

Tecnologias de Energias Renováveis

Soluções Energéticas para a Amazônia

Eduardo José Fagundes Barreto
(Coordenador)

João Tavares Pinho / Geraldo Lúcio Tiago
Filho / Gonçalo Rendeiro / Manoel
Nogueira / Wilma de Araújo Gonzalez



Eduardo José Fagundes Barreto
João Tavares Pinho
Geraldo Lúcio Tiago
Gonçalo Rendeiro
Manoel Nogueira
Wilma de Araújo Gonzalez

TECNOLOGIAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS **Soluções Energéticas para a Amazônia**

Sistemas Híbridos
Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos
Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida
Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura

1ª Edição
Brasília
Ministério de Minas e Energia
2008

Ministro de Minas e Energia

Edison Lobão

Secretário Executivo

Márcio Zimmermann

Secretário de Energia

Josias Matos de Araújo

Diretor do Programa Luz para Todos

Hélio Morito Shinoda

Diretor Nacional do Projeto PNUD BRA 99/011

Programa de Erradicação da Exclusão da Energia Elétrica

Jeová Silva Andrade

Coordenador da Região Norte

Aurélio Pavão de Farias

Coordenador de Universalização

Manoel Soares Dutra Neto

Coordenação Técnica

Eduardo José Fagundes Barreto

Assessoria de Comunicação do Programa Luz para Todos

Lucia Mitico Seo

Jose Renato Penna Esteves

Unidade e Gestão de Projetos – Projeto PNUD BRA 99/011

Antonio João da Silva – Coordenador Técnico

Eder Júlio Ferreira

Manoel Antonio do Prado

Novembro, 2008

TECNOLOGIAS DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Soluções Energéticas para a Amazônia

Coordenador Geral:

Eduardo José Fagundes Barreto

Autores:

Eduardo José Fagundes Barreto

João Tavares Pinho

Geraldo Lúcio Tiago

Gonçalo Rendeiro

Manoel Nogueira

Wilma de Araújo Gonzalez



Ideorama Design e Comunicação Ltda.
www.ideorama.com.br

Projeto Gráfico e Diagramação

Sílvio Spannenberg
Aline Weirich de Paula
Carolina Farion
Gustavo Aguiar

Capa

Sílvio Spannenberg

Revisão de Textos

Alexandre Gonçalves
Bárbara Fernandes

Produção Gráfica

Rafael Milani Medeiros

Dados internacionais de catalogação na publicação

Bibliotecária responsável: Mara Rejane Vicente Teixeira

Tecnologias de energias renováveis : sistemas híbridos, pequenos aproveitamentos hidroelétricos, combustão e gasificação de biomassa sólida, biodiesel e óleo vegetal in natura / Eduardo José Fagundes Barreto ... [et al.].

Brasília : Ministério de Minas e Energia, 2008.

156 p. : il. ; 21 × 30cm. – (Soluções energéticas para a Amazônia)

ISBN 978-85-98341-06-4

Inclui bibliografia.

1. Energia – Fontes alternativas – Brasil. 2. Recursos energéticos – Brasil.
I. Barreto, Eduardo José Fagundes. II. Brasil. Ministério das Minas e Energia. III. Série.

CDD (22ª ed.) 333.79

Sumário

Apresentação	9
Prefácio	11
1 Sistemas Híbridos	16
Conceitos Básicos.....	17
Energia Solar Fotovoltaica	18
Energia Eólica	23
Grupos Geradores.....	25
Sistema de Armazenamento	26
Sistema de Condicionamento de Potência	28
Sistemas Híbridos	29
Projeto de Sistemas Híbridos.....	31
Instalação de Sistemas Híbridos	32
Operação e Manutenção de Sistemas Híbridos.....	33
Segurança em Sistemas Híbridos	33
Análise Econômica Aplicada a Sistemas Híbridos.....	34
Sistemas Instalados e Experiências Adquiridas na Amazônia	35
Modelos de Gestão e Regulação.....	37
2 Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos	40
Introdução	41
Distribuição da população na Amazônia Legal	41
O atendimento de eletricidade às comunidades isoladas.....	42
O atendimento às comunidades isoladas	43
As μ CH e mCH	49
O estado da arte das μ CH e mCH	50
Turbinas Hidráulicas	50
Turbinas Convencionais.....	52
Turbinas não convencionais.....	53
Geradores	57
Reguladores de Velocidade e Sistemas de Controle e Automação	58
Barragens	59
Barragens móveis.....	60
Alguns projetos de μ CH desenvolvidos na região amazônica	62
Projeto μ CH Canaã	62

Projeto Cachoeira do Aruã	64
Projeto μ CH Novo Plano.....	65
Projeto μ CH Jatoarana.....	66
Modelos de gestão para unidades de geração em comunidades isoladas.....	67
Comentários finais	68
Agradecimentos	69

