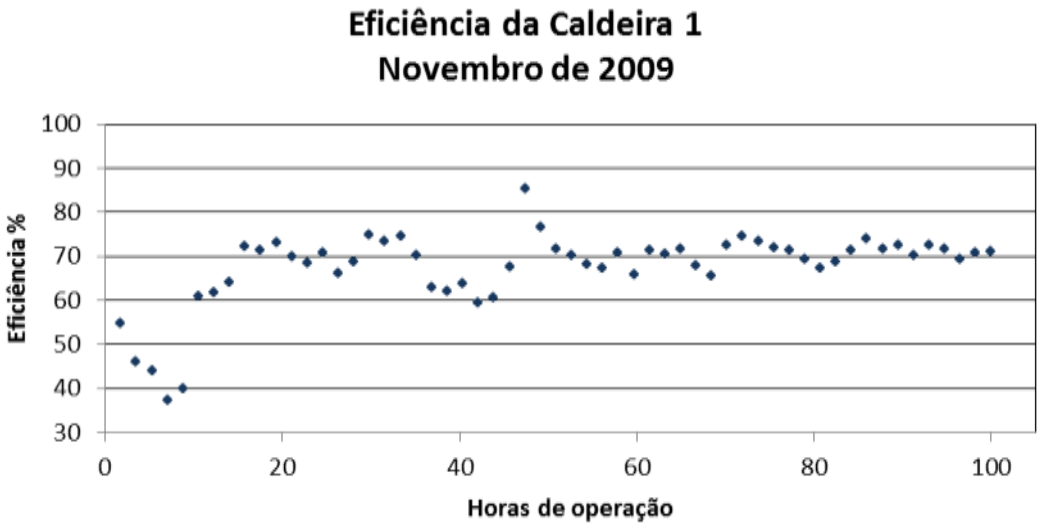


Figura 2.4 - Eficiência de uma caldeira de biomassa medida em novembro de 2009

O processo de gasificação precisa de suprimento de calor para manter-se, esse calor é resultante da combustão de uma pequena parte da biomassa a ser gasificada. A quantidade de biomassa a ser queimada é controlada pela quantidade de ar que é introduzido no reator. O calor liberado nessa combustão é utilizado para secar a biomassa, evaporar os seus compostos voláteis e gasificar o carvão residual para produzir o gás de síntese, uma composição típica desse gás pode ser vista na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Composição dos gases produzidos por um gasificador, após a remoção do alcatrão, particulado e água em base seca volumétrica.

Análise cromatográfica dos gases (% vol. b. s.)	
CO	24,8
CO_2	8,7
CH_4	1,7
H2	16,4
C_2H_4 (etileno)	0,25
C_6H_6 (benzeno)	0,14
N_2	47,3
O_2	0,71

Fonte Ushima IPT, 2001 (Ushima, A. H. - 2003)

Esse gás para ser utilizado como combustível possui as seguintes desvantagens:

- O poder calorífico é pequeno (5 MJ/kg), quando comparado com outros combustíveis fósseis (metano é 55 MJ/kg) devido, principalmente, a diluição do nitrogênio do ar.
- O alcatrão condensa a temperaturas abaixo de 120°C. Como o alcatrão líquido é polar, este adere em superfícies metálicas, causando entupimentos.
- Os gases saem do reator a altas temperaturas (acima de 500°C) e, nestas condições, não podem ser injetados no motor sob pena de redução na eficiência do motor. O gás precisa ser resfriado até a temperatura de 50°C antes de ser injetado no motor.

2.2.5 Critérios para Escolha da Tecnologia

Os ciclos a vapor, por serem uma tecnologia mais tradicional, possuem seus preços bem definidos por fabricantes que garantem o desempenho e a assistência técnica dos seus equipamentos. O custo de implantação de uma central a vapor depende de sua potência. Para potências acima de 1 MW, o valor de referência em 2008 era de US$ 1.200,00/kW, enquanto que para centrais menores, o custo referência era de US$ 1.400,00/kW. O valor referencia para manutenção e operação desse tipo de centrais era de US$ 75,00/MWh.

As centrais com gasificadores são uma tecnologia em fase de maturação, o que significa dizer que seus preços ainda são altos, os fabricantes ainda são poucos e os equipamentos não possuem garantia de desempenho. Para potências abaixo de 300 kW, o custo referência em 2008 para instalação é de US$ 3.000,00/kW e o custo de operação e manutenção de US$ 250,00/kW. Deve-se usar esses números com cautela, pois eles variam de acordo com o projeto de cada sistema. A seguir, a tabela 2.6 resume as informações descritas acima para a seleção de sistemas (Nogueira et all. - 2008).

Tabela 2.6 - Resumo dos critérios de seleção entre sistemas de vapor e sistemas de gasificação

	Equipamento			
Parâmetro de Escolha	**Caldeira + Máquina a vapor**	**Caldeira + Turbina a vapor**	**Gasificador + Motor a centelha**	**Gasificador + Motor a diesel**
Potência (kW)	40 – 250	250 – 150.000	1 – 25	25 – 500
Eficiência (%)	9 – 15	13 – 25	20 – 30	25 – 35
Maturidade tecnológica	Sim	Sim	Não	Não
Custo de investimento R$/kW	2.700	2.400 (> 1MW) 2.800 (< 1MW)	5.000	6.000
Custo de operação e manutenção US$/MWh	70	75	250	250
Intermitência de fornecimento	Sim	Não	Sim	Sim
Flexibilidade variação de carga	Sim	Pouca	Pouca	Sim
Manutenção	Frequente	Pouca	Pouca	Frequente

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. – 2008

2.3 Centrais Térmicas a Vapor: Combustão e Ciclo Rankine

Os ciclos térmicos de potência são utilizados para converter energia térmica em trabalho, podendo usar água ou gases como fluidos. Quando utilizando água, estes são denominados de ciclos a vapor ou ciclo Rankine, o rendimento destes ciclos depende diretamente da condição do vapor que é gerado na caldeira. Quanto maior for a pressão e a temperatura do vapor, mais eficiente é o ciclo devido à elevação da diferença entálpica do vapor entre a entrada e a saída da turbina ou máquina a vapor. Aumentando a pressão e a temperatura do vapor, mais robusto é o equipamento e, por conseguinte, mais elevado seu preço.

2.3.1 Descrição de ciclos a vapor

Os principais equipamentos que compõem um ciclo a vapor são: gerador de vapor (caldeira), superaquecedor, turbina ou máquina a vapor, condensador, pré-aquecedores de água e/ou ar e bombas de alimentação de água da caldeira. A Figura 2.5 apresenta de forma esquemática o ciclo a vapor. Observando a Figura 2.5, o funcionamento do ciclo é descrito a seguir.

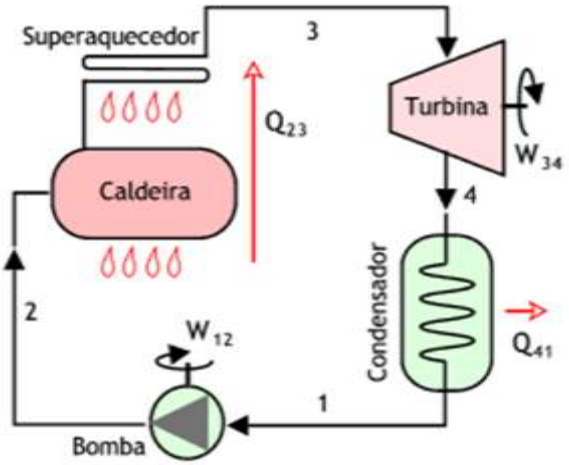


Figura 2.5 - Esquema de um ciclo a vapor

Como pode ser observado a biomassa é queimada na câmara de combustão da caldeira. O calor liberado na combustão é transferido para a água na fase líquida que está revestindo as paredes da câmara de combustão, recebendo o calor da combustão, a água passa da fase líquida para a gasosa, tornando-se vapor. Esse vapor de água é coletado na saída superior da caldeira e levado a escoar através duma serpentina imersa nos gases residuais da câmara de combustão. Como esses gases estão em alta temperatura, transfere-se calor para o vapor elevando a sua temperatura. Esse equipamento é denominado de superaquecedor. Após a saída do superaquecedor, os gases residuais são enviados para a chaminé e o vapor para a turbina. Ao entrar na turbina o vapor está na sua temperatura e pressão mais alta, e é injetado contra as pás de uma turbina fazendo girar o eixo da mesma, que por sua vez está acoplada a um gerador elétrico. A transformação de energia térmica em mecânica na turbina reduz a energia do vapor, reduzindo sua temperatura e pressão.

A ideia básica em aumentar a eficiência térmica de um ciclo a vapor está em aumentar a temperatura média em que calor é transferido para o fluido de trabalho, ou seja, a temperatura do fluido de trabalho deve ser a mais alta possível durante o processo de adição de calor pela combustão.

Um dos meios de aumentar essa temperatura é aumentando a pressão da caldeira, que automaticamente aumentará a temperatura em que a ebulição acontecerá. Consequentemente, aumentar-se-á a temperatura em que calor é transferido para o vapor, aumentando assim a eficiência do ciclo.

Outro ponto positivo em se aumentar a pressão da caldeira é a melhoria da qualidade do vapor, que por iniciar o processo de expansão com uma temperatura maior, termina o processo na saída da turbina com pequena quantidade condensada, causando menos danos erosivos nas paredes da turbina.

Existem variantes de equipamentos a serem instaladas após a turbina. A alternativa mais simples é lançar o vapor na atmosfera e esse ciclo é denominado de ciclo aberto. Como o vapor de água não é poluente, essa é a alternativa de menor investimento, mas por outro lado a de maior custo de operação, em razão do tratamento da água e a temperatura de entrada da água na caldeira. A água de alimentação da caldeira deve ser neutra e limpa, portanto precisa ser tratada e isso

tem o seu custo. Além disso, a água ambiente está próxima dos 25ºC. É então necessário elevar essa temperatura para a temperatura de vaporização gastando combustível. A maneira mais usual de reduzir os custos de operação e aumentar a eficiência é fechar o ciclo conforme mostra a Figura 2.5.

O ciclo é fechado colocando um condensador após a turbina. Esse condensador recebe o vapor de água que sai da turbina, retira seu calor o condensando e tornando-o líquido, mas a alta temperatura (aproximadamente 60ºC). O condensador transfere o calor do vapor para água do sistema de resfriamento, que eleva sua temperatura em uma dezena de graus, mas sem mudar de fase. O calor da água de resfriamento é lançado na atmosfera seja por uma torre de resfriamento ou lançando a água quente em reservatórios de água como rios e lagos.

Após sair do condensador, a água do ciclo de vapor, Figura 2.5, passa por uma bomba centrífuga onde sua pressão é elevada para a pressão de trabalho da caldeira, fechando o ciclo.

Há também os ciclos de cogeração a vapor, onde há utilização do calor rejeitado no condensador, ou extraindo uma fração ou totalidade de vapor a baixa pressão na saída da turbina para ser utilizado em processos industriais que necessitem calor. Essa utilização do calor rejeitado pelo ciclo aumenta a eficiência global do ciclo.

A Figura 2.5 apresenta um ciclo a vapor com turbina, mas esse ciclo, seja aberto ou fechado, pode ser utilizado com motores alternativos, denominados de máquinas a vapor. Diferente das turbinas a vapor, na máquina a vapor, o vapor é injetado dentro de um cilindro com o êmbolo no seu ponto morto superior, deslocando o êmbolo para o ponto morto inferior num processo de expansão que faz girar o eixo ligado ao gerador. O restante do ciclo é o mesmo.

2.3.2 Balanço Energético

Para especificar uma central a vapor no ciclo Rankine e quantificar o seu desempenho, é necessário entender os fluxos de energia no equipamento. A Figura 2.5 mostra que a energia está entrando no ciclo na caldeira na forma de calor, e na bomba na forma de trabalho mecânico (eixo girando). A energia sai do ciclo através do condensador na forma de calor e na turbina em forma de trabalho mecânico. Para fazer um balanço energético, ou seja, somar e diminuir energias é preciso definir qual sentido é positivo e qual é o negativo. A Termodinâmica define calor entrando e trabalho saindo como positivos, então as parcelas energéticas dos diversos equipamentos da Figura 2.5 seriam expressas da seguinte maneira.

Q_{cald}	Calor de combustão sendo transferido dos gases para o vapor na caldeira (entrando no ciclo)	POSITIVO
Q_{cond}	Calor removido do vapor no condensador (saindo do ciclo)	NEGATIVO
$W_{turb/motor}$	Trabalho mecânico saindo do vapor através da turbina/motor (saindo do ciclo)	POSITIVO
W_{bomb}	Trabalho mecânico entrando no ciclo através da bomba (entrando no ciclo)	NEGATIVO

Note que o ciclo Rankine pode operar tanto com uma turbina quanto com um motor alternativo, daí a notação “turb/motor”.

A lei da conservação de energia da Termodinâmica informa que num ciclo termodinâmico a soma dos fluxos de energia na forma de calor tem que ser igual a soma dos fluxos de energia na forma de trabalho.

$$Q_{cald} - Q_{cond} = W_{turb/motor} - W_{bomb} \tag{2.1}$$

A parcela da esquerda é denominada de trabalho líquido e é o que é injetado na rede elétrica, descontadas as perdas no gerador, para atender o consumidor final. Levando isso para uma central térmica, a potência do ciclo não é a potência da turbina. Essa potência tem que ser subtraída da potência requerida pelas bombas do ciclo e outras cargas parasitas.

A eficiência do ciclo é então definida como a razão entre a energia mecânica líquida fornecida pelo ciclo e o calor cedido pela caldeira para o ciclo, ou seja,

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{turb/motor} - W_{bomb}}{Q_{cald}} \tag{2.2}$$

No entanto o calor fornecido ao vapor na caldeira é uma fração do calor de reação. Parte do calor oriundo da combustão é cedido para o vapor e parte é lançado para o ambiente na energia dos gases saindo pela chaminé, e no caso de biomassas, parte da energia é perdida com os rejeitos sólidos da caldeira (carvões e cinzas). A maneira de quantificar a fração do calor de combustão que é entregue ao vapor, usa-se o conceito de eficiência da caldeira, ou seja,

$$\eta_{cald} = \frac{Q_{cald}}{Q_{comb}} \tag{2.3}$$

O calor de combustão é quantificado através do produto do poder calorífico inferior - PCI, que no caso da biomassa será usado o PCI_u, pelo fluxo de biomassa em base úmida ($m_{bio,u}$), definido por:

$$Q_{comb} = m_{bio,u} * PCI_u \tag{2.4}$$

O excesso de ar reduz o calor de reação, e em consequência reduz a quantidade de calor disponível para ser entregue ao vapor. É adotada a equação 4 para calcular o calor liberado pela reação química. Reunindo as equações (2.4) e (2.3) em (2.2)

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{turb/motor} - W_{bomb}}{\eta_{cald} * m_{bio,u} * PCI_u} \tag{2.5}$$

Essa expressão está em termos de energia (kJ), mas pode ser reescrita em termos de potência (kW) se o numerador e o denominador forem divididos por um intervalo de tempo.

A equação (2.5) permite relacionar a quantidade de biomassa a ser entregue na caldeira com a potência líquida que a turbina vai fornecer. Para isso é preciso conhecer a eficiência global do ciclo (η_{ciclo}), a eficiência da caldeira (η_{cald}) e o PCI_u, além das potências parasitas.

Para o pré-dimensionamento da planta, desprezam-se as cargas parasitas, mas é preciso levar em consideração que parte da energia entregue pelo eixo da turbina/motor ao gerador será perdida na conversão de energia mecânica em elétrica, ou seja:

$$\eta_{gerador} = \frac{W_{eletrica}}{W_{turb/motor}} \tag{2.6}$$

Substituindo as considerações acima na equação (2.6), obtém-se a equação (2.7) que será usada para o pré-dimensionamento de centrais térmicas a biomassa por combustão utilizando ciclo Rankine.

$$\dot{m}_{bio,u} = \frac{\dot{W}_{eletrica}}{\eta_{gerador} \times \eta_{cald} * \eta_{ciclo} * PCI_u} \tag{2.7}$$

A seguir estão faixas de valores típicos das eficiências da equação (2.7). Os valores crescem com o aumento da potência da central.

- Rendimento da caldeira: 80~90%;
- Rendimento do gerador: 80~95%;
- Rendimento da máquina a vapor: 20~30%
- Rendimento da turbina a vapor: 40~50%

A definição usada para escrever a equação (2.7) não envolve o condensador nem a bomba de alimentação da caldeira. A eficiência da central térmica a vapor (η_{ctv}) pode ser reescrita em termos das eficiências da caldeira, do ciclo e do gerador.

$$\eta_{ctv} = \eta_{gerador} \times \eta_{cald} \times \eta_{ciclo} \tag{2.8}$$

ou,

$$\dot{m}_{bio,u} = \frac{\dot{W}_{eletrica}}{\eta_{ctv} * PCI_u} \quad (2.9)$$

Portanto, o rendimento total esperado de uma planta a vapor com um motor a vapor situa-se numa faixa de 13% a 28%. Centrais a vapor com turbinas possuem seu rendimento entre 20 e 40%(Nogueira, M. F. M., et all. - 2008).

2.3.3 Consumo Específico de Biomassa de uma Planta a Vapor

Outra maneira de caracterizar a eficiência de uma planta a vapor consumindo biomassa é relacionando a quantidade de biomassa consumida na caldeira (kg/h) pela potência elétrica gerada (kW). Essa definição é um rearranjo da equação 2.9 é denominado de consumo específico da central térmica a vapor (CoEsctv), expresso em kg/h/kW ou kg/kWh.

$$\frac{\dot{m}_{bio,u}}{\dot{W}_{eletrica}} = \frac{1}{\eta_{ctv} * PCI_u} = CoEs_{ctv} \left[\frac{kg}{kWh}\right] \quad (2.10)$$

O consumo específico de uma planta a vapor aumenta com a diminuição da potência da central. Além disso, observando a equação (2.10) o consumo específico da planta diminui (o que é bom) com o aumento da eficiência dos componentes da central e do poder calorífico úmido do combustível. Quanto menor a umidade da biomassa, maior será o PCI_ue menor será o consumo específico da central. A título de exemplo, a Figura 2.6 mostra o perfil típico do consumo específico de biomassa para suprir as necessidades de usinas de geração de energia elétrica a vapor com potência na faixa de 50 a 2.000 kW.(Nogueira et all. - 2008).

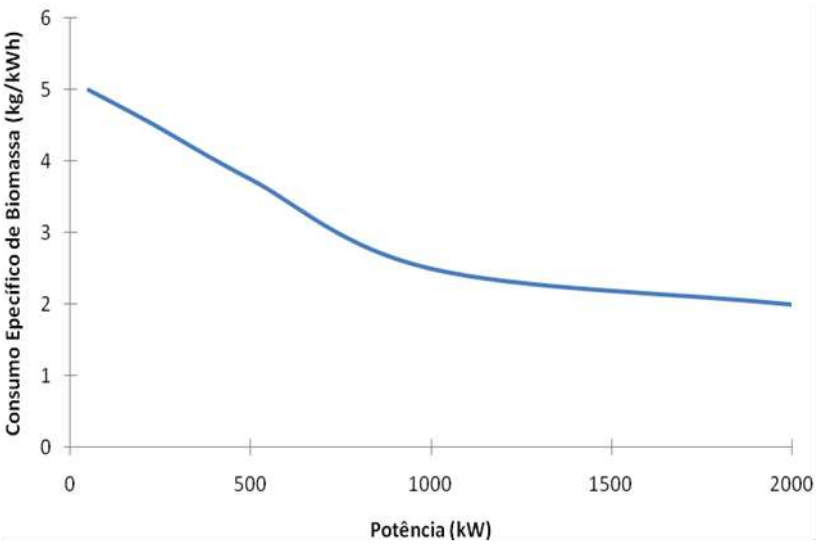


Figura 2.6 - Perfil típico do consumo específico de biomassa para suprir as necessidades de usinas de geração de energia elétrica a vapor com potência na faixa de 50 a 2.000 kWe

2.3.4 Consumo Específico de Vapor de Turbinas e Motores

Para especificar turbinas e máquinas a vapor é necessário determinar o consumo específico de vapor a ser utilizada (kg/kWh) por esses equipamentos, ou seja, quantos quilos de vapor por hora são necessários para gerar uma determinada potência. Quanto maior for este valor, mais vapor será requerido pela turbina/motor e mais combustível será consumido na caldeira. Este valor depende principalmente das características de projeto da turbina ou da máquina a vapor, ou seja, a pressão e temperatura requeridas na entrada do vapor, pressão e temperatura do vapor na saída e finalmente do rendimento da máquina térmica.

O conceito de consumo específico de vapor é oriundo da definição de eficiência isentrópica de turbina a vapor. A eficiência isentrópica de turbinas ou motores a vapor é definida como:

$$\eta_{\mathrm{turb/motor}} = \frac{\dot{W}_{\mathrm{turb/motor}}}{\dot{m}_{vapor} * \Delta h} \qquad (2.11)$$

Onde $\dot{m}_{vapor}$ é o fluxo de vapor (kg/h) e Δh é a variação da entalpia do vapor entre entrada e saída da turbina ou motor (kJ/kg). Reorganizando a equação (2.11) e usando o conceito da equação (6), obtém-se a equação (2.12).

$$\frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{W}_{eletrica}} = \frac{1}{\eta_{turb/motor} * \eta_{eletrica} * \Delta h} = \mathrm{CoEs}_{vapor} \left[\frac{kg}{kWh}\right] \quad (2.12)$$

O consumo específico de máquinas a vapor na sua condição nominal (máquina trabalha na sua condição de maior eficiência) varia entre 15 a 20 kg/h de vapor para cada 1 kW de potência produzida no gerador. Por razões construtivas, estes equipamentos não admitem pressões de entrada superiores a 1,8 MPa e estão disponíveis no mercado brasileiro para potências não superiores a 250 kW.

O consumo especifico de turbinas a vapor está na faixa de 8 a 20 kg/h de vapor para cada 1 kW de potência fornecida pelo gerador. Elas são fabricadas no Brasil desde 50 kW até 150 MW. Estas turbinas são projetadas para admitir pressões do vapor de entrada na faixa desde 0,8 até 6,0 MPa e pressões do vapor na saída desde 0,01 MPa.

2.3.5 Consumo Específico de Caldeiras

O consumo específico de caldeiras é definido como a relação entre a vazão mássica de vapor produzido e a vazão mássica de biomassa consumida pela caldeira. Essa definição é oriunda da definição da eficiência da caldeira, equação (2.3) e do cálculo do calor de combustão, equação (2.5). Re-arrumando essas equações obtém-se a equação (2.13)

$$\eta_{cald} = \frac{\dot{Q}_{cald}}{\dot{m}_{bio,u} * PCI_u} \quad (2.13)$$

O calor da caldeira absorvido pelo vapor pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{m}_{vapor} * \Delta h \quad (2.14)$$

Onde Δh é a variação da entalpia do vapor entre saída e entrada da caldeira (kJ/kg). Substituindo a equação (2.14) em equação (2.13) e reordenado temos a equação (2.15).

$$\frac{\dot{m}_{vapor}}{\dot{m}_{bio,u}} = \frac{PCI_u}{\Delta h * \eta_{cald}} \quad (2.15)$$

As caldeiras disponíveis no mercado brasileiro operam com rendimento na faixa de 85%. Uma caldeira operando a 2,1 MPa e sendo alimentada com biomassa com 50 % de umidade, para um consumo médio de 1 kg/h de biomassa ela irá produzir 4 kg/h de vapor gerado.

2.3.6 Sequência para o Pré-Dimensionamento de uma Planta a Vapor

Os parâmetros iniciais do pré-dimensionamento de uma planta a vapor são a potência nominal da planta e o consumo específico de vapor da turbina. Com eles a quantidade de biomassa a ser consumida pela caldeira pode ser calculada, o que determina o tamanho da caldeira. O dimensionamento dos demais periféricos da planta, ou seja, volume do tanque de condensado e a capacidade térmica do condensador são obtidos pela quantidade e qualidade do vapor a ser gerado por hora no ciclo termodinâmico. Portanto, para o dimensionamento da planta de geração de energia elétrica pode ser seguido à seguinte rotina:

a) Quantificar a demanda de energia a ser fornecida pela planta utilizando a curva de carga;
b) Qualificar e quantificar a biomassa disponibilizada: conhecer o poder calorífico inferior - PCI através do poder calorífico superior - PCS, obtido através da análise elementar e umidade;
c) Escolher o tipo de máquina a vapor a ser utilizada no projeto: turbina ou máquina alternativa a vapor. Nesta escolha já se define o gerador de energia

elétrica que tem que atender as condições de tensão, corrente, frequência e regime de funcionamento (contínuo ou intermitente) a que estará sendo requisitado;

d) Obter do fabricante da turbina ou máquina alternativa a vapor seu consumo específico e suas características dimensionais;
e) Calcular a quantidade de vapor necessária para atender a demanda de energia utilizando a equação (2.10);
f) Com a quantidade e qualidade do vapor requerida, definir o tamanho da caldeira e obter do fabricante suas características dimensionais. Definir o tipo de fornalha em função da biomassa disponibilizada;
g) Identificar a quantidade de biomassa a ser disponibilizada. (Uma primeira aproximação pode ser 1 kg de biomassa para cada 4 kg de vapor gerado);
h) Calcular o volume do tanque de condensado: 1,5 vezes a quantidade de vapor/h necessária no processo;
i) Dimensionar a capacidade térmica do condensador com os dados de pressão e temperatura de entrada de vapor, vazão de vapor, temperatura de saída do condensado, vazão e temperatura da água de refrigeração. Obter do fabricante suas características dimensionais;
j) Realizar um levantamento de consumo de energia da planta para definir as cargas parasitas da usina;
k) Observar as diretrizes das normas regulamentadoras do Ministério do Trabalho e Emprego, com ênfase na NR-13 - Caldeiras e Vasos de Pressão e NR-10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade;

Com estas informações torna-se possível o desenvolvimento do projeto básico de engenharia para vários tamanhos de plantas de geração de energia elétrica a vapor utilizando biomassa como combustível.

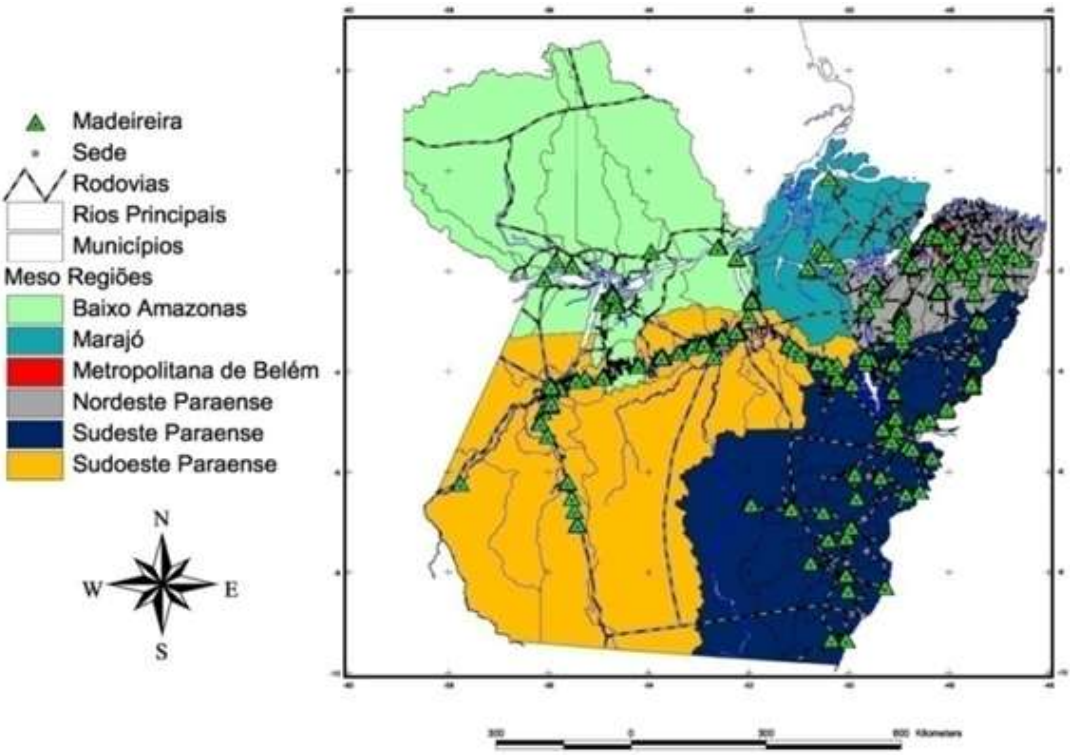
2.4 Procedimentos para Dimensionamento de uma Planta de Potência

2.4.1 Localização e Quantificação da Biomassa

O ponto de partida para o dimensionamento de uma planta de geração de energia a biomassa é a localização do material que será usado como combustível, a quantificação desse material e a sua caracterização para fins energéticos.

Devido o resíduo de biomassa ter uma massa específica aparente muito pequena, transportá-la por grandes distâncias é economicamente inviável. Estudos realizados pelo grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA – EBMA em 2009 mostram que a distância máxima economicamente viável para transporte de resíduo por via terrestre no Estado do Pará são 60 km enquanto que por via fluvial são 200 km. A planta de geração deve ficar próxima a produção do resíduo e a localização geográfica desses resíduos define a macro localização da planta. A micro localização depende de outros fatores que são vistos ainda neste capítulo.

Um exemplo desse trabalho de localização de biomassa foi realizado pelo EBMA em 2005 no Estado do Pará. O trabalho iniciou com a identificação de empresas produtoras de resíduos vegetais na junta comercial do Estado, na associação dos produtores e as empresas que obtiveram as Licenças de Operação junto a Secretaria Estadual de Meio Ambiente. Nesse levantamento foi identificado o nome da empresa, seu endereço e sua atividade produtiva. O resultado desse levantamento está na Figura 2.7.



Fonte: Pinheiro, G., et all. - 2004

Figura 2.7 - Localização de empresas produtoras de resíduos vegetais no Estado do Pará, EBMA/UFPA 2005

A etapa seguinte foi o levantamento de campo. Cada unidade produtora de resíduos foi visitadas e coletadas as seguintes informações: latitude e longitude da empresa, quantidade anual de biomassa que entra na unidade industrial em volume ou em massa ao longo de um ano e os tipos. A opção por quantificar a entrada de biomassa no processo e não o resíduo, é que o interesse final desse levantamento é quantidade mássica de resíduos. As empresas possuem controle volumétrico da entrada de biomassa como tora, no beneficiamento e na laminação, mas não possuem a quantidade de resíduos. Quantificar a massa de resíduo por medição de volume não permite quantificar a massa, pois a massa especifica aparente varia conforme a arrumação dos resíduos. Por outro lado, conhecendo a eficiência dos processos, ou seja, quanto da biomassa que entra no processo se torna resíduo, conhecendo o volume de biomassa inicial e sua massa específica, a massa de resíduos pode ser calculada.

A metodologia inicia com o levantamento do volume de biomassa em tora, beneficiada e laminada que a indústria consome e utilizando a equação 2.16, calcula-se o Volume de Resíduo Disponível (VRD).

$$VRD = VT * (1 - IAT) + VB * (1 - IAB) + VL * (1 - IAL) \quad (2.16)$$

Onde,

VRD = Volume de Resíduo Disponível, [m³/ano]
VT = Volume de tora, [m³/ano]
VB = Volume de Beneficiado, [m³/ano]
VL = Volume de laminado, [m³/ano]
IAT = Índice de Aproveitamento da Tora
IAB = Índice de Aproveitamento de Beneficiamento
IAL = Índice de Aproveitamento de Laminado

A Tabela 2.7 mostra os valores das constantes adotadas no cálculo. Note que o volume anual de resíduo disponível calculado pela equação 2.16 está em m^3. Para calcular a massa de resíduo disponível, o VRD calculado é multiplicado pela massa específica da madeira como mostrado na equação 2.17.

Tabela 2.7 - Índices adotados nos cálculos

Índice	%
Índice de Aproveitamento da Tora	55
Índice de Aproveitamento e Beneficiamento	70
Índice de Aproveitamento de Laminado	65

Fonte: EBMA/UFPA(EBMA - 2009)

$$MRD = \rho . VRD \tag{2.17}$$

Onde:

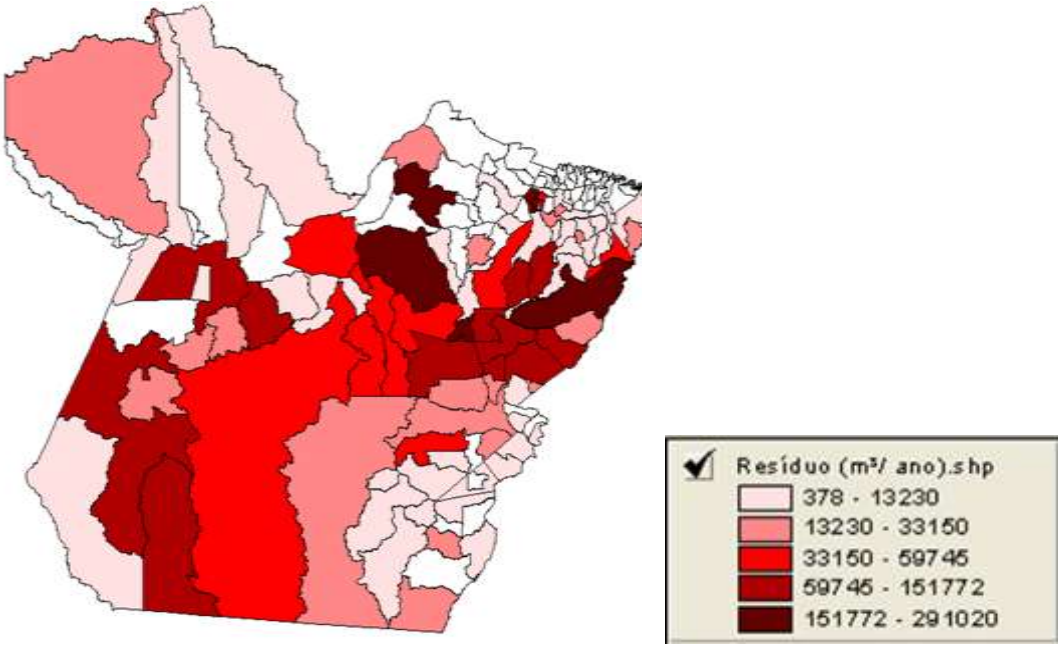
MRD.= Massa de Resíduo Disponível, [kg/ano]

VRD = Volume de Resíduo Disponível, [m^3/ano]

ρ = massa específica da madeira, [kg/m^3]

Com o resultado desse levantamento (a localização e quantificação da biomassa residual), foi elaborado um banco de dados em Access e Excel contendo o levantamento dos dados das empresas visitadas, propriedades das biomassas e as empresas foram locadas num mapa georeferenciados utilizando o programa ArcView. O resultado desse levantamento nos 143 municípios, com os totais por município está na Fonte: Pinheiro, G., et all. - 2004

Figura 2.8.



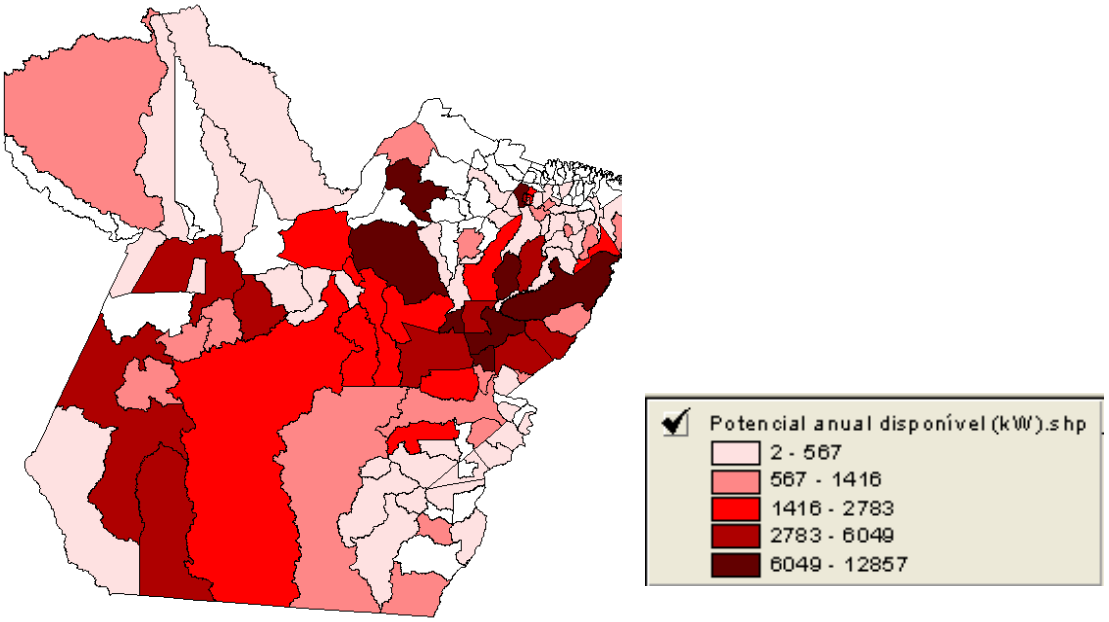
Fonte: Pinheiro, G., et all. - 2004

Figura 2.8 - Resultado do volume disponível de resíduos vegetais no Estado do Pará por município

Para que essa biomassa localizada e quantificada possa ser empregada como combustível em plantas energéticas é preciso caracterizá-la. Essa

caracterização consiste na determinação do poder calorífico superior, analise elementar e análise imediata.

Durante os levantamentos de campo, amostras dos diferentes resíduos foram coletadas e trazidos para análise laboratorial onde os parâmetros energéticos foram quantificados. Conhecendo o PCI de cada biomassa, e a quantidade anual, em massa, o produto desses dois parâmetros fornece a quantidade anual disponível de energia. Dividindo pela quantidade de segundos no ano, obtém a potência média anual dessa biomassa. A somatória dessa potência em cada município está expressa na Figura 2.9.



Fonte: Pinheiro, G., et all. - 2004

Figura 2.9 - Mapa representativo do potencial de resíduos gerados pelo setor madeireiro no Estado do Pará

O resultado desse levantamento mostrou que o setor madeireiro gera uma quantidade significativa de resíduos em função do baixo rendimento dos processos de desdobro, beneficiamento e laminação da madeira processada. São produzidos mais de 6 milhões de metros cúbicos de resíduo por ano, deste volume, em torno de 3,61 milhões de metros cúbicos tem potencial de aproveitamento para geração de energia.

Considerando a implantação de usinas a vapor, os resíduos produzidos no Estado do Pará com possibilidade de aproveitamento representam um potencial em torno de 160 MW médio, este potencial encontra-se distribuído nos municípios do Estado nas diversas empresas madeireiras, que geralmente estão localizadas próximas aos núcleos urbanos. Considerando a demanda máxima dos municípios e a disposição geográfica dos potenciais geradores, esta geração poderá ter uma penetração considerável em algumas regiões do Estado, principalmente nas regiões isoladas do setor elétrico, contribuindo para um significativo deslocamento do diesel que hoje predomina na geração elétrica destas localidades isoladas.

O aproveitamento adequado deste potencial permite também dar destinação adequada a resíduos gerados por um dos principais setores da economia do Estado do Pará, eliminar o consumo de óleo diesel para geração de energia elétrica em sistemas isolados e reduzir a emissão de CO nos Municípios isolados do Estado.

2.4.2 Dimensionamento da Demanda Elétrica a ser Atendida pela Planta

A eletrificação em comunidades isoladas na Amazônia é uma questão essencialmente social, e levar a energia a essas áreas surge como um desafio, uma conquista de cidadania, dentro de uma sociedade com desigualdades sociais e econômicas. No entanto, a maioria das tentativas de se alcançar esse desafio tem fracassado pela falta de uma avaliação detalhada do problema existente em cada comunidade em particular. De maneira geral a necessidade de suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas depende fundamentalmente das características do contexto em que ela está inserida, tais como: suas atividades econômicas e socioculturais, recursos energéticos disponíveis no local, padrões de demanda, tamanho da carga, grau de dispersão da comunidade e condições ambientais. O procedimento de avaliação se fundamenta basicamente no levantamento da carga instalada e da demanda reprimida da comunidade isolada. Tendo em vista estas informações, vários cenários energéticos podem ser criados, com o objetivo de se estimar as possíveis curvas de carga para a comunidade, as quais são de fundamental importância para qualquer tomada de decisão relacionada à solução do suprimento de energia elétrica, permitindo uma melhor visualização e

compreensão do problema de suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas na Amazônia. Portanto, o grande objetivo deste tópico é apresentar uma metodologia para a avaliação do problema de suprimento de energia elétrica em comunidades isoladas.

2.4.2.1 Características da Localidade

Este texto estabelece uma metodologia de avaliação do problema de suprimento de energia elétrica em localidades isoladas, tomando como base suas particularidades. Para isso, várias informações que caracterizem bem o uso final dessa energia necessitam ser conhecidas e trabalhadas. Dentre as informações mais relevantes para se avaliar a magnitude do sistema para atender cada localidade em particular, pode-se mencionar:

- O número de edificações;
- População residente;
- População flutuante (em caso de regiões com turismo sazonal);
- Quais as atividades socioeconômicas existentes na região (extrativismo, pesca, agricultura, etc.);
- Quais os tipos de consumidores existentes (comercial, industrial ou residencial);
- Localização e tipo de clima existente.

Além das informações anteriores, outras informações complementares se fazem necessárias, tais como:

- Se há uso de energia elétrica na localidade (por exemplo, uso de energia proveniente de grupo gerador a diesel);
- Se houver uso de energia, quais equipamentos estão instalados;
- Se, além da energia elétrica, existe o uso de outros energéticos que possam ser substituídos por energia elétrica;

- Quais as aspirações futuras em termos de aquisição de novos equipamentos.

O último aspecto mencionado é importante para se avaliar qual a demanda reprimida que deve ser considerada pelo sistema de fornecimento de energia elétrica.

Com base nessas informações, vários cenários energéticos podem ser elaborados, com o objetivo de estimar as possíveis curvas de carga passíveis de serem atendidas pela unidade de geração. Essas curvas são utilizadas na tomada de decisão relacionada à solução do suprimento de energia elétrica, permitindo uma melhor visualização e compreensão desse problema em cada caso em particular.

2.4.2.2 Procedimento de Cálculo do Consumo de Energia Elétrica

Para calcular o consumo de energia elétrica de um dado equipamento ou de um conjunto de equipamentos numa residência, indústria, comércio, etc. É necessário, antes de tudo, conhecer a potência de cada equipamento. Inicialmente deve-se procurar nos manuais dos fabricantes dos equipamentos tais informações. Caso não tenha disponibilidade, usar valores típicos por equipamento. Em seguida é feito os cálculos da seguinte forma:

i) Para um equipamento: potência do equipamento (W) x número de horas utilizadas durante o dia, dividido por 1000;

$$C_{unitaria} = \frac{P \times t}{1000} \qquad [\text{kWh}] \tag{2.18}$$

Onde:

P = Potência do equipamento em watts;

t = Período de tempo que o equipamento é utilizado durante o dia (hora);

$C_{unitaria}$ = Consumo diário de energia do equipamento em kWh.

ii) Para um conjunto de equipamentos: somar o consumo de energia diário de cada equipamento (os produtos da potência de cada equipamento (W) x número de horas utilizadas durante o dia, dividido por 1000);

$$C_{global} = \frac{1}{1000} \sum_{i=1}^{N} P_i \times t_i \qquad [\text{kWh}] \tag{2.19}$$

Onde:

P_i = potência do equipamento “i” em watts

t_i = período de tempo que o equipamento “i” é utilizado durante o dia (hora)

C_{global} = consumo total diário de energia elétrica por todos os equipamentos em kWh.

Caso as informações de potência dos equipamentos não estejam disponíveis pode-se consultar a Tabela 2.8 para estimar a potência de vários tipos de equipamentos elétricos de uso corrente. Nessa tabela consta a potência média do equipamento (média de potência de várias marcas de um determinado equipamento), uma estimativa do número de dias que o equipamento é utilizado durante um mês, a média de utilização diária e o consumo médio mensal.

Tabela 2.8 - Potência elétrica média típica de vários equipamentos domésticos

Aparelhos Elétricos	Potência média (watts)	Dias estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (kWh)
Abridor/afiador	135	10	5 min	0,11
Afiador de facas	20	5	30 min	0,05
Aparelho de som 3 em 1	80	20	3 h	4,8
Aparelho de som pequeno	20	30	4 h	2,4
Aquecedor de ambiente	1550	15	8 h	186,0
Aquecedor de mamadeira	100	30	15 min	0,75
Ar-condicionado 7.500 btu	1000	30	8 h	120
Ar-condicionado 10.000 btu	1350	30	8 h	162
Ar-condicionado 12.000 btu	1450	30	8 h	174
Ar-condicionado 15.000 btu	2000	30	8 h	240
Ar-condicionado 18.000 btu	2100	30	8 h	252
Aspirador de pó	100	30	20 min	10,0
Barbeador/depilador/massageador	10	30	30 min	0,15
Batedeira	120	8	30 h	0,48
BOILER 50 e 60 L	1500	30	6 h	270,0

Continuação da Tabela 2.8

Aparelhos Elétricos	Potência média (watts)	Dias estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (kWh)
Boiler 100 l	2030	30	6 h	365,4
BOILER 200 a 500 L	3000	30	6 h	540,0
Bomba d'água 1/4 cv	335	30	30 min	5,02
Bomba d'água 1/2 cv	613	30	30 min	9,20
Bomba d'água 3/4 cv	849	30	30 min	12,74
Bomba d'água 1 cv	1051	30	30 min	15,77
Bomba aquário grande	10	30	24 h	7,2
Bomba aquário pequeno	5	30	24 h	3,6
Cafeteira elétrica	600	30	1 h	18,0
Churrasqueira	3800	5	4 h	76,0
Chuveiro elétrico	3500	30	40 min **	70,0
Circulador ar grande	200	30	8 h	48,0
Circulador ar pequeno/médio	90	30	8 h	21,6
Computador/ impressora/ estabilizador	180	30	3 h	16,2
Cortador de grama grande	1140	2	2 h	4,5
Cortador de grama pequeno	500	2	2 h	2,0
Enceradeira	500	2	2 h	2,0
Escova de dentes elétrica	50	30	10 min	0,2
Espremedor de frutas	65	20	10 min	0,22
Exaustor fogão	170	30	4 h	20,4
Exaustor parede	110	30	4 h	13,2
Faca elétrica	220	5	10 min	0,18
Ferro elétrico automático	1000	12	1 h	12,0
Fogão comum	60	30	5 min	0,15
Fogão elétrico 4 chapas	9120	30	4 h	1094,4
Forno à resistência grande	1500	30	1 h	45,0
Forno à resistência pequeno	800	20	1 h	16,0
Forno microondas	1200	30	20 min	12,0
Freezer vertical/horizontal	130	-	-	50
Frigobar	70	-	-	25,0
Fritadeira elétrica	1000	15	30 min	7,5
Geladeira 1 porta	90	-	-	30
Geladeira 2 portas	130	-	-	55
Grill	900	10	30 min	4,5
Iogurteira	26	10	30 min	0,1
Lâmpada fluorescente compacta - 11w	11	30	5 h	1,65
Lâmpada fluorescente compacta - 15 w	15	30	5 h	2,2
Lâmpada fluorescente compacta - 23 w	23	30	5 h	3,5
Lâmpada incandescente - 40 w	40	30	5 h	6,0
Lâmpada incandescente - 60 w	60	30	5 h	9,0
Lâmpada incandescente -100 w	100	30	5 h	15,0
Lavadora de louças	1500	30	40 min	30,0
Lavadora de roupas	500	12	1 h	6,0
Liquidificador	300	15	15 min	1,1
Máquina de costura	100	10	3 h	3,9
Máquina de furar	350	1	1 h	0,35
Microcomputador	120	30	3 h	10,8
Moedor de carnes	320	20	20 min	1,2
Multiprocessador	420	20	1 h	8,4
Nebulizador	40	5	8 h	1,6
Ozonizador	100	30	10 h	30,0
Panela elétrica	1100	20	2 h	44,0
Pipoqueira	1100	10	15 min	2,75

Continuação da Tabela 2.8

Aparelhos Elétricos	Potência média (watts)	Dias estimados Uso/Mês	Média Utilização/Dia	Consumo Médio Mensal (kWh)
Rádio elétrico grande	45	30	10 h	13,5
Rádio elétrico pequeno	10	30	10 h	3,0
Rádio relógio	5	30	24 h	3,6
Sauna	5000	5	1 h	25,0
Secador de cabelo grande	1400	30	10 min	7,0
Secador de cabelos pequeno	600	30	15 h	4,5
Secadora de roupa grande	3500	12	1 h	42,0
Secadora de roupa pequena	1000	8	1 h	8
Secretária eletrônica	20	30	24 h	14,4
Sorveteira	15	5	2 h	0,1
Torneira elétrica	3500	30	30 min	52,5
Torradeira	800	30	10 min	4,0
TV em cores - 14"	60	30	5 h	9,0
TV em cores - 18"	70	30	5 h	10,5
TV em cores - 20"	90	30	5 h	13,5
TV em cores - 29"	110	30	5 h	16,5
TV em preto e branco	40	30	5 h	6,0
TV portátil	40	30	5 h	6,0
Ventilador de teto	120	30	8 h	28,8
Ventilador pequeno	65	30	8 h	15,6
Vídeocassete	10	8	2 h	0,16
Vídeogame	15	15	4 h	0,9

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. - 2008

Para exemplificar o cálculo da carga elétrica diária requerida vamos considerar o seguinte caso de uma residência onde os perfis de uso diário dos eletrodomésticos são mostrados na Tabela 2.9, onde na última coluna é aplicada a equação 2.19 para determinar o consumo médio diário de cada eletrodoméstico da residência. Somando-se o consumo médio diário de cada eletrodoméstico temos o consumo médio da residência, que é de 14,6575 kWh.

Tabela 2.9 - Perfil de uso de eletrodoméstico em uma residência típica

Aparelhos Elétricos	Quant.	Período de uso durante o dia	P (W)	Consumo médio diário (kWh)
Aparelho de som 3 em 1	01	09:00-12:00	80	0,2400
Ar-condicionado 7.500 btu	01	22:00-06:00	1000	8,0000
Batedeira	01	11:00-11:30	120	0.0600
Bomba d'água 1/4 cv	01	06:00-06:15 e 18:00-18:15	335	0,1675
Cafeteira elétrica	01	06:00-06:30 e 15:00-15:30	600	0,6000
Chuveiro elétrico	01	06:30-06:40 e 18:00-18:20	3500	1,7500
Circulador ar pequeno/médio	01	22:00-06:00	90	0,7200
Computador/ impressora/ estabilizador	01	19:00-22:00	180	0,5400
Ferro elétrico automático	01	15:00-16:00	1000	1,0000
Freezer vertical/horizontal	01	00:00-24:00	130	3,1200

Continuação da Tabela 2.9

Aparelhos Elétricos	Quant.	Período de uso durante o dia	P (W)	Consumo médio diário (kWh)
Geladeira 1 porta	01	00:00-24:00	90	2,1600
Lâmpada fluorescente compacta - 11w	09	19:00-24:00	11	0,4950
Lavadora de roupas	01	09:00-10:00	500	0,5000
Liquidificador	01	07:00-07:15	300	0,0750
Secador de cabelos pequeno	01	19:00-19:15	600	0,1500
TV em cores - 20"	02	11:00-13:00 e 19:00-22:00	90	0,9000
Ventilador de teto	02	12:00-14:00 e 23:00-05:00	120	1,9200
Ventilador pequeno	01	12:00-14:00 e 23:00-05:00	65	0,5200
Vídeocassete	02	21:00-23:00	10	0,0400
TOTAL				**14,6575**

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. - 2008

2.4.2.3 Levantamento da Carga Elétrica

Com o objetivo de estimar a possível curva de carga de uma determinada localidade isolada é importante levantar dentre os potenciais consumidores, por meio de pesquisas de campo, quais as suas reais necessidades para o uso final da energia elétrica e quais suas principais aspirações de consumo. Essas aspirações são consideradas nos cenários para estimativa da demanda reprimida.