3 Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida	70
Caracterização da Geração na Amazônia	71
Princípios para Uso de Biomassa como Combustível	72
Conversão Energética da Biomassa.....	72
Reagentes com misturas ricas e pobres – Razão de Equivalência	74
Calor de Reação e Poder Calorífico	74
Combustão dos Líquidos e Sólidos	75
Caracterização da Biomassa para Fins Energéticos.....	76
Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) e Análise Elementar	76
Análise Imediata, Teor de Voláteis, Umidade, Carbono Fixo, Cinza; Descrição dos Métodos	77
Caracterização Energética de Algumas Espécies Amazônicas	77
Pré-tratamento da biomassa.....	78
Secagem	78
Torrefação de Biomassa.....	78
Briquetes.....	78
Péletes.....	79
Trituração	79
Processos de Conversão Energética da Biomassa	79
Ciclos a Vapor	79
Consumo de Biomassa de uma Planta a Vapor.....	80
Central com Gasificação	81
Características da Biomassa para Uso num Gasificador de Extração por Baixo (Downdraft)	81
Sistema de Limpeza	82
Especificação de uma Planta de Potência.....	82
Localização e Quantificação da Biomassa.....	82
Dimensionamento da Carga a Ser Atendida pela Planta	83
Curva de Carga.....	84
Procedimento de Cálculo de Carga	84
Pré-dimensionamento de uma central a vapor	84
Impactos Ambientais e Formas de Mitigação.....	85
Métodos e Modelos para Avaliação dos Impactos Ambientais.....	85
Avaliação dos Impactos de uma Usina Termoelétrica a Biomassa	86
Impacto no Ciclo de Carbono – Emissões Evitadas.....	86
Viabilidade Econômica	86
Os Métodos.....	87

Conclusão sobre a viabilidade Econômica do Projeto.....	89
Métodos Determinísticos	87
Métodos não Determinísticos	88
Resultados Concretos.....	89
Centrais Térmicas a Vapor	89
Concepção do Projeto	90
Gestão	91
Localização do Projeto Marajó.....	89
Centrais Térmicas a Gasificação	91
Localização do Projeto Genipaúba	91
Resultados.....	92
Sustentabilidade.....	91
Computacional.....	94
Software CicloRank v1.0	94
Software ComGás v1.0	94
4 Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura.....	96
Alternativas Renováveis de Energia a Partir da Biomassa: Soluções Energéticas para a Amazônia.....	97
Biodiesel no Brasil	100
IME: Pesquisas de Ponta na Área de Produção de Biocombustíveis	104
Prospecção de Processos	105
Análise do óleo vegetal	106
Pré-tratamento do óleo	107
Degomagem e neutralização do óleo vegetal bruto com fluxo de ar	108
Acidez do óleo de dendê.....	108
Produção de biodiesel	110
Reação de transesterificação – rota etílica – Catálise Homogênea	110
Escala Bancada	110
Lavagem	112
Secagem do biodiesel.....	112
Reação de transesterificação – rota etílica – Catálise Heterogênea.....	112
Escala Bancada	112
Reação de transesterificação – Aumento de escala	113
Usina piloto de biodiesel	114
Óleo Vegetal in Natura em Motores de Combustão Interna	116
Introdução	116
Uso de Óleo Vegetal <i>in Natura</i> em Motores	117
Propriedades Físico-Químicas dos Óleos Vegetais que Influenciam o Funcionamento dos Motores Diesel.....	118
Propriedades que Influenciam a Quantidade de Energia Gerada	119
Kit de Conversão.....	120
Motor Elsbett	120
Motores com pré-câmara de combustão.....	120

Desempenho do Grupo Gerador MWM D225-4 e Multi Fuel 4RTA-G da MAS com óleo de dendê <i>in natura</i>	121
Motor Veicular – Cristalização do óleo de dendê <i>in natura</i>	122
Uso do óleo de dendê refinado – oleína	123
Desempenho do Grupo Gerador MWM D229-6 com óleo de dendê <i>in natura</i>	123
Experiências de Eletrificação Rural Utilizando Óleo Vegetal como Combustível – Projetos implantados na Amazônia.....	123
Conclusão	124

Referências Bibliográficas.....	126
Sistemas Híbridos	126
Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos.....	135
Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida	139
Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura	141

Apresentação

O Programa Luz para Todos, maior programa de eletrificação rural já feito no Brasil, já realizou, desde a sua criação em novembro de 2003, até outubro de 2008, mais de um milhão e oitocentas mil ligações domiciliares em todo o País, correspondendo a mais de nove milhões de beneficiados na zona rural brasileira. Essas ligações foram realizadas essencialmente por extensão de rede convencional.

Na Região Amazônica, as longas distâncias, os obstáculos naturais, as dificuldades de acesso e a baixa densidade populacional dificultam o atendimento de grande parte da população pelo sistema convencional de distribuição. Por outro lado, o atendimento alternativo, com sistemas térmicos a diesel, muito utilizados na Região, apresenta custos elevados associados à operação e manutenção e à logística de distribuição do combustível.

Para vencer as dificuldades de eletrificar as comunidades rurais isoladas da Amazônia, o Ministério de Minas e Energia – MME promoveu, no âmbito do Programa Luz para Todos, com o apoio de recursos financeiros não reembolsáveis do Fundo Multilateral de Investimentos do Banco Interamericano de Desenvolvimento – FUMIN/BID, uma série de atividades destinadas ao desenvolvimento e implantação de projetos de geração de energia elétrica de pequeno porte e a capacitação de profissionais, principalmente das concessionárias da Região, para a implantação de soluções energéticas alternativas a partir de fontes renováveis de energia.