Para permitir um melhor entendimento do que está sendo exposto e embasando os itens subsequentes, considere uma dada comunidade isolada nas margens de um rio da Amazônia, que esteja distante da sede do município e que não seja atendida pelo sistema interligado nacional. Supondo que na determinada localidade isolada foi realizada uma pesquisa de campo e os resultados após terem sido devidamente analisados e tratados mostraram o seguinte:

- A comunidade conta com 41 famílias;
- A comunidade tem como principais atividades a pesca, a extração de madeira e a agricultura familiar;
- O número de moradores que vivem na vila é de aproximadamente 113 moradores tradicionais;
- Foi constatado que dentro da área de abrangência da pesquisa a comunidade possui 73 edificações, sendo 49 de moradores tradicionais e 08 moradias que são ocupadas sazonalmente (casa de veranistas),

além de escola, igreja, centro comunitário e 13 diversos (depósitos, comércios, etc.).

Com base nessas informações e nas informações complementares, será construído um cenário que ilustrará como extrair a possível curva de carga de uma dada localidade. Essa curva é de grande importância, pois auxiliará as etapas de planejamento e dimensionamento da planta de geração de energia elétrica que deverá ser projetada para atender a localidade.

2.4.2.4 Demanda Reprimida

De modo a se estimar a curva de carga da comunidade isolada, para uma possível disponibilidade de energia elétrica, é necessário realizar um levantamento, dentre as famílias da comunidade, de quais as suas principais aspirações de consumo. Para exemplificar a abordagem feita para obtenção da demanda reprimida, considere o exemplo mostrado na Tabela 2.10, onde estão apresentadas as principais necessidades aspiradas pela mesma comunidade mencionada no item anterior, caso haja disponibilidade de energia elétrica. Vale ressaltar que os valores de potência associados a cada um dos equipamentos da Tabela 2.8, correspondem a valores tipicamente encontrados no mercado e/ou estão disponíveis na Tabela 2.8.

Tabela 2.10 - Equipamentos almejados pela comunidade (Demanda Reprimida)

Equipamento	P (W)	Nº	PTOTAL (kW)
Ventilador	120	15	1,80
Freezer	130	8	1,04
Geladeira	90	30	2.70
Televisor (TV 20”)	90	11	0,99
Serra elétrica	14000	3	42,00
DVD	20	1	0,02
Ferro de Passar	1000	3	3,00
Liquidificador	300	3	0,90
Som	80	4	0,32
Máquina de Lavar	500	1	0,50
Computador	180	2	0,36
Microondas	1200	2	2,40
Estufa	200	1	0,20
Batedeira	120	1	0,12
Iluminação Pública (lâmpadas)	40	40	1,60
∑ PTOTAL			57,95

Observa-se da Tabela 2.10, que as aspirações mais significativas no que refere ao consumo de energia elétrica, sejam pela quantidade de famílias que as almejam ou pela própria necessidade e característica de utilização desses equipamentos, correspondem aos cinco primeiros itens da tabela (ventiladores, “freezers”, refrigeradores, televisores e serras elétricas). Com base principalmente nesses cinco equipamentos e, também, na carga já existente, o cenário para obtenção da curva de carga pode ser elaborado, tal como apresentado a seguir. É importante mencionar que para criação dos cenários, considerou-se também um sistema de iluminação pública constituído de 40 pontos de luz, sendo que cada um deles possui uma potência de 40 watts, como consta na Tabela 2.8.

2.4.2.5 Curva de Carga

Neste tópico será elaborado o cenário do consumo de energia com base nas informações abordadas anteriormente. Esse cenário auxiliará na previsão da demanda futura da comunidade em questão, no que diz respeito ao dimensionamento da planta de geração de energia e ao uso de energia elétrica. Este cenário foi elaborado com base nas seguintes premissas:

- A carga instalada é considerada como a soma das cargas das 73 edificações existentes na localidade, onde se considerou 0,5 kW[1] de potência instalada por residência, além de 57,95 kW, a mais, de demanda reprimida, totalizando uma potência instalada de:

  P_{inst} = 57,95 kW + 73 x 0,5 kW = 94,45 kW;

- No período pico, aqui considerado no período noturno de 19 às 22 horas, a carga será igual ao valor da carga instalada (94,45 kW) menos o valor da carga correspondente as três serras elétricas (42 kW), resultando num valor de 52,45 kW. Esse último valor sofrerá uma redução de 50% no período de 23:00 às 24:00 horas, implicando numa carga de 26,225 kW;

[1] Este valor pode ser obtido com maior grau de detalhamento mediante a um levantamento de carga na própria localidade, entretanto pode-se considerar este um valor típico da Amazônia.

- No período de 19:00-22:00 h $\rightarrow$Pico = $P_{inst} - P_{serra}$ = 94,45 kW – 42 kW = 52,45 kW;
- No período de 23:00-24:00 h $\rightarrow$ $P_{pico\ red}$= 0,5 x P_{pico}= 0,5 x 52,45 kW = 26,225 kW;
- O consumo durante a madrugada corresponde à refrigeração, iluminação pública e 1% da carga instalada correspondente à iluminação residencial residual. Com relação a refrigeração considera-se um fator de coincidência (f_c) entre o funcionamento dos compressores de 33%[2].
- No período de 00:00-06:00 h $\rightarrow$ $P_{madrugada} = f_c \times P_{ref} + P_{ilumin} + 1\% \times P_{inst}$

  $P_{madrugada}$= 0,33 x (1,04 + 2,70) + 1,60 + 0,01 x 94,45

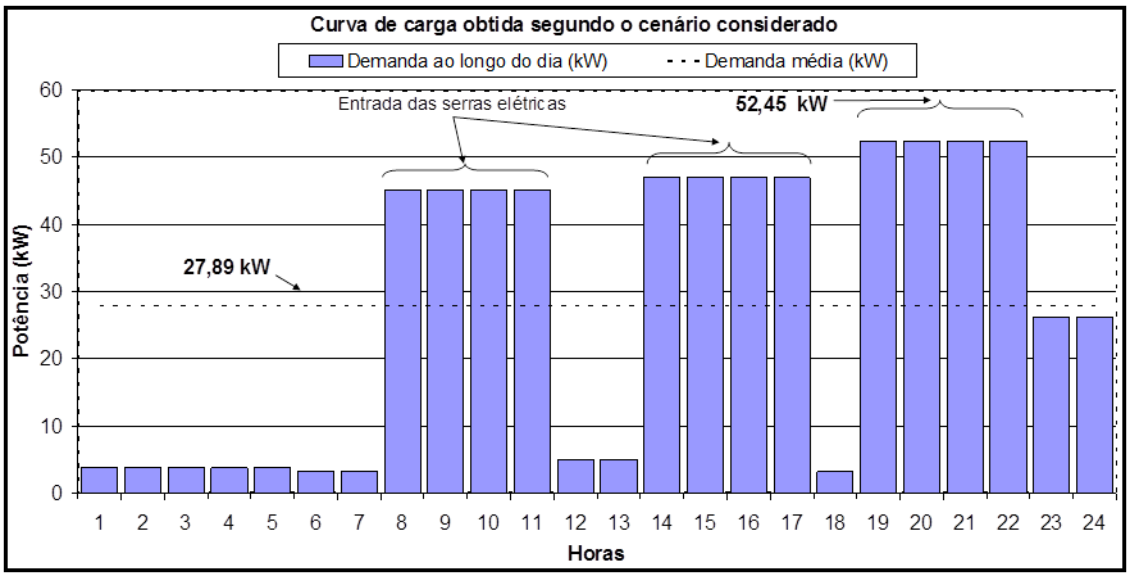
  $P_{madrugada}$= 3,7787 kW;

A demanda ao longo do dia se deve basicamente à soma das demandas individuais para refrigeração ((1,04 + 2,70) x 0,5 kW))[3] , TV (0,99 kW), ventiladores (1,8 kW), som (0,32 kW) e serras elétricas (42 kW), sendo que os ventiladores são utilizados durante o pico de calor (13:00 às 16:00) e as serras elétricas nos períodos de: 8:00 às 11:00 e de 14:00 às 17:00h.

Com as considerações acima é possível construir a curva de carga para a comunidade isolada em questão. A curva de carga obtida segundo o Cenário 1 descrito acima representa o demanda em quilowatt a cada hora e é apresentada na Figura 2.10.

[2] No que se refere ao primeiro item (refrigeração), considerou-se um fator de coincidência (fc) entre o funcionamento dos compressores dos refrigeradores (geladeira e freezer) que possivelmente constituirão o sistema de refrigeração de 33%. Assim sendo, a potência demandada por esses equipamentos será: de 2,70 kW (geladeira) mais 1,04 kW (freezer), que é a potência referente à refrigeração estimada na Tabela 14, multiplicado pelo fator de coincidência que é 0,33.

[3] Considerou-se um fator de coincidência entre o funcionamento dos compressores dos refrigeradores (geladeira e freezer) de 50%, uma vez que funcionamento dos compressores se torna mais frequente devido o aumento de calor.



Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. - 2008

Figura 2.10 - Curva de carga representativa da comunidade tomada como exemplo, obtida para o período de 24 horas, segundo o Cenário de Consumo de Energia Elétrica

A partir do levantamento da curva de carga, é possível identificar os horários de maior demanda, tanto durante o dia quanto durante a noite. Esta análise permite estimar o comportamento da demanda e, a partir desse comportamento, é possível estudar as características do sistema de produção de eletricidade necessário para o atendimento mais adequado de uma dada localidade isolada. Da curva de carga mostrada na Figura 2.10 é possível observar que existem três picos crescentes de demanda. Os dois primeiros, um pela manhã e outro pela tarde, representam o funcionamento das serras que é uma das principais atividades econômicas da comunidade. Enquanto o terceiro pico, no período da noite, representa a máxima carga que será demandada da unidade de geração de energia.

Outro aspecto muito importante associado à demanda estimada para a comunidade em questão, está relacionado ao fator de carga, que é definido como a relação entre a potência média demandada em um dado intervalo de tempo e a potência máxima demandada nesse mesmo intervalo, ver equação 2.20. Quanto maior for o fator de carga, mais da potência instalada da planta é efetivamente utilizada.

$$f_{carga} = \frac{P_{média\ \text{demandada}}}{P_{máxima\ \text{demandada}}} \tag{2.20}$$

A potência média diária demandada é calculada com somatória das potências médias de cada hora e dividida por 24 horas.

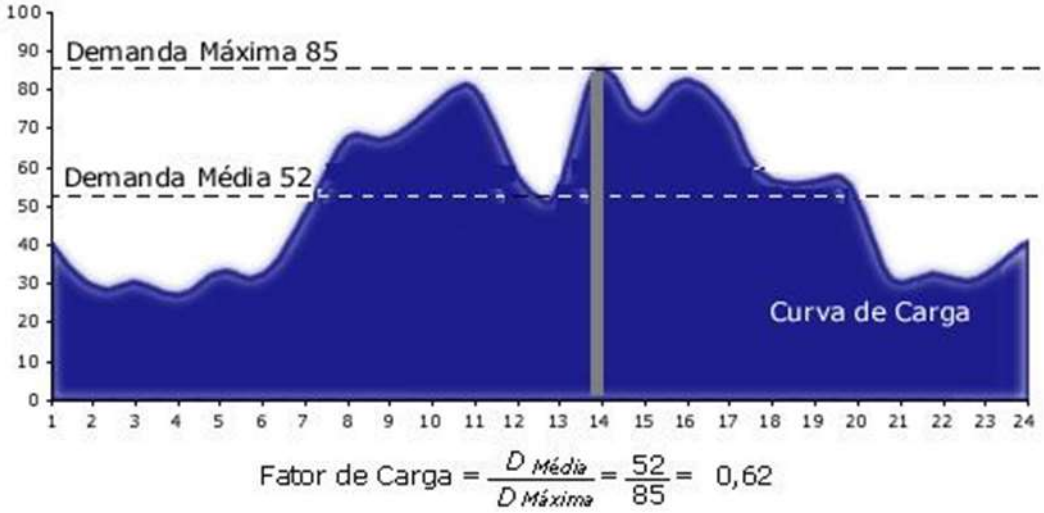


Figura 2.11 - Comportamento da demanda diária de uma comunidade hipotética

A Figura 2.11 apresenta o comportamento hipotético de uma determinada demanda diária. Note que a demanda máxima é bem superior à média, resultando em um fator de carga de 0,62. Quanto menor for o fator de carga, maior é o custo da geração. Considerando-se o cenário da Figura 2.10, onde se tem para as potências máxima e média os valores de 52,45 kW e 27,89 kW, respectivamente, observa-se um valor para o fator de carga de 0, 532, sinalizando que o sistema terá um alto custo para atender esse perfil de demanda.

Assim, uma forma de diminuir o custo do sistema alternativo de geração de energia é administrar o fator de carga, ou seja, gerenciar o uso dos equipamentos de forma que a curva de carga torne-se mais plana (fator de carga próximo a 1). Para que esta gestão seja possível, a administração dos equipamentos deve ser feita pelos próprios moradores da comunidade que, depois de serem submetidos a um trabalho de conscientização do uso racional da energia elétrica disponível, determinam os equipamentos que podem ser desligados e administrados, assumindo o controle e garantindo uma curva de carga mais plana.

2.4.2.6 Determinação da Capacidade da Planta

Três fatores definem a potência de uma planta de geração de eletricidade. O primeiro deles se refere à demanda de potência elétrica a ser atendida no horário de pico, que definirá qual a capacidade mínima da planta. O segundo se refere ao fator de carga representativo do perfil de demanda a ser atendida, o qual servirá de indicativo de quanto mais ou menos custosa será a energia gerada por essa planta. O terceiro é a quantidade de energia elétrica que será consumida, pois isto define a quantidade de recurso energético proveniente da fonte primária necessário para o atendimento do mesmo.

No caso do exemplo da Figura 2.10, fica claro que a capacidade da planta deve ser maior ou, no mínimo, igual ao valor de pico da demanda a ser atendida (52,45 kW) e que a quantidade de energia primária necessária, para atender os 669 kWh diários (=27,89*24) deve ser igual a esse valor corrigido das devidas perdas nos processos de conversão e distribuição de energia. No que se refere ao fator de carga encontrado, percebe-se que esse corresponde a um valor baixo (0,532), o que implicará em uma operação não otimizada da unidade geradora a biomassa destinada ao atendimento da curva de carga em questão, principalmente nos horários de carga baixa, ocasionando o aumento do consumo específico de combustível (kg/kWh produzido) desta unidade geradora, uma vez que ela estaria trabalhando, na maior parte do tempo, distante do ponto ótimo de operação.

2.4.3 Critérios para Localização das Centrais Térmicas

A seleção do local para a implantação de uma central térmica a vapor possui uma influência na longevidade da planta, tendo impactos significativos nas etapas de construção e operação. Cada alternativa de local potencial para a implantação da central deverá ser avaliada para determinar qual é a localidade economicamente viável. A escolha da localidade envolve um grande número de variáveis, através das quais é possível analisar a importância e a contribuição de cada uma. Algumas das

variáveis que contribuem na tarefa de avaliar o potencial do local para a instalação de uma central e que estão envolvidas no processo da tomada de decisão são:

- O transporte de combustíveis para a operação da central;
- Proximidade da demanda elétrica;
- Disponibilidade de água para uso industrial;
- Disponibilidade de energia elétrica para as etapas de montagem e manutenção;
- A localização de áreas de preservação ambiental, APA.

O processo de escolha da localidade não se restringe apenas à avaliação das variáveis citadas. Dois critérios devem ser quantificados ou avaliados, os quais são: o critério econômico, e o critério ambiental. Estes critérios são considerados importantes e mais abrangentes por envolverem outras variáveis além das que foram mencionadas anteriormente. No critério econômico, devem estar embutidas as análises das seguintes variáveis:

- O custo da importação de equipamentos, caso haja;
- O custo da instalação dos equipamentos;
- Qual a capacidade de produção de energia elétrica;
- Qual a vida útil dos equipamentos;
- Qual a quantidade de água necessária para o funcionamento dos equipamentos;
- Qual a quantidade de combustível necessário;
- Qual o custo do transporte de combustível até o local da central;
- Qual o custo de operação e manutenção da central, incluindo pessoal contratado.
- No critério ambiental as seguintes variáveis devem ser avaliadas:
- Qual o nível de emissão de gases;
- Qual o nível de poluição do ar no local versus o nível de poluição emitido pela tecnologia escolhida.

- Qual a disponibilidade de água.
- Identificar se a área desejada é considerada de preservação ambiental (APA), nestas não podem ser construídas centrais térmicas.
- Consultar normas, regulamentos e licenciamentos ambientais.

A seleção do local depende também da disponibilidade do uso da terra, na facilidade do manuseio do combustível, da previsão de uma futura expansão da central, e ainda, das características físicas do local que devem ser levadas em consideração no processo de escolha da localidade para a implantação como:

- Informação do solo;
- Drenagem do local;
- Dados de vento;
- Informação sobre Zona Sísmica.

As vias de transporte como estradas, vias férreas, estaleiros ou portos, são também fatores que devem ser avaliados quanto da disponibilidade dos mesmos. A falta de meios de transporte pode elevar os custos da central ou mesmo inviabilizar a operação da mesma. Outro fator é o clima do local, o qual determinará o tipo de arquitetura do prédio que abrigará os equipamentos e escritórios. O projeto estrutural dos prédios deve também ser avaliado levando em consideração as fundações e preparação do piso para que possam receber equipamentos pesados e geradores de vibrações. As fundações devem ser projetadas para suportar com segurança todas as estruturas, considerando o tipo de fundação e pressões possíveis.

A Tabela 2.11 apresenta os comentários, de forma resumida, de algumas das variáveis já citadas anteriormente, que devem ser avaliadas para a determinação da localização de uma central termoelétrica a vapor.

Tabela 2.11 - Resumo das Variáveis a Serem Avaliadas e Considerações

Variáveis a serem avaliadas	Em que estas variáveis influenciam	Comentários
Clima	Conforto térmico de funcionários e manutenção adequada de equipamentos.	Irá determinar o tipo de arquitetura da construção, aquecimento e/ou sistema de ventilação a ser adotado.
Temperatura	Dias mais quentes ou mais frios	Afeta o carregamento estrutural da construção
Topografia	Tipos de solo	Afeta na arquitetura do prédio e níveis do piso; no manuseio de combustíveis; na armazenagem de combustíveis e materiais; e na drenagem do solo. Determina as fundações do prédio, drenagem, e distribuição de dutos subterrâneos quando for o caso.
	Nível máximo de água	Afeta os níveis do piso, altura de bombas, e fundações.
	Zona sísmica	Determina a necessidade de reforço estrutural da construção.
	Previsão de futura expansão	Afeta a disponibilidade de espaço na planta da central térmica para uma futura expansão da mesma.
Vias de acesso	Estradas, rodovias, vias férreas, portos, estaleiros.	Afeta o transporte de combustível e de material.
Suprimento de água	No arrefecimento e funcionamento de equipamentos da central térmica, e no uso doméstico.	Afeta na escolha da localização da central, no tratamento de água se for necessário.
Disponibilidade de material no local	No custo de transporte e na reposição de peças.	Irá determinar os materiais a serem utilizados na construção da central.
Normas e Regulamentos do local	Poluição atmosférica, poluição da água, armazenamento e descarte de combustível, destino de resíduos sólidos e líquidos.	É necessário obter a permissão e licenciamento ambiental. É necessário atender as normas de prevenção de incêndios e acidentes.
Disponibilidade e habilidade da mão-de-obra local	No custo de treinamento ou deslocamento de pessoas qualificadas.	Determina a mão-de-obra para construção e operação da central térmica.
Variáveis associadas ao Critério Econômico	Nos custos de importação, instalação, operação, manutenção, transporte de equipamentos e combustíveis.	Afeta na viabilidade de implantação de uma central.

Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. - 2008

2.4.4 Exemplo do Pré-Dimensionamento de uma Central a Vapor

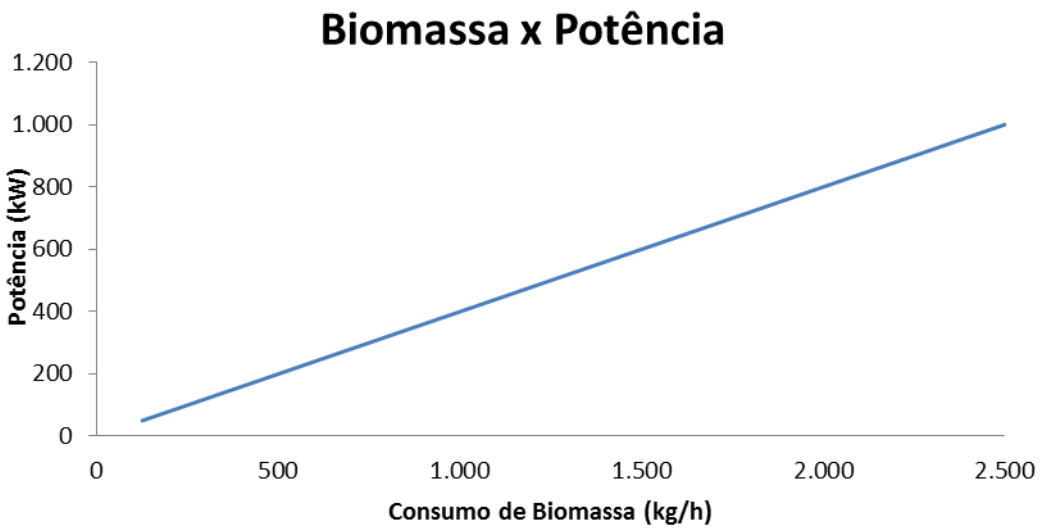
A concepção de projeto desta natureza recai inicialmente no conhecimento prévio do tipo, natureza, sazonalidade e custo do combustível a ser utilizado, no critério de escolha da máquina térmica (turbina ou máquina alternativa) e caldeira e no suprimento e nível de potência a ser disponibilizada pela planta.

Como parâmetros genéricos para inicio do pré-dimensionamento, considere as seguintes premissas.

a) Utilização de uma biomassa com as seguintes características:
   - Tipo: serragem de madeira
   - PCS de 19,7 MJ/kg (PCI de 13,4 MJ/kg)
   - Densidade a granel de 370 kg/m^3
   - Umidade de 30%
   - Forma geométrica: cavacos de 250 mm de comprimento e espessura 5 mm..

b) Usinas operam com as seguintes características:
   - Rendimento do ciclo termodinâmico de 18%;
   - Consumo específico de vapor da turbina de 10 kg/kWh gerado.

Com esses parâmetros, a Figura 2.12 exprime a variação do consumo de biomassa do sistema com turbina a vapor com a potência da planta.



Fonte: Nogueira, M. F. M., et all. - 2008

Figura 2.12 - Perfil do consumo de biomassa para suprir as necessidades de usinas de geração de energia elétrica a vapor com potência na faixa de 50 a 1.000 kW

2.5 Vapor

A seguir serão descriminadas algumas tecnologias para geração de eletricidade utilizada biomassa como combustível.

2.5.1 Ciclo a Vapor com Turbinas de Contrapressão

É empregado de forma integrada a processos produtivos por meio da cogeração. Nele, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar as turbinas usadas no trabalho mecânico requerido nas unidades de produção e turbinas para geração de energia elétrica. Além disso, o vapor que seria liberado na atmosfera após a realização desses processos pode ser encaminhado para o atendimento das necessidades térmicas do processo de produção. Este processo está maduro do ponto de vista comercial e é o mais disseminado atualmente (ANEEL, 2008).

2.5.2 Ciclo a Vapor com Turbinas de Condensação e Extração

Consiste na condensação total ou parcial do vapor ao final da realização do trabalho na turbina para atendimento às atividades mecânicas ou térmicas do processo produtivo. Esta energia a ser condensada, quando inserida em um processo de cogeração, é retirada em um ponto intermediário da expansão do vapor que irá movimentar as turbinas. A diferença fundamental desta rota em relação à contrapressão é a existência de um condensador na exaustão da turbina e de níveis determinados para aquecimento da água que alimentará a caldeira. A primeira característica proporciona maior flexibilidade da geração termelétrica (que deixa de ser condicionada ao consumo de vapor de processo). A segunda proporciona aumento na eficiência global da geração de energia. Este sistema permite, portanto, a obtenção de maior volume de energia elétrica. No entanto, sua instalação exige investimentos muito superiores aos necessários para implantação do sistema simples de condensação (ANEEL, 2008).

2.6 Estado da Arte das Tecnologias para Geração de Energia com Turbinas e Máquinas a Vapor

Segundo Eletrobrás (2011), a geração elétrica de pequena escala, tendo como combustível biomassa sólida é obtida usualmente por um dos três seguintes processos: queima direta em caldeira, com produção de vapor e acionamento de máquina alternativa a vapor (locomóvel ou motor Stirling); queima direta em caldeira, com produção de vapor e acionamento de pequena turbina a vapor; gasificação e acionamento de motor de combustão interna, seja através do ciclo diesel ou do ciclo Otto (ignição)(Eletrobrás, 2011).

A opção mais econômica para a geração de energia elétrica com queima direta de biomassa, em escala relativamente pequena, seria a utilização do sistema de caldeira + turbina a vapor. A disponibilização de pequenas turbinas a vapor a preços razoáveis é relativamente recente, e praticamente tirou o mercado potencial dos locomóveis. O problema é que a "pequena escala" referida ainda é muito superior à escala aplicável na maioria das comunidades existentes na região Amazônica. Ela pode trabalhar gerando 50kW, mas o consumo de biomassa, o custo da caldeira, dos equipamentos auxiliares e das instalações, não decresceriam na mesma proporção. Operando com 50kW, o consumo de madeira seria de aproximadamente 10kg/kWh. Desta forma, os sistemas de geração elétrica com biomassa baseados em caldeira e turbina a vapor só se tornam viáveis para potências acima de 250kW (Eletrobrás, 2011).

Bridwater, (1995) em seu estudo revisa os custos e tecnologias envolvidos em um sistema integrado para a produção de eletricidade a partir de biomassa, em particular de madeira. A Figura 2.13 faz uma comparação entre as eficiências para os o processo de gasificação e combustão direta com enfoque para geração de energia elétrica. Ressalta-se que o estudo de Bridwater, (1995), foi desenvolvido para sistema de geração de eletricidade acima de 5 MWe. Observe que as maiores eficiência da figura abaixo é para o Ciclo Combinado e Integrado de gasificação (IGCC)

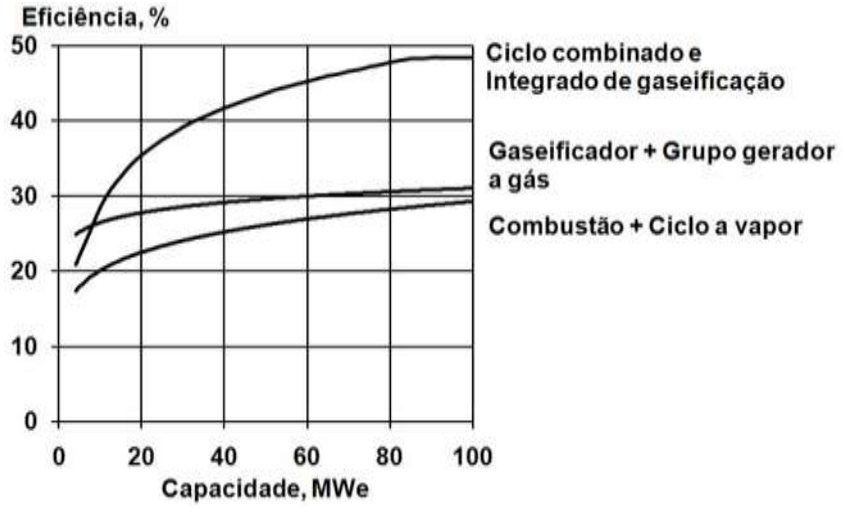


Figura 2.13 - Eficiência para diversos sistemas de geração a biomassa

2.7 Gasificação

A gasificação é a conversão de qualquer combustível líquido ou sólido, como a biomassa, em gás energético por meio da oxidação parcial em temperatura elevada. Esta conversão, realizada em gasificadores, produz um gás combustível que pode ser utilizado em usinas térmicas movidas a gás para a produção de energia elétrica. Assim, a tecnologia de gasificação aplicada em maior escala transforma a biomassa em importante fonte primária de centrais de geração termelétrica de elevada potência, inclusive aquelas de ciclo combinado, cuja produção é baseada na utilização do vapor e do gás, o que aumenta o rendimento das máquinas (ANEEL, 2008).

A tecnologia de gasificação de combustíveis é conhecida desde o século XIX e foi bastante utilizada até os anos 30, quando os derivados de petróleo passaram a ser utilizados em grande escala e adquiridos por preços competitivos. Ela ressurgiu nos anos 80 – quando começou a ficar evidente a necessidade de contenção no consumo de petróleo – mas, no caso da biomassa, ainda não é uma tecnologia competitiva do ponto de vista comercial. Segundo o Plano Nacional de Energia 2030, a maior dificuldade para a sua aplicação não é o processo básico de gasificação, mas a obtenção de um equipamento capaz de produzir um gás de

qualidade, com confiabilidade e segurança, adaptado às condições particulares do combustível e da operação (ANEEL, 2008).

2.8 Biogás

Diversos estudos descrevem que o biogás é considerado como um combustível gasoso com um conteúdo energético elevado semelhante ao gás natural, composto, principalmente, por hidrocarbonetos de cadeia curta e linear. Podendo ser utilizado para geração de energia elétrica, térmica ou mecânica em uma propriedade rural, contribuindo para a redução dos custos de produção. No Brasil, os biodigestores rurais vêm sendo utilizados, principalmente, para saneamento rural, tendo como subprodutos o biogás e o biofertilizante.

O desenvolvimento de tecnologias para o tratamento e utilização dos resíduos é o grande desafio para as regiões com alta concentração de produção pecuária, em especial suínos e aves. De um lado a pressão pelo aumento do numero de animais em pequenas áreas de produção, e pelo aumento da produtividade e, do outro, que esse aumento não provoque a destruição do meio ambiente. A restrição de espaço e a necessidade de atender cada vez mais as demandas de energia, água de boa qualidade e alimentos, têm colocado alguns paradigmas a serem vencidos, os quais se relacionam principalmente à questão ambiental e a disponibilidade de energia.

You et all (2009), em seu trabalho discutiu a importância do desenvolvimento de usinas de bio gás em fazendasem primeiro. Em seguida foi estudado o balanço energético do sistema e do processo de produção de calor, respectivamente. O status de fazer uso do calor residual em usinas de biogás também foi discutido na China. Através dos estudos, dois principais esquemas de fazer uso de calor em usinas de biogás de grandes fazendas de criação foi proposta, que estavam fornecendo aos moradores com aquecimento ou resfriamento de carga para as exigências do ambiente interno de acordo com as estações e construção de armazenamentos frios para processamento de aves e armazenamento do produto. O outor em seu trabalho, os métodos de aproveitamento do calor residual de uma usinad e biogás de uma zona de demonstração agrícola em uma cidade costeira

foram discutidos a partir dos benefícios econômicos e ambientais e adotou-se o segundo método. Os resultados mostraram que a taxa de utilização global de energia de biogás foi de quase 80% após a plena utilização do calor residual. O projeto teve bons benefícios econômicos e ambientais. Os regime spodem dar algumas referências na utilização do calor residual em usinas de biogás de grandes fazendas de criação e outros projetos semelhantes (You et all., 2009).

2.9 Células a combustível

As células de combustível, hoje em dia, já são usadas em centrais de produção de energia com potências reduzidas (menos de uma dezena de MW). Ficam colocadas perto dos equipamentos consumidores, podendo assim ser consideradas uma tecnologia de geração dita distribuída. Apostando na produção local (descentralizada) poupa-se no investimento da construção de grandes linhas de transporte de energia, na proteção destas e outros equipamentos auxiliares, bem como, na manutenção dessas infraestruturas. Outro aspecto de economia são os custos de exploração, uma vez que as perdas energéticas, com a produção descentralizada, são consideravelmente reduzidas em linhas, nos transformadores (elevadores e abaixadores), bem como, na quantidade de aparelhagem de proteção com diminuição do número (Santos,2004).

Célula a combustível é uma tecnologia que utiliza o hidrogênio e o oxigênio para gerar eletricidade com alta eficiência, e também vapor d'água quente resultante do processo químico na célula a combustível. A importância da célula está na sua alta eficiência e na ausência de emissão de poluentes quando se utiliza o hidrogênio puro, além de ser silenciosa (Portela et all. 2009).

De acordo com (Santos et all, 2004), os custos relacionados com a produção também baixam, pois o rendimento das células de combustível é substancialmente mais elevado. A grande barreira que tem a vencer é o custo elevado desta tecnologia, resultando da investigação, do preço dos materiais e dos processos de fabricação, o que tem restringido o uso da tecnologia das células de combustível. Com o decurso do tempo, eventuais novas descobertas, a produção em massa das

células de combustível e em oposição uma cada vez maior escassez de fontes de energia não renováveis serão fatores que irão levar a uma nova filosofia de produção energética na área da energia elétrica (Santos- 2004).

Ainda segundo Santos et al. (2004), as células combustíveis é uma tecnologia que começa a aparecer cada vez mais, que comparativamente com outras tecnologias tradicionais de produção proporciona alta eficiência (mesmo para potências baixas) e reduzidas emissões acústicas. As pilhas de células de combustível são amigas do ambiente, pois mesmo com a utilização de um combustível fóssil, não produzem gases nocivos que contribuem para o aparecimento das chuvas ácidas, nem libertam partículas poluentes que ponham em risco a qualidade do ar, nenhum hidrocarboneto é derramado durante operação normal, e comparando com o dióxido de carbono libertado com as outras tecnologias que usam este tipo de combustível, mesmo com as mais eficientes o valor é bastante menor.

Permitem aumentar ou diminuir a potência de operação (capacidade de regulação) respondendo rapidamente à carga, são simples de instalar, tem versatilidade de fontes na alimentação. Combustíveis fósseis (petróleo, óleo, gás natural), hidrogênio puro produzido por eletrólise (energia vinda de fontes renováveis como sol, o vento, a água), a biomassa, etc., podem ser usados como fonte de combustível.

2.9.1 Vantagens/ desvantagens das células de combustível

Uma das vantagens dos sistemas de células a combustível é que podem ser fabricadas em pequenas unidades modulares, em grandes quantidades, facilmente transportada e montadas num determinado local em um intervalo de tempo muito reduzido. Se por qualquer motivo deixarem de ser necessárias no local, poderão num curto espaço de tempo ser facilmente deslocada para outro onde exista déficit de energia.

Do processo de funcionamento normal das pilhas de células ao combustível gera-se uma quantidade significativa de calor que pode ser aproveitado para

produzir vapor ou água quente. Esta otimização permite que haja um aumento da eficiência do sistema. Toda a transformação de energia tem uma perda associada assim, quanto menor forem às transformações, melhor é o rendimento. Nas células de combustível existe uma transformação direta da energia química em elétrica, o que é uma vantagem face às tecnologias convencionais de produção de energia elétrica.

Mais um fator positivo das células de combustível é a sua simplicidade em termos de princípios de funcionamento, com a inexistência de movimento mecânico no interior desta e com a conversão direta da energia.

Quando é usado o hidrogênio como combustível os subprodutos da reação são o calor e a água pura, o que significa que a pilha de combustível pode ser vista como não tendo emissões dos gases do feito estufa. Mas mesmo quando se usam os combustíveis fósseis os níveis de poluição são consideravelmente mais baixos, devido ao elevado rendimento deste tipo de tecnologia que permite reduções no consumo destes combustíveis.

As desvantagens têm a ver com os custos de investigação, dos materiais usados na produção das células e dos processos de fabricação.

O conhecimento destas encontra-se num número limitado de pessoas. Existe uma falta de infraestruturas para a produção, transporte e armazenamento do combustível hidrogênio e as poucas infraestruturas que existem estão viradas para a indústria química em geral.

Outra questão negativa tem a ver com a produção do hidrogênio que recorre ao uso intensivo de energia e deriva muitas vezes dos combustíveis fósseis. O combustível depende do tipo de célula de combustível em questão, necessita de estar livre de determinados contaminantes, senão as células de combustível podem ver a seu desempenho reduzido, podendo em casos extremos deixarem de funcionar.

A existência de sistemas auxiliares que apoiam a pilha de células de combustível têm componentes sujeitos a avarias, cuja falha de um deles pode comprometer todo o processo de energia. Logicamente estes sistemas aumentam também as necessidades de manutenções.

2.10 Potencial de Biomassa

Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos.

Embora grande parte da biomassa seja de difícil contabilização, devido ao uso não comercial, estima-se que, atualmente, ela representa cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária. Esse índice é superior ao do carvão mineral e similar ao do gás natural e ao da eletricidade. Nos países em desenvolvimento, essa parcela aumenta para 34%, chegando a 60% na África.

Neste tópico é abordada a potencialidade de biomassa de maneira geral no Brasil, regionalizando para Amazônia, e sub-regionalizando para o Estado do Pará.

2.10.1 No Brasil

No Brasil, a biomassa representa cerca de 20% da oferta primária de energia. A imensa superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Segundo dados do Balanço Energético Nacional de 1999, a participação da biomassa na produção de energia elétrica é resumida a cerca de 3%, dividida entre o bagaço de cana-de-açúcar (1,2%), os resíduos madeireiros da indústria de papel e celulose (0,8%), resíduos agrícolas e silvícolas diversos (0,6%) e a lenha (0,2%) (MME -1999).

2.10.2 Na Amazônia

A Amazônia tem imensos recursos florestais, abrigando um terço das florestas tropicais do mundo. A Amazônia brasileira, compreendendo uma área maior que 5 milhões de km², o que corresponde aproximadamente 61% do território brasileiro, é uma das maiores reservas de madeiras tropicais na atualidade e

desempenha uma elevada importância como fornecedora de madeira para o mercado nacional e internacional.

2.10.3 No Pará

Em 2006 o Grupo EBMA realizou um trabalho de investigação que resultou no “Estudo do potencial de biomassa disponível no estado do Pará para geração de energia elétrica utilizando os resíduos da indústria madeireira, do alumínio e agroindústria”, o qual quantificou a biomassa disponibilizada no Estado do Pará, identificando em 143 municípios do Estado aqueles que têm viabilidade técnica e econômica para aproveitamento dos resíduos de biomassa para fins energéticos. Os estudos do projeto resultaram em um mapa de potencial energético em Sistema de Informação Geográfica. (EBMA – 2006)

Dados do setor madeireiro obtidos de levantamentos realizados pelo Imazon –(IMAZON, 2009) Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, mostram que no ano de 2008 no Estado do Pará foram identificadas 1.067 empresas madeireiras em operação, as quais extraíam 6,6 milhões de metros cúbicos de madeira em tora, essa produção corresponde a 53,9% da coleta nacional, sendo os pólos madeireiros mais significativos: Paragominas, Tailândia, Tomé-Açu e Ulianópolis.

III- DENSIDADE ENERGÉTICA DA BIOMASSA

A biomassa constituída de resíduos resultantes de processos industriais é uma das alternativas consideradas para geração de energia com fontes e/ou tecnologias não convencionais.

A agroindústria e a indústria florestal, dentre elas a sucroalcooleira, papel, celulose e madeireira, são exemplos de setores que produzem resíduos com importante potencial de aproveitamento energético no Brasil. É comum que estes resíduos possuam grande variedade de formas, densidades, granulometrias e umidades, ou seja, considerável heterogeneidade.

A queima direta desses resíduos proporciona custo reduzido para o calor gerado, e um custo de geração de energia mais competitivo, muito embora apresente um baixo rendimento térmico em função da umidade e heterogeneidade. Este baixo rendimento, entretanto, é compensado pela facilidade de obtenção do combustível a um custo mínimo.

Na utilização de resíduos, sem processo de conversão prévia para obtenção de combustível (sólido ou gasoso) com características mais homogêneas, é de extrema importância observar à influência das variáveis como umidade, densidade, granulometria e poder calorífico, na densidade energética, devido à influência direta no custo do kWh produzido.

Neste tópico é apresentada uma avaliação de resultados de ensaios de laboratório de caracterização (densidade a granel, umidade e poder calorífico) de resíduos do setor agroindustrial e madeireiro. Esta avaliação tem como objetivos: verificar seu desempenho como combustível através da determinação da densidade energética; avaliar a influência de parâmetros como umidade, densidade e granulometria no seu aproveitamento; bem como determinar os valores típicos dos referidos parâmetros que possam ser utilizados como referencial no dimensionamento de equipamentos para geração de energia.

3.1 Metodologia

As amostras ensaiadas foram disponibilizadas pelas empresas produtoras de resíduos sem misturas e nas condições em que se encontravam após o processamento, e que poderiam vir a ser utilizadas em uma usina de geração de energia. As mesmas permaneceram armazenadas em um pátio coberto, no máximo uma semana até a data dos ensaios.

Para cada amostra foram realizadas três determinações de cada parâmetro, e calculada a média aritmética.

Foram realizados ensaios de poder calorífico superior e umidade em trinta e duas amostras; e ensaios de umidade, poder calorífico superior e densidade a granel em treze amostras. Os resíduos foram obtidos em empresas madeireiras e agroindústrias localizadas nos Municípios de Belém, Ananindeua e Marituba, todos localizados no Estado do Pará.

A partir dos resultados dos ensaios de análise química imediata, umidade e densidade a granel foram determinados o poder calorífico inferior – PCI e a densidade energética das biomassas para comparação do desempenho das mesmas como combustíveis, da seguinte maneira:

(a) Densidade energética (quantidade de energia por unidade de volume de um combustível) foi obtida pelo produto do PCI com a densidade a granel das amostras.

(b) Poder calorífico inferior foi obtido através da equação (3.1) (Gomide, R. - 1984):

$$PCI = (1-a).PCS - 9.(1-a).h.h_{lv(25^oC)} - a.h_{lv(25^oC)} \tag{3.1}$$

Onde *PCI* = poder calorífico inferior (kcal/kg); *PCS* = poder calorífico superior (kcal/kg); a = umidade base úmida (%); *h* = percentual de hidrogênio do material seco (%); $h_{lv(25^oC)}$ = entalpia de vaporização da água a 25ºC (kcal/kg), igual a 583,58 kcal/kg.

O teor de hidrogênio foi calculado a partir da seguinte equação empírica (formula de Seyler), dada em (Nogueira, et all, 2006):

Onde *PCI* = poder calorífico inferior (kcal/kg); *PCS* = poder calorífico superior (kcal/kg); a = umidade base úmida (%); *h* = percentual de hidrogênio do material seco (%); $h_{lv(25^oC)}$ = entalpia de vaporização da água a 25ºC (kcal/kg), igual a 583,58 kcal/kg.

O teor de hidrogênio foi calculado a partir da seguinte equação empírica (formula de Seyler), dada em (Nogueira, et all, 2006):

$$h = 0{,}069 . \left(PCS' \frac{1}{100} + MV' \right) - 2{,}87 \tag{3.2}$$

$$PCS' = PCS \frac{100}{(MV + CF)} \tag{3.3}$$

$$MV' = MV \frac{100}{MV + CF} \tag{3.4}$$

Onde: h = percentual de hidrogênio*; PCS'* = poder calorífico em base seca e isenta de cinza (kcal/kg); *MV'* = percentual de matéria volátil em base seca e isenta de cinza, *MV* = percentual de voláteis, *CF* = percentual de carbono fixo.

Foram realizados também ensaios em treze amostras resultantes de misturas de dois tipos de resíduos com porcentagens de 50% + 50% (serragem mais resíduo agroindustrial) e 70% + 30% (serragem + resíduo agroindustrial). Para efetuar as misturas, as amostras foram separadas em peso, e misturadas manualmente até obtenção de amostra com aspecto visual uniforme, a fim de garantir resultados representativos para os ensaios de umidade e poder calorífico, uma vez que se utiliza quantidade pequena na execução dos ensaios (50 g para a umidade, e 0,5 g para o poder calorífico), caso as misturas fossem heterogêneas poderiam apresentar resultados incorretos.

A fim de verificar a influência do aumento de umidade na densidade a granel e, consequentemente, na densidade energética de uma mesma amostra de biomassa, foram realizados ensaios em duas amostras de serragem, constituídas de madeiras classificadas como madeira leve (quaruba, com densidade de 600 kg/m^3 a 12% de umidade) e madeira pesada (jatobá, com densidade de 890 kg/m^3 a 12% de umidade), e em amostras de resíduos da agroindústria, com granulometrias diversas (fibra de dendê e casca de castanha). As Figura 3.1 e Figura 3.2 ilustram cada uma das amostras que foram ensaiadas para duas condições de umidade:

(a) Umidade em que os resíduos foram coletados nas empresas (identificadas como amostras em umidade natural) e;

(b) Umidade após a umidificação com água corrente, identificadas como amostras saturadas.

(a)

(b)

Figura 3.1 - Amostra de Casca de Castanha (a) Seca (b) Úmida

(a)

(b)

Figura 3.2 - Amostra de Fibra de Dendê (a) Seca (b) Úmida

Figura 3.3 - Umidificação das amostras

3.2 Normatização

Foram adotadas como referência para execução dos ensaios as seguintes normas brasileiras existentes para carvão vegetal, que se adequaram aos resíduos estudados, conforme avaliações realizadas em (Nogueira, et all, 2006):

NBR 6923 – carvão vegetal - amostragem e preparação da amostra, que define os procedimentos de coleta e preparação de amostras para realização de ensaios de caracterização de carvão vegetal(ABNT - NBR 6923);

- NBR 8112 – carvão vegetal – análise imediata, destinada a determinação dos teores de umidade, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo de carvão vegetal(ABNT - NBR 8112);
- NBR 8633 – determinação do poder calorífico, prescreve o método de determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática(ABNT - NBR 8633);
- NBR 6922 – determinação da massa específica (densidade a granel) (ABNT, NBR 8922).

3.3 Resultados e Discussão

As Figura 3.4 a Figura 3.7 mostram os resultados dos ensaios de umidade, poder calorífico e análise química imediata, obtidos para trinta e duas das amostras estudadas, a fim de exemplificar o comportamento típico dos resíduos florestais e agroindustriais disponibilizados pelas empresas do Estado.

Na Figura 3.4 pode-se observar a grande variação da umidade dos resíduos nas condições de campo, que variaram de aproximadamente 5% até 70%.

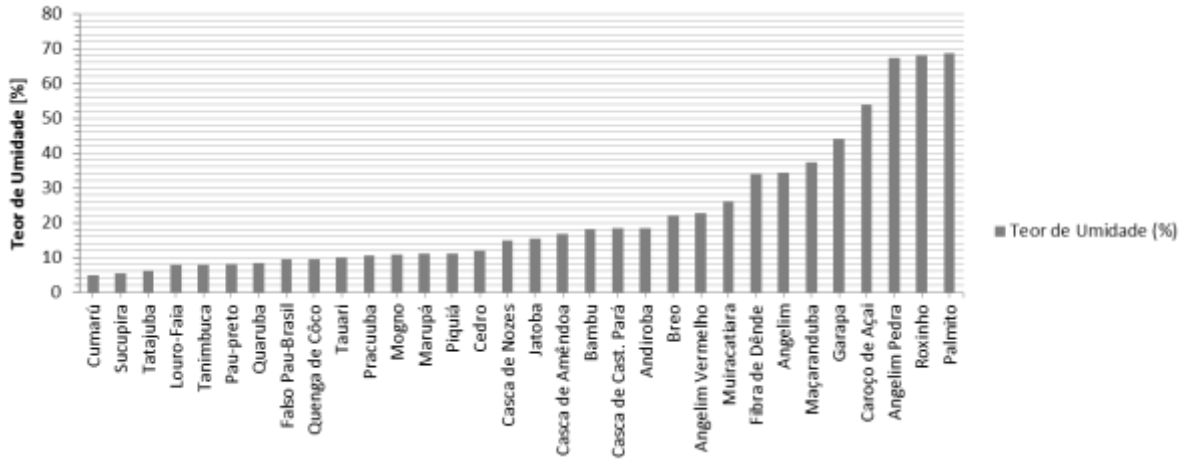


Figura 3.4 - Resultados dos ensaios de umidade

Há pouca influência do tipo de biomassa no poder calorífico superior, este parâmetro de um modo geral mostrou-se similar para todos os resíduos, com valores mais frequentes na faixa de 4.500 a 5.000 kcal/kg (Figura 3.5).

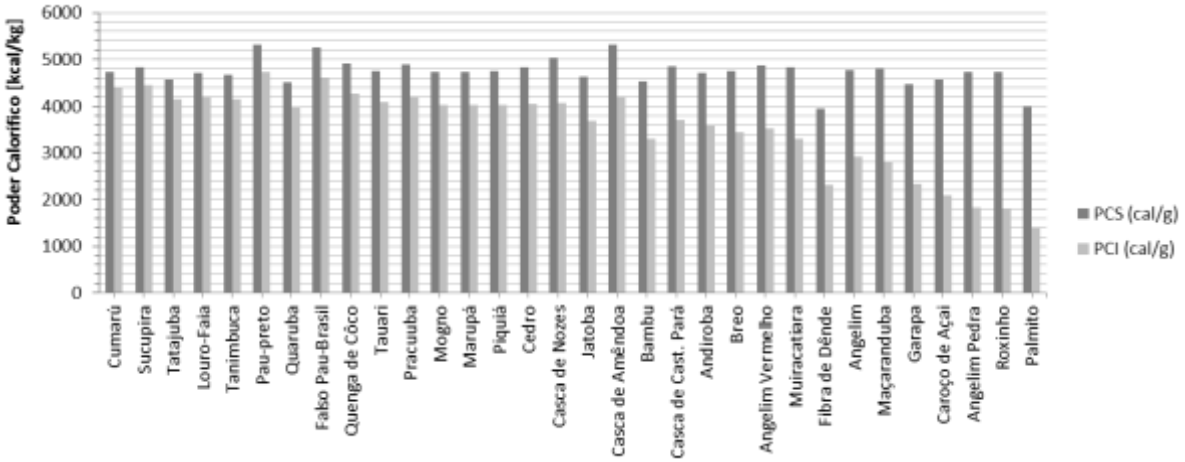


Figura 3.5 - Resultado de poder calorífico superior e inferior

Quanto ao poder calorífico inferior, também, há pouca influência do tipo de biomassa neste parâmetro, sendo a umidade a característica que influenciou mais significativamente nos resultados de PCI; maiores valores de umidade implicaram na redução significativa dos valores de PCI. Na Figura 3.6 este comportamento pode ser visto claramente nos resultados de alguns ensaios realizados no presente trabalho, e nas avaliações realizadas em Nogueira et all (2006) e Brascep Engenharia Ltda. (Brascep Engenharia LTDA, 1987), onde se observa também a similaridade dos resultados. Na

Tabela 3.1 podem ser vistas as biomassas ensaiadas nos referidos trabalhos.