Entre essas atividades se destaca a produção da presente coleção, denominada *Soluções Energéticas para a Amazônia*, constituída de 5 volumes, que abordam as seguintes tecnologias de geração de energia renovável: i) *Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos*; ii) *Sistemas Híbridos*; iii) *Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura*; iv) *Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida*; v) uma versão resumida de todas as tecnologias descritas anteriormente, intitulada *Tecnologias de Energias Renováveis*.

O uso dessas tecnologias a partir de recursos locais disponíveis na Amazônia, principalmente a biomassa e os pequenos aproveitamentos hidroelétricos, tem sido pouco considerado por um conjunto de questões relacionadas à cultura das concessionárias, sedimentada na extensão de rede elétrica, ou à falta de informação quanto à viabilidade técnica e econômica das tecnologias relacionadas a esses potenciais. As iniciativas para viabilizar o uso dessas alternativas, no horizonte de médio e longo prazos, requerem ações imediatas.

Entretanto, soluções energéticas alternativas para a Amazônia devem ser buscadas, não para substituir o atendimento convencional, mas principalmente como complemento, pelo menos até o tempo em que a maturidade tecnológica se revele para as concessionárias da Região. Além da energia, essa geração apresenta grandes perspectivas para a renda local, com o aproveitamento de recursos da região, a fim de diversificar a matriz energética e também reduzir os custos de transporte de combustíveis.

Soluções energéticas estruturadas a partir da disponibilidade local de energia primária podem

ser uma alternativa viável e sustentável para eletrificar essas áreas. Para isso, este Ministério tem trabalhado em diversas frentes, desde a realização de projetos-piloto com tecnologias renováveis para o atendimento de comunidades da Região Amazônica, até a realização de cursos de capacitação em tecnologias renováveis, apropriadas para a Região, para as concessionárias e outros interessados.

Assim, essa iniciativa do MME, de difundir o conhecimento sobre tecnologias de geração de energia alternativas para atendimento de comunidades isoladas, busca construir o alargamento de opções para o futuro, prestigiando o conhecimento das opções locais. É outro enfoque, complementar às soluções concretas posta em marcha pelo Programa LUZ para TODOS – LpT.

Ministério de Minas e Energia

Prefácio

A Amazônia é um desafio desde que foi descoberta pela civilização européia. Primeiramente sob o domínio da coroa espanhola, assenhoreada de quase toda *Hylea* pelo Tratado de Tordesilhas, foi conquistada, ao longo dos séculos XVI a XVIII, em mais uma das memoráveis epopéias portuguesas. Fato registrado, sob protesto, pelo padre jesuíta Samuel Fritz, alemão, missionário da Igreja espanhola na América, que em sua saga pelo Amazonas, desde a província de Quito a Belém do Pará, buscou proteger as missões espanholas que se estendiam até as barras do Rio Negro. Reclamou os direitos da igreja e coroa espanhola junto ao governador do Maranhão e Grão-Pará, contra os excessos dos portugueses, “que como verdaderos piratas de los rios que pertencian ao domínio de Castilha, llevábán cautivos y hacian esclavos á cuantos índios encontraban...”¹. Em sua viagem cartografou o grande rio e seus tributários, mapa de grande valor, primeiramente reproduzido pelos ingleses².

Paul Marcoy³, viajante francês, em famoso périplo pelo Amazonas em meados do século XIX, ao dar com a aparência triste e desolada das cidades ribeirinhas abandonadas, e com o impacto do colonizador sobre o nativo e a natureza, opina que as conquistas portuguesas e espanholas lançaram nos países subjugados e nos seus povoados os germes da destruição e não as sementes da vida. Mais, nas suas palavras: que “a regeneração desse belo país é tarefa acima das suas forças e que um futuro virá na forma de uma migração européia, abundante de gênio e vigor natural”.

Esqueceu-se Marcoy que Espanha e Portugal são parte do gênio e vigor natural do Velho Continente?

Euclides da Cunha viajou pelo Purus e outros rios importantes da planície Amazônia; legou-nos brilhantes relatos⁴ do que viu e do que sentiu. Contradizendo Marcoy, desfia vigorosa e poética narrativa sobre a migração nordestina para os confins do Acre, designando-a como uma seleção natural invertida, na qual todos os fracos, todos os inúteis, todos os doentes e todos os sacrificados, eram expedidos a esmo, como o rebotalho das gentes, impelidos pelas grandes secas de 1879–1880, 1889–1890, 1900–1901, para ocupar a vastíssima, despovoada, quase ignota Amazônia, o que equivalia a expatriá-los dentro da própria pátria. A intervenção governamental se resumia à tarefa expurgatória para livrar os grandes centros urbanos. Segundo ele, “os banidos levavam a missão dolorosíssima e única de desaparecerem. E não desapareceram. Ao contrário, em menos

¹ **O diário do Padre Samuel Fritz**, organizado por Renan Freitas Pinto. Editora da Universidade do Amazonas. Manaus, 2006

² A frota espanhola que, entre outras coisas, levava o mapa para a Espanha, foi atacada e aprisionada por navios ingleses em 1708. Rodolfo Garcia. Introdução. **O diário do Padre Samuel Fritz**, organizado por Renan Freitas Pinto. Editora da Universidade do Amazonas. Manaus, 2006

³ **Viagem pelo Rio Amazonas**. Editora da Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2006.