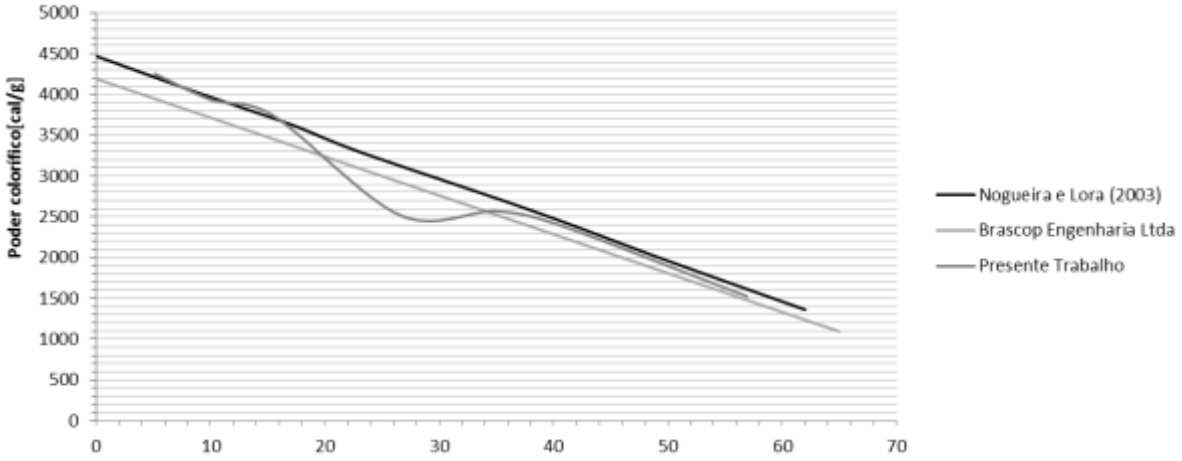


Figura 3.6 - Variação do poder calorifico inferior das amostras de resíduos vegetal com a umidade base úmida

Quanto à análise química imediata, todas as amostras apresentaram valores semelhantes, dentro das seguintes faixas (Figura 3.7):

- Teor de voláteis – entre 75 e 85 %;
- Teor de Cinzas – entre 0 e 5 %;
- Teor de carbono fixo – entre 15 e 25 %.

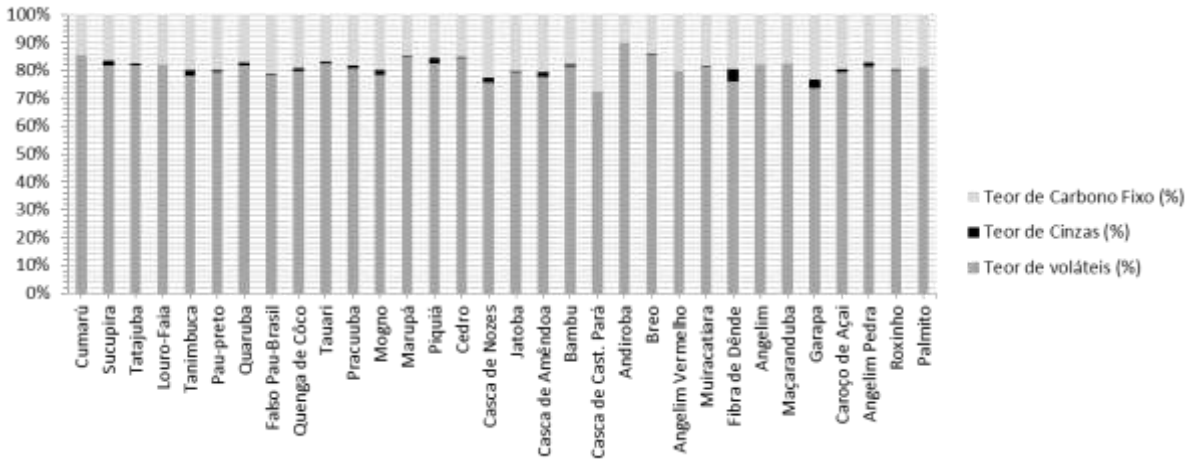


Figura 3.7 - Resultados dos ensaios de análise química imediata

Tabela 3.1 - Variação do PCI com a Umidade

Referência	Biomassa	Umidade Base Úmida (%)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
Nogueira e Lora (ABNT - NBR 8633)	Lenha	62	1363
		50	1960
		38	2582
		23	3299
		17	3633
		9	4016
		0	4470
Brascop Engenharia Ltda.(ABNT - NBR 6923)	Madeira	65	1095
		55	1571
		45	2048
		35	2524
		25	3000
		15	3477
		0	4191
Resultados de Ensaios Realizados no Presente Trabalho	Cacho Seco de Amêndoa	56,90	1527
	Serragem	40,49	2400
	Caroço de Açaí	35,00	2569
	Fibra de Dendê	26,56	2520
	Casca de Castanha do Pará	15,47	3742
	Serragem	10,07	3933
	Serragem	5,12	4254

As Figura 3.8 a Figura 3.10 apresentam os resultados de ensaios de análise química imediata: umidade (Figura 3.8), poder calorífico (Figura 3.9) e densidade à granel (Figura 3.10), realizados em treze amostras de biomassas diversas. Onde se

determinou também a densidade a granel a fim de obter a densidade energética (Figura 3.11), visando identificar àquelas com melhor desempenho como combustível.

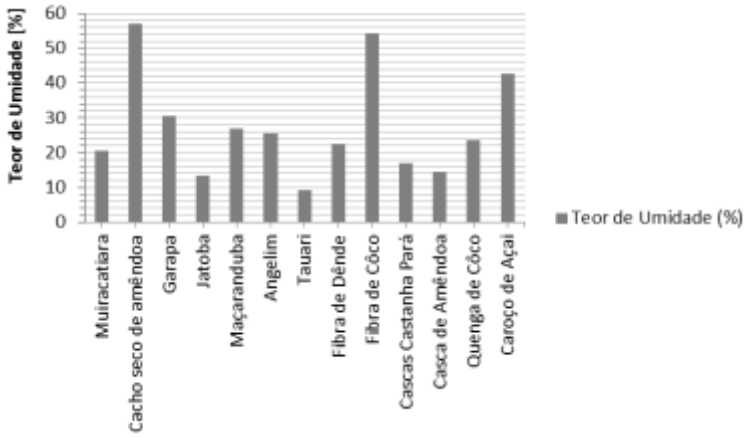


Figura 3.8 - Resultados dos ensaios de umidade

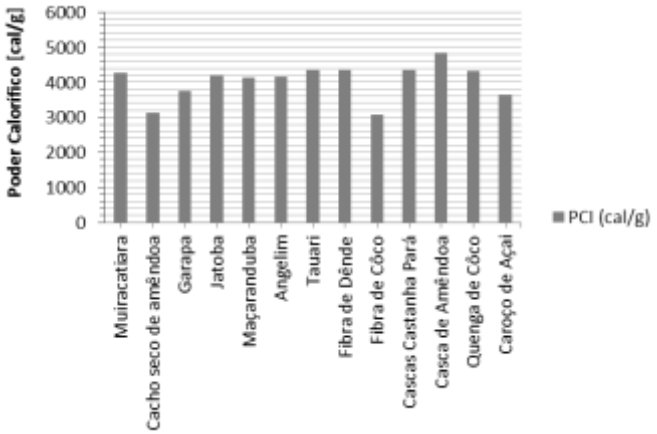


Figura 3.9 - Resultados do poder calorífico inferior

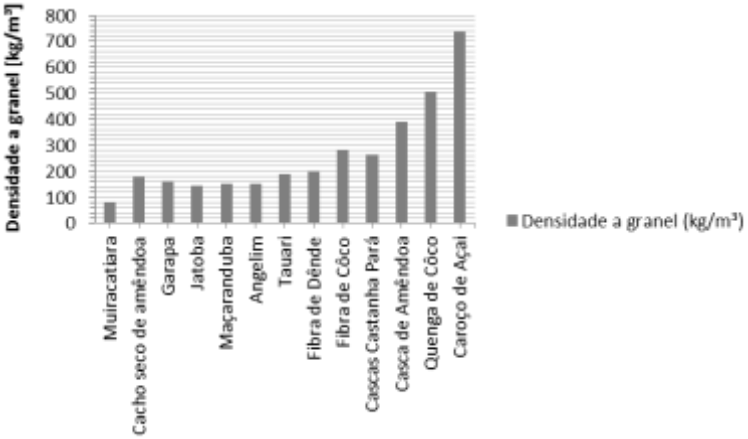


Figura 3.10 - Resultados dos ensaios de densidade a granel

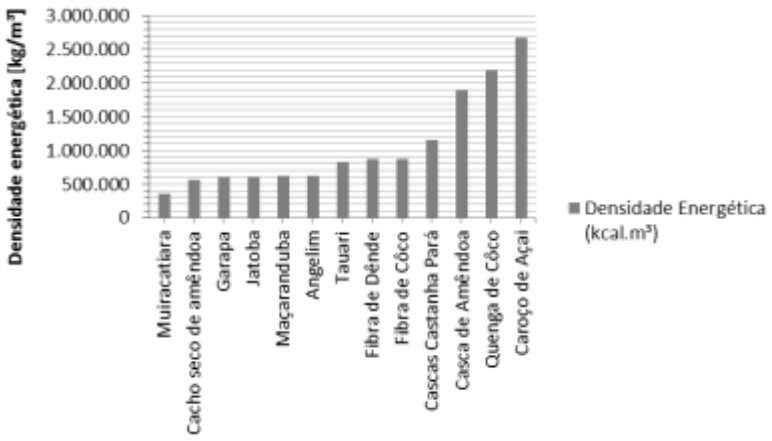


Figura 3.11 - Resultados dos ensaios de densidade energética

O parâmetro que influenciou mais intensamente os valores obtidos para a densidade energética foi à densidade a granel das amostras, àquelas com maior densidade à granel foram as que apresentaram maior densidade energética, sendo elas: caroço de açaí, casca de amêndoa e quenga de coco.

Enquanto que as biomassas constituídas por serragem, cuja densidade a granel é menor, de um modo geral apresentaram menor densidade energética, independente do PCI.

O bom desempenho do caroço de açaí pode ser questionado visto que a umidade (base seca) das amostras coletadas conforme a condição em que são disponibilizadas pelos produtores, situa-se na faixa 43% (base seca). Em (Brascep Engenharia LTDA, 1987) é indicado como inadequado para aproveitamento como biomassa combustível com umidade acima de 45% (base úmida).

Após a realização de ensaios com uma única biomassa realizou-se ensaios de misturas de biomassas. Os resultados dos ensaios das misturas de biomassa constituída por serragem mais resíduos agroindustriais foram aproximadamente à média ponderada dos valores obtidos para as amostras quando ensaiadas individualmente.

As Figura 3.12 a Figura 3.15, apresentam os resultados dos ensaios de umidade, PCI, densidade a granel e densidade energética das misturas de biomassa.

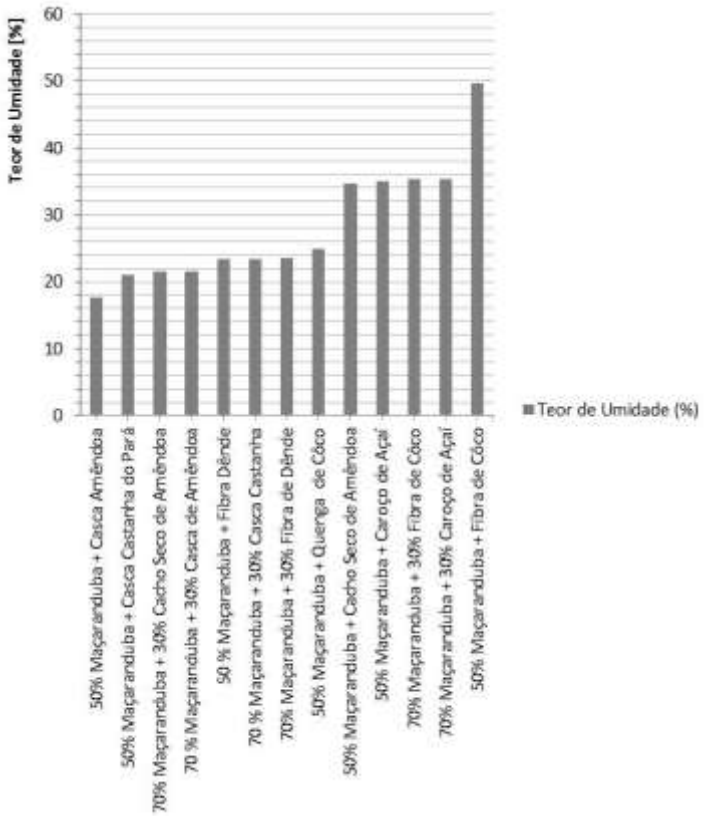


Figura 3.12 - Resultados dos ensaios de umidade das misturas

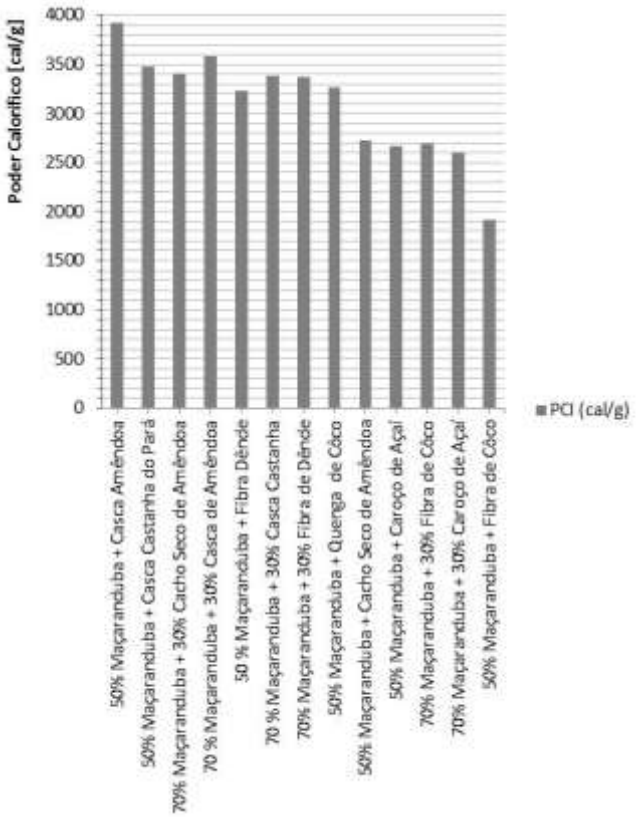


Figura 3.13 - Resultados do poder calorífico inferior das misturas

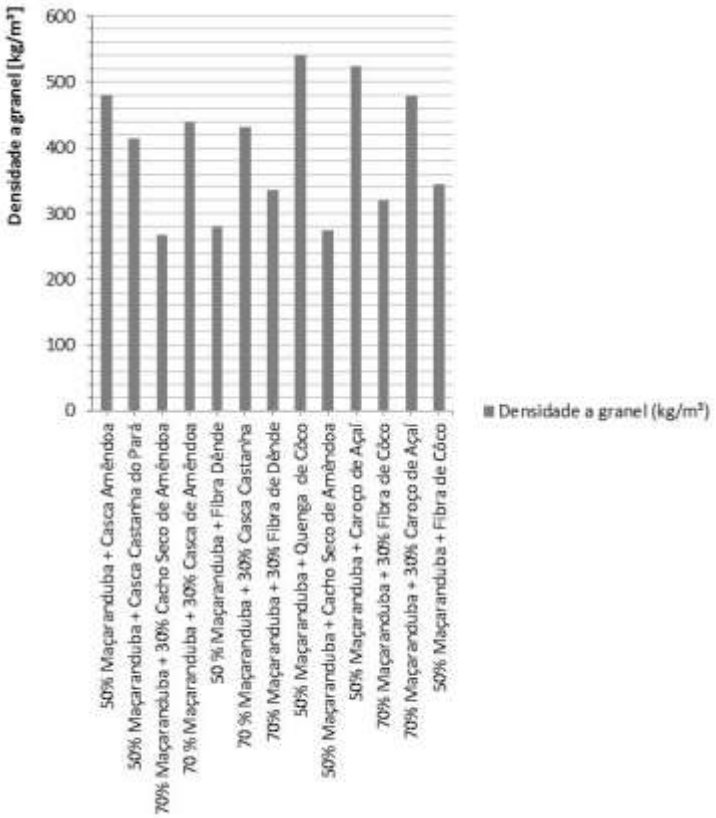


Figura 3.14 - Resultados dos ensaios de densidade a granel das misturas

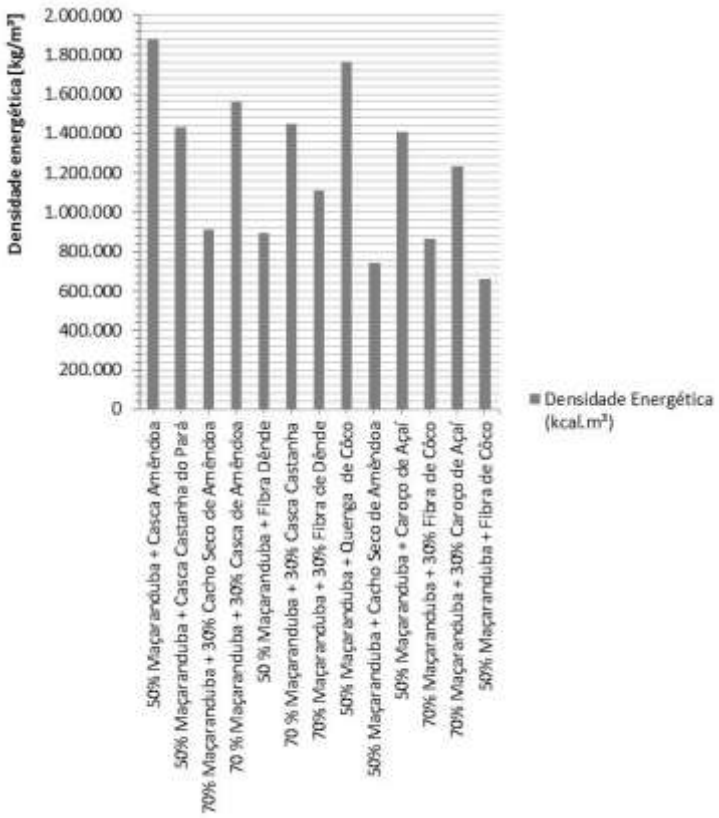


Figura 3.15 - Resultados dos ensaios de densidade energética das misturas

A fim de verificar a repercussão da densidade real, granulometria e umidade na densidade a granel e, consequentemente, na densidade energética dos resíduos, foram realizados ensaios em duas amostras de serragem constituídas de madeiras classificadas como madeira leve (quaruba com densidade real de 600 kg/m^3 a 12% de umidade) e madeira pesada (jatobá com densidade real de 890 kg/m^3 a 12% de umidade), e em amostras de resíduos da agroindústria, com granulometrias diversas (fibra de dendê e casca de castanha).Cada uma das amostras foram ensaiadas para duas condições de umidade, a saber, na umidade em que os resíduos foram coletados nas empresas (identificadas como amostras em umidade natural) e, umidade após a molhagem com água corrente (identificadas como amostras saturadas).

As Figura 3.16 a Figura 3.19 apresentam os resultados destes ensaios, a partir dos quais se verifica que a densidade real dos resíduos pouco influenciou nos resultados obtidos para o PCI, este fato pode ser observado especialmente para as amostras de serragem, cujo PCI (amostras com umidade natural) foi semelhante para as amostras de jatobá e quaruba, em torno de 2.900 kcal/kg, havendo redução significativa do valor de PCI com o aumento da umidade. Para as amostras de fibra de dendê e casca de castanha o PCI obtido foi significativamente maior que a das amostras de serragem, em torno de 3.900 kcal/kg.

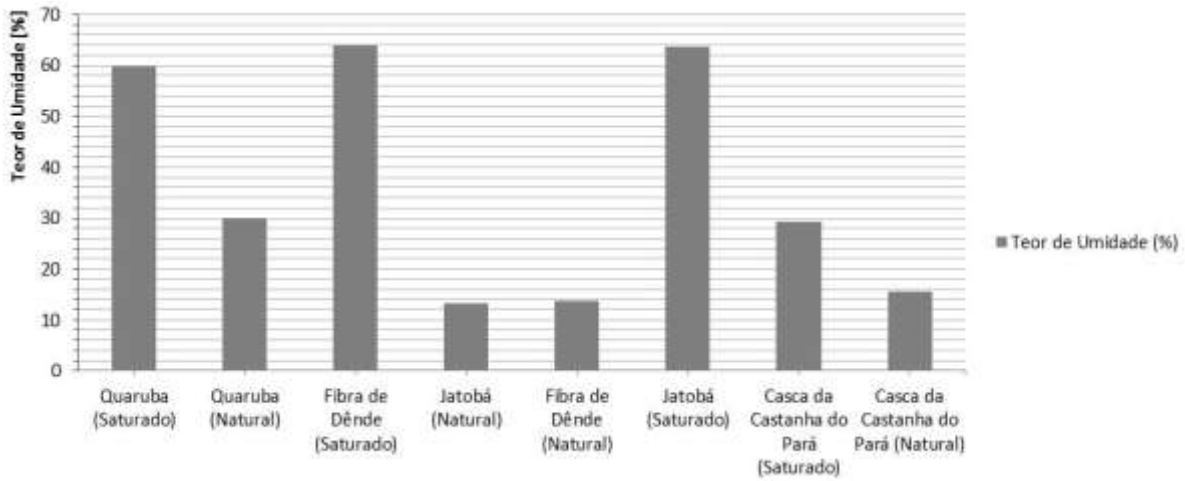


Figura 3.16 - Resultados do ensaios de umidade com variação da umidade

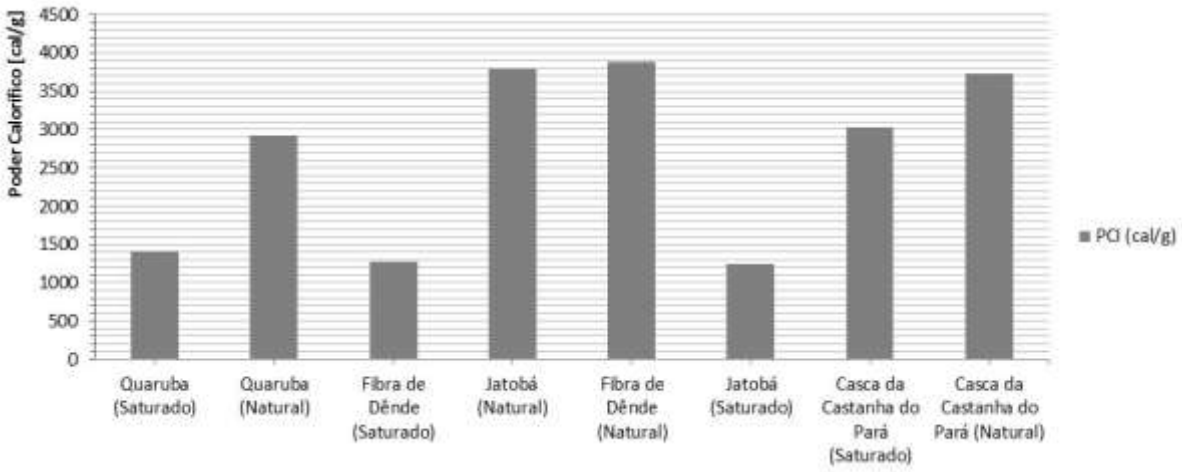


Figura 3.17 - Resultados do poder calorífico inferior com variação de umidade

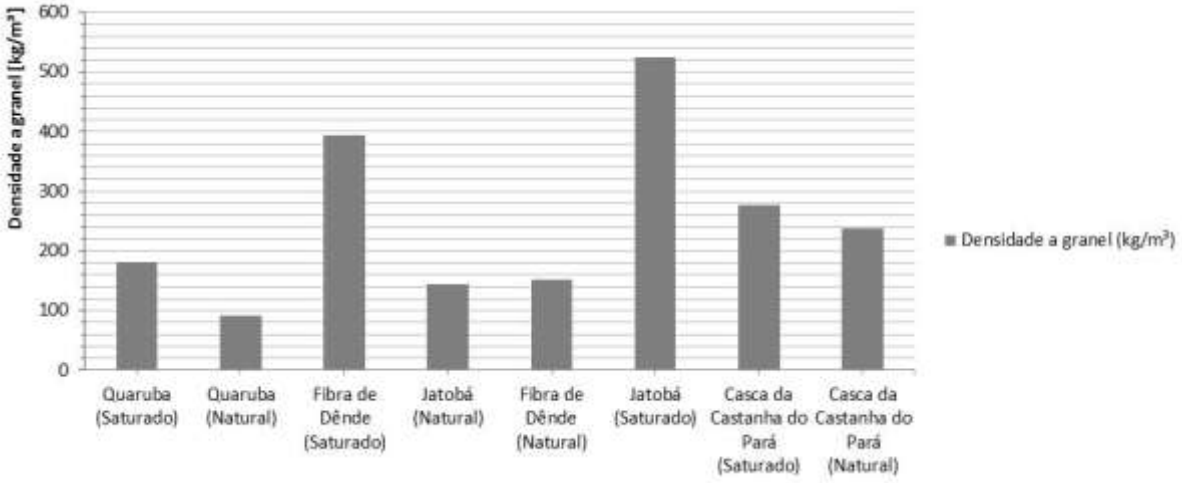


Figura 3.18 - Resultados dos ensaios de densidade a granel com variação de umidade

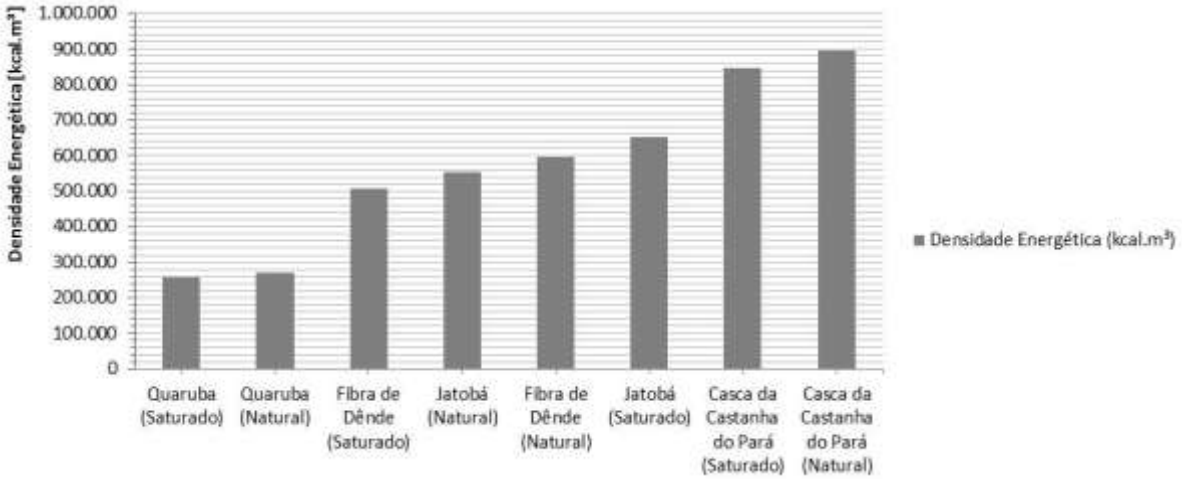


Figura 3.19 - Resultados dos ensaios de densidade energética com variação da úmida

A densidade real das amostras influência positivamente na densidade a granel das mesmas e garantem que a biomassa apresente maior densidade energética, nesta campanha de ensaios as amostras que apresentaram melhor desempenho como energético foram a casca de castanha e serragem de jatobá, que possuem maiores valores de densidade a granel, em umidade natural.

3.4 Comentários

Podem ser adotados como valor típico de PCS de resíduos vegetais 4.500 a 5.000 kcal/kg. Sendo o PCI dependente da umidade, pode-se considerar para umidade em torno de 30%, PCI de 3.000 kcal/kg para resíduos vegetais.

Quanto à densidade a granel de serragem, podem ser adotados valores na faixa de 150 kg/m3 (madeiras leves) a 250 kg/m^3 (madeiras pesadas) e a densidade energética na faixa de 450.000 a 600.000 kcal/m^3, considerando tratar-se do produto do PCI com a densidade a granel.

Como sugestão de trabalhos futuros pode ser realizada a queima de amostras de biomassa separadamente em usina piloto, a fim de confirmar os resultados de desempenho como combustíveis obtidos em laboratório. Especialmente testar a queima do caroço de açaí, que é um resíduo com quantitativo gerado significativamente na região em estudo e cuja densidade a granel apresentou valor consideravelmente maior que as demais biomassas estudadas.

Tendo em vista a baixa densidade a granel e a heterogeneidade natural dos resíduos, deve ser dada atenção especial ao armazenamento dos mesmos a fim de evitar que haja aumento da umidade, resultando em redução das características dos mesmos como combustíveis.

IV- POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO ESTADO DO PARÁ UTILIZANDO A BIOMASSA DO SETOR MADEIREIRO

A Amazônia é uma das maiores detentoras de riquezas florestais do mundo. Tem uma vasta variedade de espécies florestais madeireiras e com isso tornou-se uma grande fonte de suprimentos para o setor madeireiro, tanto a nível nacional como internacional, consequentemente, atraindo às atenções de todo o mundo.

Com o crescimento da atividade madeireira no norte e a exaustão das florestas do sul e sudeste do país, assim como, das florestas da África e sudeste Asiático, e com o grande comércio de produtos madeireiro realizado por nossa região, tornou o Estado do Pará um grande exportador de produtos florestais. Este indicador se deu pelo Estado possuir cerca de 73% de sua área coberta por florestas, além de ter condições excelentes para exploração: relevo, grande extensões de rios navegáveis e rodovias.

O volume de resíduos gerados pela indústria de base florestal, na região Amazônica, é em torno de 50% do volume de tora não processada. Além do desperdício de recursos naturais e do impacto ao meio ambiente, os usos tradicionais que são dados a esses resíduos não levam em conta o potencial econômico mais nobre desses materiais, já que esses resíduos são geralmente utilizados na:

- Transformação em energia por meio da queima;
- Uso e produção de carvão para fins industriais e domésticos;
- Queima a céu aberto.

A lenha é o tipo de resíduo oriundo da indústria de base florestal de maior representatividade, correspondendo a 71% da totalidade dos resíduos. O aproveitamento desses resíduos contribui para a racionalização dos recursos florestais, bem como para gerar uma nova alternativa econômica para as empresas e, desta forma aumentando a geração de renda e de novos empregos.

4.1 Revisão e Histórico:

4.1.1 Localização das Madeireiras

Os principais pólos madeireiros do Pará quanto ao número de empresas continuam sendo: Paragominas, Tomé-Açu, Tailândia e Ulianópolis, situado ao sul do Estado e os menores pólos são Afuá, Uruará e Novo Repartimento. (Rendeiro, et all,2011).

4.1.2 Período de Instalação

A atividade madeireira no Pará começou na década de 60 com a abertura de estradas (Belém-Brasília). O que permitiu o acesso a reservas florestais no leste e sul do estado, essa atividade teve um aumento considerável com o asfaltamento da PA 150, pois aumentou o acesso às florestas próximas do rio Tocantins, resultando no crescimento expressivo da produção madeireira.

Porém, a atividade madeireira em grande escala, pode ser considerada um fenômeno recente no Estado, já que metade das madeireiras foram instaladas na década de 90. Segundo a Federação das Indústrias do Estado do Pará - FIEPA, em 2010 existiam 553 empresas de fabricação de madeira.

4.1.3 Rendimento das Madeireiras

Os fatores que afetam o rendimento são: a forma de armazenamento, tipos de equipamentos, espécies madeireiras e qualificação da mão-de-obra.

Pesquisas de campo realizada pelo Grupo de Energia Biomassa e Meio Ambiente (EBMA) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pará (UFPA) (EBMA, 2009) estimaram um rendimento médio de 55% para o desdobro de toras, 30% para beneficiado e 35% para laminado.

4.1.4 Caracterização dos Resíduos

Em geral, os resíduos são classificados como um conjunto de materiais, compreendendo o que resta de matérias-primas após seu processamento e que não possam ser considerados produtos ou subprodutos que o empresário pretenda beneficiar.

Os resíduos florestais ocorrem na forma de galhos ou seções de fuste nas áreas de colheita e os resíduos industriais são na forma de finas partículas (serragem ou pó), costaneiras, refilos, destopos e maravalhas. Os resíduos ocasionados pela derrubada de árvores, quando acumulados em grande quantidade na floresta, afetam negativamente a regeneração das florestas nativas, aumentando o risco de incêndios e dificultam as operações de plantio.

A grande maioria das indústrias madeireiras elimina os resíduos através da combustão a céu aberto sem nenhuma preocupação de aproveitar o calor gerado. Algumas raras indústrias produzem carvão vegetal ou aproveitam os resíduos para geração de energia térmica na produção de vapor para as suas estufas.

4.1.5 Importância do Uso da Madeira para Produção Energia Térmica e Elétrica

Vários são os fatores que justificam o uso da madeira como recurso energético. Dentre estes fatores, destacam-se:

- O fato de a madeira ser uma fonte de energia renovável;
- Ser um combustível menos poluente, devido à baixa emissão de enxofre;
- Balanço nulo entre emissão de carbono pela unidade geradora e sua assimilação pela vegetação;
- Pode ser utilizada de forma direta ou transformada em combustível sólido (carvão e lenha), líquido (ácidos piro-lenhosos e alcatrão) e gasoso (H_2, CH_4, CO, etc.);

- Não necessita de armazenamento especial, podendo ser estocada a céu aberto.

4.1.6 Inconveniências do Uso da Madeira para Energia

Como maior desvantagem para uso energético, a madeira é um material volumoso e apresenta um poder calorífico baixo quando comparado com outros combustíveis (Petróleo). Porém, pode-se melhorar o aspecto energético da madeira transformando em carvão vegetal que tem maior poder calorífico. O uso da madeira para energia exige uma quantidade relativamente alta de mão de obra.

4.1.7 Características da Madeira para Combustão

A madeira como combustível apresenta características intrínsecas que devem ser levadas em consideração. Dentre essas, destacam-se:

- Teor de umidade da madeira;
- Poder calorífico;
- Poder calorífico superior (PCS);
- Poder calorífico inferior (PCI);
- Densidade Energética.

4.1.8 Processos de Transformação da Madeira

- Desdobro: É aquele que transforma as toras de madeira em pranchões de dimensões pré-definidas através de serras-fita, para que as mesmas possam ser exportadas.
- Beneficiamento: É aquele que transforma estes pranchões em produto acabado de qualquer natureza, sejam eles portas, janelas, móveis, etc.

- Laminação: É aquele que transforma as toras através de tornos para a fabricação de compensados ou outros tipos de painéis de madeira.

4.2 Metodologia de Avaliação do Potencial de Biomassa

Consiste em mapear as empresas madeireiras, através das licenças de operação “LO” obtidos por pesquisas de campo realizado nos municípios do Estado do Pará através de pessoas devidamente treinadas. Após coletados estes dados foram introduzidas e calculadas as potências térmica e elétrica que podem ser gerados por empresa. Dentre as informações recolhidas as mais relevantes para esta pesquisa são as atividades referentes aos processos de produção:

- Número de serras fitas;
- Volume médio de tora, madeira serrada e laminada por ano;
- Espécies mais utilizadas;
- Localização das empresas.

O levantamento foi realizado através da obtenção dos cadastros das empresas madeireiras devidamente registradas junto a FIEPA - Federação das Indústrias do Estado do Pará.

4.2.1 Ensaios de Laboratório

Após o levantamento das licenças de operação, outro levantamento importante para o banco de dados foi o das propriedades termofísicas das espécies de biomassa. Foram levantadas e utilizadas as normas brasileiras existentes para caracterização química imediata: teor de voláteis, teor de cinzas, teor de carbono fixo, umidade, poder calorífico superior e densidade a granel para o carvão vegetal. Os procedimentos estabelecidos nas normas citadas acima foram aplicados aos resíduos do setor madeireiro.

4.2.2 Tratamento dos Dados

Os dados levantados das empresas visitadas pela pesquisa de campo e as propriedades das biomassas obtidas em laboratório, foram introduzidos e filtrados através do software Microsoft Office Access, por ter sua interface extremamente “amigável” e de fácil manipulação de dados. Além disso, este pode gerar formulários e relatórios. A Figura 4.1 demonstra a facilidade de manipulação dos dados.

Lista de Empresas

ID	Empresas	Sistema	Municípios	Resíduo Total [m³/ano]	Potência Total Gerada [kW]	Resíduo Excedente [m³/ano]
1	ABINCO MADEIRAS LTDA	INTERLIGADO	ABAETETUBA	7200,00	103,30	4272,79
2	L. B. COELHO	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	4800,00	68,87	2848,48
3	MAD. MEDRAR LTDA	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	4800,00	222,63	4199,01
4	BOM JESUS IND. MAD. LTDA EPP	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	4600,00	218,04	4094,04
5	SERRARIA UBÁ LTDA	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	4800,00	222,63	4199,01
6	MAD. 03 IRMAOS LTDA	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	6000,00	279,54	5248,77
7	HIDILPLAC IND. COM. LTDA	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	7200,00	335,45	5826,32
8	HABEL MAD. LTDA	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	6600,00	87,86	3707,75
9	LUDI MADEIRAS LTDA	INTERLIGADO	ABEL FIGUEIREDO	12000,00	559,08	10497,53
10	IND. MAD. FÉLIX	INTERLIGADO	ACARÁ	5400,00	251,59	4723,89
11	MADEIREIRA BORGES	ISOLADO	AFUÁ	4500,00	209,66	3936,58
12	EMAPA - EXP. DE MADEIRA DO PARÁ LTDA	ISOLADO	AFUÁ	68960,00	2936,53	54643,35
13	IPAMA	INTERLIGADO	ÁGUA AZUL DO NORTE	12000,00	559,08	10497,53
14	BRASIBEL IND. E COM. EXP. LTDA	ISOLADO	ALMEIRIM	7200,00	335,45	6298,52
15	ALMEIRIM INDUSTRIAL	ISOLADO	ALMEIRIM	19500,00	908,51	16468,24
16	MADEIREIRA PALESTINA	ISOLADO	ALTAMIRA	4800,00	222,63	4199,01
17	INTERNACIONAL MADEIRAS LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	7200,00	335,45	6298,52
18	SANTA CLARA IND. COM. MADEIRA LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	2338,52		
19	CRUZ MACHADO LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	974,38		
20	OCEANO IND. E COM. DE MADEIRA LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	6000,00	279,54	5248,77
21	SAMA IND. COM. MADEIRAS LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	1169,26		
22	MADEIREIRA RENASCER	ISOLADO	ALTAMIRA	1559,01		
23	MADEIREIRA CARDOSAL LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	1169,26		
24	IMADAM - INDÚSTRIA MADEIREIRA DA AMAZÔNIA LTDA	ISOLADO	ALTAMIRA	1559,01		
Total		718				

Registro: 1 de 718 | Não Filtrado | Pesquisar

Figura 4.1 - Tela de visualização do Banco de Dados

Para este banco de dados foi desenvolvido um software em Visual Basic (Anexo I) para simular um sistema de cogeração de energia elétrica através do vapor gerado por uma turbina acoplado a uma estufa de secagem, como mostra a Figura 4.2.

Figura 4.2 - Cálculo de Potencial Energético por Empresa Pesquisada

Para esta simulação foram utilizados os dados da tabela 13 como parâmetros de entrada, fornecidos por estudos realizados pelo grupo EBMA (EBMA, 2009) e informações de fabricantes para uma usina operando a uma pressão de 2,1 MPa.

Na Tabela 4.1 são mostradas as constantes e os respectivos valores das constantes adotadas no cálculo, sendo que para os valores de entalpia de vapor e densidade a granel foi utilizada a média das espécies caracterizadas em laboratório.

Tabela 4.1- Parâmetros utilizados nos cálculos

Índice de Aproveitamento da Tora	55%
Índice de Aproveitamento e Beneficiamento	70%
Índice de Aproveitamento de Laminado	65%
Volume de Madeira Estufada	100%
Densidade à Granel	200,00 kg / m³
PCI	3.200 kcal/ kg
Rendimento da Caldeira	85 %
Relação serragem x Tora	5
Umidade da Madeira Serrada	30 %
Umidade Final da Madeira	10 %
Entalpia do Vapor a 21 bar	666 kcal/kg
Eficiência da Secagem	40 %
Consumo Específico da Turbina	10 kg/kWh

4.2.3 Cálculos do Programa

Foi elaborado um código computacional, também utilizando a linguagem Visual Basic, tomando como base os parâmetros de entrada. Os cálculos forneceram os seguintes dados de saída por empresa a partir dos volumes anuais de processamento de madeira:

- Cálculo do volume da tora (mês, dia, hora);
- Cálculo do volume beneficiado (mês, dia, hora);
- Cálculo do volume laminado (mês, dia, hora);
- Cálculo do resíduo disponível (ano, mês, dia, hora);
- Cálculo do vapor total gerado (ano, mês, dia, hora);
- Cálculo do vapor para secagem (ano, mês, dia, hora);
- Cálculo do vapor para geração de energia (ano, mês, dia, hora);
- Cálculo da densidade energética;
- Cálculo da potência elétrica gerada;
- Cálculo da potência elétrica excedente.

4.3 Sistema de Informação Geográfica (SIG)

Esse sistema consiste na implementação de dados georeferenciados, com o intuito de obter a localização das empresas pesquisadas, utilizando um aparelho de localização por coordenadas georeferenciadas (GPS). A partir dos dados de georeferenciamento, foram gerados mapas do Estado do Pará e seus municípios contendo informação de rios, rodovias, sedes, além da interface com as informações do banco de dados do Microsoft Access.

Para esta aplicação, foi escolhido o Software ARC VIEW 3.2a, devido fácil manipulação dos dados e interface simples com o banco de dados Microsoft Access, a partir de consultas geradas no mesmo, onde essas consultas consistem em dados filtrados do banco de dados “Madeireiras Pará”. Para visualizar os dados destas

consultas, no Arc View, basta clicar no símbolo referente a uma empresa madeireira no mapa, representada pela figura de um triângulo, conforme mostra a Figura 4.3.

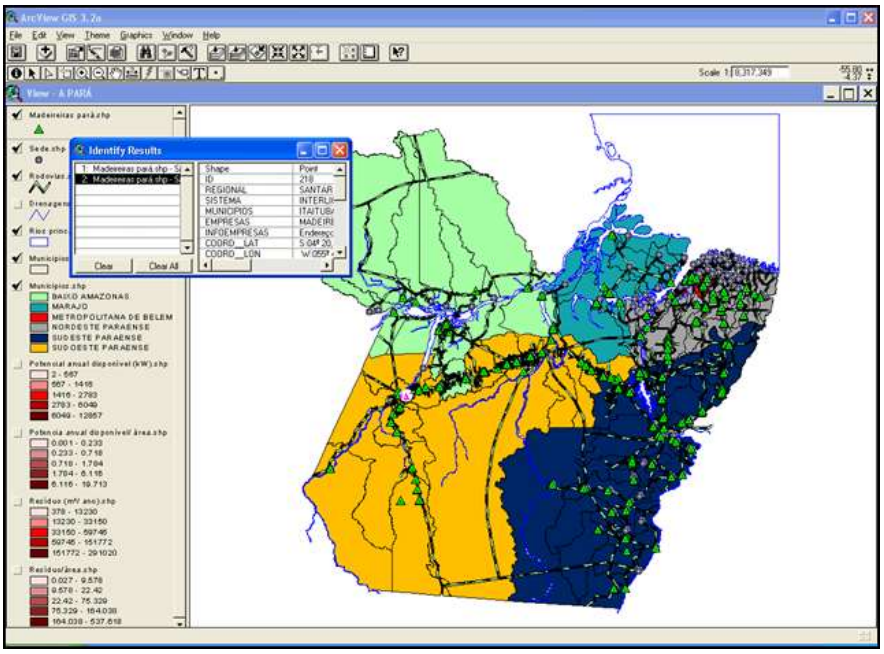


Figura 4.3 - Tela de visualização do Software Arcview 3.2

4.4 Tratamento dos Dados

Dos 143 municípios pesquisados, 88 apresentaram potencial para gerar energia elétrica através de biomassa energética. Sendo que os outros municípios, pelo fato de não possuírem empresas madeireiras, não puderam entrar neste estudo.

Na Figura 4.4 são mostrados os tipos de empresas madeireiras espalhadas pelo Estado: empresas que desdobram, empresas que beneficiam, empresas que laminam, empresas que desdobram e beneficiam, empresas que desdobram e laminam, empresas que beneficiam e laminam e empresas que desdobram e beneficiam e laminam.

Juntas estas empresas processam um volume aproximado de 8,7 milhões de m³ por ano (Figura 4.5), produzindo cerca de 3,61 milhões de m³ por ano de

resíduos (Figura 4.6) o que permite a geração de aproximadamente 160 MW de potência média anual (Figura 4.7), o que é um valor relevante.

Vale ressaltar que o Estado possui em sua maioria empresas de desdobro, o que é muito ruim para a região, pois além de ser o processo que apresenta o menor aproveitamento, também, é aquele de menor valor agregado.

Os gráficos de resíduos e volume gerados mostram bem este desperdício, pois qualitativamente os volumes de resíduos são maiores que os produzidos.

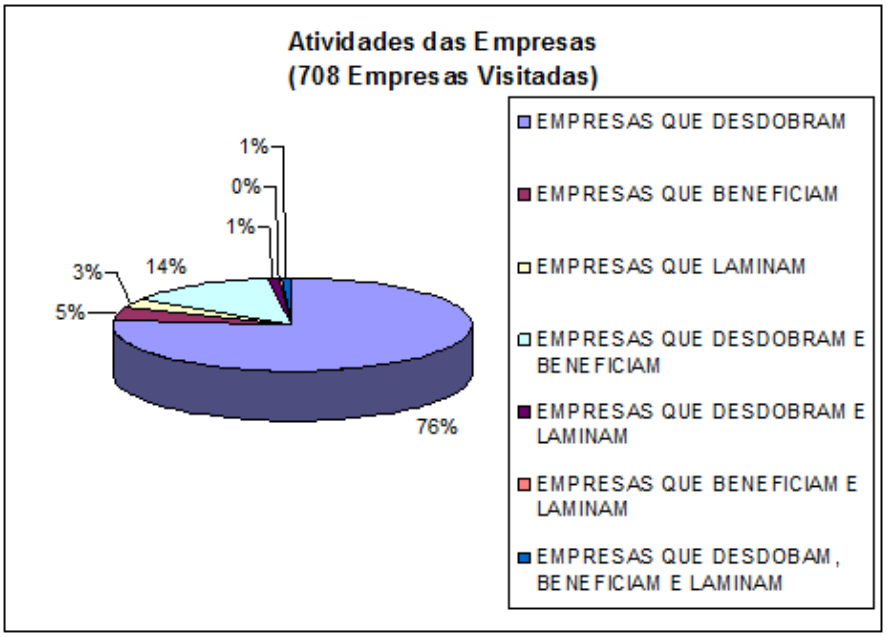


Figura 4.4 - Empresas Visitadas

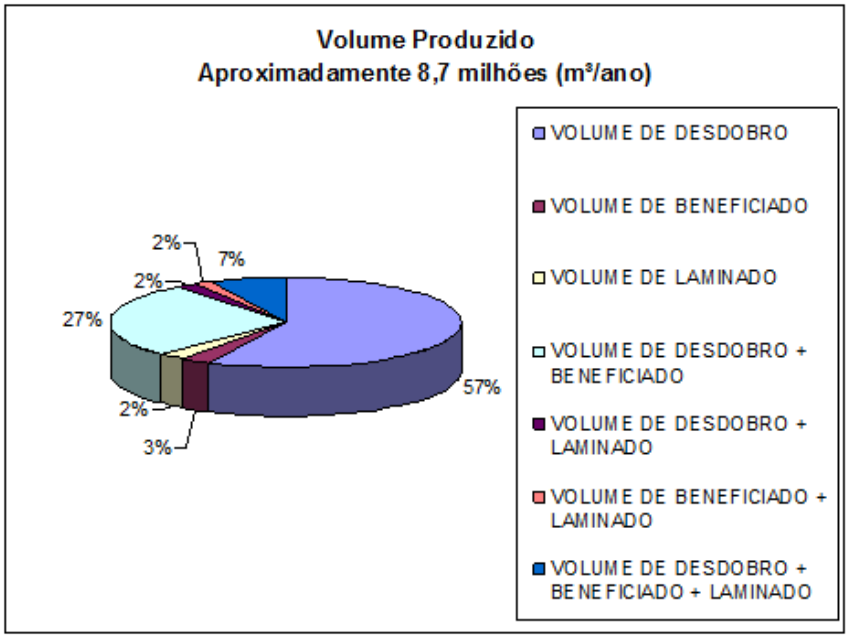


Figura 4.5 - Volume Produzido

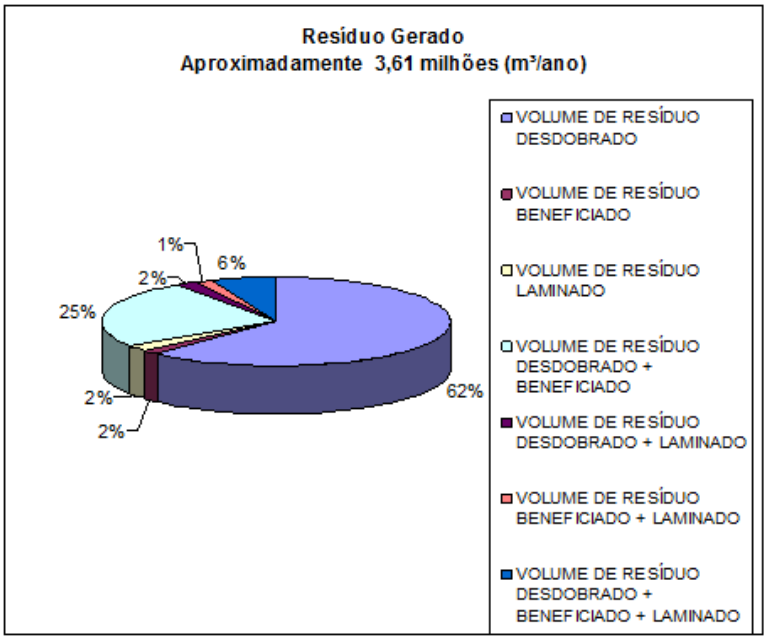


Figura 4.6 - Resíduo Gerado

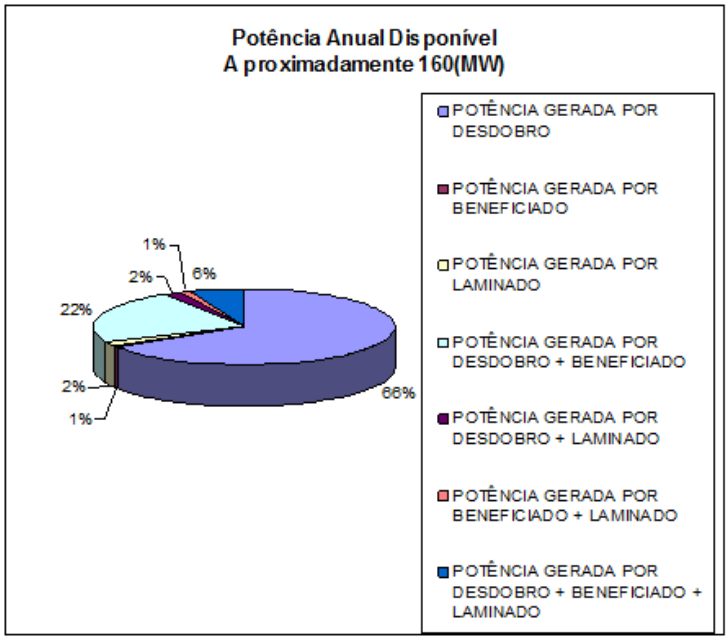


Figura 4.7 - Potência anual Disponível

4.4.1 Histogramas

Na Figura 4.8 pode-se observar claramente que a grande parte das empresas está concentradas entre 6 e 12 mil m³/ano. Esta divisão é observada devido ao número de serra fitas das empresas, pois uma serra fita produz em média 6.000 m³/ano.