⁴ *Um Clima Caluniado*, in **Amazônia – Um Paraíso Perdido**. Editora Valer Universidade Federal do Amazonas. Manaus, 2003.

de trinta anos, o Estado que era uma vaga expressão geográfica, um deserto empantanado, a estirar-se, sem lindes, para sudoeste, definiu-se de chofre, avantajando-se aos primeiros pontos do nosso desenvolvimento econômico.”

Fazendo coro a Euclides da Cunha podemos então dizer que conquistamos a Amazônia, e da forma mais surpreendentemente possível, talvez sem precedentes na história da humanidade. Demos seguimento à saga portuguesa.

Desses tempos para cá muitas coisas aconteceram e muitos conhecimentos foram aos poucos revelados: a importância da floresta para o equilíbrio climático do planeta hoje é incontestável; a riqueza dos produtos da floresta abre um sem-número de oportunidades; inegável o valor ecológico e econômico da *Hylea*, que desperta cobiças globais.

A planície amazônica – toda a bacia do Solimões com seus mais importantes afluentes Purus, Javari, Juruá, e parte do Amazonas com seus tributários – permanece ainda pouco tocada, com exceção das grandes cidades, principalmente Manaus. A expansão do capitalismo para a fronteira amazônica transfigurou a região, hoje conhecida como o Arco do Desmatamento. Revelam-se, portanto, duas Amazônias: de um lado, a urbana, igual a qualquer grande centro do Sul-Sudeste, e a rural do capital, produtora de excedentes; de outro lado, a rural, tradicional, de subsistência, oriunda daquela ocupação relatada por Euclides da Cunha, ainda detentora de conhecimentos herdados dos nativos, isolada da civilização e ainda teimosamente sobrevivente. É sobre esses últimos que devemos voltar nossos esforços. A Amazônia que nos espera, portanto, é talvez mais complexa. Nossa missão é preservá-la, explorando-a com toda a inteligência legada pela civilização. A primeira tarefa é oferecer dignidade àqueles que a dominaram: minimizar seus sofrimentos e assegurar uma vida com o melhor da civilização: educação e saúde públicas de boa qualidade. A eletrificação dessas comunidades rurais isoladas é fundamental para trazer suas populações para a contemporaneidade do mundo, e esse é o papel desempenhado pelo Programa Luz para Todos.

Nesse ponto devemos admitir que toda nossa rica cultura de prestação de serviços de energia, baseada na extensão da rede convencional do sistema interligado e todas as regras impostas pela legislação para garantir a qualidade do serviço e o equilíbrio econômico financeiro da concessão, podem não servir para a Amazônia isolada.

De igual modo, o atendimento convencional realizado com sistemas térmicos a diesel não é conveniente, seja pela sinalização dada de contradizer, em plena Amazônia, a consciência universal de restrição ao uso de combustíveis fósseis, seja pela cristalização de interesses, cada vez mais difíceis de serem demovidos. Sem mencionar os custos econômicos e os problemas logísticos dessa alternativa.

A imensidão do território e a sua descontinuidade imposta pelos rios, igapós, igarapés, florestas e outros acidentes geográficos e o tempo, que se conta em dias, não em horas, exigirá a quebra de paradigmas no setor elétrico: a descentralização do serviço. A grandeza do território deverá ser enfrentada de forma fragmentada, aproveitando as disponibilidades locais e diversificada de energéticos. A resposta mais adequada poderá ser o uso de tecnologias renováveis adaptáveis às condições locais: pequenos aproveitamentos hidroelétricos, energia solar, resíduos de biomassa sólida para caldeiras e turbinas a vapor, produção de óleo vegetal in natura, biodiesel e etanol para uso motores de combustão interna.

Todavia, a resposta tecnológica atende apenas a um lado do problema. O outro, bem mais complexo, se refere ao uso da energia e à gestão de cada unidade de geração descentralizada.

Novamente nos deparamos com a necessidade de um modelo que aparentemente contradita com o regime de concessão dos serviços públicos. Esta necessita de escala, simplicidade e uniformidade das suas operações, que são fundamentais para manter suas tarifas em um nível suportável pelos seus usuários.

Talvez a resposta para esse desafio possa ser encontrada num programa complementar de estímulo à cooperação nessas comunidades. Difícil, mas não impossível. O uso produtivo da energia poderá estar associado à formas de gestão que possa vir a facilitar o serviço da concessionária nessas áreas remotas. Apoiar vigorosamente o beneficiamento de espécies da Região que pode assentar firmemente o homem, principalmente os mais jovens, nas áreas rurais, ajudando a conter a migração para os grandes centros, talvez até mesmo inverter o processo migratório.

Contudo, todas essas conjecturas podem de nada valer se legítimos representantes dos amazônidas não participarem ativamente das soluções. Por certo, pesquisadores com muitos anos de serviço em campo, labutando com comunidades isoladas e com larga experiência em tecnologias alternativas, serão fundamentais para apontar as melhores soluções.

Por isso que o Ministério de Minas e Energia buscou a cooperação desses profissionais, com suas expertises, desde o Edital do CT-Energ, 2003, que objetivava identificar respostas tecnológicas aos desafios colocados. Posteriormente, parte dos projetos aprovados nesse Edital foi apoiada pelo Fundo Multilateral de Investimentos – FUMIN, da Cooperação Técnica ATN/MT 6697-BR, realizada entre o MME e o BID, para identificar modelos de gestão adequados e sustentáveis para os projetos.