Nota-se, também, na Figura 4.9 que grande parte das empresas gera em média de 3000 a 6000 m³/ano de volume de resíduo (65 % delas).

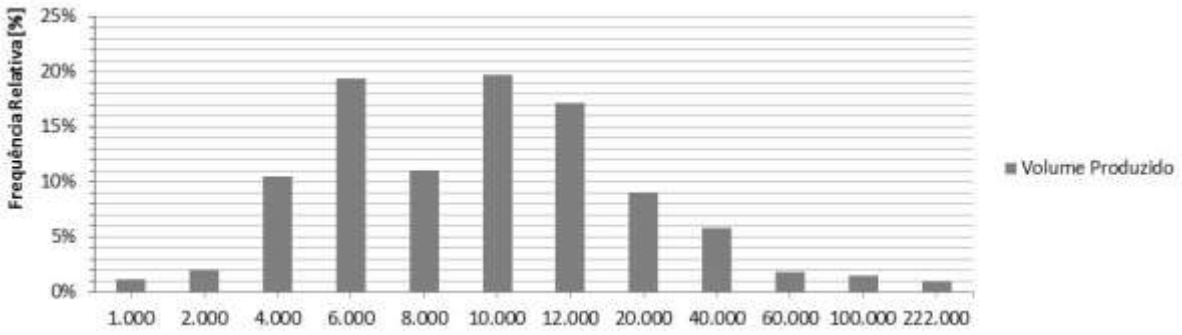


Figura 4.8 - Histograma do Volume Produzido

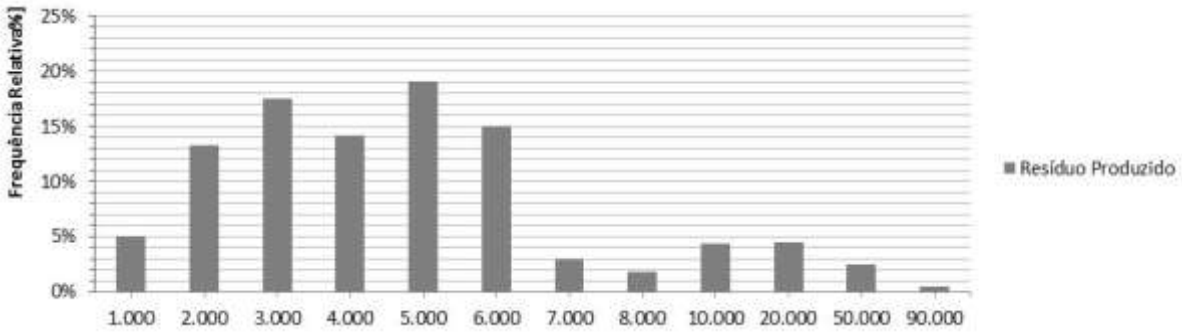


Figura 4.9 - Histograma do Resíduo Produzido

Aproximadamente 70 % das empresas pesquisadas possuem potencial para gerar sozinhas de 200 a 300 kW de potência (Figura 4.10).

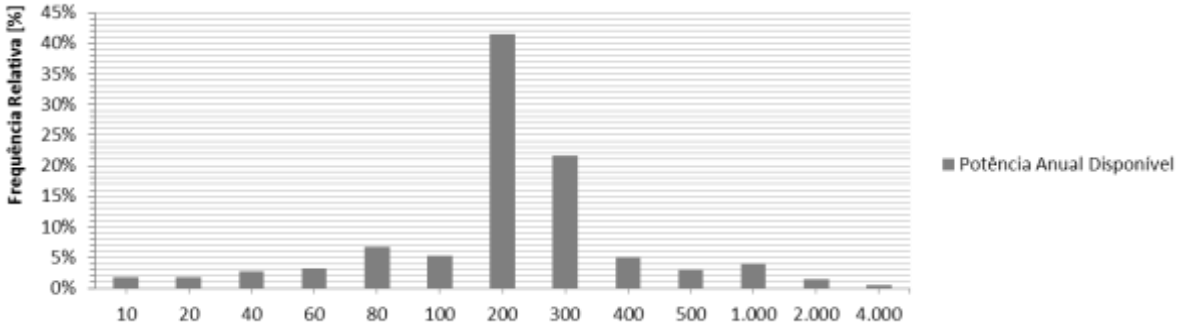


Figura 4.10 - Histograma da Potência Anual Disponível

4.4.2 Mapas Gerados

Os municípios que possuem a maior quantidade de resíduos não necessariamente possuem o maior potencial de geração de energia elétrica, pois dependendo do tipo de serraria, parte do resíduo pode ser utilizado para produzir vapor de processo. Assim, os mapas a seguir têm o objetivo de identificar os municípios que apresentam maiores potências, seja de geração de resíduo ou de geração de eletricidade.

Através da Figura 4.11 pode–se observar que os municípios de Paragominas, Portel, Breves e Belém são os que apresentam a maior produção de resíduos. Já na Figura 4.12 foi observado que os municípios de Paragominas, Portel, Breves, a Região Metropolitana de Belém, juntamente com os municípios de Jacundá, Goianésia, Tucuruí e Tailândia são os que apresentam o maior potencial de geração de energia elétrica.

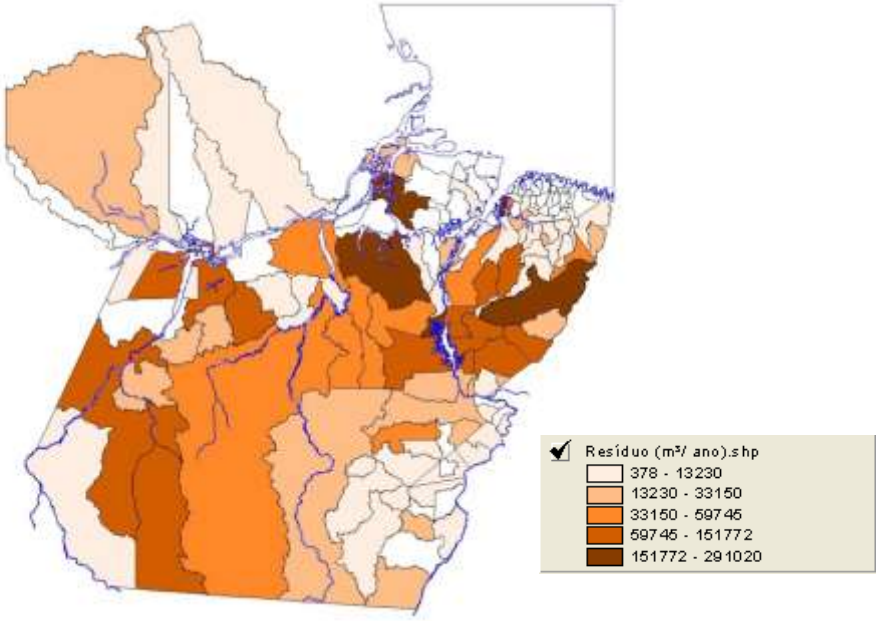


Figura 4.11 - Mapa do Resíduo Disponível

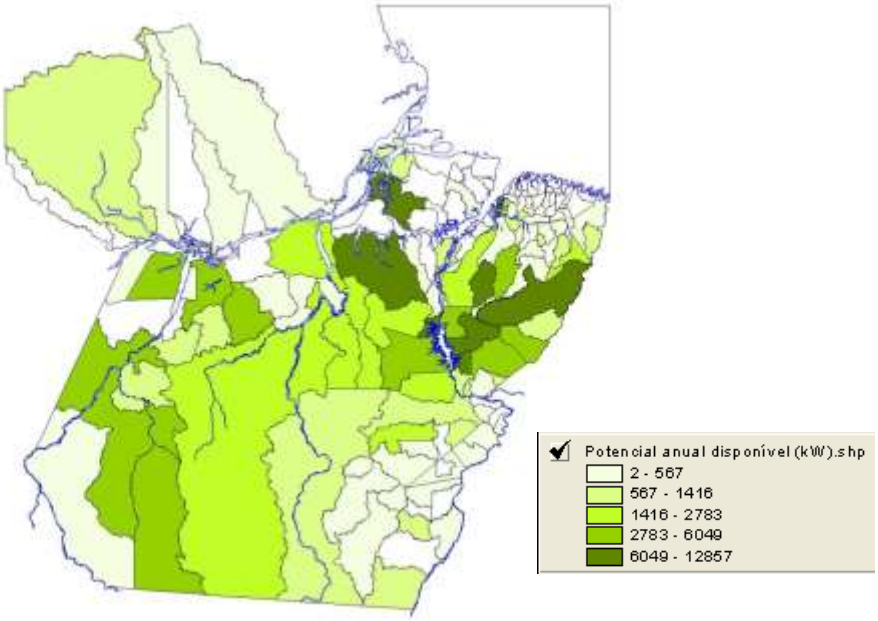
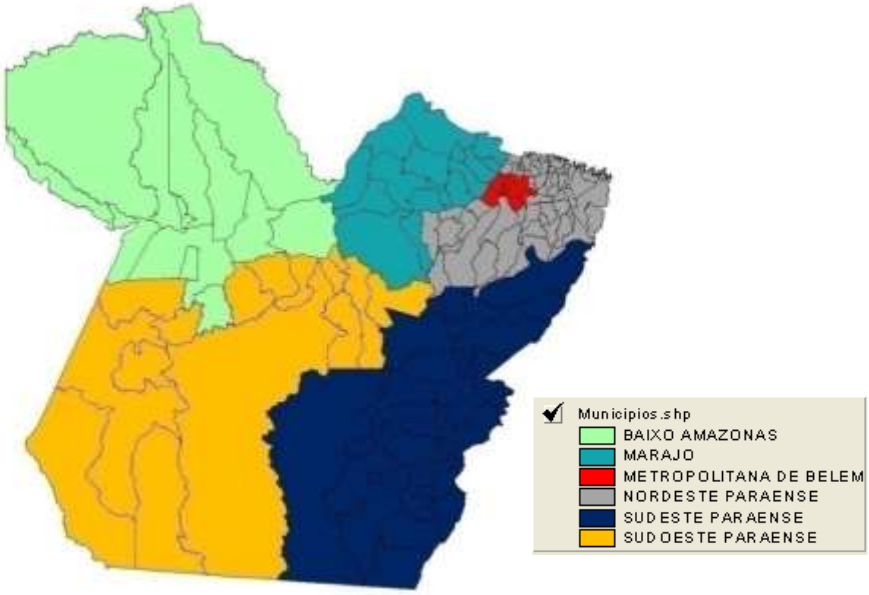


Figura 4.12 - Mapa da Potência Anual Disponível

4.4.3 As Mesorregiões

Para facilitar o estudo, foram consideradas as mesorregiões do Estado do Pará, que são: Baixo Amazonas, Região Metropolitana de Belém, Sudeste Paraense, Sudoeste Paraense, Nordeste Paraense e Marajó (Figura 4.13). Os principais dados destas mesorregiões são apresentados na Tabela 4.2.



.

Figura 4.13 - Mapa das Mesorregiões

Tabela 4.2 - Dados das Empresas/Mesorregião

MESO REGIÃO	NÚMERO DE EMPRESAS	VOLUME GERADO (m^3/ano)	RESÌDUO GERADO (m^3/ano)	POTÊNCIA ANUAL DISPONÍVEL (kW)
BAIXO AMAZONAS	42	504.402	199.756,5	8.278
REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM	52	1.146.060	434.481	17.071
NORDESTE	107	1.031.717	449.022,3	20.450
SUDESTE	331	3.751.582	1.595.268	72.178
SUDOESTE	151	1.246.020	534.549	24.369
MARAJÓ	24	1.016.117	396.735	16.177

Um fato interessante da Tabela 4.2 é que o Nordeste Paraense apesar de possuir um número maior de empresas se comparado com a Região Metropolitana

de Belém – RMB apresenta um volume produzido menor, um resíduo gerado maior e uma potência anual maior. Isto se deve ao fato de na RMB haver uma predominância de empresas de beneficiamento e, além disso, grande parte da madeira processada ser proveniente de outras mesorregiões, inclusive do próprio Nordeste.A quantidade maior de resíduos no Nordeste é devido o tipo de processo, onde na RMB fica claro um número maior de empresas de beneficiamento (maior índice de aproveitamento).

Com relação ao potencial, um fator de alta relevância é a presença de estufas nas empresas da RMB, já que estas utilizam parte do vapor gerado para as mesmas (potência térmica), diminuindo desta forma o potencial de geração da potência elétrica.

4.5 Metodologia dos Custos

Após analisadas as mesorregiões, foram identificados os municípios isolados do sistema elétrico convencional com produção de biomassa e aqueles pertencentes ao sistema interligado com produção de biomassa e possibilidade de fornecimento aos municípios isolados mais próximos.

Para o cálculo da potência instalada, considerou-se o consumo da madeireira (basicamente o consumo específico do equipamento de maior consumo em função do volume produzido), e o excedente seria disponibilizado para transporte. Nos sistemas isolados, todo o resíduo disponível nesse município seria integralmente utilizado para geração de eletricidade, tendo esse resíduo somente o custo do seu transporte da serraria até a planta termoelétrica.

Para os cálculos de potência instalada, que é aquela utilizada pela empresa para ela se auto sustentar foram estimados através de dados fornecidos pelo EBMA que:

- Para desdobro foi considerado que a cada 12.000m³ de madeira processada demanda 70 kW;

- Para beneficiado foi considerado que a cada 12.000m³ de madeira processada demanda 70 kW;
- Para laminado foi considerado que a cada 9.000m³ de madeira processada demanda 80 kW.

A potência excedente é dada pela fórmula abaixo:

$$\boldsymbol{Potênciaexccedente = potênciagerada - potênciainstalada} \quad \textbf{(36)}$$

Os municípios isolados e suas respectivas demandas, além das potências disponíveis e excedentes estão na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Demanda e potenciais dos municípios isolados

MUNICÍPIOS	Demanda (kW)	Potência Disponível (kW)	Potência Excedente (kW)
BAIXO AMAZONAS			
ALENQUER	3433,30	0,00	0
ALMEIRIM	2437,50	518,00	0
GURUPÁ	1316,90	0,00	0
CURUA	694,20	0,00	0
FARO	521,30	0,00	0
JURUTI	1514,50	18,00	0
MONTE ALEGRE	4668,30	25,00	0
ÓBIDOS	4209,40	0,00	0
ORIXIMINÁ	5717,40	789,00	0
PORTO DE MOZ	1342,90	1683,00	340,10
PRAINHA	832,00	0,00	0
TERRA SANTA	1205,10	0,00	0
NORDESTE PARAENSE			
NOVA ESPERANÇA DO PIRIÁ	904,80	2007,00	1102,20
SUDESTE PARAENSE			
BANNACH	312,00	88,00	0
SANTA MARIA DAS BARREIRAS	299,00	0,00	0
SANTANA DO ARAGUAIA	3519,10	877,00	0
BARREIRA DO CAMPO	248,30	0,00	0
KARAPANÃ	150,80	0,00	0
MANDI	232,70	0,00	0
AVEIRO	275,60	0,00	0
JACAREACANGA	572,00	276,00	0
NOVO PROGRESSO	6240,00	4207,00	0
CASTELO DOS SONHOS	1839,50	0,00	0
MARAJÓ			
AFUÁ	968,50	1091,00	122,50
ANAJÁS	702,00	0,00	0
BAGRE	507,00	126,00	0
BREVES	5691,40	8458,00	2766,60
CACHOEIRA DO ARARI	715,00	0,00	0

Continuação da Tabela 4.3

MUNICÍPIOS	Demanda (kW)	Potencial Disponível (kW)	Potência Excedente (kW)
MARAJÓ			
CHAVES	292,50	0,00	0
COTIJUBA	390,00	0,00	0
CURRALINHO	803,40	0,00	0
MELGAÇO	403,00	0,00	0
MUANÁ	1183,00	0,00	0
OEIRAS DO PARÁ	868,40	0,00	0
PONTA DE PEDRAS	1248,00	85,00	0
PORTEL	3659,50	6417,00	2757,50
SANTA. CRUZ ARARI	377,00	0,00	0
SÃO SEBASTIÃO DA BOA VISTA	897,00	0,00	0
SALVATERRA	2420,60	0,00	0
SOURE	2947,10	0,00	0

O próximo passo foi identificar os municípios com potencial disponível para fornecer biomassa, tendo como fator predominante para a escolha a distância. A distância foi medida com o auxílio do software Arcview 3.2ª, já que o mesmo possibilita esta interface e as rotas escolhidas juntamente com os respectivos potenciais disponíveis seguem na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Potencial a ser fornecido e distâncias

ROTAS DE TRANSPORTE	PONTENCIAL A SER FORNECIDO (kW)	DISTÂNCIA TERRESTRE (km)	DISTÂNCIA FLUVIAIS (km)
BAIXO AMAZONAS			
SANTARÉM – ALENQUER	2707,73		61
GOIANÉSIA – ROTA BREU BRANCO	4711,45	57	
NOVO REPARTIMENTO - ROTA BREU BRANCO	4014,42	69	
TUCURUÍ - ROTA BREU BRANCO	7089,8	11	
DOM ELISEU - ROTA BREU BRANCO	2194,45	320	
PARAGOMINAS - ROTA BREU BRANCO	4141,95	359	
ROTA BREU BRANCO - ROTA PORTO DE MOZ	22152,07		709
ROTA PORTO DE MOZ – ALENQUER	725,57		390
ROTA PORTO DE MOZ – ALMERIM	1919,5		65
ROTA PORTO DE MOZ – GURUPÁ	1316,9		82
ROTA PORTO DE MOZ – CURUÁ	694,2		435
ROTA PORTO DE MOZ – FARO	521,3		617

Continuação da Tabela 4.4

ROTAS DE TRANSPORTE	PONTENCIAL A SER FORNECIDO (kW)	DISTÂNCIA TERRESTRE (km)	DISTÂNCIA FLUVIAL (km)
BAIXO AMAZONAS			
ROTA PORTO DE MOZ – JURUTÍ	1496,5		513
ROTA PORTO DE MOZ - MONTE ALEGRE	4643,3		273
BAIXO AMAZONAS			
ROTA PORTO DE MOZ – ÓBIDOS	4209,4		472
ROTA PORTO DE MOZ – ORIXIMINÁ	4928,4		495
ROTA PORTO DE MOZ – PRAINHA	832		165
ROTA PORTO DE MOZ - TERRA SANTA	1205,1		576
SUDESTE			
ÁGUA AZUL DO NORTE – BANNACH	182	180	
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA – KARAPANÃ	150,8	354	
JACUNDÁ - SANTANA DO ARAGUAIA	2642,1	608	
REDENÇÃO - SANTA MARIA DAS BARREIRAS	299	178	
REDENÇÃO - BARREIRA DO CAMPO	248	208	
REDENÇÃO – BANNACH	42	108	
SÃO FÉLIX DO XINGU - VILA MANDI	232,7	55	
SUDOESTE			
RURÓPOLIS – AVEIRO	275,6	137	
RURÓPOLIS - NOVO PROGRESSO	543,37	457	
ITAITUBA – JACAREACANGA	296	383	
CASTANHAL - ROTA BELÉM	71,18	73	
BENEVIDES - ROTA BELÉM	1439,25	31	
MARITUBA – ROTA BELÉM	765,8	20	
ANANINDEUA - ROTA BELÉM	2100	16	
ROTA BELÉM – COTIJUBA	390		25
ROTA BELÉM – MUANÁ	1183		129
ROTA BELÉM - PONTA DE PEDRAS	1163		71
ROTA BELÉM – SALVATERRA	2420,6		81
ROTA BELÉM – SOURE	2947,1		85

Para o cálculo da quantidade de resíduos que deveriam ser transportados para o referido município foi adotada a seguinte metodologia:

O EBMA forneceu a informação de que para cada 2,5 kg/h de biomassa consumido seria gerado 1 kWe (elétrico) de potência, levando em conta todos os

rendimentos da planta de geração de energia. A quantidade total de resíduos é dado pela expressão abaixo:

$$QTD_{res} = Potência\ excedente\ \times \frac{2,5}{1000} \quad (37)$$

Onde:

QTD_{res}= Quantidade total de resíduos [kg/h]

Para o cálculo dos custos, foi adotada uma média de US$10,00/ton a cada 100km, para o transporte fluvial e US$30,00/ton a cada 100km, para o transporte rodoviário. Ambos considerados como produtos transportados à granel. Estes valores foram obtidos através do Sistema de Informação de Fretes – SIFRECA, em 2010.

$$CT_{Transp} = cotaçãodoDólar(\mathrm{R\$})\ \times\ QTD_{res}\ \times \left(Distânciaterrestre\ \times \frac{30}{100} + DistânciaFluvial\ \times \frac{10}{100}\right) \quad (38)$$

Onde:

CT_{Transp}. = Custo Total com Transportes

O valor do dólar usado foi de R$ 1,60.

Na Tabela 4.5 estão os valores da quantidade de resíduos por hora, custo de transporte e custo de transporte por tonelada hora, tendo em vista que para uma análise econômica esta última é a melhor forma de representar os custos.

Tabela 4.5 - Quantidade de resíduos e custos

ROTAS DE TRANSPORTE	QUANTIDADE DE RESÍDUOS NECESSÁRIOS (ton/h)	CUSTO TOTAL COM TRANSPORTE (R$)	CUSTO POR TONELADA (R$/ton)
BAIXO AMAZONAS			
SANTARÉM – ALENQUER	6,7693	94,97	14,03
GOIANÉSIA - ROTA BREU BRANCO	11,779	463,25	39,33
NOVO REPARTIMENTO - ROTA BREU BRANCO	10,036	477,82	47,61
TUCURUÍ – ROTA BREU BRANCO	17,725	134,53	7,59
DOM ELISEU - ROTA BREU BRANCO	7,2613	1603,28	220,80
PARAGOMINAS - ROTA BREU BRANCO	8,5798	2125,29	247,71
ROTA BREU BRANCO - ROTA PORTO DE MOZ	55,38	9030,85	163,07
ROTA PORTO DE MOZ – ALENQUER	1,8139	609,01	335,74
ROTA PORTO DE MOZ – ALMERIM	4,7988	1252,44	260,99
ROTA PORTO DE MOZ – GURUPÁ	3,2923	872,12	264,90
ROTA PORTO DE MOZ – CURUÁ	1,7355	600,64	346,09
ÁGUA AZUL DO NORTE – BANNACH	0,455	56,51	124,20
CONCEIÇÃO DO ARAGUAIA – KARAPANÃ	0,377	92,09	244,26
JACUNDÁ - SANTANA DO ARAGUAIA	6,6053	2771,03	419,52
REDENÇÃO - SANTA MARIA DAS BARREIRAS	0,7475	91,81	122,82
REDENÇÃO - BARREIRA DO CAMPO	0,6208	89,09	143,52
REDENÇÃO – BANNACH	0,105	7,82	74,52
SÃO FÉLIX DO XINGU - VILA MANDI	0,5818	22,08	37,95
SUDOESTE			
RURÓPOLIS – AVEIRO	0,689	65,13	94,53
RURÓPOLIS - NOVO PROGRESSO	1,3584	428,35	315,33
ITAITUBA - JACAREACANGA	0,74	195,56	264,27
ITAITUBA - CASTELO DOS SONHOS	4,5988	1723,01	374,67
ITAITUBA – NOVO PROGRESSO	1,32	350,66	266,34
TRAIRÃO – NOVO PROGRESSO	2,4075	518,29	215,28
MARAJÓ			
BREVES – ANAJÁS	1,755	81,13	46,23
BREVES – BAGRE	0,9525	9,42	9,89
BREVES - CACHOEIRA DO ARARÍ	1,7875	119,64	66,93
BREVES – CHAVES	0,425	26,20	61,64
BREVES - SANTA CRUZ DO ARARÍ	0,9425	77,17	81,88
AFUÁ – CHAVES	0,3063	3,94	12,88
PORTEL – CURRALINHO	2,0085	97,93	48,76
PORTEL – MELGAÇO	1,01	5,33	5,29
PORTEL - OEIRAS DO PARÁ	2,171	79,39	36,57

Continuação da Tabela 4.5

ROTAS DE TRANSPORTE	QUANTIDADE DE RESÍDUOS NECESSÁRIOS (ton/h)	CUSTO TOTAL COM TRANSPORTE (R$)	CUSTO POR TONELADA (R$/ton)
SUDOESTE			
PORTEL - SÃO SEBASTIÃO DA BOA VISTA	2,24	94,80	42,32
CASTANHAL – ROTA BELÉM	0,178	8,96	50,37
BENEVIDES – ROTA BELÉM	3,5981	76,96	21,39
MARITUBA – ROTA BELÉM	1,9145	26,42	13,80
ANANINDEUA – ROTA BELÉM	5,25	57,96	11,04
ROTA BELÉM – COTIJUBA	0,975	10,67	10,94
ROTA BELÉM – MUANÁ	2,9575	103,08	34,85
ROTA BELÉM - PONTA DE PEDRAS	2,9075	62,55	21,51
ROTA BELÉM - SALVATERRA	6,0515	144,11	23,81
ROTA BELÉM – SOURE	7,3678	182,23	24,73

Para o abastecimento de biomassa das mesorregiões do sudeste e sudoeste paraense não foi necessário o transporte de outras mesorregiões, todavia isso não aconteceu com o Baixo Amazonas e o Marajó, onde ouve a necessidade de biomassa proveniente do sudeste (Rotas Breu Branco e Porto de Moz), e da Região metropolitana (Rota Belém), onde a biomassa foi concentrada em um município portuário para depois ser “diluído” para os outros municípios, o valor do custo de transporte da biomassa também foi distribuído proporcionalmente pelos municípios.

4.5.1 Mapas das rotas

4.5.1.1 Baixo Amazonas

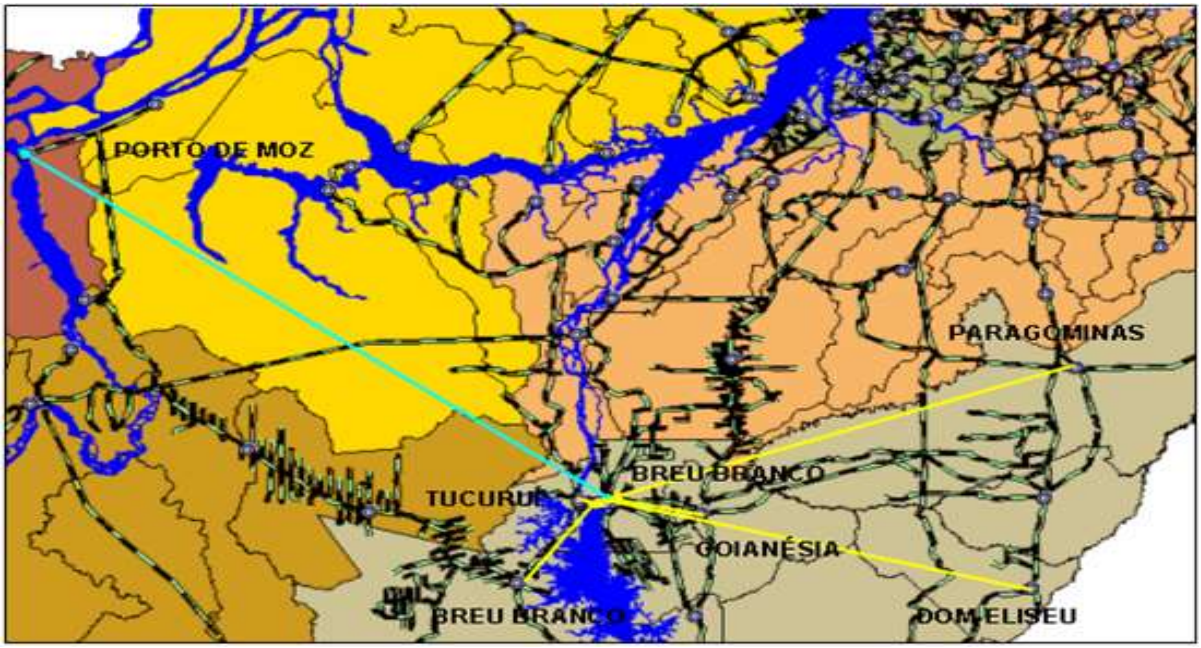


Figura 4.14 - Mapa com as rotas para Breu Branco e em seguida para Porto de Moz

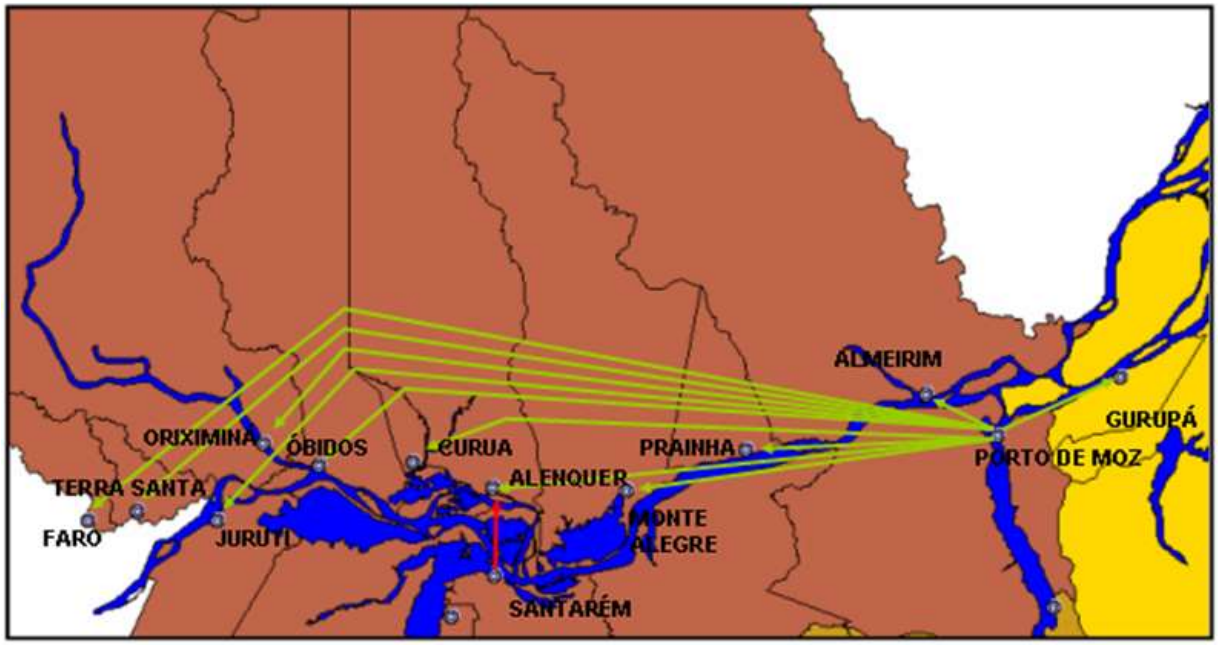


Figura 4.15 - Mapa com as rotas de Porto de Moz para os demais municípios isolados do Baixo Amazonas

4.5.1.2 Sudeste

Figura 4.16 - Mapa com as rotas para os municípios isolados do Sudeste Paraense

4.5.1.3 Sudoeste

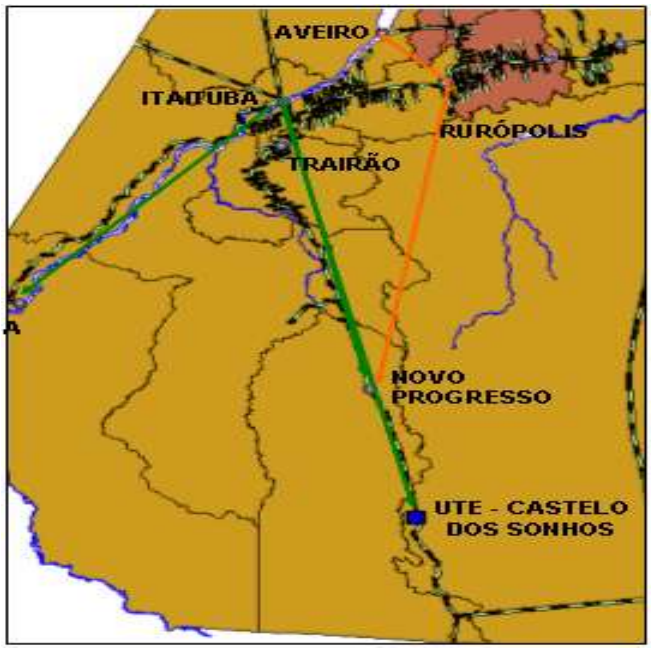


Figura 4.17 - Mapa com as rotas para os municípios isolados do Sudoeste Paraense

4.5.1.4 Marajó

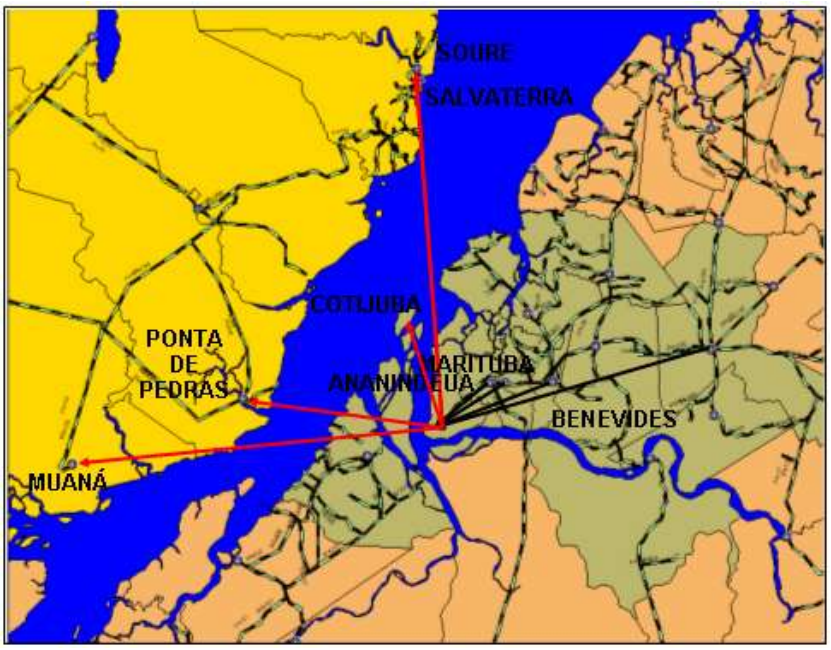


Figura 4.18 - Mapa com as rotas para Ananindeua e depois para os municípios isolados do Marajó

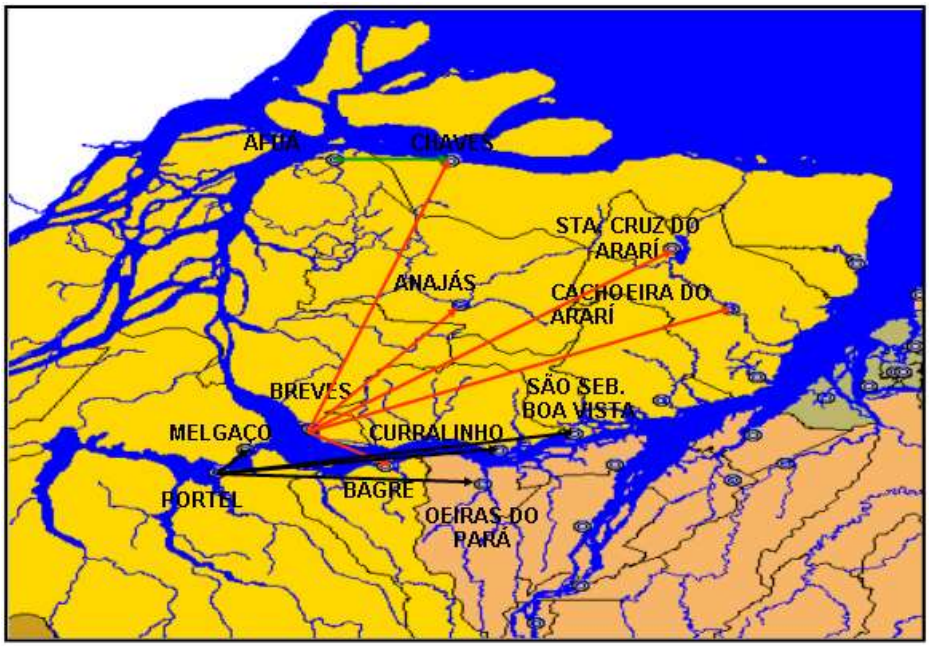


Figura 4.19 - Mapa com as rotas para os municípios isolados do Marajó

4.6 Resultados e Comentários

A mesorregião do Marajó foi aquela que apresentou melhor possibilidade de aproveitamento da biomassa dentro da própria mesorregião, pois necessitou de pouca biomassa proveniente de outra mesorregião, já que possui um potencial de geração com biomassa energética em torno de 16.177 kW. Os municípios pertencentes a essa mesorregião apresentam uma demanda total na faixa de 24.073 kW. Outro fator é que quase todo o transporte é fluvial, o que torna o custo mais baixo. Essa característica é interessante tendo em vista que a região do Marajó é atualmente a região com maior número de localidades isoladas do Estado, e com baixa perspectiva de entrar no sistema interligado segundo a concessionária local Centrais Elétricas do Pará S/A - Celpa.

A maior parte do potencial com biomassa encontra-se nos municípios do sistema interligado nacional, podendo ser aproveitado como autoprodução, sendo viável também, em muitos casos o transporte de biomassa para Municípios do sistema isolado, onde o custo do kWh da geração a biomassa for menor que o custo da geração dieselétrica atualmente praticado.

Através dos benefícios provenientes de CCC - Conta Consumo Combustível, CDE – Conta de Desenvolvimento Energético, RGR – Reserva Global de Reversão e Créditos de Carbono, é possível o estudo da viabilidade econômica para a implantação de usinas termoelétricas alimentadas por biomassa considerando as condições de financiamento praticadas pelo BNDES e a disponibilidade própria da biomassa pelo produtor de energia.

Levando-se em consideração que as usinas a vapor possuem custos menores de manutenção e operação se comparadas às usinas térmicas a diesel e devido sua atratividade técnica e econômica, as usinas termoelétricas podem ser implantadas com sucesso nas regiões do Estado do Pará onde existir a sustentabilidade do fornecimento da biomassa, especialmente em localidades isoladas do setor elétrico, onde há predominância da geração a diesel.

O aproveitamento racional deste potencial permite, também, um fim mais apropriado aos resíduos madeireiros, diminuir o consumo de óleo diesel no estado além de reduzir a emissão de CO_2 no Estado.

V- UTILIZAÇÃO DA BIOMASSA EM QUEIMA DIRETA USANDO CICLO RANKINE

Neste capítulo é apresentado inicialmente o ciclo Rankine básico e as modificações que nele podem ser implementadas para otimizar a utilização de energia térmica disponível. Será mostrado também o equacionamento para o ciclo Rankine, baseado em balanços de massa e energia nos componentes do ciclo, regidos, respectivamente, pela equação da “conservação de Massa” e pela equação da “Primeira Lei da Termodinâmica”, ambas para regime permanente. Para este estudo foram avaliadas as irreversibilidades relacionadas com o processo de expansão na turbina e compressão na bomba de alimentação, considerando desprezível as variações de energia cinética e potencial.

5.1 Ciclo Rankine

O ciclo Rankine ou ciclo a vapor é usado nas centrais térmicas convencionais e consiste basicamente de uma caldeira, uma turbina a vapor, um condensador e um sistema de bombas. A Figura 52 mostra o diagrama simplificado do ciclo Rankine, convencional que compreende os seguintes passos:

- Bombeamento adiabático da água (processo 3 – 4);
- Vaporização da água, mediante troca de calor à pressão constante em uma caldeira (processo 4 – 1);
- Expansão adiabática do vapor em uma turbina (processo 1 – 2);
- Condensação do vapor, mediante troca de calor a pressão constante em um condensador (processo 2 – 3).

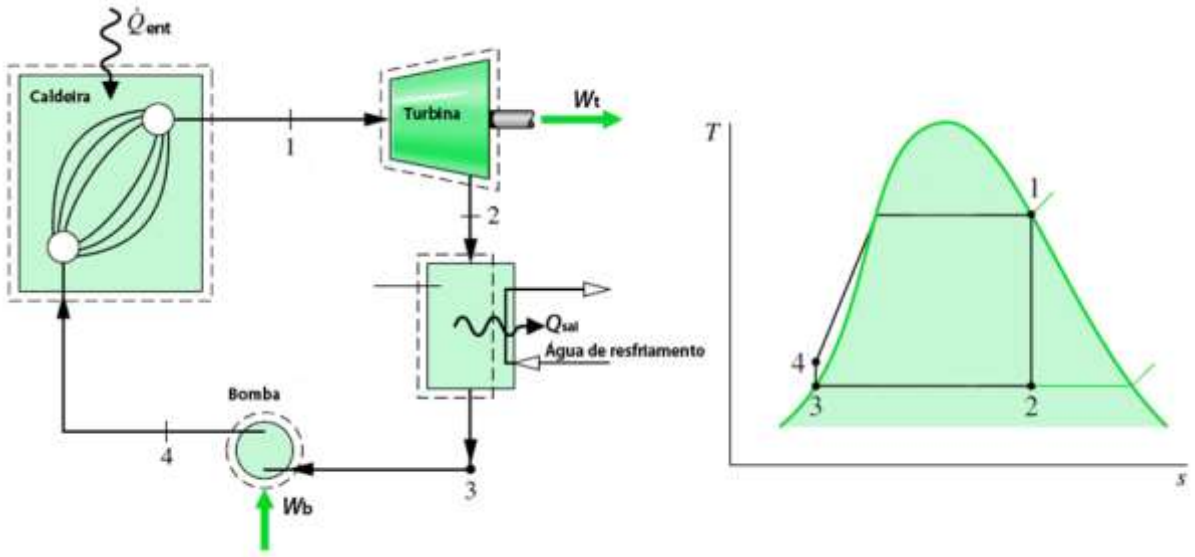


Figura 5.1 - Diagrama Simplificado do Ciclo Rankine (convencional)

Na prática, as centrais termelétricas utilizam muitos outros equipamentos, fundamentais para a realização destes processos como, por exemplo, aqueles que compõem os sistemas de: preparação e fornecimento de combustíveis para caldeira, tratamento da água de alimentação da bomba, água de refrigeração para condensador, tratamento dos gases de combustão antes de seu lançamento na atmosfera, etc.

O rendimento da central depende da pressão e da temperatura do vapor na entrada da turbina e da pressão na saída da turbina.

A sua maturidade tecnológica faz com que poucas novidades sejam introduzidas no que diz respeito ao ciclo térmico. Mas, uma série de inovações tem surgido com respeito ao processo de combustão e às caldeiras no sentido de reduzir os impactos ambientais de combustíveis poluentes.

O rendimento térmico nominal típico de uma usina termelétrica a vapor, construída entre a segunda metade dos anos 70 e a primeira dos anos 80, era da ordem de 40-42 %. No entanto, eficiências mais elevadas, da ordem de 45-47%, têm sido alcançadas no atual estado da arte, devido ao recrudescimento da legislação ambiental em vários países, principalmente em relação às emissões de óxidos de enxofre e material particulado.

Tais exigências justificaram esforços adicionais para que eficiências mais elevadas pudessem ser alcançadas, o que tem sido conseguido com a elevação dos parâmetros do vapor gerado (elevação da pressão e da temperatura do vapor), melhoria do projeto das palhetas das turbinas a vapor, otimização do escape das turbinas e redução de perdas em geral. Eficiências mais elevadas da ordem de 50% são esperadas para as centrais que entraram em operação em 2005 e de 55% são prognosticadas para 2020.

Assim, para aumentar a eficiência do ciclo, rendimento da instalação, podem ser incluídos economizadores, reaquecedores de alta e baixa pressão, etc. Estes últimos têm a função de elevar a temperatura da água na entrada da caldeira e assim economizar combustível.

5.2 Equacionamento Termodinâmico para um Ciclo Rankine

Para o ciclo Rankine apresentado na Figura 5.1 foi adotada a metodologia de aplicar um volume de controle em volta de cada equipamento e realizar balanços sistemáticos de massa e energia (Van Wylen, G. J. & Sonntag, R. E.- 1976).

As equações básicas foram utilizadas na seguinte forma:

- Conservação de Massa:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \tag{5.1}$$

- Primeira Lei da Termodinâmica:

$$\dot{Q}_{vc} + \sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s + \dot{W}_{vc} \tag{5.2}$$

Inicialmente, para os volumes de controles da Figura 5.1, o balanço de energia, desprezando a parcela $\Delta\left(\frac{V^2}{2} + gZ\right)$, é dado como:

- Turbina a Vapor (Processo 1-2): Expansão adiabática a vapor.

$$\frac{\dot{W}_t}{\dot{m}} = h_1 - h_2 \tag{5.3}$$

- Condensador (Processo 2-3): Transfere calor do ciclo a pressão constante.

$$\frac{\dot{Q}_{saída}}{\dot{m}} = h_2 - h_3 \tag{5.4}$$

- Bomba de alimentação (Processo 3-4): Compressão adiabática da água saturada.

$$\frac{\dot{W}_b}{\dot{m}} = h_4 - h_3 = v_3(p_3 - p_4) \tag{5.5}$$

- Gerador de Vapor (Processo 4-1): Transfere calor ao ciclo a pressão constante.

$$\frac{\dot{Q}_{entrada}}{\dot{m}} = h_1 - h_4 \tag{5.6}$$

Pela aplicação da primeira Lei da Termodinâmica, determina-se:

- Potencia do Ciclo:

$$\dot{W}_{ciclo} = \dot{Q}_e - \dot{Q}_s \tag{5.7}$$

- Fluxo de Massa de Vapor ($\dot{m}$):

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{ciclo}}{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)} \tag{5.8}$$

- Fluxo de Massa da Água de Refrigeração ($\dot{m}_{a.r.}$):

$$\dot{m}_{a.r.} = \frac{\dot{m} \times (h_2 - h_3)}{(h_{a.r.,saída} - h_{a.r.,entrada})} \tag{5.9}$$

- Eficiência da Turbina (ηt):

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_t / \dot{m}}{\left(\dot{W}_t / \dot{m}\right)_s} = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1 - h_{2s}} \tag{5.10}$$

- Eficiência da Bomba (ηb):

$$\eta_b = \frac{\left(\dot{W}_b / \dot{m}\right)_s}{\dot{W}_b / \dot{m}} = \frac{(h_{4s} - h_3)}{h_4 - h_3} \tag{5.11}$$

- Eficiência do Gerador de Vapor (η_{gv}.):

$$\eta_{gv} = \frac{m_v (h_3 - h_2)}{m_{biom.} \times PCS} \tag{5.12}$$

- Fluxo de Biomassa ($\dot{m}_{biom.}$):

$$\dot{m}_{biom.} = \frac{\dot{W}_t}{\eta_{ciclo} \times PCS} \tag{5.13}$$

- Rendimento do Ciclo (ηciclo):

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_t / \dot{m} - \dot{W}_b / \dot{m}}{\dot{Q}_e / \dot{m}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_4 - h_3)}{h_1 - h_4} \tag{5.14}$$

Essas equações foram utilizadas na implementação de um código computacional capaz de simular o comportamento termodinâmico do ciclo Rankine para análise de resultados encontrados na literatura.

5.3 Cálculo das Propriedades Termodinâmicas da Água

A implementação computacional de equações de propriedades termodinâmicas é de suma importância, dado o número de equações envolvidas em determinados problemas, tal como o de simulação de ciclos termodinâmicos. Neste caso, as inúmeras consultas a tabelas termodinâmicas inviabilizaria este tipo de tarefa. Neste capítulo foi desenvolvida uma DLL (Dinamic Link Library), biblioteca de vinculo dinâmico que é uma espécie de “sub-rotina” que pode ser chamada por um programa qualquer para executar funções específicas. O software utilizado para a programação da DLL é o FORTRANTM que é a ferramenta mais indicada e utilizada na área de desenvolvimento de softwares de aplicação científica e tecnológica por possuir inúmeras bibliotecas disponíveis, tais como, IMSL, NUMERICAL RECIPES etc.

5.3.1 Formulações Matemáticas

As formulações mostradas a seguir permitem a determinação das propriedades termodinâmicas da água, na condição de líquido comprimido, líquido saturado, mistura líquido-vapor, vapor saturado e vapor superaquecido.

5.3.1.1 Formulação para a Região de Vapor Saturado e Superaquecido

A formulação apresentada por Reynolds (Reynolds, 1979) possibilita o cálculo das propriedades termodinâmicas da água, mediante o emprego de expressões de dois tipos:

(1) Uma equação envolvendo pressão, massa específica e temperatura (P,ρ,T), dada na forma P = (ρ,T) (equação estado);

(2) Uma equação para o calor específico a volume constante à densidade nula (gás ideal), dada na forma $C_v^o = C_v^o(T)$.

A primeira expressão apresenta-se na seguinte forma:

$$P = \rho RT\left[1 + \rho Q + \rho^2\left(\frac{\partial Q}{\partial \rho}\right)_T\right] \tag{5.15}$$

Onde o valor de Q, é dado por:

$$Q = (\tau - \tau_c) \times \sum_{j=1}^{7}\left(\tau - \tau_{aj}\right)^{j-2} \times \left[\sum_{i=1}^{8} A_{ij}\left(\rho - \rho_{aj}\right)^{i-1} + e^{-E\rho} \times \sum_{i=9}^{10} A_{ij}\rho^{i-9}\right] \tag{5.16}$$

Onde: $\tau = 1000/T$ $\tau_c = 1000/T_c$

$\tau_{a1} = \tau_c$ $\tau_{aj} = 2{,}5$ para j>1

ρ_{a1} $\rho_{aj} = 1000$ para j>1

Nas equações acima, os valores de massa específica são dados em kg/m^3, os valores de temperatura em K (Kelvin) e os de pressão em Pa (Pascal). T_c é a temperatura do ponto crítico cujo valor é T_c = 647,286 K (374,123 ºC) e R é a constante dos gases cujo valor para a água é R = 461,51 J/kg K.

Os valores das constantes A_{ij} são apresentados na Tabela 5.1

Tabela 5.1 - Valores das constantes para a equação 5.16

i/j	1	2	3	4	5	6	7
1	2.9492937e-2	-5.1985860e-3	6.8335354e-3	-1.5641040e-4	-6.3972405e-3	-3.9661401e-3	-6.9048554e-4
2	-1.3213917e-4	7.7779182e-6	-2.6149751e-5	-7.2546108e-7	2.6409282e-5	1.5453061e-5	2.7407416e-6
3	2.7464632e-7	-3.3301902e-8	6.5326396e-8	-9.2734289e-9	-4.7740374e-8	-2.9142470e-8	-5.1028070e-9
4	-3.6093828e-10	-1.6254622e-11	-2.6181978e-11	4.3125840e-12	5.6323130e-11	2.9568796e-11	3.9636085e-12
5	3.4218431e-13	-1.7731074e-13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	-2.4450042e-16	1.2748742e-16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	1.5518535e-19	1.3746153e-19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	5.9728487e-24	1.5597836e-22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	-4.1030848e-1	3.3731180e-1	-1.3746618e-1	6.7874983e-3	1.3687317e-1	7.9847970e-2	1.3041253e-2

A segunda expressão calcula o calor específico a volume constante:

$$C_v^o = \sum_{i=1}^{6} G_i T^{i-2} \tag{5.17}$$

Os valores das constantes G_i são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Constantes da Equação 5.17

i	G_i
1	4.600000*104
2	1.011249*103
3	8.389300*10-1
4	-2.199890*10-4
5	2.466490*10-7
6	-9.704700*10-11

As equações (5.15) e (5.17) são utilizadas juntamente com relações termodinâmicas, para obter a formulação para as demais propriedades:

5.3.1.2 Energia Interna Específica

A energia interna de uma substância compressível simples pode ser expressa como:

$$u = u(T,v) \tag{5.18}$$

Diferenciando a equação (5.18) e usando a definição $C_v = \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)$ resulta:

$$du = C_v dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv \tag{5.19}$$

Das relações termodinâmicas têm-se:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_v - P \tag{5.20}$$

Substituindo a equação (5.20) na equação (5.19), usando $dv=d\rho/\rho^2$ e integrando segundo a trajetória mostrada na Figura 5.1, obtém-se:

$$u = \int_{To}^{T} C_v^o(T)dT + \int_0^{\rho} \frac{1}{\rho^2}\left[P - T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho\right]d\rho + u_o \tag{5.21}$$

Observa-se que a primeira integração é realizada à densidade zero, o que justifica a presença de C_v^o no lugar de C_v, e a segunda à temperatura constante. Na equação (59) $u_o = 2{,}3750207\times10^6$ J/kg é o valor de referência para $T_o = 273{,}16$ K (0 ºC).

5.3.1.3 Entalpia Específica

A entalpia específica é calculada em função da energia interna, pressão e massa específica:

$$h = u + P/\rho \tag{5.22}$$

5.3.1.4 Entropia Específica

A entropia é determinada pela equação de Gibbs(Moran, M. J. & Shapiro, H. N. - 1999):

$$ds = \frac{1}{T}du + \frac{P}{T}dv \tag{5.23}$$

Usando as equações (5.22) e (5.23), tem-se:

$$ds = \frac{C_v}{T}du - \frac{1}{\rho^2}\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_\rho dv \tag{5.24}$$

Somando e subtraindo o termo [-R ln(ρ)] à equação (5.10) e então integrando segundo a trajetória mostrada na Figura 5.1, obtém-se:

$$s = \int_{To}^{T} \frac{C_v^o(T)}{T} dT - R\ln(\rho l + \int_0^{\rho} \frac{1}{\rho^2}\left[\rho R - \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_{\rho}\right] d\rho + s_o \tag{5.25}$$

Onde s_o = 6,6965776×10^3J/kg.K é o valor de referência para T_o = 273,16 K (0 ºC).

5.3.1.5 Região de Saturação

Na região de saturação, torna-se mais conveniente o uso de fórmulas que permitam o cálculo das propriedades em função apenas da temperatura. As expressões fornecidas por Reynolds(Reynolds, 1979) são apresentadas a seguir:

5.3.1.6 Pressão de Saturação

$$\ln\left(\frac{P_{sat}}{P_c}\right) = \left(\frac{T_c}{T} - 1\right) \times \sum_{i=1}^{8} F_i \left[a \times \left(T - T_p\right)\right]^{i-1} \tag{5.26}$$

Onde P_c é a pressão no ponto crítico cujo valor é 317,0 kg/m^3. Os valores das constantes D_i são apresentados na Tabela 5.3

Tabela 5.3 - - Constantes da equação

i	D_i
1	-7.4192420
2	2.972100*10-1
3	-1.155286*10-1
4	8.685635*10-3
5	1.094098*10-3
6	-4.399930*10-3
7	2.520658*10-3
8	-5.218684*10-4

5.3.1.7 Entalpia e Entropia de Vaporização

Utilizando a equação de Clausius-Clapeyron(Bejan,1984).

$$h_{fg} = Tv_{fg} \frac{dPsat}{dTsat} \tag{5.27}$$

$$s_{fg} = \frac{h_{fg}}{T} \tag{5.28}$$

5.3.1.8 Equação de Densidade de Líquido Saturado

A formulação mostrada a seguir permite a determinação da densidade de líquido saturado para um dado valor de T;

$$\rho_f = \rho_c \left[1 + \sum_{i=1}^{N} D_i \left(1 - T/T_c\right)^{i/3} \right] \tag{5.29}$$

5.3.1.9 Tratamento Especial na Região de Líquido Comprimido

Nos casos onde a equação P-ρ-T é válida no regime de líquido comprimido, uma chamada da sub-rotina PROP para T e P saturados e um “chute” para densidade de líquido dará um valor de ρ_f não muito diferente daquele determinado pela *Dwater*, e os valores de u, h e s produzidos por essa chamada da PROP estarão muito próximos dos valores reais das propriedades de líquido saturado.

Para a região de líquido comprimido, somente uma pequena correção é requerida, e a equação (5.30) foi utilizada:

$$f = f_p + \left(f_{es} - f_{ps}\right) \left(\frac{\ln(P_c) - \ln(P)}{\ln(P_c) - \ln(P_s)} \right) \tag{5.30}$$

$P<P_c$ $\qquad f = f_p \qquad$ $P>P_c$

Aqui f é qualquer propriedade (ρ, u, h, s) na região de líquido comprimido, f_p é o valor calculado da sub-rotina PROP para T e P especificados, f_{ps} é o valor de f_p no

ponto de saturação especificado T. f_{es} é o valor de saturação em T, calculado através dos passos de 1 - 4 abaixo, P_c é a pressão crítica, P_s é a pressão de saturação em T. Notar que a correção é zero na pressão crítica e cima dela.

Para o calculo de f_{es} é utilizado o seguinte procedimento:

(1) A pressão de saturação e dPsat/dT são calculados em um dado T usando Swater;

(2) As propriedades do vapor saturado VG, UG, HG e SG são calculados usando a PROP para T e P especificados;

(3) A densidade de liquido saturado é calculada a partir da equação (5.29);

(4) HFG e SFG são calculados usando as equações (5.27) e (5.28), respectivamente. Assim, então, as propriedades do liquido saturado (HF e SF) são calculados pela subtração HG-HFG e SG-SFG. f_{es} é igual a essa diferença.

5.4 Biblioteca de Vinculo Dinâmico (DINAMIC LINK LIBRARY - DLL)

O termo vinculação dinâmica se refere à chamada que o programa executável faz a função da DLL. O ligador (linker) simplesmente usa a informação da declaração externa da sub-rotina para definir algumas tabelas no arquivo executável. Quando o Windows™ carrega o arquivo executável na memória, ele primeiro carrega todas as DLLs necessárias e depois inicia o programa. Durante o processo de carga, o Windows™ preenche as tabelas internas do programa com os endereços das funções das DLLs em memória.Sempre que o programa chama uma função externa ele usa essa tabela interna para direcionar a chamada até o código da DLL (que agora está localizada no espaço de endereços do programa). Porém, isto não caracteriza dois aplicativos diferentes; o que ocorre é que a DLL é incorporada ao programa em execução. E ainda, todos os parâmetros são passados para as funções e rotinas através da pilha (stack) do aplicativo (A DLL não tem pilha própria).

Vantagens do uso de DLLs:

- Se programas diferentes utilizarem a mesma DLL, ela será carregada apenas uma vez, resultando em economia de memória no Windows™;

- As DLLs podem receber "atualizações". Pode-se, por exemplo, melhorar o código fonte de uma DLL e substituir a antiga utilizada por algum aplicativo, sem ter de recompilar o aplicativo.

5.4.1 Escrevendo uma DLL em FORTRAN™ e Utilizando em VISUAL BASIC.

No FORTRAN™, o que se tem a fazer, é simplesmente compilar e construir, a partir de um arquivo tipo FORTRAN™ (*.f90, *.for, *.f), um Workspace tipo DLL.

```
SUBROUTINE CALCULOS(P,T,V,H,S,U,X,EST,NOP,UND)
    !MS$ATTRIBUTES DLLEXPORT,STDCALL::CALCULOS
    !MS$ATTRIBUTES REFERENCE::P,T,V,H,S,U,X,EST,NOP,UND

ESTRUTURA DA SUB-ROTINA
RETURN
END
```

Certamente, para os usuários do FORTRAN™, o trecho de código fonte que é novidades são as linhas que contém os atributos da sub-rotina. A segunda linha do arquivo contém os atributos de exportação da sub-rotina (isso faz com que ela se torne visível dentro da DLL a outros programas), bem como define a Convenção de Chamada (Calling Convention). Esta convenção de chamada utilizada (STDCALL), deve ser utilizada para passagem dos parâmetros para o padrão Win32. A terceira linha do arquivo determina que os parâmetros P, T, V, H, S, U, X, EST, NOP, UNDda sub-rotina serão passados por referência, e não por valor. Se todos os passos apresentados acima foram religiosamente seguidos qualquer um deve conseguir compilar e construir o Workspace gerando assim o arquivo F90.dll. A tarefa agora é saber qual o verdadeiro nome da sub-rotina **CALCULOS** dentro da DLL PROPRIEDADES. As DLLs guardam tabelas que, através do nome das sub-rotinas, indexam as mesmas. Abrindo o arquivo PROPRIEDADES.DLL com o programa

Dependency Walker que vem junto com o FORTRAN™ encontra-se o nome da sub-rotina **CALCULOS** que deverá ser utilizado no Visual Basic. Na figura abaixo se verifica que "_calculos@40" é o nome de saída da sub-rotina **CALCULOS**.

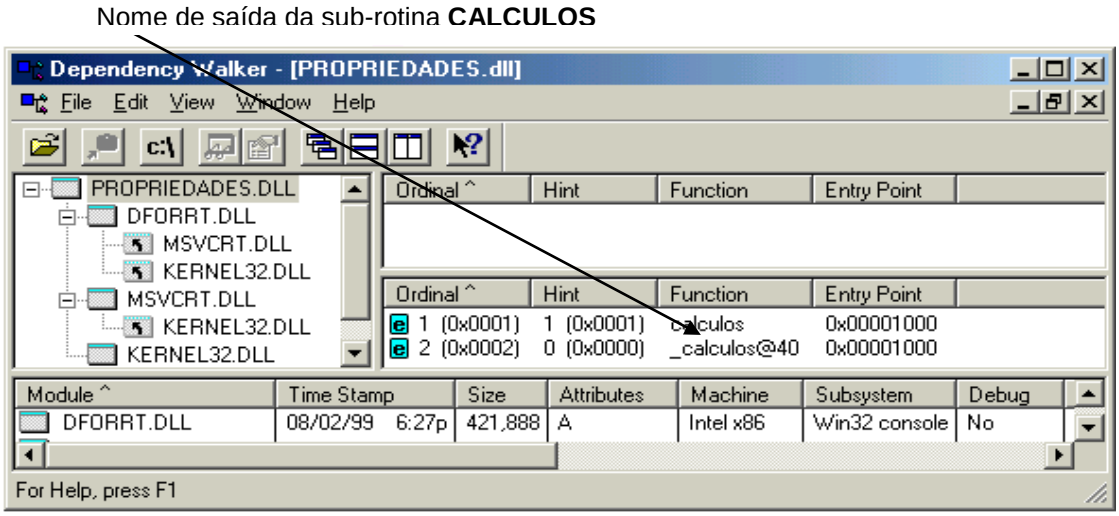


Figura 5.2 - Tela de visualização do local da dll

Dentro do Visual Basic a chamada da sub-rotina CALCULOS (P,T,V,H,S, U,X, EST, NOP, UND) do arquivo Propriedades.dll é feita da seguinte forma:

procedure PW(var P, T, V, H, S, U, X: REAL; var NOP, UND, EST:integer); stdcall;

external 'PROPRIEDADES.DLL' name '_calculos@40';

Nota-se no texto acima que a sub-rotina "_calculos@40" é renomeada para "procedure PW".

5.4.2 Descrição das Sub-Rotinas do Arquivo "PROPRIEDADES. DLL".

Sub-rotina Pwater (T,P,V, U,H, S).

Com as entradas T e v essa sub-rotina utiliza as equações (5.15), (5.17), (5.21), (5.22), (5.25) para o cálculo das propriedades P, U, H, S.

Sub-rotina PROP (T,P,V, U,H,S, NOP).

Pode ser chamada com quaisquer duas propriedades específicas e com um “chute” para T e /ou v, para calcular as propriedades não especificadas. O calculo das propriedades é feito de forma interativa utilizando a sub-rotina Pwater. Cada par de propriedades para a entrada na sub-rotina está associado a um valor de NOP:

- Para NOP =1, o par de propriedades de entrada é T e V.
- Para NOP =2, o par de propriedades de entrada é T e P.
- Para NOP =3, o par de propriedades de entrada é P e V.
- Para NOP =7, o par de propriedades de entrada é T e S.
- Para NOP =8, o par de propriedades de entrada é P e S.
- Para NOP =9, o par de propriedades de entrada é P e H.

Sub-rotina Swater (T,P,DPDT)

Quando chamada com a entrada T a partir da equação (5.26) calcula a pressão de saturação P_{sat} e a derivada $dP_{sat}/dT_{sa\,t}$= DPDT.

Sub-rotina SAT(T,P,DPDT,NOP2)

É utilizada para calcular Psat(T) ou Tsat(P) e dPsat/dTsat, dependendo do valor do NOP2.

Para NOP2 =1, calcula Psat(T) e dPsat/dT.

Para NOP2 =2, calcula Tsat(T) e dPsat/dT.

Sub-Rotina Dwater

Quando chamada com a entrada T essa sub-rotina utiliza as equações (5.26), (5.27), (5.28), (5.29), para o calculo da densidade de líquido saturado (rf), pressão de saturação (Psat), volume especifico de liquido saturado (VF), volume especifico de vapor saturado (VG), diferença entre VG e VF (VFG), entalpia de liquido saturado (HF), entalpia de vapor saturado (HG), diferença entre HG e HF (HFG), entropia de liquido saturado (SF), entropia de vapor saturado (SG), diferença entre SH e SF (SFG).

Sub-Rotina CALCULOS(P,T,V,H,S, U,X, EST, NOP, UND)

Entrando-se com um número correspondente a um par de propriedades e com os valores das propriedades chamadas à sub-rotina dá como saída as demais propriedades e o estado da substância (líquido comprimido, mistura líquido-vapor ou vapor superaquecido) que é armazenado na variável EST. Os Números dos pares de propriedades são:

- NOP =1, o par de propriedades de entrada é T e V.
- NOP =2, o par de propriedades de entrada é T e P.
- NOP =3, o par de propriedades de entrada é P e V.
- NOP =4, o par de propriedades de entrada é P e X.
- NOP =5, o par de propriedades de entrada é T e X.
- NOP =7, o par de propriedades de entrada é T e S.
- NOP =8, o par de propriedades de entrada é P e S.

O Fluxograma da Sub-rotina **CALCULOS** do arquivo Propriedades.DLL é apresentado abaixo.

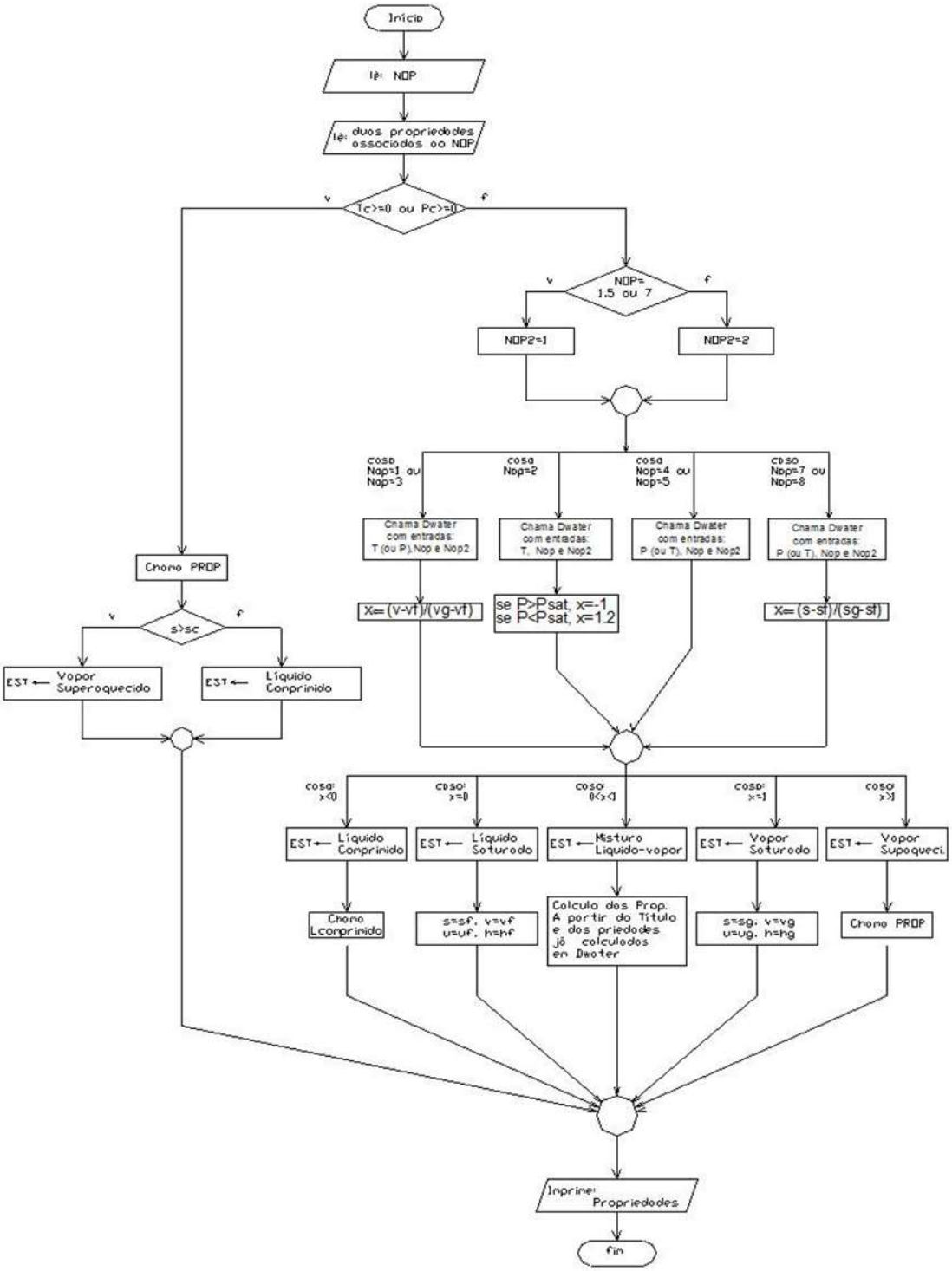


Figura 5.3 - Fluxograma da Sub-rotina CALCULOS

5.5 Simulação Computacional do Ciclo a Vapor Rankine

5.5.1 Formulação do Problema

Foram elaborados códigos computacionais capazes de simular as diferentes configurações do Ciclo Rankine.

Adotou-se a metodologia de simular separadamente as diferentes configurações do ciclo Rankine, para que fosse possível avaliar de maneira isolada os efeitos do superaquecimento e inserção de uma estufa no processo, sobre o rendimento do ciclo, bem como o fluxo de biomassa queimada para a produção de vapor.

5.5.2 Código Computacional

Para seguir a metodologia adotada, foram elaborados códigos computacionais diferentes, para cada simulação realizada, utilizando a linguagem FORTRAN™ para a criação de uma DLL que fosse executada na linguagem Visual Basic para entrada dos dados e apresentação de resultados (ANEXO II – Software CicloRank)

5.5.3 Simulação do Rankine Básico

O objetivo principal de estudo nesta simulação é consolidar o código computacional desenvolvido, comparando os resultados obtidos com os da literatura existente, dando desta forma solidez para sua utilização em outras simulações.

A simulação se desenvolve de acordo com os passos descritos a seguir:

1. Utilizando os parâmetros fixos do ciclo, podem ser determinados os valores de entalpia e entropia específicas, para os seguintes estados termodinâmicos (ver Figura 52):

- Estado 1 (saída do condensador-início do bombeamento): a água encontra-se no estado de líquido saturado, logo, utiliza-se somente o valor da pressão na saída do condensador (P3);
- Estado 2 (saída da bomba – entrada na caldeira): usa-se o valor da pressão na entrada da caldeira (P4) e considera-se o processo isentrópico no bombeamento (s3 = s4);
- Estado 3 (saída da caldeira – entrada na turbina): são empregados os valores de pressão e temperatura na entrada da turbina (P1 e T1), fornecidos na entrada de dados;
- Estado 4 (Saída da turbina – entrada no condensador): usa-se o valor da pressão na saída da turbina (P2) e considera-se o processo isentrópico na expansão da turbina (s1 = s4).

2. Nos equipamentos são informados:

- Bomba: o valor da eficiência isentrópica (hb);
- Caldeira: o poder calorífico superior (PCS) da biomassa utilizada bem como seu teor de umidade e rendimento da combustão;
- Turbina: é informada a eficiência isentrópica da turbina e potência gerada;
- Condensador: a temperatura de entrada e saída da água de refrigeração.

3. Uma vez que todos os estados termodinâmicos estejam determinados, empregam-se as equações apresentadas no capítulo para calcular:

- Potência total Gerada no ciclo (kW);
- Fluxo total de calor cedido no ciclo (kW);

- Fluxo total de calor rejeitado no ciclo (kW);
- Fluxo de massa de vapor produzida no ciclo (kg/s);
- Fluxo de biomassa queimada na combustão da unidade de combustão (kg/s);
- Eficiência da caldeira;
- Rendimento térmico do ciclo(%).

5.5.4 Validação do Código

Para esta simulação foram usados os seguintes parâmetros fixos:

- Vapor saturado a 8.0 MPa na entrada da turbina e líquido saturado na saída do condensador a uma pressão de 0.008 MPa.
- Turbina: potência gerada de 101.17 MW e eficiência de 85 %.
- Condensador: temperatura de 15ºC de entrada e saída de 35ºC.
- Bomba: Eficiência de 85%.

Resultados após a simulação comparados com a literatura é informado na ??.

Tabela 5.4 - Resultados da simulação comparados com a literatura

	Simulação	**Literaturas (Nogueira, L. A. H e Lora, E. E. S. - 2003) e (Van Wylen, G. J. & Sonntag, R. E.- 1976)**
Fluxo de massa de Vapor do ciclo (kg/h)	4.449×10^{5}	4.449×10^{5}
Fluxo de massa de água de refrigeração (kg/h)	9.329×10^{6}	9.39×10^{6}
Taxa de Calor cedido (kW)	318.164×10^{3}	318.2×10^{3}
Taxa de calor Rejeitado (kW)	218.164×10^{3}	218.2×10^{3}
Potência do ciclo (kW)	99.99×10^{3}	100×10^{3}
Rendimento do ciclo (%)	31,43	31.4

Observa-se uma excelente concordância entre os resultados obtidos na simulação desenvolvida com os resultados obtidos nas literaturas.

5.5.5 Simulação Computacional do Ciclo Rankine Acoplado a um Sistema de Secagem

O objetivo desta simulação é analisar o comportamento do ciclo com extração de energia por uma estufa de secagem, de forma a prever seu desempenho em sistemas industriais, especialmente nas indústrias madeireiras.

1. Utilizando os dados de entrada, que correspondem aos parâmetros fixos do ciclo, determinam-se os valores de entalpia e entropia específicas, para os estados referentes à saída do condensador, início do processo de vaporização na caldeira, superaquecimento do vapor no super-aquecedor e entrada da turbina. Informa-se, também, com o dado de entrada a potência gerada na turbina, as propriedades termo físicas da biomassa utilizada na queima direta na unidade de combustão, rendimento da unidade de combustão, potência consumida na estufa e eficiências da turbina e bomba.

2. Após a determinação de todos os estados termodinâmicos, empregam-se as equações para calcular o fluxo de vapor do ciclo, fluxo de biomassa e rendimento térmico do ciclo.

5.5.6 Análise de Resultados

Para esta simulação foram usados os seguintes parâmetros fixos:

- Vapor saturado a 1,2 Mpa na entrada da turbina e líquido saturado na saída do condensador a uma pressão de 0.01 MPa;
- Vapor Superaquecido a 1,2 MPa, 280 ºC na saída do superaquecedor e 0,6 MPa na entrada da estufa;
- Turbina: eficiência de 85 %;
- Condensador: água de resfriamento a temperatura de 27ºC de entrada e saída de 35ºC;
- Bomba: Eficiência de 85%;

- Superaquecedor: vapor de saída T= 280 ºC e P=1,2 MPa.

Parâmetros de simulados:

- Biomassa: Caroço de Açaí (PCS: 4.422 kcal/kg, Teor de Umidade: 33,3%)

	Simulação
Fluxo de massa de Vapor do ciclo (kg/h)	4689.17
Fluxo de massa de água de refrigeração (kg/h)	3486.00
Potência do ciclo (kW)	4.98
Fluxo de biomassa (kg/h)	11.00
Eficiência da Gerador de Vapor (%)	59.70
Rendimento do ciclo (%)	24.11

- Biomassa: Casca de Cacau (PCS: 4.022 kcal/kg, Teor de Umidade: 72,23 %)
- Turbina: 10 kW
- Estufa: 25 kW

	Simulação
Fluxo de massa de Vapor do ciclo (kg/h)	82.99
Fluxo de massa de água de refrigeração (kg/h)	6012.73
Potência do ciclo (KW)	9.97
Fluxo de biomassa (kg/h)	51.18
Eficiência da Gerador de Vapor (%)	24.96
Rendimento do ciclo (%)	24.11

- Biomassa: Loro de Canela (PCS: 4.905 kcal/kg, Teor de Umidade: 12,25 %)
- Turbina: 10 kW
- Estufa: 15 kW

	Simulação
Fluxo de massa de Vapor do ciclo (kg/h)	71.00
Fluxo de massa de água de refrigeração (kg/h)	4946.87
Potência do ciclo (KW)	9.97
Fluxo de biomassa (kg/h)	11.28
Eficiência da Gerador de Vapor (%)	79.43
Rendimento do ciclo (%)	24.11

Para diferentes espécies de biomassa simuladas e variações nos parâmetros de potência consumida na estufa e potencia útil na turbina os resultados obtidos na simulação apresentam valores satisfatórios com uma situação real.

5.6 Comentários

É inegável o potencial energético disponível hoje no Brasil, a quantidade de biomassa que hoje é desperdiçada poderia compensar ou até mesmo suprir as deficiências energéticas que o país possuí. Apesar de a região norte ser considerado um dos maiores bancos de biomassa e biodiversidade do mundo, ainda sim é medíocre em aproveitamento desse potencial.

A tecnologia para o aproveitamento desse potencial, também, já esta dominada. Isto reforça a necessidade de utilizar um sistema que garanta a utilização adequada desse potencial, evitando que o mesmo seja queimado indiscriminadamente a céu aberto, poluindo ainda mais a atmosfera.

Conhecer o tipo de biomassa que se esta utilizando também é vital para o bom funcionamento de um sistema de aproveitamento de resíduos, já que além de queimar também é preciso identificar o que esta sendo gerado na queima e desta forma garantir que o resíduo, tanto industrial quanto que agrícola receba um fim não degradante para a natureza.

Este trabalho apresentou a simulação do ciclo Rankine, com as propriedades termodinâmicas da água estimadas a partir de um modelo de fluido real, onde se mostrou eficiente.

Uma análise comparativa dos resultados obtidos pela simulação com aqueles fornecidos pela literatura pode-se concluir que o programa computacional apresenta facilidade de implementação computacional, rapidez e precisão nos cálculos.

O programa elaborado pode ser empregado como ferramenta auxiliar nas análises do ciclo Rankine, pois apresenta uma estrutura que pode ser modificada de acordo com as necessidades do projetista, possibilitando um detalhamento ou refinamento dos cálculos.

Tanto o programa para cálculo das propriedades termodinâmicas, quanto àqueles que realizam as simulações, demonstram ser bastante eficientes para a avaliação do comportamento termodinâmico do ciclo Rankine, atendendo completamente as necessidades deste trabalho.

VI- ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE UMA PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA

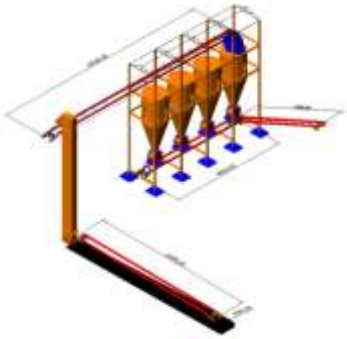
Uma das alternativas de combustível não convencional para geração de energia elétrica é a biomassa constituída por resíduos agroindustriais e florestais. Na Amazônia, em particular no Estado do Pará, há produção considerável de resíduos florestais e grande disponibilidade de recursos naturais com possibilidade de aproveitamento energético (caroço de açaí, casca de castanha do Pará, palmeiras diversas), estes resíduos podem ser utilizados como combustível em usinas térmicas a vapor. A vantagem da queima direta desses resíduos em usinas térmicas a vapor é o custo do calor gerado reduzido, visto não haver processamento da biomassa a fim de obter características mais homogêneas para o combustível, este fato proporciona um custo de geração de energia mais competitivo. Por outro lado, há necessidade de estudar o comportamento do ciclo considerando a grande heterogeneidade dos resíduos que serão utilizados sem processamento prévio, tendo em vista que características como umidade e granulometria, podem inviabilizar a operação de uma unidade geradora.

Este trabalho apresenta dados referentes ao monitoramento de uma usina piloto de geração de energia elétrica baseada no ciclo Rankine, implantada no Laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA, o sistema é todo instrumentalizado, possibilitando monitorar vários parâmetros de funcionamento do sistema de geração, tais como: quantidade de biomassa no tempo, pressão de saída do vapor na caldeira, pressão de entrada e saída do vapor na turbina, rotação do gerador, temperaturas de entrada e saída no condensador, phmetria e condutividade da água de alimentação da caldeira, tensão e potência em cada fase.

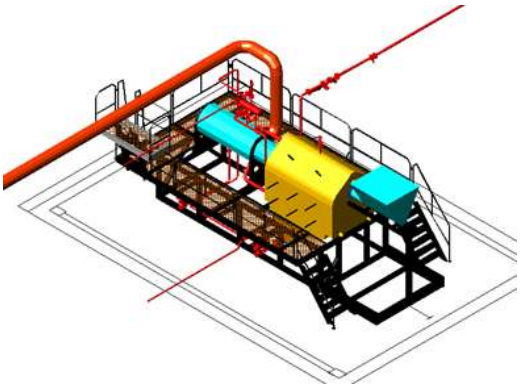
O objetivo principal é efetuar a avaliação da eficiência do ciclo a vapor utilizando os diversos tipos de biomassa de resíduos florestais e agroindústrias disponíveis na região e suas misturas.

6.1 Descrição da Usina Piloto

A planta piloto de geração de energia elétrica utilizada é baseada no ciclo Rankine, utilizando o vapor de água como fluido de trabalho. É composta de sistema de estocagem e alimentação de biomassa, caldeira fogo tubular dotada de uma fornalha tubular com grelha refrigerada, turbina de condensação de um único estágio, gerador, condensador, sistema de bombeamento, tanque de condensado e sistema de tratamento de gases, conforme mostrado na Figura 6.1. A unidade geradora é automatizada, sendo possível monitorar vários parâmetros de funcionamento do sistema de geração, tais como: quantidade de biomassa no tempo, pressão de saída do vapor na caldeira, pressão de entrada e saída do vapor na turbina, rotação do gerador, temperaturas de entrada e saída no condensador, phmetria, condutividade, tensão e correntes em cada fase e consumo de energia. As especificações técnicas dos componentes da planta são mostrados na Tabela 6.1 e a relação de sensores instalados pode ser vistos na Tabela 6.2. Esse monitoramento é realizado por um aplicativo escrito sob a plataforma Elipse SCADA implantado no centro de controle e monitoramento da usina(CCM). Para captação dos sinais um conversor A/D (analógico/digital), com resolução de 16 bits, se encarrega de converter os sinais analógicos em digitais. Dados em tempo real são apresentados de forma numérica em tabela na tela do Sinótico, gerando arquivos dat. Os dados referentes a essas tabelas são armazenados para posterior acesso.

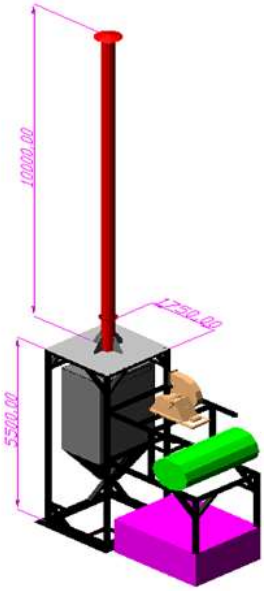


a) Sistema de estocagem e alimentação de biomassa



b) Caldeira

c) Conjunto turbina a vapor e gerador



d) Tanque de condensado e sistema de tratamento de efluentes gasosos

Figura 6.1 - Usina Piloto da UFPA.

Tabela 6.1 - Especificações técnicas dos principais equipamentos

Fornalha	Caldeira	Turbina	Gerador	Condensador
Fab. Montex Grelha refrigerada Tabular PMTA: 12Kg/cm2 Superfície de Aquecimento: 4,2m2	Fab. Montex PMTA: 12Kg/cm2 Superfície de Aquecimento: 16m2 Categoria: B Capacidade: 350Kg/h	Fab: Coppus Turbine Mod: RL12L Rotação: 3000RPM S/Trip RPM: 3810 Stream Press:140 Steam Temp.°F/°C: 460 / 237,78	Fab: KOHLBACH Tipo: Síncrono Compound Trifásico Freq.:60Hz Pol.:4 Mod.:132LA Potencia 7.5kva/6KW Corrente: 19,7A Rotação:1.800RPM	Fab: Coppus Turbine Mod. CD12L Stream Press Max:100 Heat Exch.90.000 Kcal/h

Tabela 6.2 - Relação de Sensores Instalados na Usina Piloto

SENSORES					
	Subsistema	Modelo	Localização	Fabricante	Quantidade
Sensores de Temperatura	Caldeira	Tipo S	Fornalha	Pirométrica	2 (dois)
		Tipo J	Caldeira	Pirométrica	2 (dois)
	Turbina	Tipo J	Turbina	Pirométrica	3 (três)
	Trocador de Calor	Tipo k(Pt-100)	Trocador de calor	Pirométrica	7 (sete)
	Estufa	Tipo K(Pt-100)	Estufa	Pirométrica	2 (dois)
Sensores de pressão eletrônicos	Caldeira	TP:0-30bar	Saída do Vapor Vivo da Caldeira	Spirax Sarco	1 (um)
	Turbina	TP:0-30bar	Entrada de Vapor Vivo da Turbina	Spirax Sarco	1 (um)
		TP:0-15bar	Rotor da Turbina	Spirax Sarco	1 (um)
Sensor de Nível	Caldeira	LP10-4	Caldeira	Spirax Sarco	1 (um)
Sensor de Ph/Condutividade	Caldeira	DLCD	Caldeira	Blowair	1 (um)
CÉLULAS DE CARGA					
Célula de Carga	Silo	L-2T	Silos	Alfa Instrumentos	16 (dezesseis)

6.2 Ensaios de Laboratório

Os ensaios de laboratório foram realizados em amostras de resíduos do setor agroindustrial e madeireiro, para determinação de sua composição química imediata (teor de voláteis, teor de carbono fixo e teor de cinzas), umidade, poder calorífico e densidade a granel e obtenção das densidades energéticas. O objetivo foi obter informações desses resíduos como combustível que possam ser adotados em simulações computacionais do ciclo Rankine, para análise comparativa com desempenho de uma usina piloto operando com estes combustíveis.

Para execução dos ensaios foram adotadas as seguintes normas brasileiras existentes para carvão vegetal, que se adequaram aos resíduos estudados, conforme avaliações realizadas em(Nogueira et all. 2006) e (Pinheiro, G., et all. 2004):

- NBR 6923 – Carvão Vegetal - Amostragem e Preparação da Amostra, que define os procedimentos de coleta e preparação de amostras para realização de ensaios de caracterização de carvão vegetal;
- NBR 8112 adotadas como referência– Carvão Vegetal – Análise Imediata, destinada a determinação dos teores de umidade, cinzas, matérias voláteis e carbono fixo de carvão vegetal;
- NBR 8633 – Determinação do Poder Calorífico, prescreve o método de determinação do poder calorífico superior do carvão vegetal a volume constante, em uma bomba calorimétrica adiabática, isotérmica ou estática;
- NBR 6922 – Determinação da Massa Específica (Densidade a Granel), prescreve o método de determinação da massa específica do carvão vegetal como recebido.

A partir dos resultados dos ensaios de análise química imediata, umidade e densidade a granel foram determinados através de cálculos o poder calorífico inferior – PCI e a densidade energética das biomassas para comparação do desempenho das mesmas como combustível, da seguinte maneira:

(a) Densidade energética (quantidade de energia por unidade de volume de um combustível) foi obtida pelo produto do PCI com a densidade a granel das amostras.

(b) Poder calorífico inferior foi obtido através da Eq. (104) (Gomide, 1984):

$$PCI = (1-a).PCS - 9.(1-a).h.h_{lv(25^oC)} - a.h_{lv(25^oC)} \quad (6.1)$$

Onde PCI = poder calorífico inferior (kcal/kg); PCS = poder calorífico superior (kcal/kg); a = umidade base úmida (%); h = percentual de hidrogênio do material seco (%); = entalpia de vaporização da água a 25ºC (kcal/kg), igual a 583,58 kcal/kg.

O teor de hidrogênio foi calculado a partir das Eq. (6.1) (formula de Seyler), (6.2) e (6.3) empíricas, obtida em (Gomide, 1984):

$$h = 0{,}069 . \left(PCS' \frac{1}{100} + MV' \right) - 2{,}87 \tag{6.2}$$

$$PCS' = PCS \frac{100}{(MV + CF)} \tag{6.3}$$

$$MV' = MV \frac{100}{MV + CF} \tag{6.4}$$

Onde: h = percentual de hidrogênio; PCS' = poder calorífico em base seca e isenta de cinza (kcal/kg); MV' = percentual de matéria volátil em base seca e isenta de cinza, MV = percentual de voláteis, CF = percentual de carbono fixo.

Os resultados dos ensaios de laboratório indicaram que há pouca influência do tipo de biomassa no poder calorífico superior, este parâmetro de um modo geral mostrou-se similar para todos os resíduos, com valores na faixa de 4.500 a 5.000 kcal/kg.

Quanto ao poder calorífico inferior também há pouca influência do tipo de biomassa neste parâmetro, sendo a umidade a característica que influenciou mais significativamente nos resultados de PCI; maiores valores de umidade implicaram na redução significativa dos valores de PCI.

Quanto à análise química imediata, todas as amostras apresentaram valores semelhantes, dentro das seguintes faixas:

- Teor de voláteis – entre 75 e 85 %;
- Teor de Cinzas – entre 0 e 5 %;
- Teor de carbono fixo – entre 15 e 25 %.

O parâmetro mais significativo para a densidade energética dos resíduos foi à densidade a granel, àqueles com maior densidade a granel apresentaram maior densidade energética, indicando melhor desempenho como combustível, sendo eles: caroço de açaí, casca de amêndoa e quenga de coco. Enquanto que a serragem, cuja densidade a granel é menor, de um modo geral apresentou menor densidade energética, independente do PCI. O bom desempenho dos resíduos com maiores densidades a granel deve ser avaliado considerando também a umidade

com que os mesmos são disponibilizados; resíduos com umidades acima de 45% (base úmida), são considerados inadequados para aproveitamento como combustível, conforme trabalho de Brascep Engenharia Ltda., (Brascep Engenharia LTDA, 1987).

Os resultados dos ensaios das misturas de dois tipos de resíduos foram aproximadamente à média ponderada dos valores obtidos para as amostras quando ensaiadas individualmente.

Por fim os resultados dos ensaios de laboratório indicaram que pode ser adotado como valor típico de PCS de resíduos vegetais 4.500 a 5.000 kcal/kg. Sendo o PCI dependente da umidade, pode-se considerar para umidade em torno de 30%, PCI de 3.000 kcal/kg para resíduos vegetais.

Quanto à densidade a granel de serragem, podem ser adotados valores na faixa de 150 kg/m^3 (madeiras leves) a 250 kg/m^3 (madeiras pesadas), sendo assim a densidade energética estaria na faixa de 450.000 a 600.000 kcal/m^3.

6.3 Análise Energética da Unidade Piloto

A formulação da análise energética de cada um dos componentes da planta foi baseada nas 1ª e 2ª leis da termodinâmica(Van Wylen, G. J. & Sonntag, R. E.-2010), que resultou no desenvolvimento do software Ciclo Rank.

Os cálculos são efetuados a partir dos seguintes parâmetros:

- Fluxo de biomassa;
- PCI (kJ/kg) e Umidade do Resíduo agroindustrial;
- PCI (kJ/kg) e umidade do Resíduo da Indústria madeireira;
- Pressão (bar) e temperatura (°C) do vapor na saída da caldeira;
- Pressão (bar) e temperatura (°C) do vapor na entrada da turbina;
- Temperatura do vapor na saída da turbina, em °C;
- Temperatura do vapor condensado na saída do condensador, em °C;
- Temperatura do vapor condensado na entrada da bomba de alimentação da caldeira, em °C.

Pelo software obtêm-se os valores para as seguintes variáveis do sistema:

- Potencia total Gerada no ciclo (kW);
- Fluxo total de calor cedido no ciclo (kW);
- Fluxo total de calor rejeitado no ciclo (kW);
- Eficiência da caldeira (%);
- Eficiência da turbina (%);
- Rendimento térmico do ciclo (%).

A Figura 6.2 mostra o esquema da usina piloto configuração de Ciclo Rankine com superaquecimento.

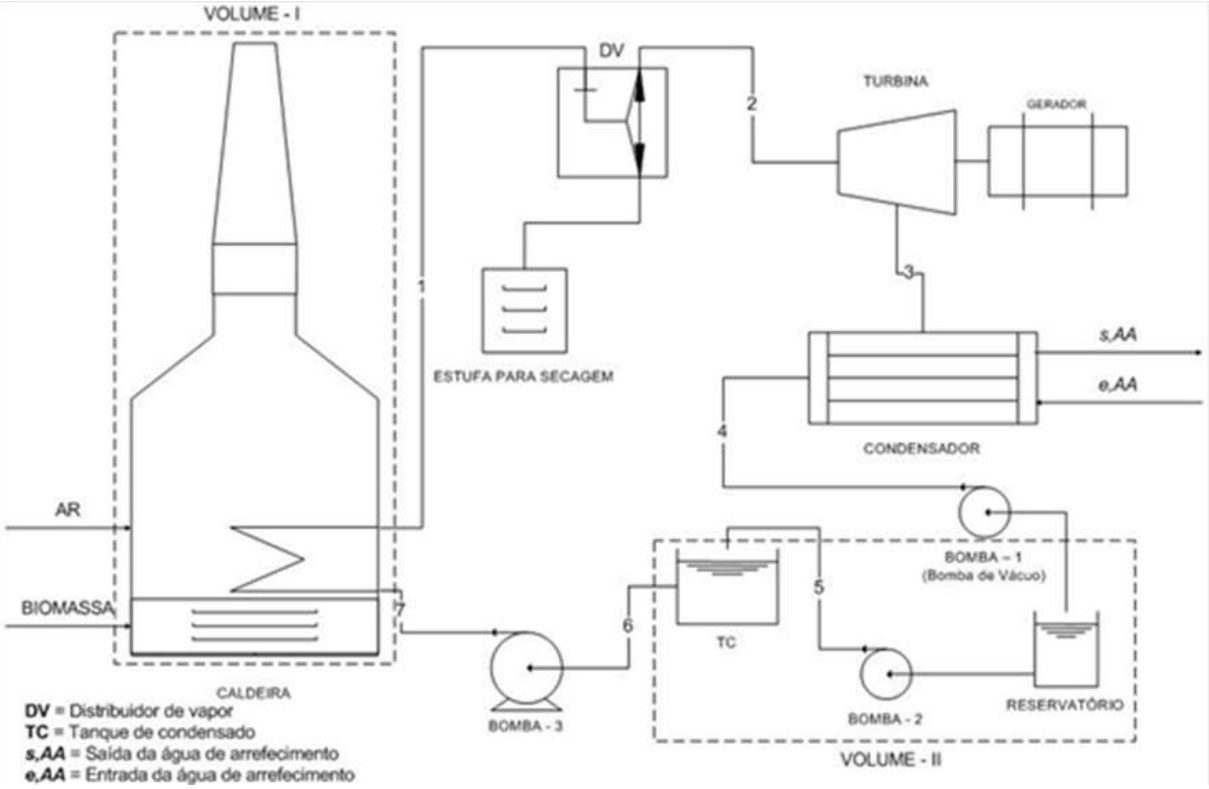


Figura 6.2 - Diagrama esquemático da planta de potência a vapor da Unidade Piloto

A partir dos dados obtidos em tempo real da planta foi calculada a eficiência do ciclo, utilizando a Eq. (6.5):

$$\eta_{Ciclo} = \frac{\dot{W}_T - \sum_i \dot{W}_{B.i}}{\dot{Q}_V} \tag{6.5}$$

Os resultados de eficiência do ciclo são mostrados na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

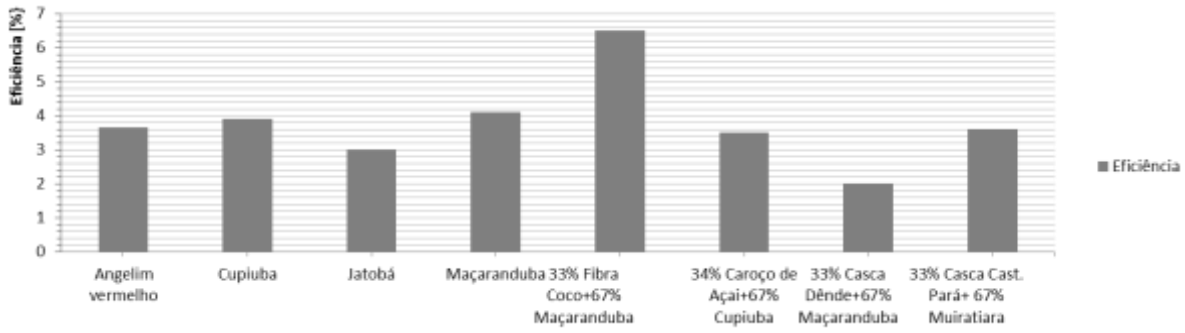


Figura 6.3 - Eficiência do Ciclo para mixe de biomassa ensaiado

A variação da eficiência do ciclo, observada entre os diversos tipos de biomassa é função das diferentes velocidades de volatização das mesmas e, também, das purgas de vapor ocorridas durante a operação da planta. O consumo específico médio foi de 140 Kg vapor/kW gerado.

6.3.1 Biomassa Utilizada como Combustível na Caldeira

Onze diferentes tipos de biomassa referenciados na Figura 6.3 foram utilizados como combustível na avaliação experimental do comportamento e eficiência da usina. Uma pequena quantidade biomassa era colhida como amostragem antes de alimentar a caldeira. O PCI analisado no item anterior serviu para determinar a eficiência elétrica da usina:

$$\eta_{global} = \frac{Potência\ elétrica \times Tempo}{PCI \times m_{bio}} \tag{6.6}$$

Tabela 6.3 - Propriedades das biomassas

Biomassa	PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)	Carbono Fixo (%)	Teor de Voláteis (%)	Teor de Cinzas (%)	Teor de Umidade (%)
Açaí	19158,80	11466,81	19,452	79,449	1,106	34,996
Angelim pedra	19842,92	10977,66	17,145	81,558	1,298	41,252
Angelim vermelho	4881,00	20435,77	20,345	79,609	0,048	18,475
Casca de dendê	16551,17	10870,98	19,594	76,206	4,201	26,564
Cumaru	20139,76	13988,52	13,285	86,649	0,068	25,106
Jatobá	19412,52	15899,33	19,993	79,626	0,381	13,301
Maçaranduba	20114,77	13070,23	17,364	82,432	0,203	29,871
Serragem de Tauarí	19869,72	17321,93	16,749	82,557	0,694	9,153
Tauarí	19869,72	17321,93	16,749	82,557	0,694	9,153

6.3.2 Metodologia do Ensaio

A experiência foi realizada durante 51 dias entre as 7h00 e 18h00, totalizando 194,75 horas de operação. A injeção de vapor na turbina só iniciava após atingir a pressão de trabalho, escolhida em >6 bar. Os 11 tipos de biomassa que alimentaram o sistema caldeira-fornalha eram pesados em quantidades entre 80 kg e 100 kg a uma frequência de 45 a 50 minutos. Uma balança com precisão de 0,1g (conectada ao sistema de aquisição de sinais) foi usada para controlar a alimentação de biomassa à caldeira-fornalha.

A potência elétrica gerada era medida através do equipamento SAGA 4500 fabricado pela ESB, o qual, também, estava conectado ao sistema de aquisição de sinais. Foram medidas as potências elétricas, a corrente elétrica, voltagem e fator de potência.

6.3.3 Potência Elétrica Gerada

A potência média gerada pela usina foi de 1,93 ± 0,19 kW com nível de confiança de 95%. O valor de potência elétrica medida na usina foi, portanto, 16 % menor que o valor calculado (Figura 6.4 e Tabela 6.4).