Posteriormente, nasceu também no MME, em 2006, o Projeto *Soluções Energéticas para a Amazônia*, concebido no transcorrer da implantação dos projetos-pilotos aprovados no Edital do CT-Energ, 2003. A idéia consistia basicamente em usar recursos do Japan Special Fund – JSF da Cooperação Técnica ATN/JF-6630-BR, realizada entre o MME e o Banco Interamericano de Desenvolvimento – BID, para capacitar profissionais do setor elétrico, de universidades e de outras instituições relacionadas, para a elaboração e execução de projetos descentralizados com energias renováveis para atendimento de comunidades isoladas da Amazônia.

As tecnologias escolhidas foram aquelas que ofereciam condições para o atendimento desse objetivo, preferencialmente que devessem apresentar os seguintes atributos: *simplicidade, confiabilidade, robustez e baixo custo de manutenção e produção em escala*. As tecnologias foram: i) sistemas híbridos, com a combinação de energia eólica, solar fotovoltaica e grupo-gerador diesel; ii) pequenos aproveitamentos hidroelétricos com turbinas de baixa queda; iii) queima de resíduos de biomassa em caldeira/turbina a vapor e iv) produção e de biodiesel e de óleo vegetal in natura para uso em motores de combustão interna. Posteriormente, achamos por bem incluir gasificação de biomassa sólida, que se ainda não madura para geração de eletricidade, apresenta potencial para outros aproveitamentos, inclusive para produção de frio.

O Projeto *Soluções Energéticas para a Amazônia* foi executado, por meio de Cartas de Acordo com o MME, por professores/pesquisadores da Universidade Federal da Pará – UFPA; da Universidade Federal de Itajubá-Unifei; da Universidade Federal do Amazonas – UFAM, esta última tendo contado com a fundamental colaboração do Instituto Militar de Engenharia – IME. A escolha dessas instituições se deveu à experiência dos seus pesquisadores na implantação de projetos com energias renováveis no interior da Amazônia, inclusive no âmbito do Edital CT-Energ, 2003.

Os resultados desse projeto são conhecidos: realização de dois cursos de capacitação para cerca de 400 profissionais, um básico (40h), realizado simultaneamente nas nove capitais da

Amazônia Legal, e um avançado (160h), realizado nas universidades acima citadas. Esses treinamentos foram realizados entre novembro de 2007 e maio de 2008, ambos apoiados por manuais de elaboração de projetos nas tecnologias acima citadas, também preparados no âmbito dessa cooperação técnica.

O último produto dessa bem sucedida cooperação técnica é a presente coleção de livros “Soluções Energéticas para a Amazônia”, sendo que quatro deles representando um conjunto de tecnologias e um volume com a síntese das tecnologias apresentadas: i) Sistemas Híbridos; ii) Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos; iii) Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida; iv) Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura; e v) Tecnologias de Energias Renováveis. Espera-se que esses livros se constituam como referência para o setor elétrico, principalmente quando se for dada a necessária atenção ao atendimento de comunidades isoladas.

Para finalizar, gostaria de agradecer a todos aqueles que colaboraram ativamente com a execução desse projeto, primeiramente, os professores/pesquisadores que meteram a mão na massa, verdadeiros artífices: João Tavares Pinho, que coordenou o tema sistemas híbridos e Gonçalo Rendeiro e Manoel Nogueira que coordenaram combustão e gasificação de biomassa, e suas respectivas equipes, todos da UFPA; Geraldo Lúcio Tiago, da Unifei, que embora não sendo da Amazônia, juntamente com sua equipe desenvolveu alguns projetos bem sucedidos de pequenos aproveitamentos hidroelétricos na região e Antonio Cesar Pinho Brasil Jr. e Rudi Van Els, da UnB, que também contribuíram nessa área com seus conhecimentos em turbinas hidrocínéticas; José de Castro Correia, da UFAM, que com o providencial apoio da prof^a Wilma de Araújo Gonzalez e equipe, do IME, coordenaram o tema produção de biodiesel e de óleo vegetal in natura para uso em motores de combustão interna.

Ao professor Roberto Zilles, da USP, responsável por um dos mais bem sucedidos projetos do CT-Energ,2003, que aceitou fazer a revisão técnica do livro Sistemas Híbridos, trabalho que executou com entusiasmo desinteressado. E ao professor Gutemberg Pereira Dias, pela disposição em discutir todos os assuntos referentes às tecnologias em pauta, em especial o uso de biocombustíveis em motores de combustão interna; ele também procedeu a uma revisão técnica das publicações que trataram desse tema.

No MME esse projeto contou com o firme apoio de Antonio João da Silva, que, arrisco dizer, sem ele não teria sido possível. Esteve presente desde a concepção e acompanhou todo o processo de execução, sempre buscando apresentar as soluções quando o projeto encontrava dificuldades no seu cumprimento. Mobilizou toda a sua equipe para viabilizar o projeto: Eder Julio Ferreira e Manoel Antonio do Prado, sempre trabalhando com muita diligência, e a Manuela Ordine Lopes Homem Del Rey, Alessandro Ferreira Caldeira e Samuel da Silva Lemos, pela presteza e competência no apoio.