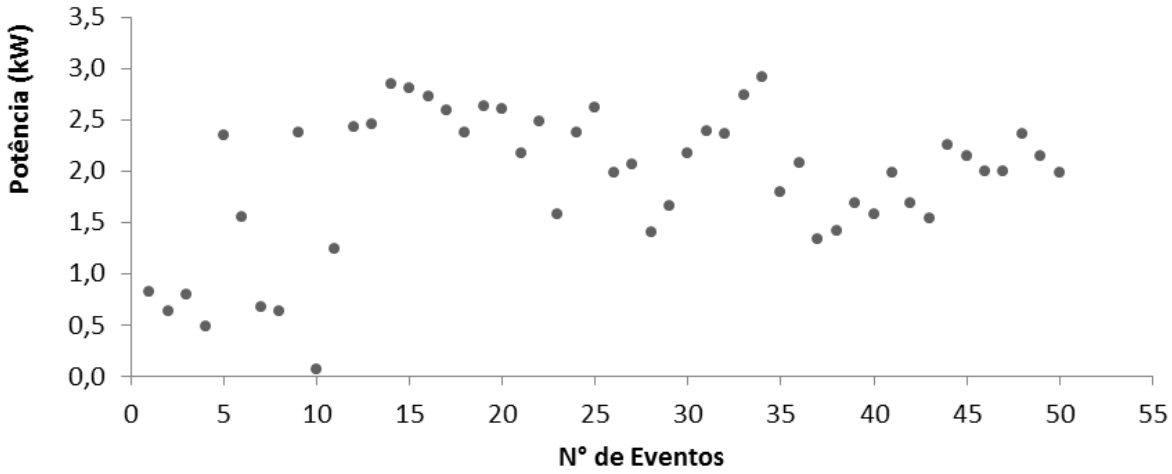


Figura 6.4 - Gráfico da dispersão da Potência elétrica em função do número de eventos.(dados experimentais)

Tabela 6.4 - Tratamento Estatístico dos resultados experimentais

Resumo Estatístico	
Média	1,93
Erro padrão	0,10
Desvio padrão	0,69
Variância da amostra	0,47
Curtose	0,13
Intervalo	2,86
Mínimo	0,06
Máximo	2,92
Soma	98,35
Contagem	51,00
Nível de confiança (95,0%)	0,19

6.3.4 Eficiência Elétrica Medida

A eficiência elétrica global é determinada através da Equação (107). A potência elétrica medida experimentalmente dividido pela energia contida na

biomassa, baseada no PCI, forneceu a eficiência elétrica global. A Figura 6.5 e Tabela 6.5 mostram que a eficiência média da usina foi de 0,46± 0,08 % com nível de confiança de 95%.

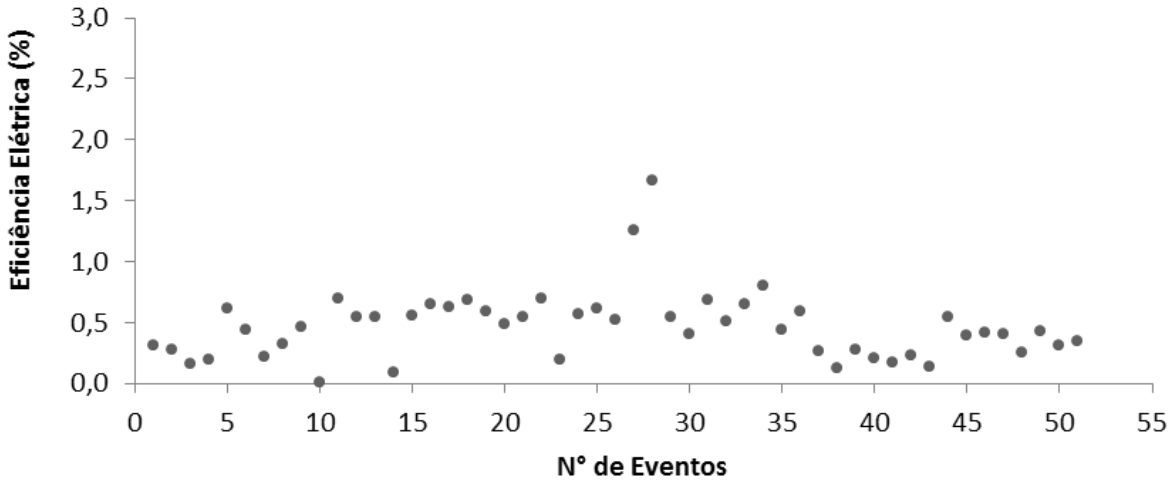


Figura 6.5 - Gráfico da dispersão da eficiência elétrica em função do número de eventos (dados experimentais).

Tabela 6.5 - Tratamento Estatístico dos resultados experimentais

Resumo Estatístico	
Média	0,465
Erro padrão	0,039
Desvio padrão	0,281
Variância da amostra	0,079
Curtose	6,351
Intervalo	1,656
Mínimo	0,009
Máximo	1,665
Soma	23,707
Contagem	51
Nível de confiança (95,0%)	0,079

6.3.5 Eficiência Elétrica em função da Potência Gerada

A eficiência elétrica global pode ainda ser relacionada à potência gerada. A Figura 6.6 mostra que quanto maior as potências geradas, maior a eficiência da

usina, com tendência assintótica a 0,6%. Contudo, raros eventos mostram que eficiências maiores que 0,8% são possíveis.

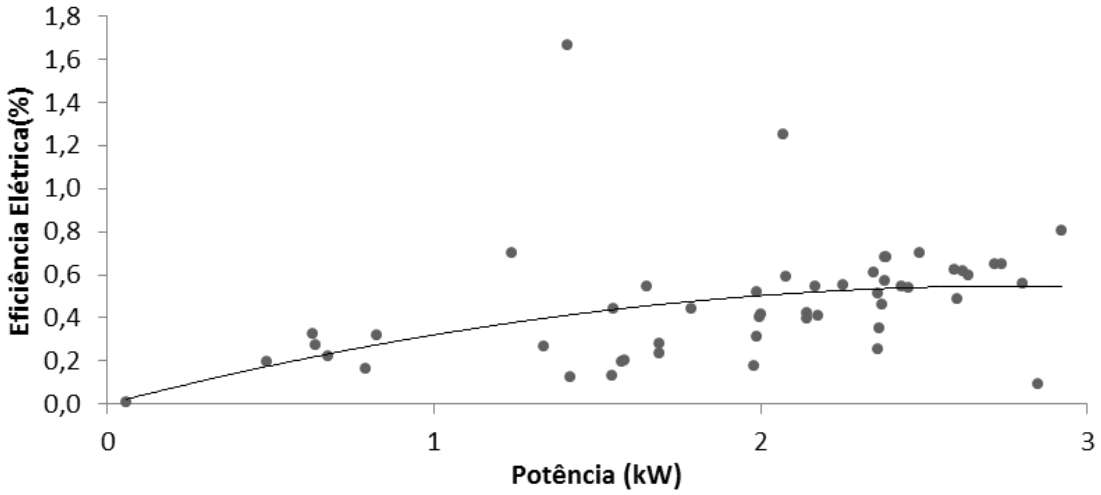


Figura 6.6 - Curva eficiência elétrica em função da potência (dados experimentais)

6.4 Comentários

A eficiência da planta se mostrou baixa em função de sua distribuição espacial, por ter sido projetada e construída para fins didáticos. Este arranjo motivou uma elevada perda de calor e perda de carga na rede de vapor. Adicionalmente, o consumo específico se mostrou compatível com a pressão de operação do vapor e o tipo de turbina utilizada.

VII- ESTUDO DE CASOS

A universalização da energia elétrica no Brasil, em particular a eletrificação rural, esta sendo fomentada pelo governo federal brasileiro através do Programa Luz para Todos – PLpT(Ministério de Minas e Energia - 2009). A coordenação geral é do Ministério de Minas e Energia, e os agentes executores são as concessionárias de distribuição de energia elétrica. Grande parte dos recursos de investimento é subsidiada pelo governo federal, visando incentivar a eletrificação rural.

Na região amazônica, parte da população rural não tem possibilidade de ser atendida através da interligação ao Sistema Interligado Nacional Brasileiro – SIN, tendo em vista as condições fisiográficas da região, onde há necessidade de fazer grandes travessias de rio, e a ausência de infraestrutura viária, sendo que o atendimento deve ser realizado via sistemas descentralizados.

O atendimento a estas comunidades isoladas é um fator crítico no processo de universalização, uma vez que os custos de operação e manutenção – O&M, para atendimento aos consumidores isolados é muito elevado, se considerarmos as mesmas condições de fornecimento dos consumidores dos grandes centros, tendo em vista estarem localizados e locais remotos, de condições de acesso e comunicação difícil e logística de transporte complexa.

Neste sentido foi efetivado um estudo e desenvolvimento de soluções tecnológicas e modelos de gestão alternativos, que sejam adequados à realidade destes consumidores, a custos adequados que possam servir como modelos para que sejam atingidas as metas de universalização.

A utilização de fontes renováveis de energia disponíveis localmente, em sistemas descentralizados, é uma opção que deve ser considerada para atendimento a estes consumidores isolados, tendo em vista a disponibilidade de recursos naturais na região e as vantagens inerentes a essas fontes, como redução de consumo de óleo diesel e possibilidade de agregar à geração de energia processos produtivos para a localidade isolada.

Nos vilarejos de maior porte a geração de energia com biomassa, é uma opção a ser considerada, visto que o combustível (biomassa) pode ser obtido de

pequenas indústrias de beneficiamento de produtos locais, sendo interessante, em função do aproveitamento dos recursos naturais existentes na região, além de possibilitar o desenvolvimento econômico da população e descarte de resíduos.

A seguir serão apresentados quatro estudos de casos reais de implantação de sistemas de geração de energia alternativa para localidades isoladas, que já estão sendo atendidas com sistema descentralizado baseado na queima direta de biomassa de resíduos (ciclo Rankine), com o objetivo de experimentar propostas de modelos de gestão sustentáveis, adequada as condições de isolamento das comunidades, bem como, consolidar a tecnologia do ciclo a vapor como a melhor indicada nestes casos. Adicionalmente, é apresentada uma alternativa, para pequenas potências de até 500W utilizando uma micro usina a biomassa, onde os resultados experimentais obtidos com o protótipo construído se mostraram bastante animadores.

CASOS REAIS

Projeto MARAJÓ.

Projeto ENERMAD.

Projeto USINA FLUTUANTE- MME.

Projeto ELETROBRÁS/BURITI

7.1 Projeto MARAJÓ

Implantado em 2007, o projeto Marajó financiado pelo fundo setorial CT-Energ/ CNPq, BID/PNUD e MME, fica localizado em uma comunidade isolada do sistema elétrico do estado do Pará, denominada Comunidade de Santo Antônio, na região dos furos de Breves, na Ilha de Siriri. É um projeto integrado e sustentável com cadeia produtiva local que inclui uma usina de geração de energia elétrica a partir de resíduos de biomassa produzidos na própria comunidade, uma fábrica de gelo, uma câmara frigorífica e uma fábrica de extração de óleo vegetal.

A Ilha de Siriri tem 100 ha e está a 45 minutos da cidade de Breves (de lancha com motor de popa), Figura 7.1 e Figura 7.2. Há nessa comunidade um total de 15 casas ocupadas por 72 moradores, cujas principais atividades são a pesca, a produção de madeira serrada, a criação de suínos, produção de açaí e cultivo de arroz (agricultura familiar), gelo, conservação a frio e extração de óleo vegetal. A comunidade consumia antes da implantação do projeto 200 litros de óleo Diesel por semana, adquiridos na cidade de Breves, após a implantação do projeto esse consumo foi reduzido a uma quantidade mínima que atende tão somente ao barco da comunidade e a um pequeno grupo gerador Diesel utilizado quando a usina de geração de energia elétrica a biomassa não está em funcionamento.

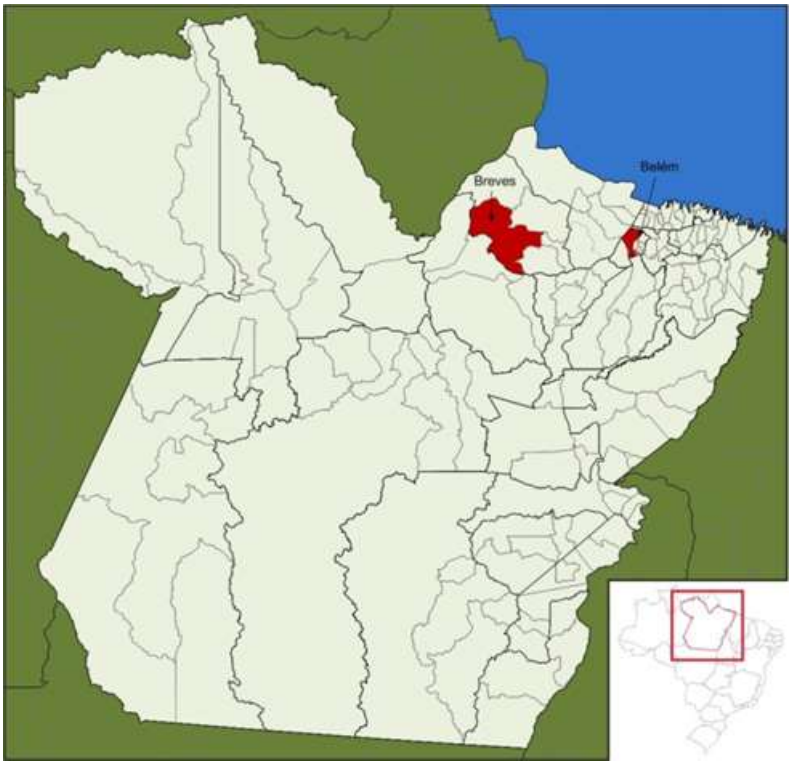


Figura 7.1 - Localização de Breves no Estado do Pará

Figura 7.2 - Localização do Projeto Marajó: S 01º 47,658’ W 50º 19,343’

Este projeto fez transferência de conhecimento e tecnologia à comunidade de Santo Antônio, pois promove o aumento de produtividade agroextrativista de maneira sustentável com agregação de valor, beneficiando a população ali residente e das regiões limítrofes, gerando renda, empregos diretos e indiretos, melhorando a qualidade de vida, diminuindo o passivo ambiental e alavancando o desenvolvimento econômico da região. O fato de o projeto garantir a oferta de energia para a localidade com aumento da produção agroextrativista, propicia ainda a instalação de novos mercados de trabalho e produtos (indústria-comércio-serviços), com o consequente aumento da renda local. Com a implantação do projeto, e por sua localização estratégica, está ocorrendo um efeito multiplicador destas ações para outras comunidades do mesmo perfil socioeconômico.

7.1.1 Concepção do Projeto

O projeto é constituído por uma usina de geração de energia elétrica com potência de 200 kW utilizando como combustível resíduo de biomassa. Uma fábrica de extração de óleo vegetal e uma fábrica de gelo com câmara frigorífica. Ver Figura 7.3. O arranjo produtivo local foi concebido em função da demanda reprimida dos produtos gelo, serviços de conservação a frio, óleo vegetal, energia firme e de qualidade.

Figura 7.3 - Arranjo do Projeto Marajó

A usina de geração de energia elétrica, Figura 7.4, consiste de uma caldeira flamo-tubular que queima resíduo de biomassa para gerar vapor. O vapor aciona uma turbina que move o gerador elétrico, em ciclo termodinâmico fechado.

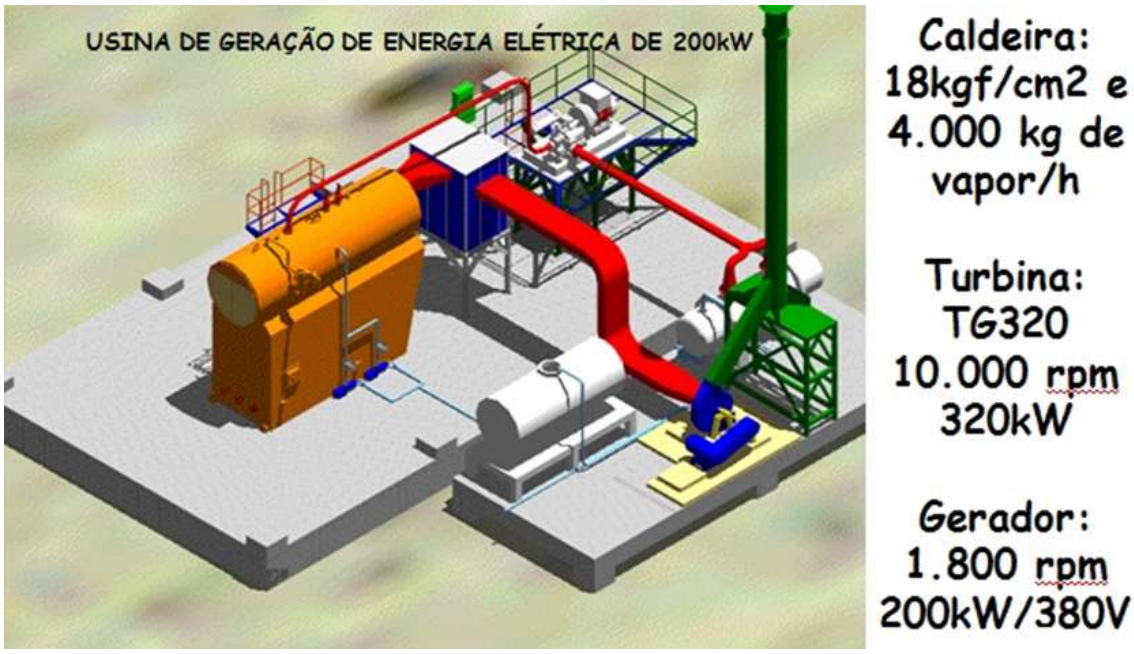


Figura 7.4 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 200 kW

A fábrica de extração de óleo vegetal, Figura 7.5, tem capacidade de esmagar 100 kg/h de polpa de sementes de oleaginosas é composta de estufa de secagem, cozinhador a vapor, prensa, decantador, filtro prensa e tanque de armazenamento.

Figura 7.5 - Fábrica de Extração de Óleo Vegetal

A fábrica de gelo tem capacidade para produzir 10 ton/dia de gelo em escamas e a câmara frigorífica tem um volume útil de 60 m^3, operando com temperatura de até -30ºC. Ver Figura 7.6.

Figura 7.6 - Fábrica de Gelo e Câmara Frigorífica

7.1.2 Implantação do Projeto

O projeto foi implantado em três etapas. A primeira etapa foi de obras civis, contemplando as fundações, seguida das lajes em concreto armado ciclópico e fabricação dos galpões de abrigo dos equipamentos do projeto, ocupando uma área de 750m^2. A segunda etapa foi à instalação dos equipamentos e a terceira etapa o comissionamento dos sistemas e o treinamento dos operadores.

Na primeira etapa de obras civis, as atividades desempenhadas foram o estaqueamento, construção dos blocos de concreto, construção das vigas, construção da laje e fabricação e montagem dos galpões de abrigo dos equipamentos para cada unidade produtiva.

As fundações foram realizadas através de estacas de madeira, com dimensões de 250x250x10.000mm, cravadas nos pontos de carregamento das estruturas, num total de 156 pontos de carregamento, com nega média por ponto de 40m. As estacas serviram de suporte de sustentação para as vigas de concreto, através das sapatas de concreto e por fim a camada de concreto recobrindo a área total de cada uma das lajes estruturadas. Ao todo, foram construídas quatro lajes para as áreas de utilidades, usina de geração de energia elétrica, fábrica de extração de óleo vegetal e fábrica de gelo e câmara frigorífica.

A segunda fase do projeto foi dedicada a instalação dos equipamentos em cada unidade de produção, entretanto alguns periféricos, tais como: filtros ciclônicos, tanques e estação de tratamento de água tiveram que ser fabricados no local em função da dificuldade enfrentada no transporte de Belém até o local do projeto. A logística de transporte e a falta de infraestrutura local, foram as maiores dificuldades enfrentadas pela equipe do projeto, a maioria dos equipamentos foram transportados em balsas e seu descarregamento realizados com guinchos manuais sobre trilhos de aço fixados em estacas de madeira cravadas no solo. O equipamento de maior peso e volume foi a caldeira, com 30 ton e altura de 6m, sendo necessário a instalação de estrutura própria para desembarque no local.

Figura 7.7 - Vista Geral do Projeto Marajó

Após a instalação de todos os equipamentos e periféricos, a equipe técnica do projeto em conjunto com os técnicos das empresas fornecedoras dos equipamentos e de serviços realizou a terceira e última etapa do projeto: comissionamento dos sistemas e o treinamento dos operadores. Foram realizados primeiro os testes de funcionamento, com acompanhamento dos futuros operadores de cada sistema produtivo. Em seguida a equipe do projeto deu início aos treinamentos, envolvendo: curso de segurança em operação de caldeiras NR13, curso de manipulação de alimentos, curso de noções de preservação do meio-ambiente, treinamento em gerenciamento do empreendimento, treinamento em operação e manutenção de usina termoelétrica à biomassa, treinamento em operação e manutenção da fábrica de gelo e câmara frigorífica, treinamento em operação e manutenção da fábrica de extração de óleo, treinamento para o uso da eficiente da energia elétrica. Após aferição do desempenho de cada participante, os sistemas produtivos foram liberados para entrar em funcionamento com os operadores da própria comunidade.

7.1.3 Operação

Atualmente, a Cooperativa Multiprodutos de Santo Antônio, CMSA conta com 14 operadores, assim distribuídos: 8 para a usina de geração de energia elétrica, 4 para a fábrica de extração de óleo vegetal e 2 para fábrica de gelo. Os sistemas

operam cerca de 12 horas por dia em função da demanda dos produtos fabricados e da demanda de produção da serraria local. Cada sistema produtivo tem seu plano de operação e manutenção que são periodicamente inspecionados pela equipe do projeto. Paradas programadas para manutenção já fazem parte da rotina dos cooperados e quando ocorre, entra em operação um grupo gerador diesel que supre a demanda dos consumos essenciais da ilha.

7.1.4 Modelo de Gestão

O modelo de gestão empregado foi através da constituição de uma Pessoa Jurídica na forma de Cooperativa denominada CMSA, com objetivo social de indústria, comércio e serviços de energia elétrica, gelo, conservação a frio, óleos vegetais e produtos florestais. A CMSA tem uma estrutura técnica e administrativa organizacional composta pelos próprios moradores da comunidade partícipes da CMSA e também de pessoas das regiões limítrofes que receberam treinamento de gestão do empreendimento para cada função específica, com apoio no grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente – EBMA da Universidade Federal do Pará.

Os custos das demandas e consumos dos processos produtivos da cooperativa e as cargas parasitas da usina de geração são incorporadas pelo empreendimento e a energia elétrica disponibilizada para consumo residencial, comercial e/ou industrial é cobrado mensalmente, através de leitura de consumo de energia em cada ponto consumidor. É de responsabilidade da CMSA a manutenção da mini rede, o levantamento de carga em cada ponto de consumo e a emissão mensal da respectiva fatura. Havendo necessidade (colapso de demanda), a cooperativa poderá implantar o regime hora-sazonal de energia para a modalidade de produção industrial.

Outras ações decorrentes da dinâmica de aferição e adequação do modelo de gestão são a continuidade das avaliações semestrais socioeconômica da comunidade e as avaliações da área de arroz plantada e sua produtividade, da área de floresta nativa com espécies oleaginosas e quantidade de espécies oleaginosas nativas na Ilha, avaliação da quantidade de madeira serrada, quantidade de resíduos de madeira serrada, quantidade de biomassa consumida na usina de geração de energia elétrica, potência elétrica gerada e consumida, quantidade de

gelo produzida e vendida, informações estas que contribuem para uma melhor administração do empreendimento.

7.1.5 Sustentabilidade do Projeto

Os pontos importantes que garantem a sustentabilidade do projeto Marajó, foram focados na disponibilidade de biomassa a ser demandada pela usina de geração de energia elétrica, quantidade e qualidade da água potável usada tanto para a usina de geração de energia como para fábrica de gelo e para os demais sistemas produtivos, a disponibilidade e facilidade de obtenção de sementes oleaginosas nas quantidades demandadas e nos modelos de negócios para manutenção e prospecção de mercados locais e regionais.

Para a usina de geração de energia elétrica, o consumo horário de biomassa é cerca de 750 kg, que é suprido com segurança pelos resíduos da indústria madeireira local e pelos resíduos da fábrica de extração de óleo. Adicionalmente, nas regiões limítrofes ao projeto existem várias madeireiras que disponibilizam gratuitamente os resíduos produzidos, garantindo assim o suprimento de biomassa da usina. O custo de geração de energia elétrica auferido é de R$140,00 por MWh gerado, bastante atrativo quando comparado ao valor comercializado pela concessionária local e o da geração com grupos-geradores diesel.

A água potável é obtida por bombeamento da água do rio Parauau (o projeto está às margens desse rio), que recebe tratamento físico-químico e bacteriológico em uma estação de tratamento de água, instalada no galpão da fábrica de gelo, com capacidade de processamento de $10m^3/h$, que supre todas as necessidades de abastecimento do empreendimento e ainda libera o excedente para consumo da própria comunidade.

As sementes oleaginosas são adquiridas de terceiros e em função da sazonalidade da safra de cada espécie. São processadas principalmente sementes de andiroba, jupati, muru-muru e buriti, todas oriundas do extrativismo local. A região do Marajó tem um potencial enorme destas palmáceas o que possibilita uma oferta constante dos produtos o ano inteiro.

Os modelos de negócios foram implementados de acordo com a especificidade de cada produto industrializado. O gelo é vendido aos pescadores da própria região, que antes obtinham o produto a uma distancia média de até 120 km, facilitando o acesso ao produto e barateando seu custo. A madeira processada é toda comercializada na cidade de Breves, onde o mercado de madeira é muito forte, com a utilização da energia elétrica a produção da madeireira triplicou, passando de 5m3 por turno de 8 h, para 15 m^3. O óleo vegetal, principalmente o de andiroba, tem alcançado um preço de R$10,00 por litro e está sendo comercializado em Belém. Prospecções de novos mercados são realizadas para outras regiões do país através do uso da telefonia local ou da internet na sede do município de Breves. Vislumbra-se a verticalização de outros processos produtivos locais, tais como: a industrialização do açaí, o beneficiamento do arroz, fábrica de vassouras e de móveis de madeira em função da energia elétrica disponibilizada e da matéria prima.

Todos estes indicadores físicos e econômicos demonstram a sustentabilidade do projeto e servem de parâmetro para replicar o modelo para outros projetos similares, onde a energia elétrica gerada é sustentada por arranjos produtivos locais.

7.2 Projeto ENERMAD

Implantado em 2009, o projeto ENERMAD financiado pelo fundo setorial CT-Energ/ CNPq, BID/PNUD e MME, em parceria com o CENBIO/USP. Fica localizado em uma comunidade isolada do setor elétrico do estado do Pará, denominada Comunidade de Porto Alegre, na região norte de Breves, no rio Curumú. É um projeto integrado e sustentável com cadeia produtiva local que inclui uma usina de geração de energia elétrica a partir de resíduos de biomassa gerados na própria comunidade e uma estufa de secagem para madeira. Em 2010, através de um novo projeto com a ELETROBRÁS, implantou-se um fábrica de extração de óleo vegetal para aproveitamento da oferta de energia da planta de geração a biomassa bem como a farta disponibilidade de sementes de oleaginosas da região, fazendo com que houvesse maior geração de renda e emprego para os moradores locais. Este novo empreendimento é gerenciado por uma ONG que administra todo o processo produtivo independente da cooperativa local.

A Comunidade de Porto Alegre está a 3,5 horas da cidade de Breves (de lancha com motor de popa), Figura 7.8. Há nessa comunidade um total de 62 casas ocupadas por 240 moradores, cujas principais atividades são a pesca, a produção de madeira serrada, produção de açaí e pequenos comércios de gêneros alimentícios. A comunidade consumia antes da implantação do projeto 450 litros de óleo Diesel por semana, adquiridos na cidade de Breves.

Figura 7.8 - Localização do Projeto ENERMAD: S 00° 59' 54.1"W 50° 53' 11.7"

Este projeto além da transferência de conhecimento e tecnologia à comunidade de Porto Alegre tem promovido o aumento de produtividade agroextrativista de maneira sustentável e sementes oleaginosas com agregação de valor, beneficiando a população ali residente e das regiões limítrofes, gerando renda, empregos diretos e indiretos, melhorando a qualidade de vida, diminuindo o passivo ambiental e alavancando o desenvolvimento econômico da região. O fato de o projeto garantir a oferta de energia para a localidade com aumento da produção agroextrativista propicia ainda a instalação de novos mercados de trabalho e produtos (indústria-comércio-serviços), com o consequente aumento da renda local. Com a implantação do projeto, e por sua localização estratégica, está ocorrendo um efeito multiplicador destas ações para outras comunidades do mesmo perfil socioeconômico.

7.2.1 Concepção do Projeto

O projeto é constituído por uma usina de geração de energia elétrica com potência de 200 kW utilizando como combustível resíduo de biomassa, uma fábrica de extração de óleo vegetal e uma estufa para secagem de madeira. Ver Figura 7.9. O arranjo produtivo local foi concebido em função da oferta de madeira e sementes oleaginosas existentes na região.

Figura 7.9 - Arranjo do Projeto ENERMAD

A usina de geração de energia elétrica, Figura 7.10, consiste de uma caldeira flamo-tubular que queima resíduo de biomassa para gerar vapor. O vapor aciona uma turbina que move o gerador elétrico, em ciclo termodinâmico fechado.

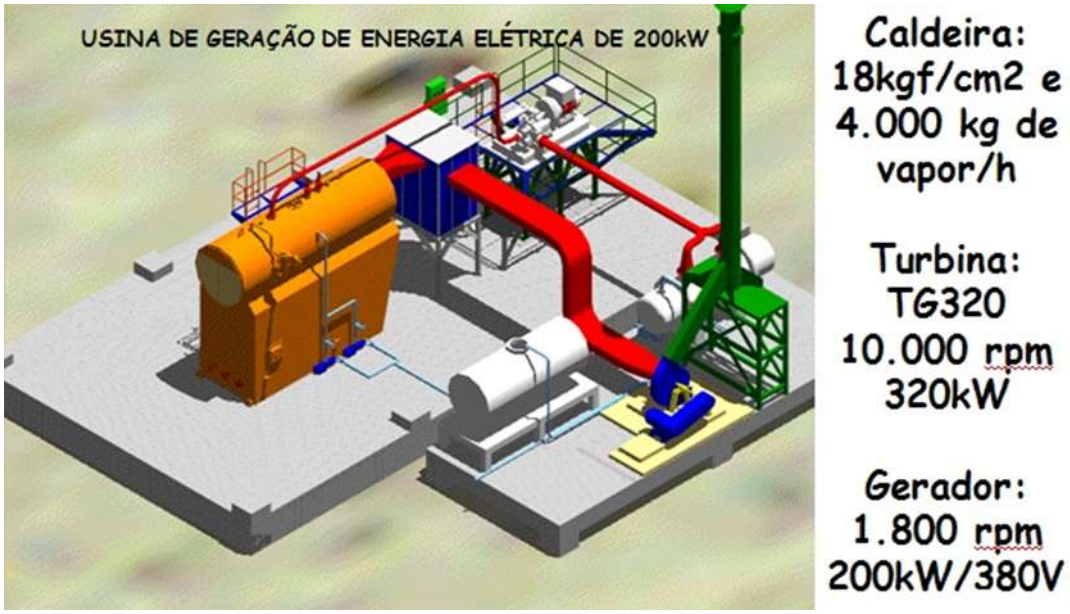


Figura 7.10 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 200 kW

7.2.2 Implantação do Projeto

O projeto foi implantado em três etapas. A primeira etapa foi de obras civis, contemplando as fundações, seguida das lajes em concreto armado ciclópico e fabricação dos galpões de abrigo dos equipamentos do projeto, ocupando uma área de 360m^2. A segunda etapa foi à instalação dos equipamentos e a terceira etapa o comissionamento dos sistemas e o treinamento dos operadores.

Na primeira etapa de obras civis, as atividades desempenhadas foram o estaqueamento, construção dos blocos de concreto, construção das vigas, construção da laje e fabricação e montagem dos galpões de abrigo dos equipamentos para cada unidade produtiva.

As fundações foram realizadas através de estacas de madeira, com dimensões de 250x250x10.000mm, cravadas nos pontos de carregamento das estruturas, num total de 156 pontos de carregamento, com nega média por ponto de 40m. As estacas serviram de suporte de sustentação para as vigas de concreto, através das sapatas de concreto e por fim a camada de concreto recobrindo a área total de cada uma das lajes estruturadas. Ao todo, foram construídas três lajes para as áreas de utilidades (estufa de secagem mais exaustor de gases e condensador), usina de geração de energia elétrica e fábrica de extração de óleo vegetal.

A segunda fase do projeto foi dedicada a instalação dos equipamentos em cada unidade de produção, entretanto alguns periféricos, tais como: filtros ciclonicos, tanques e estação de tratamento de água tiveram que ser fabricados no local em função da dificuldade enfrentada no transporte de Belém até o local do projeto. A logística de transporte e a falta de infraestrutura local, foram as maiores dificuldades enfrentadas pela equipe do projeto, a maioria dos equipamentos foram transportados em balsas e seu descarregamento realizados com guinchos manuais sobre trilhos de aço fixados em estacas de madeira cravadas no solo. O equipamento de maior peso e volume foi a caldeira, com 30 ton e altura de 6m, sendo necessário a instalação de estrutura própria para desembarque no local.

Figura 7.11 - Vista Geral do Projeto ENERMAD

Após a instalação de todos os equipamentos e periféricos, a equipe técnica do projeto em conjunto com os técnicos das empresas fornecedoras dos equipamentos e de serviços realizou a terceira e última etapa do projeto: comissionamento dos sistemas e o treinamento dos operadores. Foram realizados primeiro os testes de funcionamento, com acompanhamento dos futuros operadores de cada sistema produtivo. Em seguida a equipe do projeto deu início aos treinamentos, envolvendo: curso de segurança em operação de caldeiras NR13, curso de manipulação de alimentos, curso de noções de preservação do meio-

ambiente, treinamento em gerenciamento do empreendimento, treinamento em operação e manutenção de usina termoelétrica à biomassa, treinamento em operação e manutenção da fábrica de extração de óleo, treinamento para o uso da eficiente da energia elétrica. Após aferição do desempenho de cada participante, os sistemas produtivos foram liberados para entrar em funcionamento com os operadores da própria comunidade.

7.2.3 Operação

Atualmente, o projeto conta com 10 operadores, assim distribuídos: 6 para a usina de geração de energia elétrica, 4 para a fábrica de extração de óleo vegetal. Os sistemas operam cerca de 12 horas por dia em função da demanda dos produtos fabricados e da demanda de produção da serraria local. Cada sistema produtivo tem seu plano de operação e manutenção que são periodicamente inspecionados pela equipe do projeto. Paradas programadas para manutenção já fazem parte da rotina dos cooperados e quando ocorre, entra em operação um grupo gerador diesel que supre a demanda dos consumos essenciais da ilha.

7.2.4 Modelo de Gestão

O modelo de gestão empregado foi o mesmo do projeto Marajó, através da constituição de uma Pessoa Jurídica na forma de Cooperativa denominada CODEVISTA, com objetivo social de indústria, comércio e serviços de energia elétrica, gelo, conservação a frio, óleos vegetais e produtos florestais. A CODEVISTA tem uma estrutura técnica e administrativa organizacional composta pelos próprios moradores da comunidade partícipes da CODEVISTA e também de pessoas das regiões limítrofes que receberam treinamento de gestão do empreendimento para cada função específica, com apoio no grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente – EBMA da Universidade Federal do Pará.

Os custos das demandas e consumos dos processos produtivos da cooperativa e as cargas parasitas da usina de geração são incorporadas pelo empreendimento e a energia elétrica disponibilizada para consumo residencial, comercial e/ou industrial é cobrado mensalmente, através de estimativa de consumo

de energia em cada ponto consumidor. É de responsabilidade da CODEVISTA a manutenção da mini rede, o levantamento de carga em cada ponto de consumo e a emissão mensal da respectiva fatura. Havendo necessidade (colapso de demanda), a cooperativa poderá implantar o regime hora-sazonal de energia para a modalidade de produção industrial.

Outras ações decorrentes da dinâmica de aferição e adequação do modelo de gestão são a continuidade das avaliações semestrais socioeconômica da comunidade e as avaliações da área de arroz plantada e sua produtividade, da área de floresta nativa com espécies oleaginosas e quantidade de espécies oleaginosas nativas na Ilha, avaliação da quantidade de madeira serrada, quantidade de resíduos de madeira serrada, quantidade de biomassa consumida na usina de geração de energia elétrica, potência elétrica gerada e consumida, quantidade de gelo produzida e vendida, informações estas que contribuem para uma melhor administração do empreendimento.

7.2.5 Sustentabilidade do Projeto

Os pontos importantes que garantem a sustentabilidade do projeto ENERMAD, foram focados na disponibilidade de biomassa a ser demandada pela usina de geração de energia elétrica, a disponibilidade e facilidade de obtenção de sementes oleaginosas nas quantidades demandadas e nos modelos de negócios para manutenção e prospecção de mercados locais e regionais.

Para a usina de geração de energia elétrica, o consumo horário de biomassa é cerca de 750 kg, que é suprido com segurança pelos resíduos da indústria madeireira local e pelos resíduos da fábrica de extração de óleo. O custo de geração de energia elétrica auferido é de R$150,00 por MWh gerado, bastante atrativo quando comparado ao valor comercializado pela concessionária local e o da geração com grupos-geradores diesel.

As sementes oleaginosas são adquiridas de terceiros e em função da sazonalidade da safra de cada espécie. São processadas principalmente sementes de andiroba, jupati, muru-muru e buriti, todas oriundas do extrativismo local. A região

do Marajó tem um potencial enorme destas palmáceas o que possibilita uma oferta constante dos produtos o ano inteiro.

Os modelos de negócios foram implementados de acordo com a especificidade de cada produto industrializado. A madeira processada é toda comercializada na cidade de Breves, onde o mercado de madeira é muito forte. O óleo vegetal, principalmente o de andiroba, tem alcançado um preço de R$10,00 por litro e está sendo comercializado em Belém. Prospecções de novos mercados são realizadas para outras regiões do país através do uso da telefonia local ou da internet na sede do município de Breves. Vislumbra-se a verticalização de outros processos produtivos locais, tais como: a industrialização do açaí, o beneficiamento do arroz, fábrica de vassouras e de móveis de madeira em função da energia elétrica disponibilizada e da matéria prima.

Todos estes indicadores físicos e econômicos demonstram a sustentabilidade do projeto e servem de parâmetro para replicar o modelo para outros projetos similares, onde a energia elétrica gerada é sustentada por arranjos produtivos locais.

7.3 Projeto USINA FLUTUANTE- MME

Implantado em 2009, o projeto Usina Flutuante financiado pelo Ministério de Minas e Energia - MME fica localizado em uma comunidade isolada do setor elétrico do estado do Pará, denominada Comunidade São Pedro, na região norte de Breves. É um projeto integrado e sustentável com cadeia produtiva local que inclui uma usina de geração de energia elétrica a partir de resíduos de biomassa gerados na própria comunidade e uma fábrica de extração de óleo vegetal.

A Comunidade São Pedro está a 4,5 horas da cidade de Breves (de lancha com motor de popa) Figura 7.12 e Figura 7.13. Há nessa comunidade um total de 65 casas ocupadas por 290 moradores, cujas principais atividades são a produção de madeira serrada, pesca artesanal e a produção de açaí. A comunidade consumia antes da implantação do projeto 350 litros de óleo Diesel por semana, adquiridos na cidade de Breves.

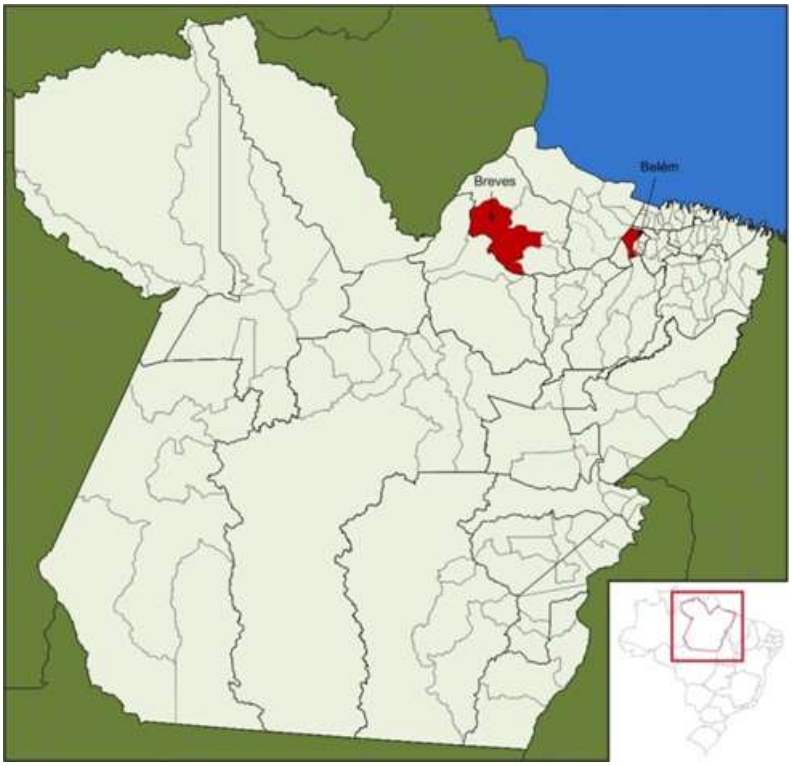


Figura 7.12 - Localização de Breves no Estado do Pará

Figura 7.13 - Localização do Projeto USINA FLUTUANTE- MME: S 00° 51' 47.2"

Este projeto tem garantido uma oferta de energia para a localidade com aumento da produção agroextrativista, propiciando a instalação de novos mercados

de trabalho e produtos (indústria-comércio-serviços), com o consequente aumento da renda local.

7.3.1 Concepção do Projeto

Pela dificuldade encontrada na implantação dos projetos MARAJÓ e ENERMAD, no que tange ao deslocamento de materiais de construção, dificuldade de acesso as áreas de implantação, mão de obra especializada escassa, optou-se por conceber todo o projeto em uma plataforma flutuante, fabricada e instalada em Belém, com melhores condições de infraestrutura e posteriormente, rebocada por um empurrador até a localidade beneficiária. Isto facilitou sobremaneira todas as etapas de fabricação, montagem, instalação, comissionamento e treinamento.

O projeto é constituído por uma usina de geração de energia elétrica com potência de 50 kW utilizando como combustível resíduo de biomassa e uma fábrica de extração de óleo vegetal, montados sob uma plataforma flutuante, Figura 7.14. O arranjo geral do empreendimento.

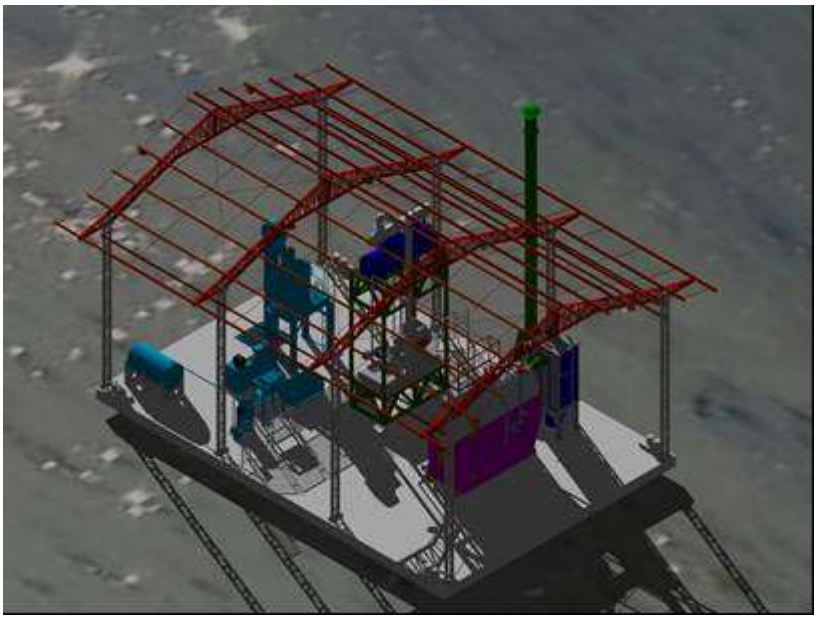


Figura 7.14 - Arranjo do Projeto USINA FLUTUANTE

A usina de geração de energia elétrica, Figura 7.15, consiste de uma caldeira flamotubular que queima resíduo de biomassa para gerar vapor. O vapor aciona uma turbina que move o gerador elétrico, em ciclo termodinâmico fechado.

Figura 7.15 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 50 kW

A fábrica de extração de óleo vegetal, Figura 7.16, tem capacidade de esmagar 100 kg/h de polpa de sementes de oleaginosas é composta de estufa de secagem, cozinhador a vapor, prensa, decantador, filtro prensa e tanque de armazenamento.

Figura 7.16 - Unidade: Fábrica de Extração de Óleo Vegetal

7.3.2 Implantação do Projeto

O projeto foi finalizado em 2009 dentro da UFPA e posteriormente deslocado via fluvial até a comunidade de São Pedro, no município de Breves.

Em seguida a equipe do projeto deu início aos treinamentos, envolvendo: curso de segurança em operação de caldeiras NR13, curso de manipulação de alimentos, curso de noções de preservação do meio-ambiente, treinamento em gerenciamento do empreendimento, treinamento em operação e manutenção de usina termoelétrica à biomassa, treinamento em operação e manutenção da fábrica de extração de óleo, treinamento para o uso da eficiente da energia elétrica. Após aferição do desempenho de cada participante, os sistemas produtivos foram liberados para entrar em funcionamento com os operadores da própria comunidade.

7.3.3 Operação

Os sistemas operam cerca de 10 horas por dia em função da demanda dos produtos fabricados e da demanda de produção da serraria local. Cada sistema produtivo tem seu plano de operação e manutenção que são periodicamente inspecionados pela equipe do projeto. Paradas programadas para manutenção já fazem parte da rotina dos cooperados e quando ocorre, entra em operação um grupo gerador diesel que supre a demanda dos consumos essenciais da ilha.

7.3.4 Modelo de Gestão

O modelo de gestão foi similar aos demais, onde foi constituída uma Pessoa Jurídica na forma de Cooperativa denominada Cooperativa Mista Agroflorestal de São Pedro - CMASP com objetivo social de indústria, comércio e serviços de energia elétrica, óleos vegetais e produtos florestais. A CMASP tem uma estrutura técnica e administrativa organizacional composta pelos próprios moradores da comunidade partícipes da CMASP e também de pessoas das regiões limítrofes que receberam treinamento de gestão do empreendimento para cada função específica, com apoio no grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente – EBMA da Universidade Federal do Pará.

Os custos das demandas e consumos dos processos produtivos da cooperativa e as cargas parasitas da usina de geração são incorporadas pelo empreendimento e a energia elétrica disponibilizada para consumo residencial, comercial e/ou industrial é cobrado mensalmente, através de leitura de consumo de energia em cada ponto consumidor. É de responsabilidade da CMASP a manutenção da mini rede, o levantamento de carga em cada ponto de consumo e a emissão mensal da respectiva fatura. Havendo necessidade (colapso de demanda), a cooperativa poderá implantar o regime hora-sazonal de energia para a modalidade de produção industrial.

Outras ações decorrentes da dinâmica de aferição e adequação do modelo de gestão são a continuidade das avaliações semestrais socioeconômica da comunidade e as avaliações da área de arroz plantada e sua produtividade, da área de floresta nativa com espécies oleaginosas e quantidade de espécies oleaginosas nativas na Ilha, avaliação da quantidade de madeira serrada, quantidade de resíduos de madeira serrada, quantidade de biomassa consumida na usina de geração de energia elétrica, potência elétrica gerada e consumida, quantidade de gelo produzida e vendida, informações estas que contribuem para uma melhor administração do empreendimento.

7.3.5 Sustentabilidade do Projeto

Os pontos importantes que garantem a sustentabilidade do projeto USINA FLUTUANTE foram focados na disponibilidade de biomassa a ser demandada pela usina de geração de energia elétrica, quantidade e qualidade da água potável usada para a usina de geração de energia e para os demais sistemas produtivos, a disponibilidade e facilidade de obtenção de sementes oleaginosas nas quantidades demandadas e nos modelos de negócios para manutenção e prospecção de mercados locais e regionais.

Para a usina de geração de energia elétrica, o consumo horário de biomassa é cerca de 190 kg, que é suprido com segurança pelos resíduos da indústria madeireira local e pelos resíduos da fábrica de extração de óleo. Adicionalmente, nas regiões limítrofes ao projeto existem várias madeireiras que disponibilizam gratuitamente os resíduos produzidos, garantindo assim o suprimento de biomassa

da usina. O custo de geração de energia elétrica auferido é de R$160,00 por MWh gerado, bastante atrativo quando comparado ao valor comercializado pela concessionária local e o da geração com grupos-geradores diesel.

A água industrial é obtida por bombeamento da água do rio, que recebe tratamento físico-químico e bacteriológico em uma estação de tratamento de água, com capacidade de processamento de $4m^3/h$, que supre todas as necessidades de abastecimento do empreendimento e ainda libera o excedente para consumo da própria comunidade.

As sementes oleaginosas são adquiridas de terceiros e em função da sazonalidade da safra de cada espécie. São processadas principalmente sementes de andiroba, jupati, muru-muru e buriti, todas oriundas do extrativismo local. A região do Marajó tem um potencial enorme destas palmáceas o que possibilita uma oferta constante dos produtos o ano inteiro.

Os modelos de negócios foram implementados de acordo com a especificidade de cada produto industrializado. A madeira processada é toda comercializada na cidade de Breves, onde o mercado de madeira é muito forte, com a utilização da energia elétrica a produção da madeireira triplicou, passando de $10m^3$ por turno de 8 h, para 20 m^3. O óleo vegetal, principalmente o de andiroba, tem alcançado um preço de R$10,00 por litro e está sendo comercializado em Belém. Prospecções de novos mercados são realizadas para outras regiões do país através do uso da telefonia local ou da internet na sede do município de Breves. Vislumbra-se a verticalização de outros processos produtivos locais, tais como: a industrialização do açaí, o beneficiamento do arroz, fábrica de vassouras e de móveis de madeira em função da energia elétrica disponibilizada e da matéria-prima.

7.4 Projeto ELETROBRÁS/BURITI

Implantado em 2010, o projeto ELETROBRÁS/BURITI financiado pela Eletrobrás, fica localizado em duas comunidades isoladas do setor elétrico do estado do Pará, denominada Comunidade PALHETA I e PALHETA II, na região de Muaná. É um projeto integrado e sustentável com cadeia produtiva local que inclui uma

usina de geração de energia elétrica a partir de resíduos de biomassa gerados na própria comunidade e uma fábrica de extração de óleo vegetal, ambos instalados sob plataforma flutuante.

As Comunidades PALHETA I e PALHETA II estão a 3,0 horas da cidade de Belém (de lancha com motor de popa) Figura 7.17 e Figura 7.18. Há nessa comunidade um total de 38 casas ocupadas por 136 moradores, cujas principais atividades são a pesca artesanal e a produção de açaí. A comunidade consumia antes da implantação do projeto 60 litros de óleo Diesel por semana, adquiridos na cidade de Muaná.

Figura 7.17 - Localização de Muaná no Estado do Pará

Figura 7.18 - Localização do Projeto ELETROBRÁS/BURITI -Palheta I: S 01°32'44.16" W 49° 4'50.25" . Palheta II: S 01°32'42.18" W 49° 4'52.20"

Este projeto tem garantido uma oferta de energia para a localidade com aumento da produção agroextrativista, propiciando a instalação de novos mercados de trabalho e produtos (indústria-comércio-serviços), com o consequente aumento da renda local.

7.4.1 Concepção do Projeto

O projeto é constituído por uma usina de geração de energia elétrica com potência de 50 kW utilizando como combustível resíduo de biomassa e uma fábrica de extração de óleo vegetal, montados sob uma plataforma flutuante em cada comunidade, Figura 7.19. O arranjo geral do empreendimento.

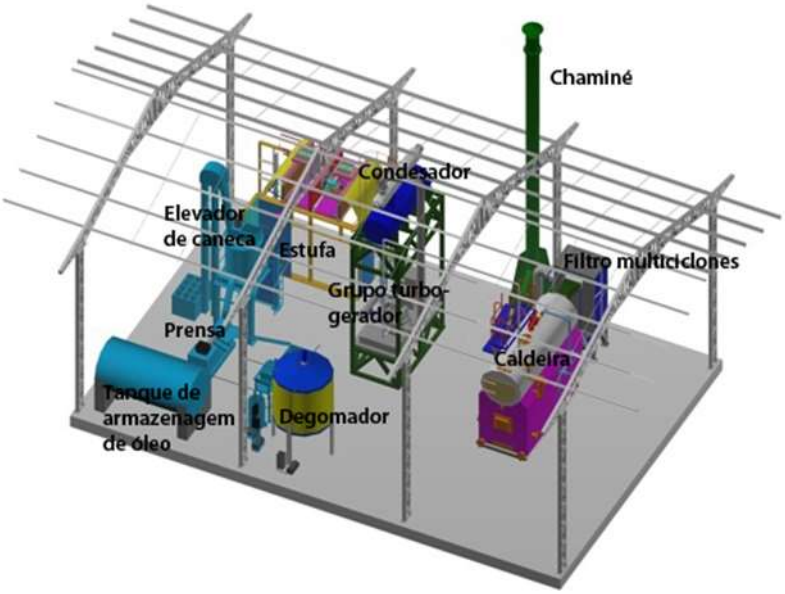


Figura 7.19 - Arranjo do Projeto ELETROBRÁS/BURITI

A usina de geração de energia elétrica, Figura 7.20, consiste de uma caldeira flamo-tubular que queima resíduo de biomassa para gerar vapor. O vapor aciona uma turbina que move o gerador elétrico, em ciclo termodinâmico fechado.

Figura 7.20 - Usina de Geração de Energia Elétrica de 50 kW

A fábrica de extração de óleo vegetal, Figura 7.21, tem capacidade de esmagar 100 kg/h de polpa de sementes de oleaginosas é composta de estufa de

secagem, cozinhador a vapor, prensa, decantador, filtro prensa e tanque de armazenamento.

Figura 7.21 - Fábrica de Extração de Óleo Vegetal

7.4.2 Implantação do Projeto

O projeto foi finalizado em 2010 dentro da UFPA e posteriormente deslocado via fluvial até as comunidades PALHETA I e PALHETA II, ambas pertencentes ao município de Muaná.

Em seguida a equipe do projeto deu início aos treinamentos, envolvendo: curso de segurança em operação de caldeiras NR13, curso de manipulação de alimentos, curso de noções de preservação do meio-ambiente, treinamento em gerenciamento do empreendimento, treinamento em operação e manutenção de usina termoelétrica à biomassa, treinamento em operação e manutenção da fábrica de extração de óleo, treinamento para o uso da eficiente da energia elétrica. Após aferição do desempenho de cada participante, os sistemas produtivos foram liberados para entrar em funcionamento com os operadores da própria comunidade.

7.4.3 Operação

Os sistemas operam cerca de 8 horas por dia em função da demanda da fábrica de extração de óleo vegetal. O sistema produtivo tem seu plano de operação e manutenção que são periodicamente inspecionados pela equipe do projeto. Paradas programadas para manutenção já fazem parte da rotina dos cooperados e quando ocorre, entra em operação um grupo gerador diesel que supre a demanda dos consumos essenciais da ilha.

7.4.4 Modelo de Gestão

O modelo de gestão aqui implementado foi através de uma ONG denominada Instituto Natural de Preservação da Amazônia – INPA em parceria com o grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente – EBMA da Universidade Federal do Pará.

Os custos das demandas e consumos dos processos produtivos e as cargas parasitas da usina de geração são incorporadas pelo empreendimento e a energia elétrica disponibilizada para consumo residencial, comercial e/ou industrial é cobrado mensalmente, através de leitura de consumo de energia em cada ponto consumidor. É de responsabilidade da INPA a manutenção da mini rede, o levantamento de carga em cada ponto de consumo e a emissão mensal da respectiva fatura. Havendo necessidade (colapso de demanda), a cooperativa poderá implantar o regime hora-sazonal de energia para a modalidade de produção industrial.

7.4.5 Sustentabilidade do Projeto

Os pontos importantes que garantem a sustentabilidade do projeto ELETROBRÁS/BURITI foram focados na disponibilidade de biomassa a ser demandada pela usina de geração de energia elétrica, quantidade e qualidade da água potável usada para a usina de geração de energia e para os demais sistemas produtivos, a disponibilidade e facilidade de obtenção de sementes oleaginosas nas quantidades demandadas e nos modelos de negócios para manutenção e prospecção de mercados locais e regionais.

Para a usina de geração de energia elétrica, o consumo horário de biomassa é cerca de 190 kg, que é suprido com segurança pelos resíduos da indústria madeireira localizadas próximas a s duas comunidades e pelos resíduos da fábrica de extração de óleo. Adicionalmente, nas regiões limítrofes ao projeto existem várias madeireiras que disponibilizam gratuitamente os resíduos produzidos, garantindo assim o suprimento de biomassa da usina. O custo de geração de energia elétrica auferido é de R$160,00 por MWh gerado, bastante atrativo quando comparado ao valor comercializado pela concessionária local e o da geração com grupos-geradores diesel.

A água industrial é obtida por bombeamento da água do rio , que recebe tratamento físico-químico e bacteriológico em uma estação de tratamento de água, com capacidade de processamento de $4m^3/h$, que supre todas as necessidades de abastecimento do empreendimento e ainda libera o excedente para consumo da própria comunidade.

As sementes oleaginosas são adquiridas de terceiros e em função da sazonalidade da safra de cada espécie. São processadas principalmente sementes de andiroba, jupati, muru-muru e buriti, todas oriundas do extrativismo local. A região do Marajó tem um potencial enorme destas palmáceas o que possibilita uma oferta constante dos produtos o ano inteiro.

Vislumbra-se a verticalização de outros processos produtivos locais, tais como: a industrialização do açaí, fábrica de vassouras e de móveis de madeira em função da energia elétrica disponibilizada e da matéria prima.

VIII- PLANTA PILOTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO MICROTURBINA A VAPOR

O conceito da Universalização do Atendimento ao usuário de energia elétrica tem sido o marco que norteia o processo de eletrificação rural em todo o país. Dentre os principais problemas encontrados no processo de universalização do atendimento de energia elétrica na região amazônica estão: sua baixa densidade demográfica, a dificuldade de acesso e um número reduzido de tecnologias que possibilitem o uso dos recursos naturais locais como opções viáveis e de baixo impacto ambiental na produção de eletricidade. Uma possível solução para o problema é o uso de fontes renováveis, tendo em vista a abundância local de recursos como biomassa, energia solar, eólica e hidráulica que podem oferecer energia primária em condições adequadas às realidades locais.

De todos os recursos de energia renováveis, a biomassa é, em muitas localidades, abundante e proeminente. As energias solar e eólica têm a limitação de serem de natureza intermitente e, por isso, são mais apropriadas de serem utilizadas nos sistemas diversificados para contribuírem onde a geração base de energia provém de outra fonte, como por exemplo, combustível fóssil, ou de sistemas de armazenamento para suprir as necessidades quando os raios solares não estão disponíveis e/ou o vento não está soprando.

Contudo, nos pequenos núcleos urbanos de até 5 residências, ou para habitações isoladas, o estado atual das tecnologias de produção de eletricidade conduzem na direção da energia elétrica vir a ser fornecida por pequenos sistemas a diesel, fotovoltaicos, eólicos ou híbridos (fotovoltaicos-eólicos-diesel), que ainda apresentam custos elevados tanto na implantação como na operação e manutenção. Para estes casos, vem se desenvolvendo uma planta piloto de geração de energia elétrica à biomassa em micro escala, com potência experimental de até 500 W, capaz de suprir essas demandas com custos que podem se tornar menores que os apresentados pelas alternativas anteriormente mencionadas (sistemas a diesel, fotovoltaicos, eólicos ou híbridos).

8.1 Tecnologias de Conversão de Biomassa em Pequena e Micro Escala

Em geral, o conceito de sistemas térmicos em pequena escala consiste em combinar calor e geração de eletricidade com potência elétrica inferior a 100 kW. Microescala também é frequentemente usado para denotar sistemas que combinam calor e eletricidade em escalas ainda menores com capacidade elétrica menor que 15 kWe. Ressalta-se que a maioria das aplicações está associada a sistemas envolvendo gasificação (Dong, D., et all. - 2009).

Atualmente, sistemas combinando calor e geração de eletricidade em micro e pequena escala estão experimento um rápido desenvolvimento e são um mercado emergente com prospectos promissores para um futuro próximo futuro (Dong, D., et all – 2009; Hawkes, A. D., et all. – 2007; Huhn, K. - 2001), sendo o Reino Unido considerado como um dos três maiores mercados para instalações em microescala na Europa (Dong, D., et all. – 2009; Denntice, D. et all. - 2003).

O uso combinado de calor e eletricidade destinado ao atendimento de pequenos grupos habitacionais foi estudado por (Bernotat, K., et all. - 2004). Nesse estudo concluiu-se que as aplicações em pequena escala têm grandes perspectivas desde que a demanda de calor total em uma dada área for suficientemente alta, o que não é o caso da maioria dos núcleos habitacionais amazônicos, onde basicamente se têm demanda por eletricidade.

Em (Denntice, D. et all. - 2003) foi analisada a possibilidade de aplicação em microescala, aonde micro sistemas de cogeração, inferiores a 15 kWe, para aplicações residenciais e iluminação comercial foram avaliados, conduzindo a uma análise energética dos eletrodomésticos e avaliando o casamento entre um microsistema e as demandas elétricas e térmicas dos eletrodomésticos por meio de teste estabelecidos para módulos de micro sistemas de produção combinada de calor e eletricidade. Eles concluíram que enquanto a economia de energia e os benefícios ambientais da cogeração em microescala no local eram indiscutíveis, os obstáculos tecnológicos ainda permaneceriam se opondo a sua difusão em larga escala, uma vez que um sistema desejável de micro-co-geração de baixo custo e fácil operação para usuários residenciais ainda estariam na ocasião em fase de desenvolvimento. Dessa forma, a introdução de microssistemas para aplicações

domésticas estará sujeita as tecnologias disponíveis, casamento de cargas elétricas e térmicas, e do preço do gás e da eletricidade.

Uma avaliação realizada em cinco microssistemas (<5 kW),utilizados em aplicações residenciais, demonstrou que apesar de serem capazes de economizar energia primária e reduzir emissão de CO2, desde que haja demanda de calor, todavia essas aplicações não foram consideradas favoráveis financeiramente, em função do alto investimento e longo período de reembolso (Paepa, M., et all. – 2006). Em resumo, de acordo com o demonstrado em algumas pesquisas (Dong, D., et all. – 2009; Paepa, M., et all. – 2006; Hawkes, A. D., et all. – 2007), o desenvolvimento de sistemas de produção combinando calor e eletricidade em microescala, de baixo custo e com tecnologias inovadoras se fazem urgentemente necessárias.

Em resumo, a aplicação de sistemas que envolvam a utilização de biomassa em microescala para produção de calor e eletricidade tem um grande potencial de mercado em todo o mundo. Atualmente, esses microssistemas estão emergindo no mercado com um prospecto promissor para o futuro próximo, principalmente nos locais onde a demanda de calor é significativa. Com a introdução de legislações ambientais cada vez mais severas e a preocupação crescente com as mudanças climáticas, os recursos renováveis tem papel crucial substituindo combustíveis fósseis que movem os sistemas tradicionais. Contudo, a pesquisa e o desenvolvimento dessa aplicação promissora ainda estão em sua fase embrionária.

A comercialização de microssistemas biomassa ainda não é uma realidade consolidada, apesar do sucesso da operação comercial de sistemas em grande e média escala (Dong, D., et all. – 2009). O desenvolvimento e implantação desses sistemas necessitam superar várias barreiras técnicas e econômicas. Por esse motivo, esforços significativos em pesquisa e desenvolvimento são urgentemente necessários, para que a próxima geração de microssistemas autônomos utilizando biomassa como recurso primário possam ser consolidados e comercializados num futuro próximo. Nesse sentido, a presente pesquisa dá uma contribuição com o desenvolvimento e análise operacional de um microssistema a vapor.

Várias tecnologias têm sido desenvolvidas para conversão de energia de biomassa em calor e eletricidade. Basicamente, estas incluem uma tecnologia de

conversão primária, que converte biomassa em água quente, vapor, gás ou produtos liquefeitos, e uma tecnologia de conversão secundária que transformam estes produtos em calor e eletricidade.

De todas as principais tecnologias de conversão de energia de biomassa, a tecnologia de combustão (tecnologia primária) e turbina a vapor (tecnologia secundária) é a combinação geralmente usada, particularmente para sistemas em grande e média escala. Mais recentemente, a combinação combustão e Ciclo Rankine Orgânico (ORC – do inglês Organic Rankine Cyclo) é a tecnologia que recebe mais e mais atenção no desenvolvimento de sistemas de conversão de biomassa em pequena escala (Dong, D., et all. – 2009). Ao invés de água, os sistemas a ORC utilizam substâncias químicas orgânicas, como fluido de trabalho, com favoráveis propriedades termodinâmicas. Os fluidos de trabalho orgânicos evaporam necessitando uma quantidade menor de calor que a água, e dessa forma, eles conseguem operar em menor temperatura e pressão que os processos a vapor convencionais.

Como uma tecnologia de geração de eletricidade avançada para aplicações com fontes de calor a baixa temperatura em escalas que vão desde uma fração de kWe para mais de 1 MWe, os sistemas baseados em ORC são em muitas formas robustos e vantajosos. A baixa temperatura, fluidos de funcionamento orgânicos conduzem para uma eficiência de ciclo maior que os sistemas convencionais que utilizam água. Em pequena e micro escala, estes são preferidos, pois proporcionam uma alta eficiência da turbina tanto em carga plena ou parcial. Outra vantagem dos sistemas baseados em ORC com relação aos sistemas convencionais é a segurança. É conhecido que a água demonstra boa eficiência em alta pressão que por sua vez requerem medidas de segurança mais rigorosas, que não são economicamente viáveis para sistemas de pequena e micro escalas. Apesar de todas as vantagens mencionadas, dois obstáculos podem ser destacados com relação ao sistema baseados em ORC: o investimento específico relativamente alto e a eficiência elétrica limitada (Dong, D., et all. – 2009; Drescher, U., et all. – 2007; Oberngerger, I. - 2000). A natureza conflitante desses dois fatores torna a solução mais complicada e difícil de ser encontrada.

Baseada em razões econômicas, alguns pesquisadores argumentam que aplicações de biomassa em pequena e micro escala devem ser simplificadas comparadas as aplicações em médio e grande porte, uma vez que o número de horas de operação é menor, e uma boa parte dessas horas opera com carga parcial.

Assim, o intercâmbio entre custos, a complexidade do processo, e o aumentada da produção de eletricidade é um fator importante quando se defini o processo mais lucrativo para um investimento em pequeno ou micro escala de um sistema a biomassa.

Embora os sistemas baseados em ORC venham sendo aplicados em unidades de geração tão pequenas quanto uma fração de kWe, nenhuma literatura disponibiliza dados experimentais de microssistemas a biomassa, tal como os ORC ou outra tecnologia. Isto se deve principalmente ao interesse limitado em aplicações em micro escala e falta de pesquisas consolidadas. Em algumas situações, dados técnicos operacionais disponíveis estão muito limitados devido a segredos comerciais.

8.2 Descrição Detalhada do Micro Sistema a Vapor

O micro sistema de geração de eletricidade a vapor foi concebido de forma simples e que pudesse ser reproduzido em escala de produção por empresas regionais, com baixo custo de fabricação. Composto basicamente de: Caldeira vertical com capacidade de 150 kg de vapor por hora e um pressão máxima de trabalho de 10 kgf/cm2; micro turbina; alternador de 12 V / 500 W usado como gerador de energia elétrica e tanque de armazenagem de água. A Figura 8.1 mostra o conceito do projeto utilizado neste protótipo.

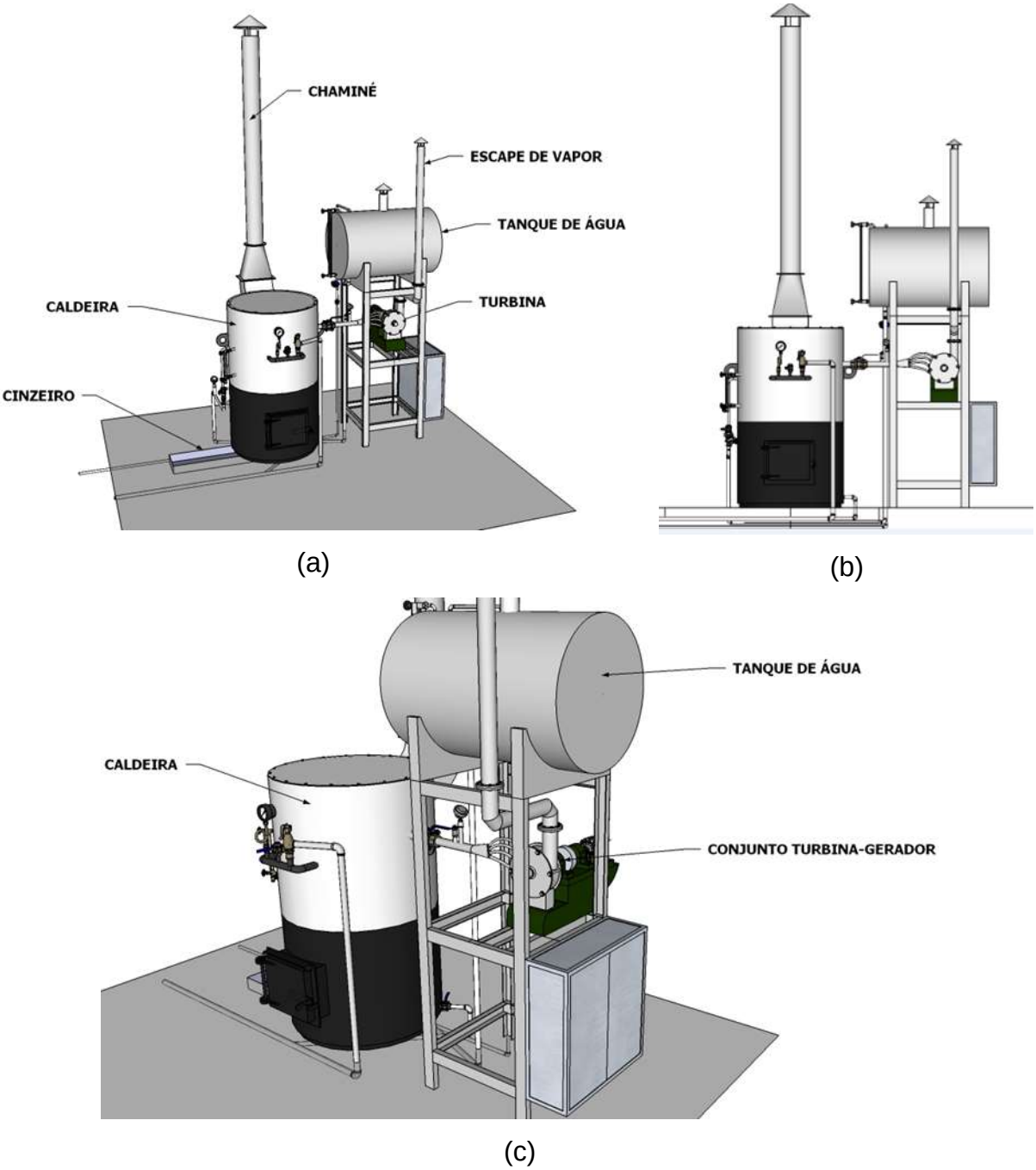
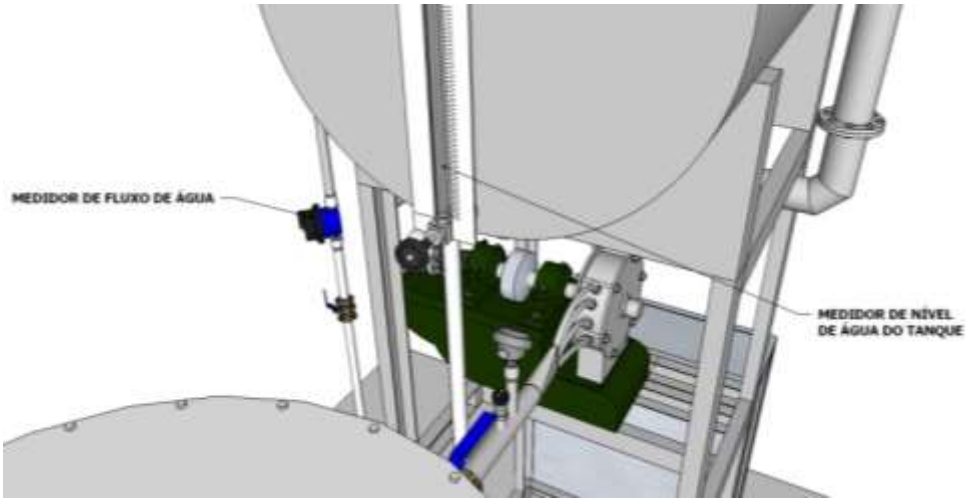
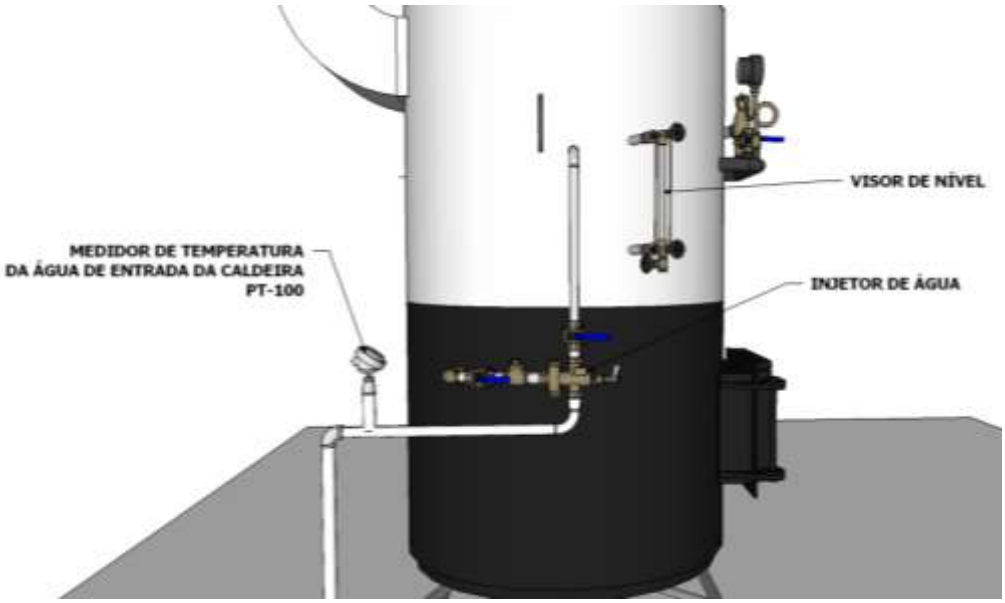


Figura 8.1 - Configuração básica do micro sistema de geração de eletricidade a vapor: (a) Vista geral do conjunto (b) Vista frontal do conjunto (c) Detalhe em perspectiva do conjunto micro turbina mais alternador

O tanque de armazenamento de água abastece a caldeira com o auxílio de um injetor a vapor. A entrada de água na caldeira está localizada próxima a fornalha de queima de biomassa (parte em preto da ilustração da caldeira) facilitando a entrada de água por injeção de vapor na pressão de trabalho da caldeira. A Figura 8.2 ilustra detalhes do sistema de alimentação de água da caldeira.



(a)



(b)

Figura 8.2 - Detalhe da tubulação de alimentação de água da caldeira e instrumentação: (a) Tubulação e medidor de fluxo de saída de água do tanque, medidor de nível de água no tanque; (b) Vista do injetor a vapor de água da caldeira, visor de nível e do Pt-100

O fluxo de vapor a partir da caldeira é controlado por uma válvula manual. Esse fluxo é direcionado até a microturbina por meio de quatro bicos injetores. A Figura 8.3 ilustra com detalhe o tipo de válvula, sua localização bem como a instalação de alguns sensores utilizados nas etapas de testes.

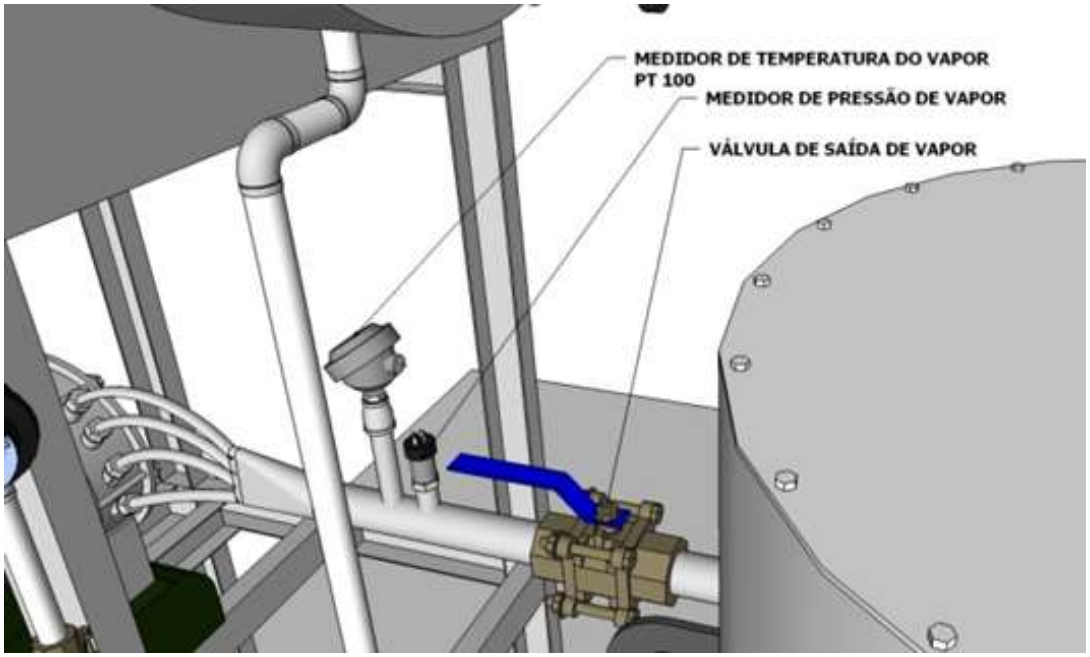


Figura 8.3 - Detalhe da tubulação de saída de vapor da caldeira para a microturbina.Válvula de controle de fluxo de vapor a partir da caldeira, medidores de temperatura e pressão do vapor, bicos de injeção de vapor

A microturbina foi desenvolvida de forma simples de ser reproduzida e é constituída de um pequeno volante de 280 mm de diâmetro ao qual foram anexadas as pás fabricadas em chapas de ferro ASTM-A36, tal como ilustram os detalhes da figura 86. Nas vistas explodidas do conjunto turbogerador, Figura 8.4, são observados também a configuração dos bicos de injeção de vapor, tubulação de descarga de vapor para a atmosfera, mancais de rolamento que comportam o eixo de acoplamento da microturbina com o alternador e um pequeno volante de inércia que auxilia na absorção de variações bruscas de carga, além de uma pequena roda dentada que, juntamente com um sensor magnético, possibilitou a obtenção da rotação do conjunto turbogerador nas etapas de testes.

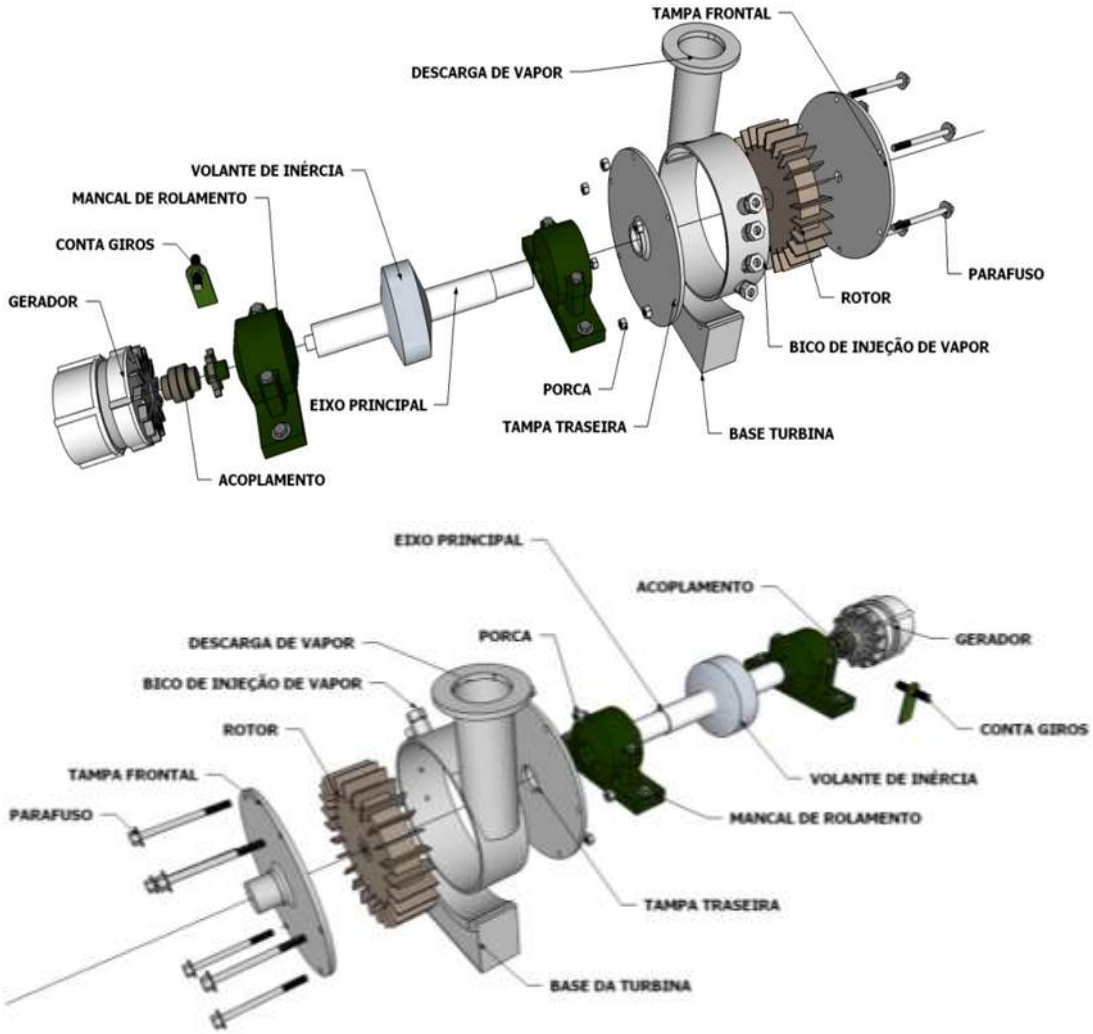


Figura 8.4 - Vistas explodidas do conjunto turbogerador

As Figura 8.5 à Figura 8.8 mostram detalhes do protótipo instalado no Laboratório de Vapor da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFPA. Para condicionar a energia elétrica produzida, um sistema constituído de controlador de carga, banco de bateria e conversor de CC–CA, também foi utilizado. Esse sistema possibilita uma operação mais adequada e estável na interface com o consumidor final.

(a) (b)

Figura 8.5 - Micro sistema a vapor instalado no laboratório de Engenharia Mecânica da UFPA: (a) Vista geral do protótipo; (b) Gerador de vapor (caldeira + fornalha)

(a) (b)

Figura 8.6 - Sistema de alimentação de água do gerador de vapor: (a) Reservatório d'água; (b) Injetor d'água na caldeira

(a)

(b)

(c)

Figura 8.7 - Detalhes do sistema de produção e transporte do vapor: (a)Manômetro e válvula de segurança da caldeira; (b) Tubulação de interligação do gerador de vapor a microturbina com a instrumentação de medida da pressão e temperatura do vapor; (c) Tubulação de escape de vapor

(a)

(b)

Figura 8.8 - Detalhes do turbogerador: (a) Turbina aberta com os bicos de injeção de vapor; (b) Acoplamento entre a turbina e o alternador

Para auxiliar na disseminação e operação do micro sistemas a vapor, foi desenvolvido um manual com os Procedimentos Operacionais (Anexo III), que poderá ser utilizado para treinamento de operadores nas comunidades a serem atendidas.

8.3 Sistema de Aquisição e Visualização dos Dados

Os parâmetros de interesse do sistema em questão foram monitorados através de um sistema de aquisição e visualização de dados, desenvolvido exclusivamente para os ensaios. Para tal, utilizou-se o software *LabVIEW™* (abreviação de *Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) para desenvolver o programa de aquisição de dados. O *LabVIEW™* é uma plataforma de linguagem de programação visual (denominada linguagem G) da *National Instruments*. Esse tipo de programação facilita a visualização e automatiza o processamento e a medição dos dados, podendo ser utilizada em diversas aplicações (Figueiredo e Vasconcelos - 2009). O *LabVIEW™* foi originalmente lançado pela *Apple Macintosh* em 1986 e é normalmente utilizado na aquisição de dados, controle de instrumentos e automação industrial em uma variedade de plataformas, incluindo o *Windows*, algumas versões do *Linux e MAC OS X*.

A Figura 8.9 mostra a interface gráfica desenvolvida para o sistema de aquisição de dados. Ela representa, de maneira ilustrativa, os componentes da microturbina, assim como os parâmetros monitorados.

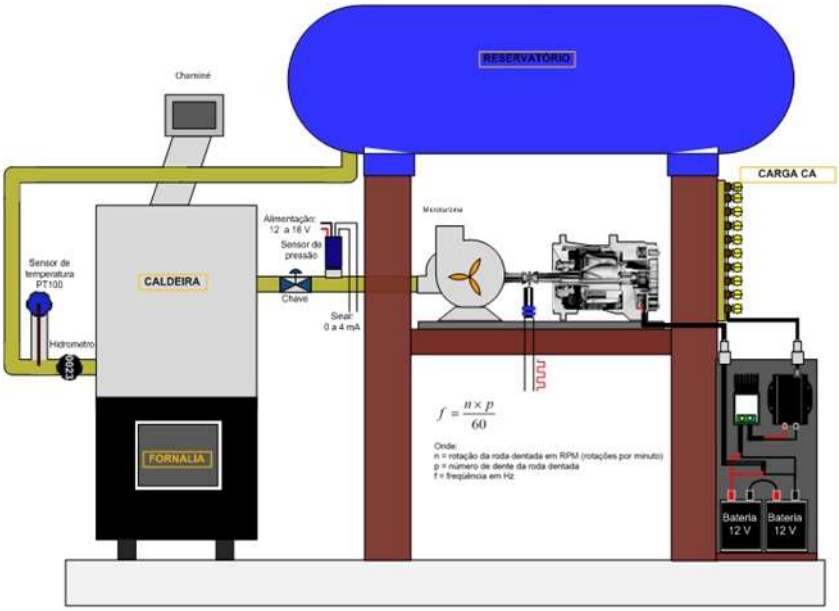


Figura 8.9 - Interface gráfica desenvolvida para o sistema de aquisição de dados

Também foram desenvolvidos *hadwares* para condicionar os sinais de medição que são inseridos na placa instalada no computador, a Figura 8.10 mostra um panorama do sistema de aquisição, com detalhe para o inversor de tensão.

Figura 8.10 - Vista geral do Sistema de Aquisição de Dados

A funcionalidade do programa desenvolvido é prover visualização e armazenamento, em um arquivo de dados, dos parâmetros de interesse do sistema: tensões e correntes elétricas (contínua e alternada), rotação do eixo gerador, temperatura e pressão de entrada do vapor na turbina. As Figura 8.11 e Figura 8.12 mostram os dados sendo exibidos na tela do computador, numericamente e graficamente.

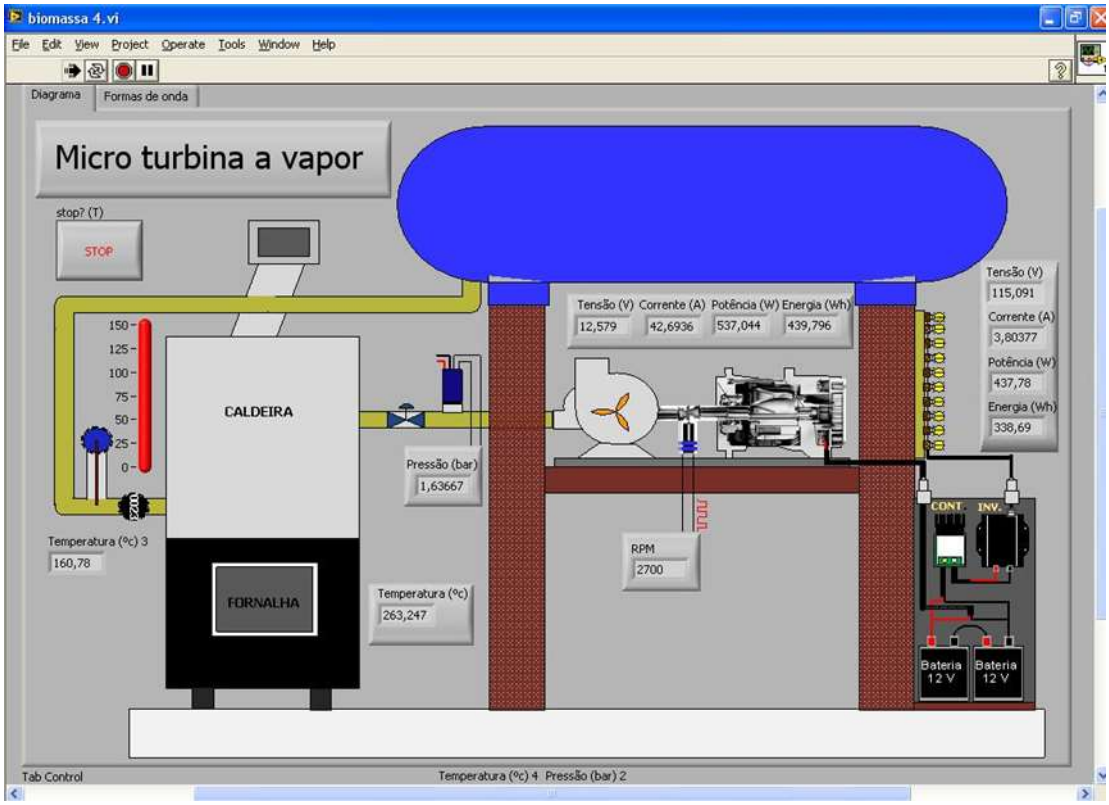


Figura 8.11 - Tela de entrada do Sinótico

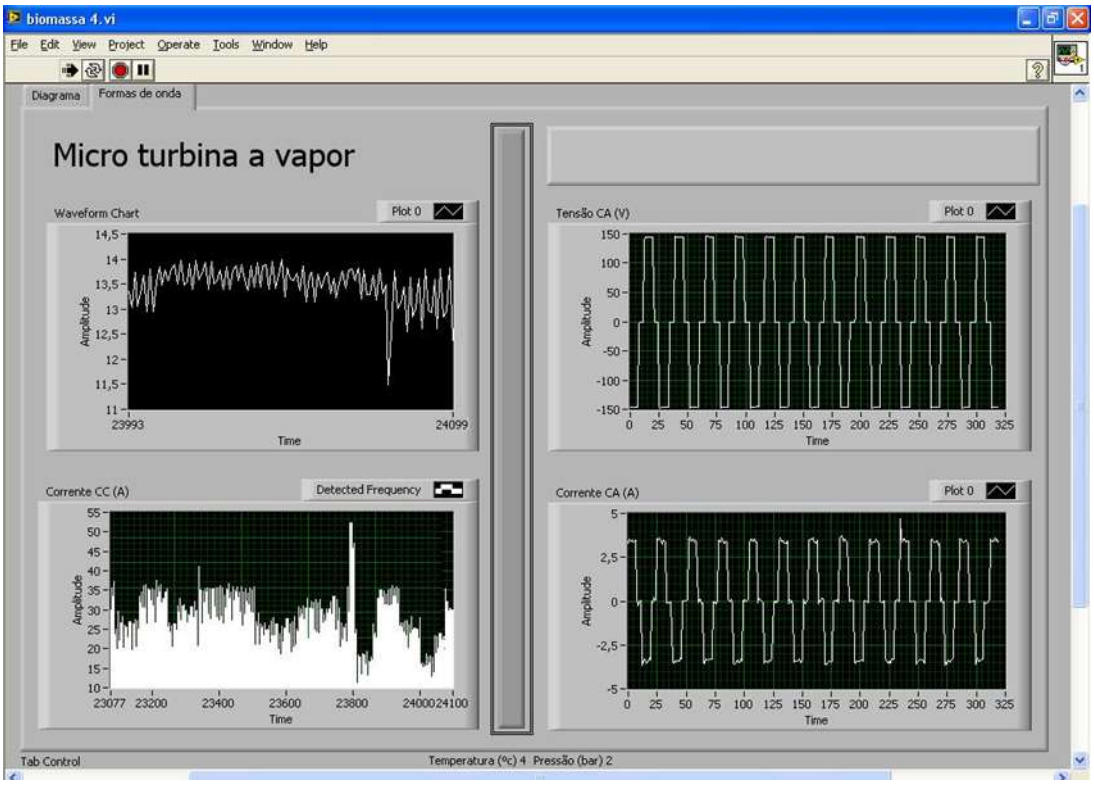


Figura 8.12 - Tela dos parâmetros elétricos mostrados no Sinótico

Como o gerador elétrico utilizado fornece em seus terminais tensão e corrente contínua utilizou-se um inversor de tensão para alimentar o banco de cargas, composto por lâmpadas incandescentes de 60 W e 100 W, em corrente alternada. A Figura 8.13 mostra o banco de cargas usado nos ensaios

Figura 8.13 - Banco de carga com lâmpadas incandescentes

A metodologia de ensaio consistiu em controlar manualmente a válvula de admissão de vapor para a microturbina e a entrada e saída de carga elétrica, por meio das chaves contidas no banco de carga, de acordo com a disponibilidade de vapor no gerador de vapor. Vale ressaltar que, além dos parâmetros descritos anteriormente, foram registrados o consumo de biomassa e o resíduo da queima na forma de cinzas por meio de uma balança.

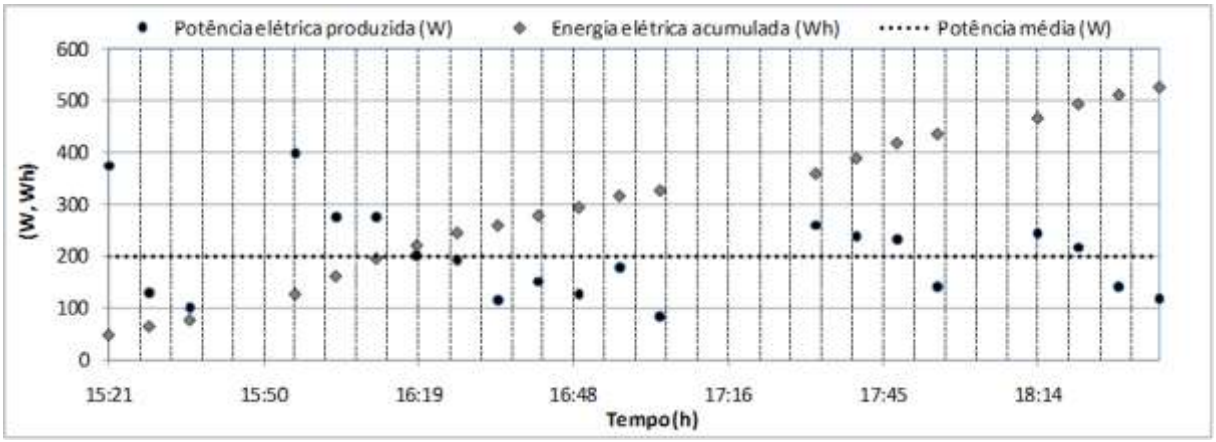
8.4 Resultados Experimentais

A seguir serão mostrados os resultados experimentais obtidos com o protótipo, demonstrando que para o sistema operar satisfatoriamente bem no atendimento de sítios isolados da rede elétrica convencional e com custos reduzidos, melhorias significativas devem ser introduzidas no sistema, principalmente no que diz respeito a eficiência da microturbina.

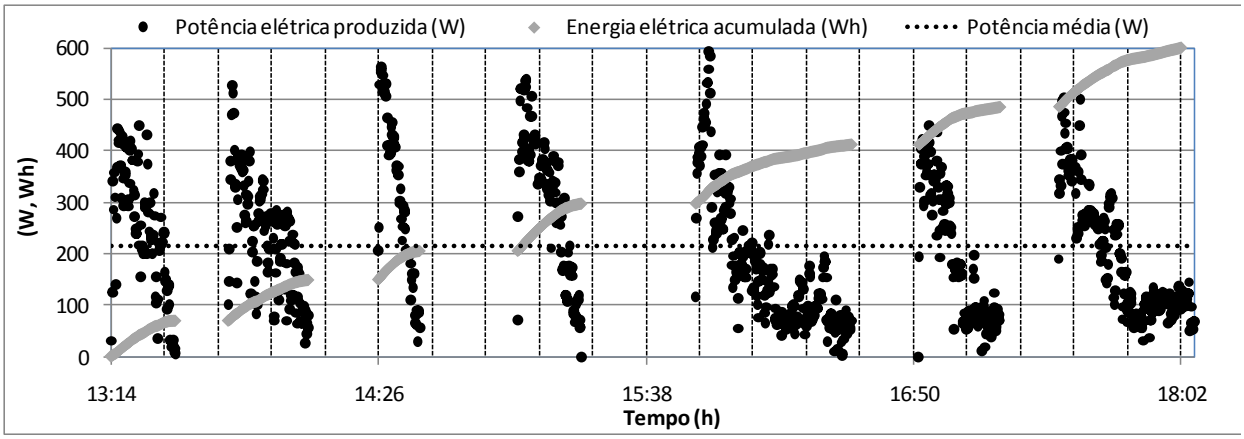
As experimentações com o protótipo ocorreram ao longo dos anos de 2010 e 2011. Durante o ano de 2010 foram realizados vários testes preliminares, onde a potência máxima atingida foi de apenas 50 W elétrico. Estes resultados preliminares possibilitaram a identificação problemas nas configurações tanto do mecanismo de injeção de vapor na microturbina quanto na própria microturbina, permitindo o aperfeiçoamento desses dois componentes do sistema. Os resultados mostrados a seguir, referem-se ao sistema com as melhorias mencionadas há pouco.

8.4.1 Resultados Experimentais 1

Os resultados experimentais foram obtidos com base em informações coletadas em dois dias de testes. No primeiro os dados eram armazenados na forma de médias em intervalos de 7 minutos. Já no segundo, com o objetivo de obter informações operacionais um pouco mais detalhadas, os dados eram armazenados na forma de médias em intervalos de 10 segundos. A Figura 8.14 a Figura 8.16 resumem as variações dos parâmetros coletados ao longo dos respectivos tempos de duração dos testes, de onde é possível visualizar uma grande instabilidade operacional do sistema. Ë possível observar nos resultados que existem intervalos onde não há coleta de dados, que correspondem a intervalos em que a válvula de admissão de vapor da microturbina era totalmente fechada, com o intuito de recuperar a pressão da caldeira que diminuía significativamente, impossibilitando a operação com produção de energia elétrica.

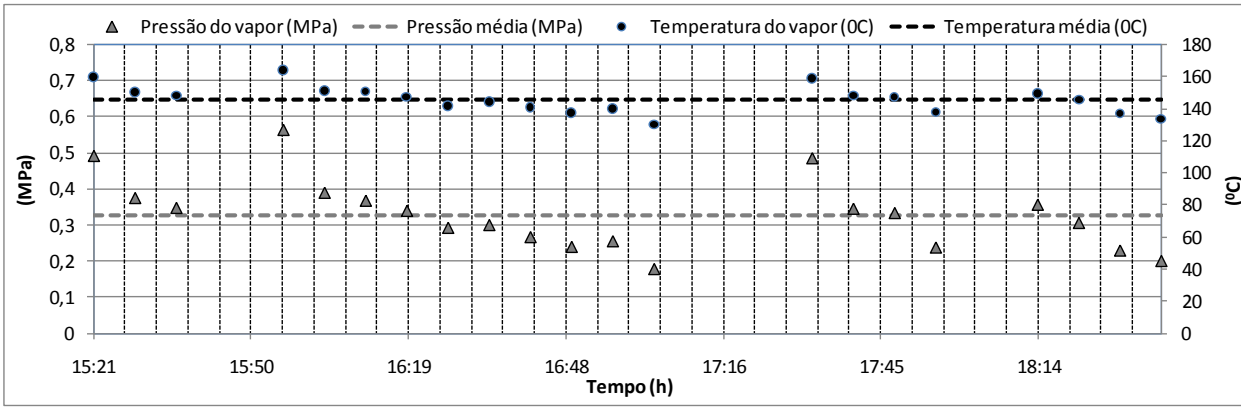


(a)

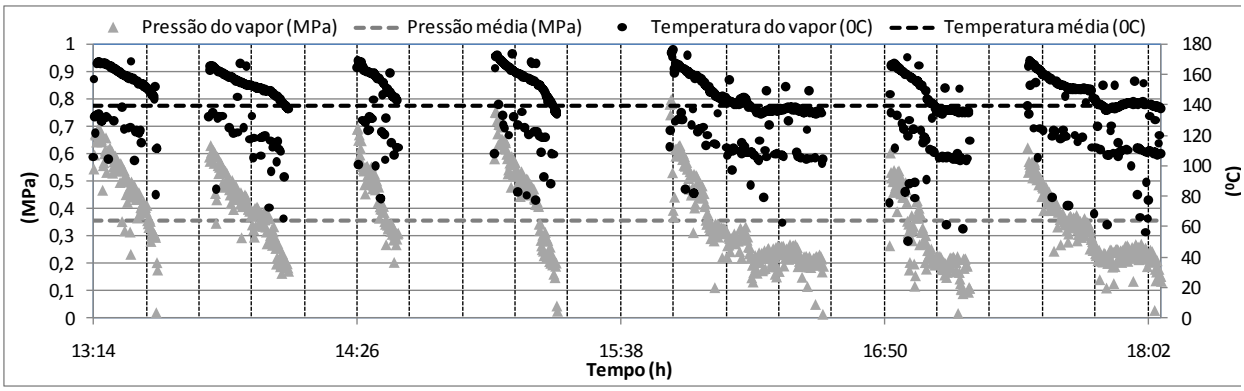


(b)

Figura 8.14 - Variação da potência gerada e da energia acumulada ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minuto; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundo.