Devemos agradecimentos ainda a Armando Cardoso, Assiz Ramos e Roberto Flaviano Amaral, sempre muito solícitos para o atendimento de demandas do projeto, e a Marcelo Zonta, que na execução de uma das suas partes mais difíceis, a capacitação simultânea de 370 profissionais nas nove capitais da Amazônia, gentilmente cedeu parte da sua equipe, que acabou por contribuir de forma decisiva para o sucesso do evento: Carla Segui Scheer, que ajudou com muita eficiência a coordenação dos trabalhos, Aron Costa Falek, Elane da Cunha Muiz Caruso e Luis Henrique dos Santos Bello.

Ainda um agradecimento muito especial a Lucia Mitico Seo e José Renato Esteves Júnior, sempre dispostos a discutir assuntos do projeto, principalmente quando se tratava das propostas

de arte das publicações.

Por fim, sinceros agradecimentos a Dr. Helio Morito Shinoda, Diretor do Programa Luz para Todos, e demais integrantes da equipe.

No BID, os agradecimentos vão para Dr. Ismael Gílio, especialista setorial, que acreditou no projeto, apesar de todas as dificuldades por que passamos, e também à sua fiel escudeira, Marília Santos.

As opiniões constantes neste prefácio, bem como aquelas expressas nos livros desta coleção, são de exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Eduardo José Fagundes Barreto

Coordenador

1 Sistemas Híbridos

SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA A AMAZÔNIA

João Tavares Pinho (*Coordenador*)
Claudomiro Fábio Oliveira Barbosa
Edinaldo José da Silva Pereira
Hallan Max Silva Souza
João Tavares Pinho
Luis Carlos Macedo Blasques
Marcos André Barros Galhardo
Wilson Negrão Macêdo

CONCEITOS BÁSICOS

Sabe-se que a energia é um insumo fundamental para o desenvolvimento da sociedade. Atualmente, o homem está cada vez mais dependente de energia, pois com sua inteligência desenvolveu maneiras para acomodar suas necessidades e desejos, utilizando-se das mais variadas formas de energia para tal. O que nos primórdios da humanidade dependia quase que exclusivamente da força bruta do homem – caçar, plantar, colher, pescar, transportar construir – com o passar do tempo foi adequado ao uso de máquinas e serviços baseados na transformação da energia. Hoje, o homem caça usando armas diversas, planta e colhe com tratores, pesca com barcos velozes e multifuncionais, transporta e constrói com veículos e engrenagens movidas a energia. A dependência, portanto, da energia cresce em diversificação e em intensidade em todo o mundo.

O uso da energia deve, entretanto, ser atrelado ao tipo de recurso energético disponível, sua viabilidade técnica e econômica, além dos impactos ambientais associados ao seu aproveitamento. Qualquer que seja a tecnologia aplicada, em maior ou menor grau, produzirá algum tipo de rejeito ou impacto ambiental. Os efeitos nocivos ao meio ambiente e ao homem quase sempre não são contabilizados nas análises econômicas dos projetos de geração de energia. Durante muito tempo, a lógica foi produzir bens e atender necessidades sem dar importância à vida.

São diversos os tipos de recursos energéticos, todos eles direta ou indiretamente dependentes da fonte primária de energia da Terra – o Sol. Fontes de energia ditas renováveis, solar e eólica, por exemplo, ou não-renováveis como os combustíveis fósseis, podem e devem ser utilizadas de forma única ou combinada (sistemas híbridos) para melhorar a qualidade de vida do homem. A opção por qualquer alternativa, ainda que viável técnica e economicamente, passa pelo respeito ao meio ambiente, aos costumes e à cultura dos envolvidos. No Brasil, a maior parte da energia consumida é proveniente do petróleo e seus derivados, o que contribui para o aumento da poluição atmosférica e de doenças respiratórias, incremento do efeito estufa e dispêndio de divisas para aquisição do mesmo. A matriz energética brasileira também agrega um percentual importante associado à energia produzida em sua maior parte pelas grandes hidrelétricas e diversas termelétricas espalhadas pelo País. Este benefício, contudo, não atinge grande parte da população brasileira, especialmente no norte do País, onde as linhas de transmissão passam por sobre vilarejos sem expressão econômica, deixando seus moradores às escuras, desassistidos, sem perspectivas de crescimento como cidadãos.

Outras formas de energia abundantes no Brasil podem ser utilizadas para, pelo menos, mitigar o isolamento social e econômico de municípios e pequenos consumidores distantes da rede integrada nacional e não atendidos pelas concessionárias de energia elétrica. A energia de fontes solar, eólica, hídrica, térmica, biomassa e outras estão disponíveis no Brasil e precisam ter seu uso incentivado através de políticas públicas que fortaleçam seu desenvolvimento. Esperar que

apenas uma das fontes citadas resolva o problema de energia no País é irreal, porém o aproveitamento da disponibilidade local de cada uma delas pode trazer contribuição significativa à matriz energética brasileira. Esta já é uma realidade em países desenvolvidos, como Alemanha, Espanha, Estados Unidos, onde as fontes renováveis respondem por parcela considerável na produção de energia.

A produção e o uso de energia não podem deixar de lado, entretanto, os cuidados com as questões ambientais. Diversos fóruns internacionais têm discutido questões como o efeito estufa, destino de rejeitos radiativos, poluição de cursos d'água, degradação do solo pelo uso de agrotóxicos, aparecimento de novas doenças, destruição de florestas, etc. Estes problemas ainda hoje são de difícil quantificação, porém suas conseqüências danosas e, às vezes irreversíveis, precisam ser mais bem consideradas.

ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

O aproveitamento da energia solar para produção direta de eletricidade teve início há pouco mais de 160 anos quando, em 1839, o cientista francês Edmond Becquerel descobriu o efeito fotovoltaico, ao observar, em um experimento com uma célula eletrolítica (*dois eletrodos metálicos dispostos em uma solução condutora*), que a geração de eletricidade aumentava quando a célula era exposta à luz. A partir daí, foram estudados os comportamentos de diversos materiais expostos à luz até o ano de 1954, quando Daryl Chapin, Calvin Fuller e Gerald Pearson desenvolveram a primeira célula fotovoltaica (FV) de silício, com eficiência de 6%, capaz de converter energia solar em eletricidade suficiente para alimentar equipamentos elétricos. No ano de 1958, iniciou-se a utilização de células FV em aplicações espaciais e até hoje essa fonte é reconhecida como a mais adequada para essas aplicações.

Desde então, a evolução do mercado FV vem sendo bastante intensa, tornando comuns aplicações em sistemas domésticos, sinalização marítima, eletrificação de cercas e outros. Em 2004, foi finalizado o projeto do maior sistema FV do mundo, o parque solar da Bavária, Alemanha, de 10 MWp de potência instalada. Dentre os principais países produtores de células fotovoltaicas no mundo, destacam-se: Japão, Alemanha e Estados Unidos (EUA).

O Japão foi o líder na produção de células e módulos fotovoltaicos durante o ano de 2006, com cifras de 920 MW e 645 MW, respectivamente (figura 1.1). A produtora japonesa Sharp se mantém líder, com a produtora alemã Q-cells em segunda posição, seguida da Kyocera, Sanyo Electric e Mitsubishi Electric. Essas cinco companhias somaram 60% do total de produção de células em 2006. Apesar de o Japão ainda liderar a produção de células, é a Alemanha que lidera a demanda fotovoltaica, seguida do Japão e EUA. Essa demanda se deve basicamente à utilização de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica, que corresponde à principal aplicação de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos nos países desenvolvidos.

O aproveitamento solar fotovoltaico passa inicialmente pelo conhecimento dos fatores que influenciam na disponibilidade do recurso e na caracterização desse recurso. No dia-a-dia observa-se o movimento aparente do Sol numa direção que vai de leste a oeste, ou simplesmente o nascer e o pôr-do-sol. Notam-se também as variações que ocorrem na duração dos dias e das noites em diferentes épocas do ano em algumas regiões. Os movimentos que a Terra realiza são muitos; sendo os mais conhecidos o de rotação, que tem duração de aproximadamente um dia, e o de translação, que dura aproximadamente 365 dias (figuras 1.2 e 1.3). Dentre as

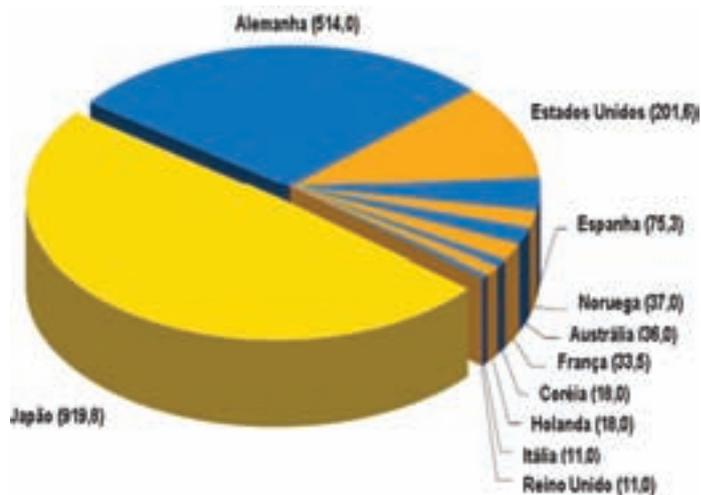


Figura 1.1 – Produção de células fotovoltaicas, em MW por país. [PHOTON INTERNATIONAL, 2007].

conseqüências diretas desses movimentos podem ser citadas as diferentes durações do dia e da noite em diferentes regiões do globo e as estações do ano: primavera, verão, outono e inverno. Outros fatores como as variações irregulares são determinantes na quantidade do recurso solar disponível de uma dada localidade.

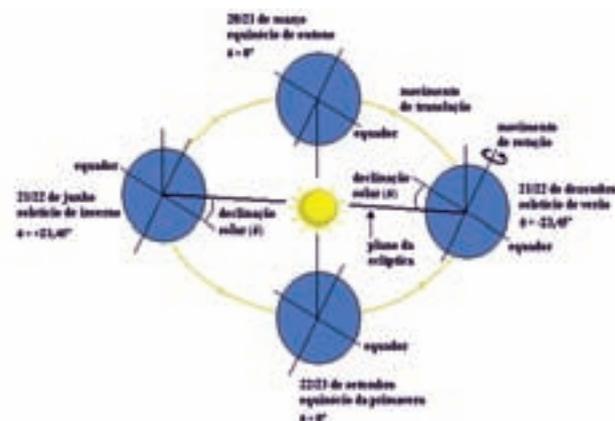


Figura 1.2 – Órbita da Terra em torno do Sol: posição da terra com relação ao sol nos solstícios e equinócios