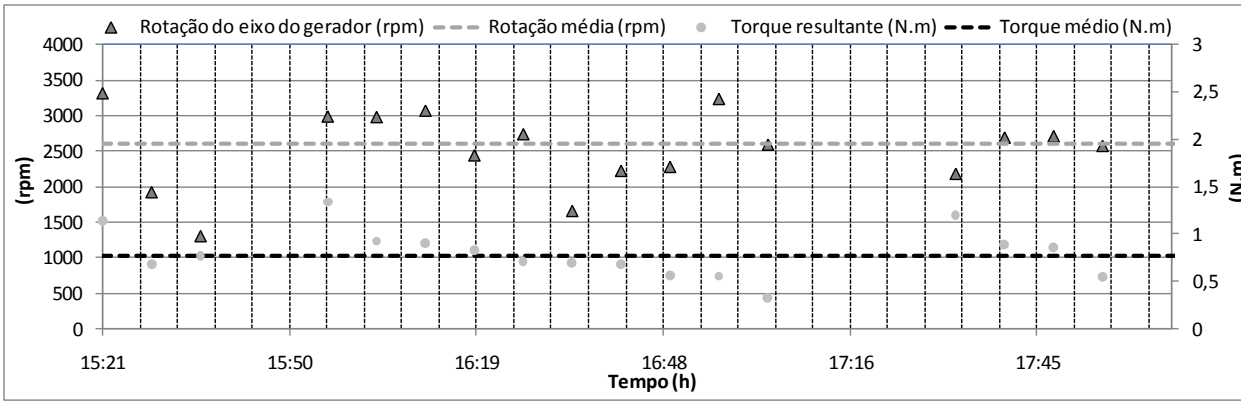


(a)

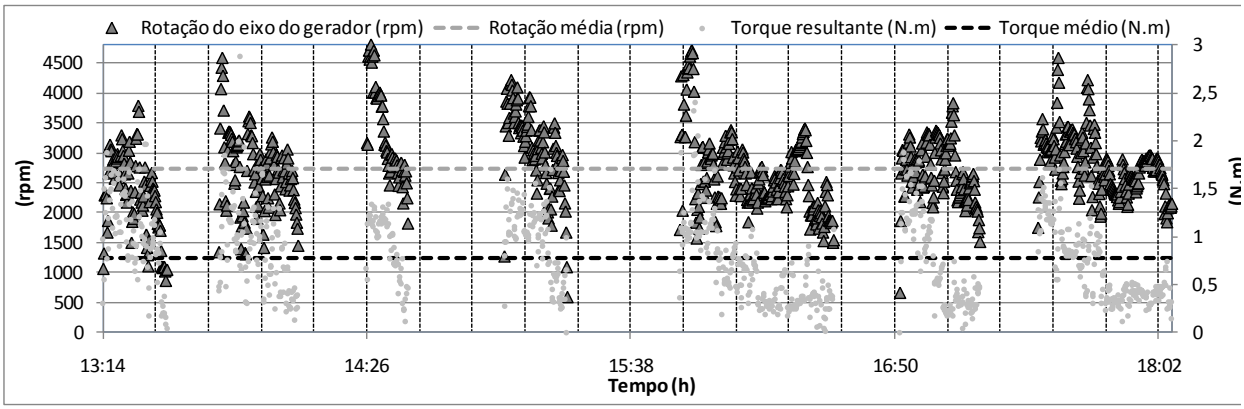


(b)

Figura 8.15 - Variação da pressão e temperatura do vapor de entrada na microturbina ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minuto; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundo



(a)



(b)

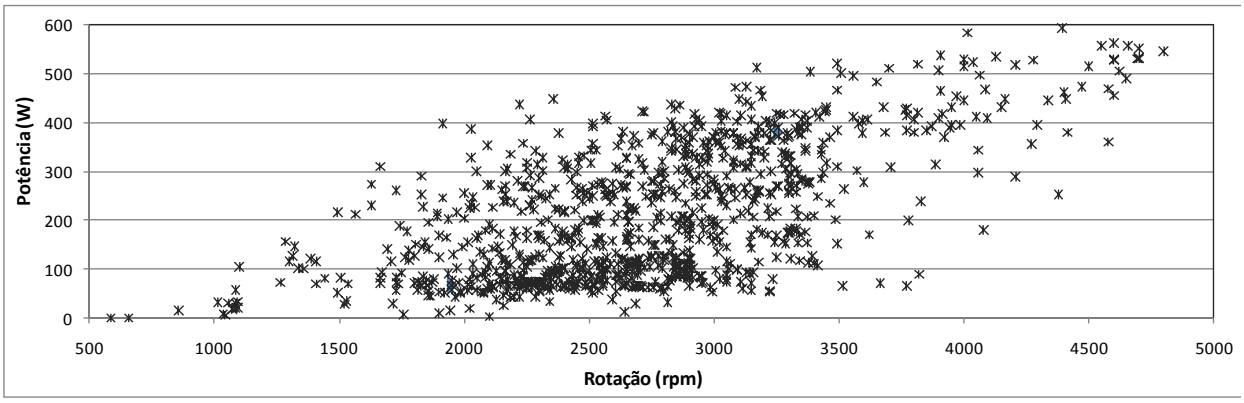
Figura 8.16 - Variação da rotação e do torque resultante no eixo da microturbina ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minuto; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundo

Nota-se que apesar dos valores médios de potência elétrica, registrados em intervalos de 10 minutos, não ultrapassarem os 400 W, como mostrado na Figura 8.14(a), valores médios em intervalos de 10 segundos, indicam potências instantâneas de até 600 W, tal como ilustra a Figura 8.14(b). Em ambos os casos uma potência média de aproximadamente 200 W foi constatada em ambos os testes, valor este utilizado nos cálculos e simulações mostradas mais adiante.

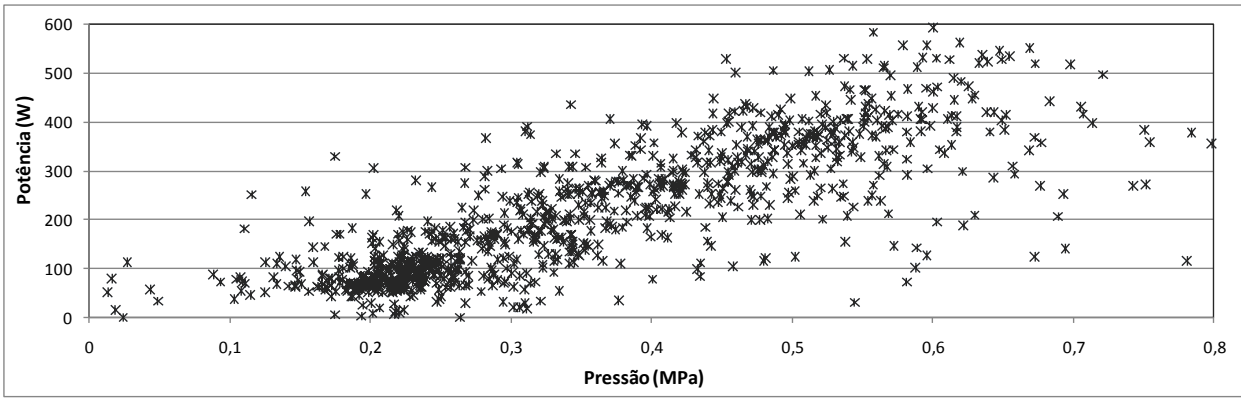
Na Figura 8.15 podem ser observadas as variações de temperatura e pressão de saída de vapor da caldeira, possibilitando identificar os momentos em que a pressão cai significativamente. Este fato implicava no estrangulamento total de válvula, interrompendo completamente o fluxo de vapor, com o objetivo de aumentar a pressão da caldeira para uma operação mais adequada com produção de energia elétrica.

Na Figura 8.16 é possível observar o comportamento da rotação do gerador ao longo dos intervalos de duração dos ensaios realizados, bem como o torque

resultante, estimado com base numa suposta eficiência média de conversão para o gerador elétrico de 95 %. Nota-se que o sistema opera com um baixo torque, em média 0,75 N.m, sendo capaz de fornecer, por um curto intervalo de tempo, um torque máximo 3 N.m quando operando com potência elétrica próximo aos 500 W. Outro aspecto importante constatado durante a parte experimental desta pesquisa foi a elevada rotação exigida pelo gerador empregado, onde valores superiores a 3.250 RPM eram necessários para obter-se a uma potência elétrica em torno dos 500 W. A Figura 8.17 mostra a variação da potência elétrica gerada em função da rotação, Figura 8.17(a), e da pressão de saída do vapor, Figura 8.17(b).



(a)



(b)

Figura 8.17 - Variação Comportamento da rotação da microturbina ao longo do tempo de duração dos testes: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 10 minutos; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundos

Vale ressaltar que a potência mecânica no eixo do gerador é dada pelo produto entre o torque resultante e a velocidade angular. Isso significa dizer que um gerador com características de operação de baixa rotação e torque mais elevado, pode ser mais conveniente de ser utilizado do que o gerador testado. As Tabela 8.1

e Tabela 8.2 resumem as informações pertinentes aos testes realizados nos dias 24 de novembro de 2010 e 17 de janeiro de 2011.

Tabela 8.1 - Resumo das informações do dia 24.11.2010

Duração do teste (h)	3,4
Tempo sem funcionamento (h)	0,8
Tempo de funcionamento (h)	2,6
Pressão média do vapor gerado (MPa)	0,3
Temperatura média do vapor gerado (^{0}C)	146
Potência elétrica media gerada (W)	199
Energia elétrica produzida (Wh)	525
Biomassa total (kg)	204
Inércia térmica (kg)	60
Cinza (kg)	6,1
Queima (kg)	138
Consumo biomassa (kg/h)	53
Umidade da biomassa (%)	35
Consumo Real (kg/h)	34,5
Vapor gerado (kg/h)	138
Consumo específico da caldeira (kg vap/kg comb)	4
Consumo específico da turbina (kg/kWh)	693
Consumo específico de combustível (kg/kWh)	173

Tabela 8.2 - Resumo das informações do dia 17.01.2011

Duração do teste (h)	4,4
Tempo sem funcionamento (h)	2,1
Tempo de funcionamento (h)	2,8
Pressão média do vapor gerado (MPa)	0,3
Temperatura média do vapor gerado (0C)	140
Potência elétrica media gerada (W)	214
Energia elétrica produzida (Wh)	606
Biomassa total (kg)	235
Inércia térmica (kg)	60
Cinza (kg)	7
Queima (kg)	168
Consumo biomassa (kg/h)	59
Umidade da biomassa (%)	35
Consumo Real (kg/h)	39
Vapor gerado (kg/h)	155
Consumo específico da caldeira (kg vap/kg comb)	4,00
Consumo específico da turbina (kg/kWh)	721
Consumo específico de combustível (kg/kWh)	180

De maneira análoga a Tabela 8.2, na Tabela 8.1 consta: o tempo de duração do teste (3,4 h); o tempo que o sistema ficou parado sem produzir eletricidade (0,8 h); o tempo que o sistema operou produzindo eletricidade (2,6 h); pressão média do vapor na saída do gerador de vapor (0,3 MPa), que pode ser considerado aproximadamente a pressão de entrada do vapor na turbina; temperatura média do vapor gerado (146 0C); a potência elétrica média de operação (199 W); a energia elétrica produzida durante o teste (525 Wh); total de biomassa consumida durante o teste (204 kg); a biomassa demandada durante a primeira fornada, necessária para vencer a inércia térmica (60 kg); cinza obtida da pesagem da biomassa após a queima (6 kg); total de biomassa queimado (138 kg), obtido da diferença entre o total inicialmente pesado (204 kg) e a quantidade necessária para vencer a inércia térmica mais as cinzas (60+6 kg); o consumo de biomassa por hora (53 kg/h), obtido da relação entre a biomassa queimada (138 kg) e o tempo de funcionamento do sistema produzindo eletricidade (2,6 h); o consumo real de biomassa (34 kg/h), obtido do consumo anteriormente mencionado (53 kg/h) menos o teor de umidade da biomassa utilizada (35 %); o vapor produzido (138 kg/h), calculado a partir das informações contidas na tabela 26;consumo específico da caldeira (4,00 kg vap/kg comb), obtido da razão entre a quantidade de vapor gerado (138 kg/h) e o consumo real de biomassa (34 kg/h); consumo específico da turbina (693 kg/kWh), obtido da relação entre a quantidade de vapor gerado (138 kg/h) e a potência média em kW (0,2 kW); e o consumo específico de combustível (173 kg/kWh), obtido da relação entre o consumo real de combustível (34 kg/h) e a potência média de operação do sistema em kW (0,2 kW).

Estes resultados conduzem para uma operação com valores médios de energia elétrica produzida, potência elétrica e pressão iguais a 565 Wh, 207 W e 0,34 MPa, respectivamente. Constata-se também, em ambos os testes realizados, um elevado consumo específico da microturbina, resultando em um valor médio de 706 kg de vapor por kWh produzido. A Figura 8.18 mostra os valores de consumo específico para turbinas de 50 kWe, 5 kWe e para a microturbina testada, considerando como potência nominal para esta ultima, o valor médio de potência de operação obtido nos testes (207 W). É esperado que a curva de tendência para o consumo específico de vapor por kWe gerado seja a mostrada na Figura 8.18.

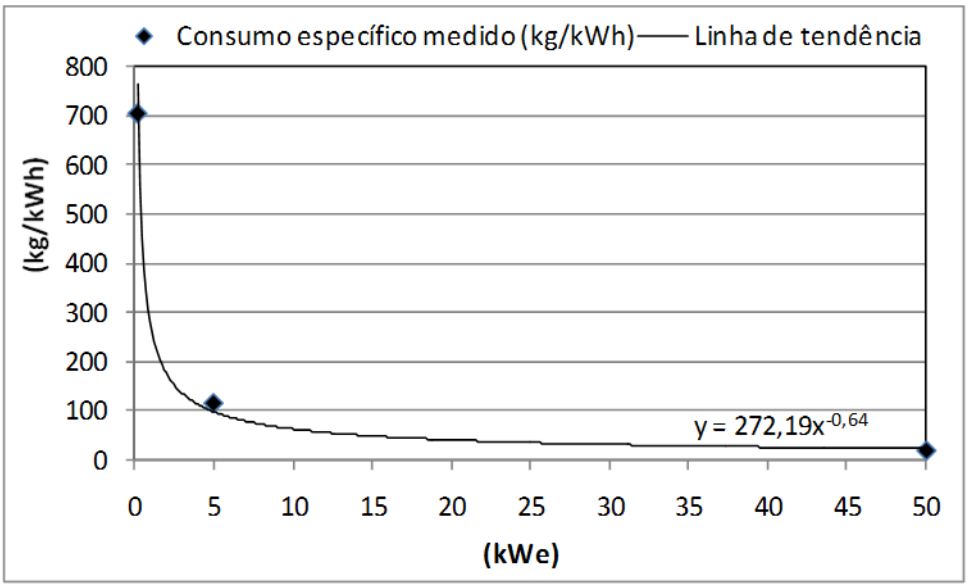


Figura 8.18 - Curva de Consumo Específico da Turbina extrapolada para até 50 kW

Além dos valores pontuais de consumo especifico, a Figura 8.18 mostra a curva de tendência resultante da interpolação desses valores, bem como a equação representativa que relaciona a potência elétrica com o consumo específico da turbina. Observa-se que a escala do micro sistema proposto nesta pesquisa encontra-se exatamente na região da curva de tendência de consumo específico na qual a variação é muito intensa, o que significa dizer que pequenas melhorias no sistema, podem proporcionar reduções significativas no consumo específico. Por exemplo, considerando-se que o sistema seja otimizado de modo que uma operação do sistema com uma potência elétrica média de 500 W seja possível. De acordo com a equação contida na Figura 8.18, obtêm-se uma redução do consumo específico da microturbina para 424 kg de vapor por kWh produzido, ou seja, uma redução de aproximadamente 40 %.

8.4.2 Resultados Experimentais 2

Nesta etapa utilizou-se um gerador de ímãs permanente de 1000 W que opera com rotação mais baixa que o anteriormente testado. Após ter realizado o experimento constatou-se uma operação com uma potência média mais baixa,

porém com um aumento muito grande da estabilidade do sistema. Outro aspecto importante que foi observado diz respeito ao aumento da pressão média do vapor de saída da caldeira (0,39 MPa) e o aproveitamento do vapor na geração de eletricidade mesmo em valores relativamente baixos (entre 0,3 MPa e 0,17 MPa), fato que não era possível com o gerador elétrico utilizado nos testes anteriores.

A rotação média da microturbina ficou próximo de 1000 rpm, o que é menos da metade do valor de rotação requerido com o gerador anterior. Apesar do sistema não ter operado o suficiente para uma comparação, em termos de consumo específico, com sistema anterior, a constatação de uma operação dinâmica mais estável se tornou um ponto muito positivo desta etapa experimental e que merece ser destacado e apresentado neste tópico. A Figura 8.19 mostra os resultados obtidos nesta etapa do experimento.

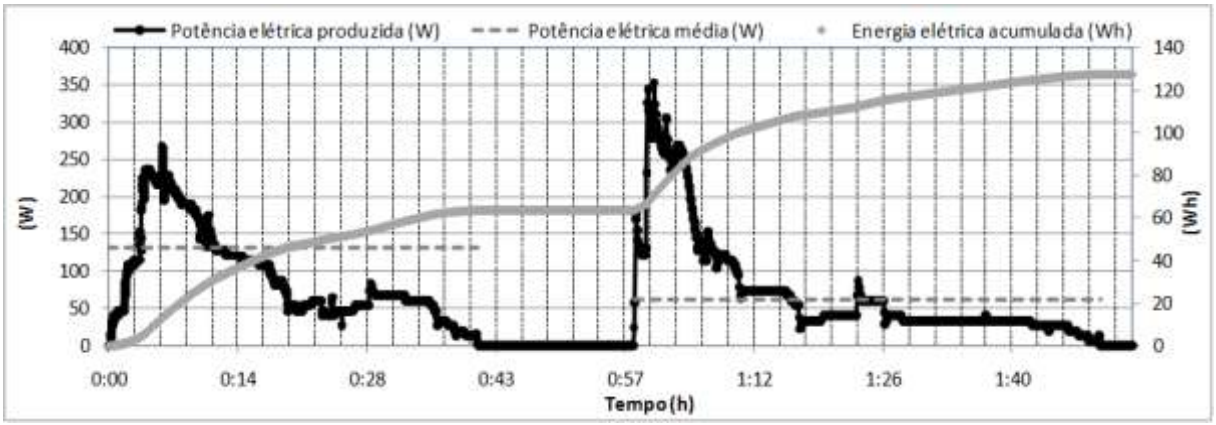
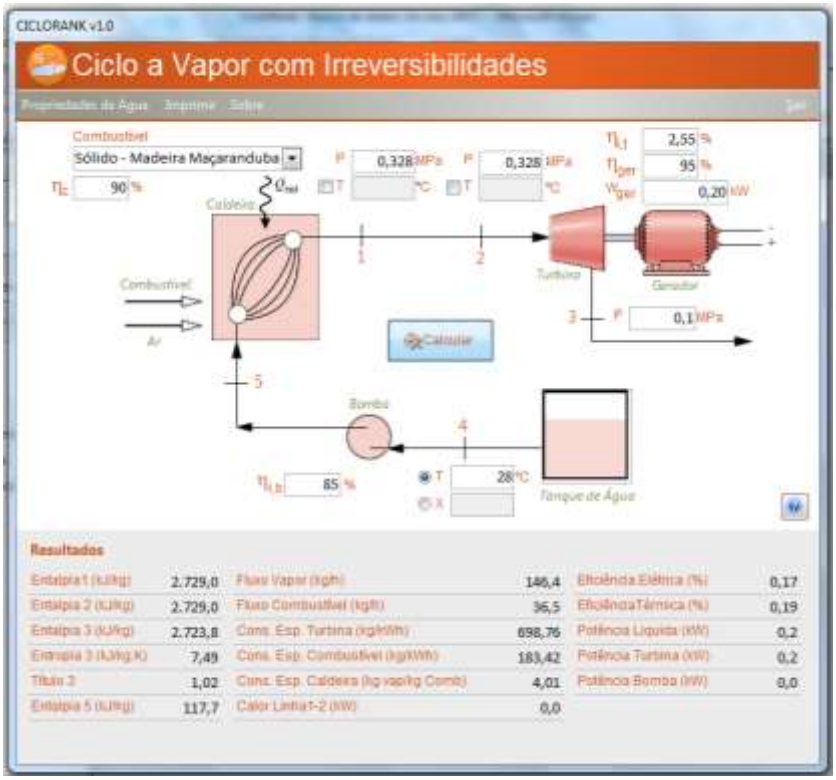


Figura 8.19 - Teste operacional com gerador de baixa rotação

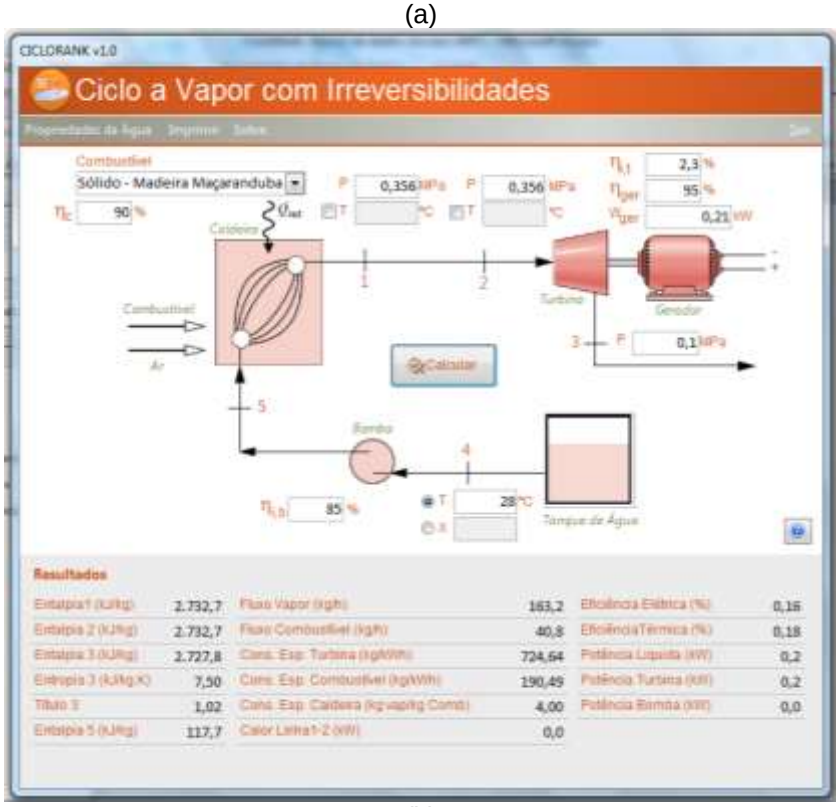
8.5 Simulação

Neste item são mostrados os resultados obtidos a partir de simulações utilizando-se o Software Ciclo Rankine, explanado anteriormente. Para tais simulações foram utilizadas algumas informações provenientes dos dados coletados durante a etapa experimental. As informações utilizadas são: pressão média de entrada de vapor da microturbina e potência elétrica média gerada referentes aos Resultados Experimentais 1. A Figura 8.20(a) e Figura 8.20(b) mostram os resultados obtidos considerando-se as eficiências médias de conversão da

microturbina de 2,55 % e 2,3 %, respectivamente aos testes realizados nos dias 24/11/2010 e 17/01/2011.



(a)

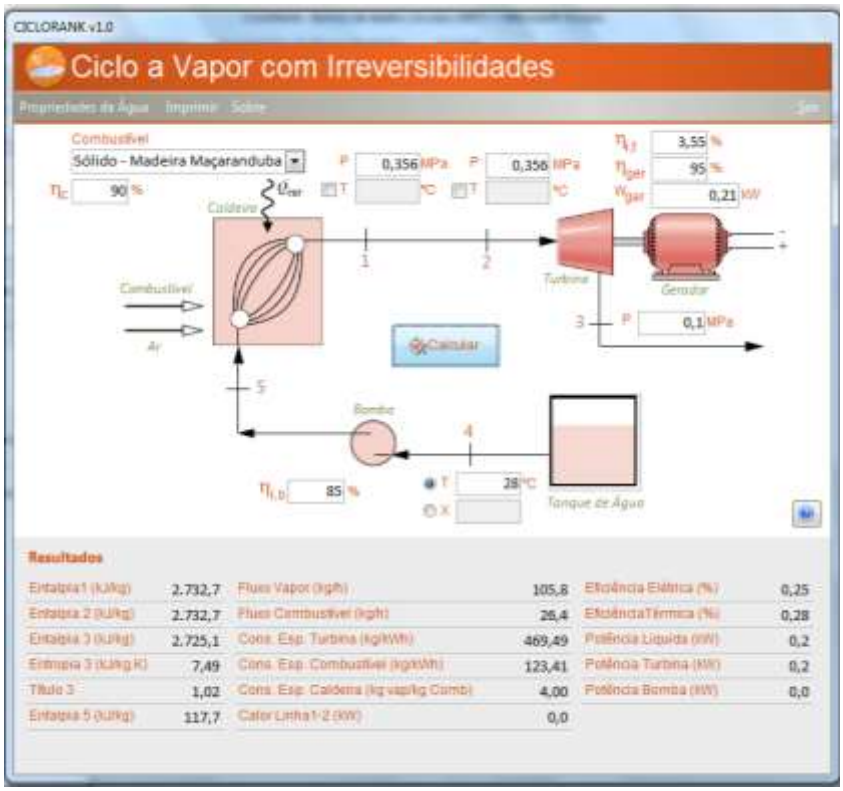


(b)

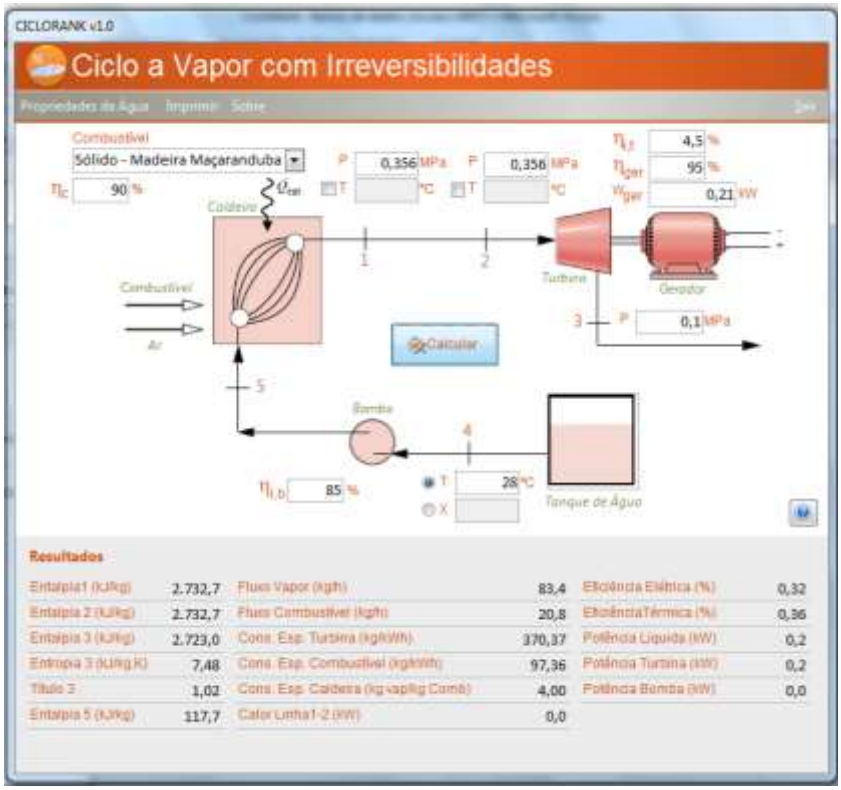
Figura 8.20 - Simulação numérica para os dados de entrada do: (a) Teste realizado no dia 24/11/2010 - médias de 7 minutos; (b) Teste realizado no dia 17/01/2011 - médias de 10 segundos

Nota-se que os valores obtidos pela simulação, Figura 105, estão próximos aos valores apresentados nas Tabela 8.1 e Tabela 8.2, confirmando elevado consumo específico da microturbina e consequentemente sua baixa eficiência de conversão, 2,425 % na média. A título de informação, resultados experimentais com uma microturbinas de 5 kW indicaram valores de eficiência da ordem de 6 % (RELATÓRIO CELPA, 2006).

A Figura 103 mostra duas simulações onde são consideradas melhorias na eficiência da microturbina para 3,55 %, Figura 8.21(a), e 4,5 %, Figura 8.21(b), com os mesmos dados de pressão média e potência elétrica média gerada obtidos no teste do dia 17 de janeiro de 2011. De acordo com essas simulações, reduções significativas nos consumos específicos podem ser atingidas somente com a melhoria da geometria das pás microturbina, sem contar com outras melhorias, tais como: distribuição e orientação mais adequada dos bicos de injeção de vapor e a utilização de um gerador elétrico mais adequado a aplicação



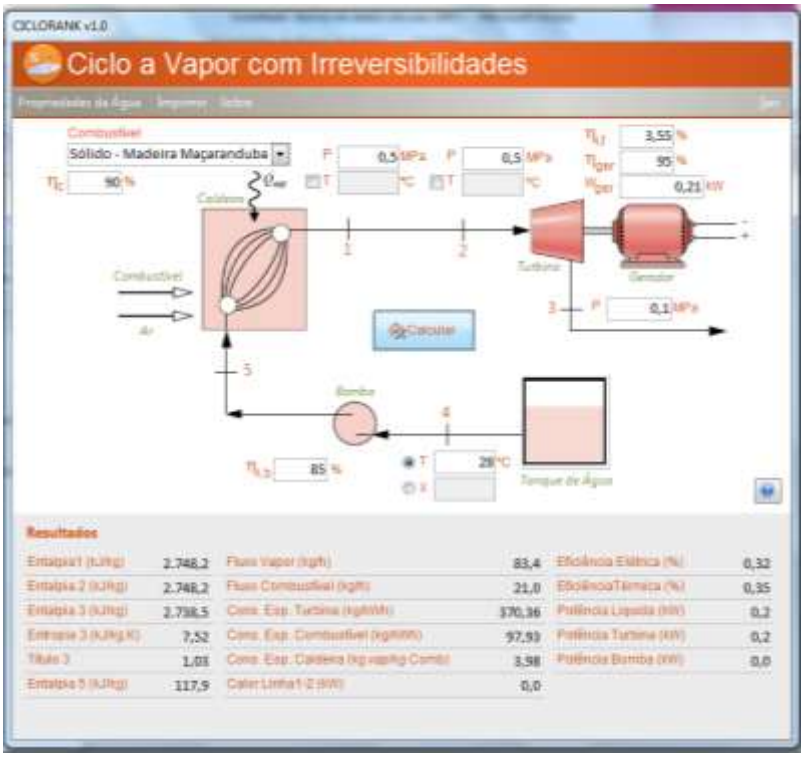
(a)



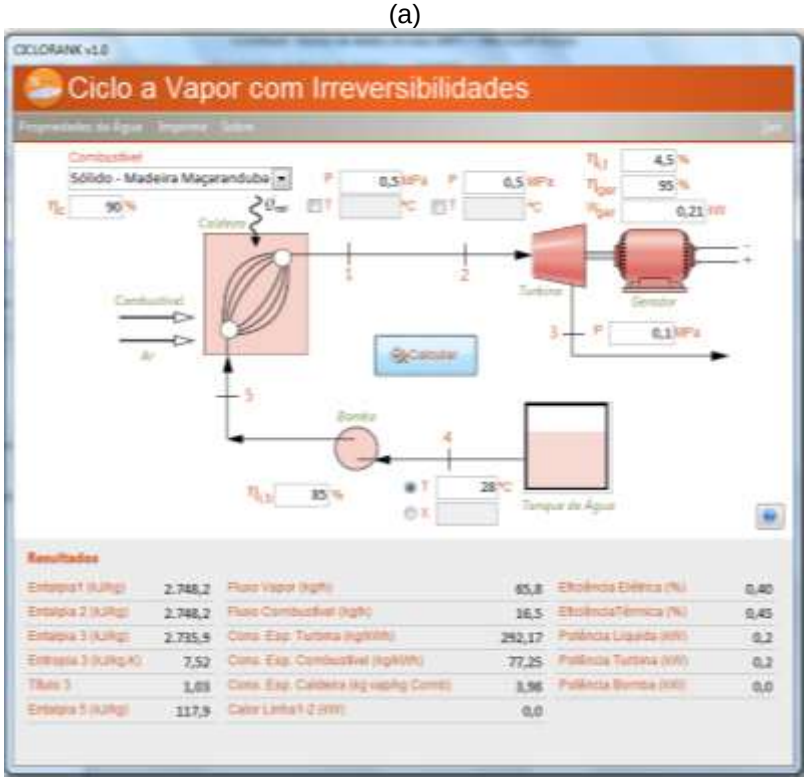
(b)

Figura 8.21 - Simulação numérica para os dados de entrada do: (a) Aumento de 1 % na eficiência da microturbina; (b) Aumento de 2 % na eficiência da microturbina.

Se a melhoria da microturbina, e o consequente aumento de eficiência suposto na simulação da Figura 8.22, vier acompanhado de uma operação com pressão média mais elevada, como por exemplo, 0,5 MPa, os resultados obtidos com a simulação indicam valores que podem perfeitamente viabilizar o uso desses sistemas para o atendimento de localidades isoladas na Amazônia. A Figura 8.22 mostra os resultados obtidos com essa nova hipótese, onde valores de consumo específico inferiores a 50% dos valores obtidos originalmente podem ser constatados.



(a)



(b)

Figura 8.22 - Simulação numérica para os dados de entrada do: (a) Aumento de 1 % na eficiência da microturbina; (b) Aumento de 2 % na eficiência da microturbina.

IX- CONCLUSÕES

Chegando ao fim deste trabalho, conclui-se que o uso da bioenergia não pode ser considerado como uma panaceia para todos os problemas energéticos. Ela deve ser considerada junto com outras opções considerando a sua combinação com outros fatores como: existência de fontes de matéria prima, empresas produtoras interessadas, padrões de consumo das comunidades que lhe sustente e características técnicas de produção, operação e manutenção e custo.

O estado do Pará sem dúvida é o grande celeiro de biomassa, que apesar de suas desvantagens como dispersão e baixa densidade, podem contribuir fortemente para mitigar os impactos ambientais e agregar maior oferta de energia, principalmente em locais afastados do setor elétrico a custos competitivos.

Dentre as tecnologias para geração de energia com uso da biomassa, o ciclo a vapor ainda é o mais indicado. Possui tecnologia madura, farta oferta de equipamentos nacionais em vários níveis de potências, possibilitando o atendimento pleno das indústrias regionais e de comunidades isoladas, desde haja um uso racional e sustentável da biomassa existente.

Os modelos de gestão aqui elencados quer sejam por cooperativas quer sejam por Organizações Não Governamentais- ONGs, ainda requerem um histórico de acompanhamento dos resultados mais consubstanciado para que se possa avaliar criteriosamente o melhor modelo de gerenciamento do sistema. A busca por novos modelos de gestão ainda é presente e crucial para consolidar de forma sustentável e economicamente viável o atendimento de comunidades isoladas do setor elétrico utilizando fontes renováveis de energia. Dentre os cases aqui elencados, ficou notório que só o domínio e a consolidação da tecnologia não é o bastante para o sucesso do atendimento com energia elétrica à comunidades isoladas do setor elétrico. Cabe, portanto, a implementação de um conjunto de ações transversais envolvendo o governo, a concessionária e a comunidade.

Para pequenas demandas de potência, indicada principalmente em unidades habitacionais isoladas, de uma a cinco residências, a micro UTE desenvolvida neste trabalho, atende a estas necessidades com custos de implantação e operação

bastante competitivos, quando comparada a geração de energia atual com diesel e até mesmo com outras fontes renováveis como: eólica e solar, abrindo uma oportunidade impar para diversificação da matriz energética destes casos.

Vale ressaltar que apesar da tecnologia de geração de energia a vapor estar consolidada, muita pesquisa e desenvolvimento caberão ainda ser realizado para melhoria da eficiência do ciclo, principalmente para baixas potências, onde o consumo específico de vapor ainda é o gargalo da tecnologia. Precisa então adequar formas geométricas das pás das turbinas aliadas ao melhor escoamento do vapor propiciando o melhor aproveitamento entálpico de forma a levar a concepção de máquinas menores e com consumo específico por quilowatt gerado menor ainda. Isto redundará em unidades ainda mais compactas, de menor custo de fabricação e operação com inúmeras aplicações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIE, AGÊNCIA **INTERNACIONAL DE ENERGIA, ENERGY TECHNOLOGY PERSPECTIVES**, 2006. Disponível em: < http://www.iea.org/techno/essentials3.pdf> Acesso em: 03/01/2011 às 10h15min.

ALANNE, K.;SAARI, A. ***Sustainable small-scale CHP technologies for buildings: the basis for multi-perspective decision-making***, Renewable Sustainable Energy Reviews nº 8, p. 4001–4031, 2004.

ANDRADE , J. C. Jr.; TEIXEIRA, P. L. ***Emissões em processos de combustão***. 1ª ed. Editora UNESP, 2003.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - http://www.aneel.gov.br. Acesso em 21.10.2009

ANEEL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.; **Atlas de energia elétrica do Brasil** In: Biomassa. 3. ed. Brasília, DF; editora da Aneel; 2008; Cap. 04; p.63-74

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - *NBR 6922:* ***Carvão vegetal– determinação da massa específica (densidade a granel)***,Out/1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - *NBR 6923:* ***Carvão vegetal– amostragem e preparação das amostras***, Out/1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – *NBR 8112:* ***Carvão vegetal – análise imediata***, Out/1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - *NBR 8633:* ***Carvão vegetal – determinação do poder calorífico***, Out/1984.

BEJAN, A. ***Advanced Engineering Thermodynamics***. New York: Wiley Interscience. 758 p. 1984.

BERNOTAT, K.;SANDBERG, T. ***Biomass fired small-scale chp in sweden and the baltic states: a case study on the potential of clustered dwellings***. Biomass Bioenergy nº 27, p. 521–530, 2004.

BRASCEP ENGENHARIA LTDA ***Biomassa Florestal (Madeira), Volume I: Caracterização e Potencial,*** 1987.

BRASIL. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel** - Programa (online). Disponível e: <http://www.biodiesel.gov.br/programa.html>. Acesso em 13.07.2009às 16h10min

BRIDGWATER, A.V.; 1995, **"The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation"**, Fuel, Vol 74, pp 631–653.

ÇENGEL, Y. A. e M. A. BOLES. ***Thermodynamics:*** *An Engineering* Approach. Boston: McGraw-Hill. 1998

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – Resolução CONAMA nº. 008/90 e 93.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S. e GOMEZ, E.O. ***Biomassa para Energia***.Editora UNICAMP. 2008.

DENNTICE D'ACCACIA, M.; SASSO, M.; SIBILIO, S.; VANOLI, L. ***Micro-combined heat and power in residential and light commercial applications***. Applied Thermal. Engineering, nº 23, p. 1247–1259, 2003.

DONG, L.; LIU, H.; RIFFAT, S. ***Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems – A literature review***. Applied Thermal Engineering nº 29, p. 2119–2126, 2009.

DRESCHER, U.; BRUGGEMANN D. ***Fluid selection for the Organic Rankine Cycle (ORC) in biomass power and heat plants***. Applied Thermal Engineering nº 27, p. 223–228, 2007.

DYNAMIS. **Mecânica Aplicada Ltda**. Vulcano. (online). Disponível em: <http://www.dynamismecanica.com.br/vulcano.php>. Acesso em 10.01.2009.

EBMA- Grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente da Universidade Federal do Pará. www.cultura.ufpa.br/ebma. Acesso em 12.01.2009.

EBMA, GRUPO DE PESQUISA E MEIO AMBIENTE. **"Estudo do Potencial de Biomassa Disponível no Estado do Pará para Geração de Energia Elétrica Utilizando os Resíduos da Indústria Madeireira, do Alumínio e Agroindústria"**, 2006

ELETROBRAS, Centrais Elétricas Brasileiras S.A. 2009. Disponível em http://www.eletrobras.com. Acesso em 12/01/2009

FENG, W., H. V. D. KOOI, *et al*. ***Biomass conversion in subcritical and supercritical water: driving force, phase equilibria, and thermodynamics analysis*.** Chemical Engineering Processing, v.43, n.12, 1 March, p.1459-1467. 2004.

FIGUEIREDO, Gilberto e VASCONCELOS, F.M. – **"Metodologia para Projeto e Análise de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Baixa Tensão e Avaliação de Desempenho de um Sistema de 1,575 kWp"**. Trabalho de Conclusão de Curso. UFPA/ITEC/FEE.2009

FIEPA – Federação **das Indústrias do Estado do Pará.** http://www.fiepa.org.br, acesso em 19/10/2010.

GEANEZI, H.; RODRIGUES, V.; CAMPOS, I.; DIOGO, A.; VALLE, R.; SODRÉ, J.; ***Desempenho e emissões na exaustão de um motor operando com biodiesel de soja e nabo forrageiro***; 11th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, ABCM, Curitiba, Brasil, Paper CIT06-0566, 2006.

GOLDEMBERG, J. e VILLANUEVA, L.D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. 2ª. Edição. Editora Universidade de São Paulo. 2003.

GOMIDE, R.***Estequiometria Industrial***. 3 ed. IPT. São Paulo, 1984.

HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. OVERVIEW OF BIOMASS ENERGY. IN: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; Rothman, H. **Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil**. London: Taylor & Francis, 2000. cap. 1

HAWKES, A.D.;LEACH, M.A. ***Cost-effective operating strategy for residential micro-combined heat and power*.** Energy nº 32, p. 711–723, 2007.

HUHN, K. ***Cogeneration in Europe – Heading for applications below 10 kW, cogeneration and ON-Site power production***. Applied Thermal Engineering, pp. 55–59, 2001.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; **Comunicado social de 19 de novembro de 2009**.

IMAZON Manual de Operação do Sisflora – **Sistema de Cadastro**, Comercialização e Transporte de Produtos Florestais, Junho de 2009.

KALLIGEROS, S.; ZANNIKOS, F.; STOURNAS, S.; LOIS, E.; ANASTOPOULOS, G.; TEAS, C.; SAKELLAROPOULOS, F.; ***An investigation of using biodiesel/marine diesel blends on the performance of a stationary diesel engine***; Biomass and Bioenergy Vol.24 pp.141-149, Greece 2002.

KEENAN, J. H.; KEYES, F. G.; HILL, P. G. E MOORE, J. G.: *"**Steam Tables"*;** John Wiley & Sons Inc.; 1969.

KNOEF, H.A.M. ***Handbook**: Biomass Gasification*. Biomass Technology Group, The Netherlands, 2005.

KOTAS, T. J. ***The Exergy Method of Thermal Power Plants***. London: Butterworths. 327 p. 1985.

KWAK, H. Y., D. J. KIM, *et al*. ***Exergetic and thermoeconomic analyses of power plants*.** ENERGY, v.28, n.4, p.343-360. 2001.

LEUNG, D.Y.C.; LUO, Y.; CHAN, T.L.; ***Optimization of Exhaust Emissions of a Diesel Engine Fuelled with Biodiesel*;** Energy & Fuels Vol.20 pp. 1015-1023, Seul

2006. MIR, Publishers Moscow. Fundamentals of Heat engineering. 1ª ed. pp.24-36. 1987.

LORA, E.S., ANDRADE, R.V., **Biomass as energy source in Brazil, Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Volume 13, Issue 4, May 2009, Pages 777-788, ISSN 1364-0321, DOI: 10.1016/j.rser.2007.12.004.

MME, **Ministério de Minas e Energia** - disponível em www.mme.gov.br. Acesso em 21.10.2009 às 18h40min.

MONNYEM, A.; VAN GERPEN, J.; ***The effect of biodiesel oxidation on engine performance and emissions*****;** Biomass and Bioenergy Vol.20 pp. 317-325, 2001

MORAN, M. J. & SHAPIRO, H. N.: ***"Fundamentals of Engineering Thermodynamics"***; Jhon Wiley & Sons Inc, 1999.

MORAN, M. J. e H. N. SHAPIRO. ***Princípios de Termodinâmica para Engenharia***. Rio de Janeiro: LTC. 681 p. 2002.

NOGUEIRA, L. A. H. e LORA, E. E. S. ***Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações***, 2a Edição, Rio de Janeiro, 2003.

NOGUEIRA, M. F. M ; RENDEIRO, G.; COUTINHO, H. W. M. ; FEITOSA NETTO, G. B . ***Caracterização Energética de Biomassas Amazônicas***. In: IV Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM, 2006, Recife, 2006.

NOGUEIRA, M. F. M, RENDEIRO, G.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. de A.; GUERRA, D. R. da S.; DUARTE, A. A. A. M. ; MACEDO, E. N.. ***Manual de Elaboração de Projetos para Comunidades Isoladas da Amazônia: centrais termoelétricas a biomassa combustão e gasificação***. Brasília: Ministério de Minas e Energia. v. 1. 76 p. 2008.

NOGUEIRA, M. F. M.;OLIVEIRA, A. G. de P.; RENDEIRO, G. ; COUTINHO, H. W. M.; FEITOSA NETTO, G. B. ***Caracterização da Biomassa para Utilização de***

Energia no Estado do Pará. In: 6o Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, Campinas, 2006.

NOGUEIRA, M. F.M.; RENDEIRO, G.; BRASIL, A. C. M.; CRUZ, D. O. de A. ; GUERRA, D. R. da S.; MACEDO, E. N.; Ichihara, J. A. ***Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida***. 1. ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia. v. 1. 190 p. 2008.

OBERNGERGER, I. ***Biomass CHP Plant Based on an ORC Process – Realized EU Demonstration Project in Admont/Austria***. Meeting of IEA Bioenergy, TASK 19 ‘‘Biomass Combustion”, 6–8th December, 2000.

PAEPA, M.D.;HERDT, P.D.;MERTENS, D. ***Micro-CHP systems for residential applications*.** Energy. Conversion and Management, nº 47, p. 3435–3446, 2006.

PINHEIRO, G.; RENDEIRO, G.; PINHO J. ***Resíduos do Setor Madeireiro****: Aproveitamento Energético*. Biomassa & Energia, v. 1, n. 2, p. 199-208, 2004.

PORTELA, Alessandra das Graças; CORREIA, Bruna Carla Iacabo. **Células a Combustível**, Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo - EEL USP, Departamento de Engenharia de Materiais. Lorena, São Paulo 2009, pp 23

REIS, L.B. ***Geração de Energia Elétrica****:* Tecnologia, Inserção Ambiental, Planejamento, Operação e Análise de Viabilidade. 3 edição. Manole. 2003.

Relatório Final do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento - P&D, “Análise da Eficiência de uma Planta Piloto de Geração de Energia Elétrica Utilizando Biomassa”. Grupo de Energia, Biomassa & Meio Ambiente da Universidade Federal do Pará e Centrais Elétricas do Pará S.A. Belém, Junho de 2006.

RENDEIRO, G. ***Técnicas de Medidas em Termociências***. UFPA/ITEC/FEM/EBMA. 2007.

RENDEIRO, G; MACEDO, E.N.;PINHEIRO, G; PINHO, J.T. – **Analysis on the Feasibility of Biomass Power Plants Adding to the Electric Power System -**

Economic, Regulatory and Market Aspects - State of Pará, Brazil. Renewable Energy. P. 1678-1684. 2011

REYNOLDS, W. C.: ***"Thermodynamic Properties in SI*** *– Graphs, Tables and Computation Equations for 40 Substances"*; Department of Mechanical Engineering; Stanford University; Stanford – CA; 1979.

SALES, C. A. V. B. **"Avaliação Técnico Econômica da Conversão da Biomassa em Eletricidade Utilizando Tecnologias de Gaseificação"**. Dissertação de Mestrado. PPEE. UFI. 2007.

SANTOS, Fernando António C. Mamede dos; SANTOS, Fernando Miguel S. Mamede dos, **Células de Combustível**, Millenium - Revista do ISPV - n.º 29 - Junho de 2004, pp 146 -156

SIFRECA - Sistema de Informação de Fretes, http://sifreca.esalq.usp.br, Acesso em: 30/06/2010

SONTAG, R. E., C. BORGNAKKE, et al. ***Computer-Aided Thermodynamic Tables****:* John Wiley & Sons 1996.

TOLMASQUIM, M.T. ***Fontes Renováveis de Energia no Brasil***. Interciência-CENERGIA, 2003.

USHIMA, A. H., ***Geração de Energia Elétrica Distribuída a Partir de Gasificação de Biomassa***, 3º Simpósio Internacional da VDI sobre Energia, VDI, Associação Técnica Brasil-Alemanha, São Paulo, 2003.

VAN WYLEN, G. J. & SONNTAG, R. E. : *"**Fundamentos da Termodinâmica Clássica**"*; Edgard Blucher, 2010.

YOU ZHANPING; YOU SHIJUN; LI XIANLI; HAO CHANGSHENG,: "**Biogas power plants waste heat utilization researches**," Power Electronics and Motion Control Conference, 2009.

IPEMC '09. **IEEE 6th International** , vol., no., pp.2478-2481, 17-20 May 2009 doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157820

ZHONG, C., C. J. PETERS, et al. ***Thermodynamic modeling of biomass conversion processes. Fluid Phase Equilibria***, v.194, n.197, p.805-815. 2002.

ANEXOS

Anexo I – Software Banco Madeireiras (CD)

Anexo II – Software Ciclo Rankine (CD)

Anexo III – Trabalhos Publicados

Anexo IV – Procedimentos Operacionais da Micro UTE

Procedimentos Operacionais

Procedimento Operacional da Caldeira

Para elevar a pressão da Caldeira ao valor máximo permito por aquecimento proceder da seguinte maneira:

- ☑ Verificar se o deposito de água (tanque de condensado), está cheio e pronto para operação;
- ☑ Certificar-se dos seguintes pontos:
  a) Válvula de descarga dos visores prova e limpeza dos eletrodos, fechadas;
  b) Válvula geral de entrada d'água no sistema de alimentação da Caldeira via injetor d'água, aberta até encher a Caldeira; sendo posteriormente fechada até atingir o nível máximo.
  c) Torneira de prova C_1 e C_2, abertas (C_1 e C_2 correspondem às torneiras, inferior e superior da coluna de nível utilizadas para o teste do alarme e teste dos eletrodos nº1 e nº 2).
  d) Válvula de bloqueio dos controles (manômetro), aberta.

- ☑ Verificar o nível de água no visor, se este não estiver visível drenar a coluna para determinar se o nível é baixo ou alto;
  Nessas condições, observar se não aparecer bolhas de água no visor. Isto ocorrendo é porque existe ar dentro da coluna de nível; acionar a torneira de prova para retirada de ar.
- ☑ A coluna e o Indicador de Nível estando limpos, proceder:
  a) Se o nível indicado for baixo, deixar que o injetor opere ate que atinja o nível de operação;
  b) Se o nível indicado for alto, operar a descarga de fundo ate que este chegue ao normal;

- ☑ Preparar uma fogueira no início da grelha de tal forma que a ignição seja rápida. Porem, não utilizar combustível líquido, cujo emprego é vedado pelo código ASME, permite-se o uso de palha, lenha fina, papel, papelão, restos de pano, estopa, etc, para dar início ao fogo.
- ☑ Verificar a presença suficiente de combustível sólido;
- ☑ Após o fogo já estiver desenvolvido regular a entrada de ar. Através das venezianas da porta do cinzeiro;
- ☑ A Caldeira atingirá a pressão de trabalho com o tempo e com abastecimento de combustível na quantidade adequada.