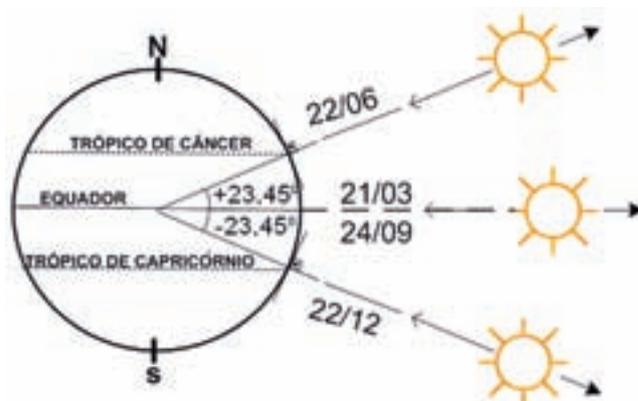


Figura 1.3 – A Terra e o Sol nas posições dos solstícios e dos equinócios

O efeito fotovoltaico é definido como a conversão direta de luz em eletricidade. Os seus fundamentos baseiam-se na teoria do diodo de junção pn , e os elementos que constituem o dispositivo conversor são chamados de fotoelementos.

Se uma junção pn for exposta a fótons com energia maior que a da banda proibida, ocorrerá a geração de pares elétron-lacuna. Se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, gerando assim uma corrente através da junção; esse deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial à qual chama-se de efeito fotovoltaico. Se as duas extremidades do “bloco” de silício forem conectadas a um circuito externo, haverá uma circulação de elétrons (figura 1.4).

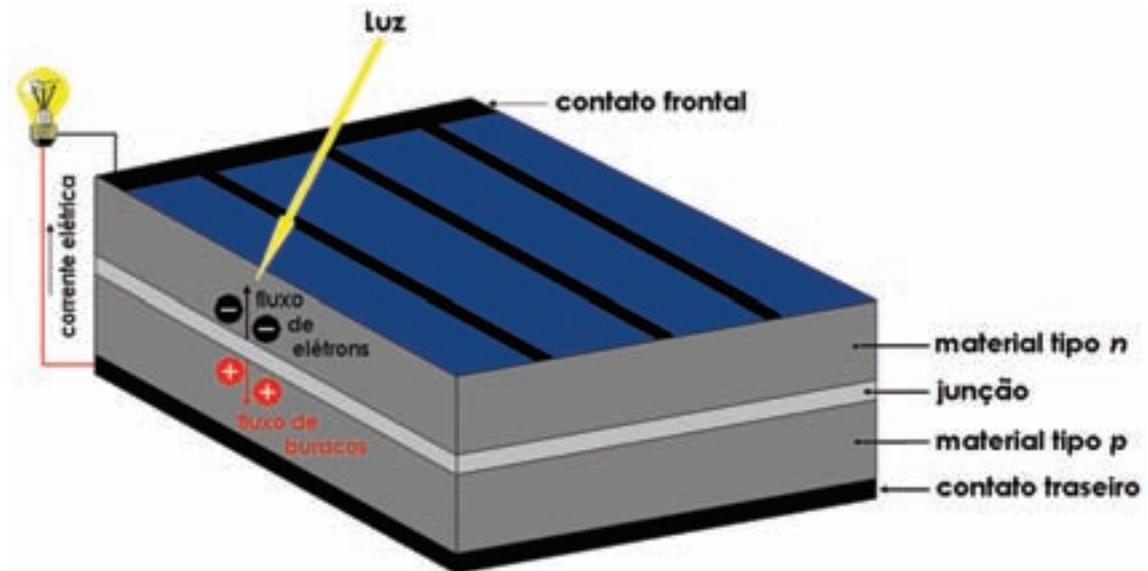


Figura 1.4 – Processo de conversão fotovoltaica

Devido à baixa tensão e corrente de saída em uma célula fotovoltaica, agrupam-se várias células formando um módulo, para que se obtenham tensões úteis na prática. O arranjo das células nos módulos pode ser feito conectando-as em série e/ou em paralelo. Para garantir maiores níveis de potência, corrente e/ou tensão, os módulos podem ser associados em série e/ou paralelo, dependendo dos valores desejados. Uma associação de módulos dá origem a um gerador ou arranjo FV.

Dentre os fatores que influenciam as características da célula, a irradiância e a temperatura são os mais importantes. Baixos níveis de irradiância reduzem a corrente gerada sem causar redução considerável à tensão, enquanto que altos valores de temperatura da célula reduzem a tensão em maiores proporções que aumentam a corrente, deslocando assim o ponto de máxima potência para a esquerda.

O dispositivo responsável pela conversão da luz incidente em eletricidade é denominado de célula fotovoltaica. Os materiais empregados na sua construção são elementos semicondutores, sendo, em escala comercial, a maioria fabricada de silício, devido a três fatores principais: o silício não é tóxico, é o segundo elemento mais abundante na natureza (o primeiro é o oxigênio), e possui uma tecnologia consolidada devido à sua utilização predominante no ramo da microeletrônica. A figura 1.5 mostra a participação das principais tecnologias utilizadas comercialmente na confecção de células e módulos fotovoltaicos.

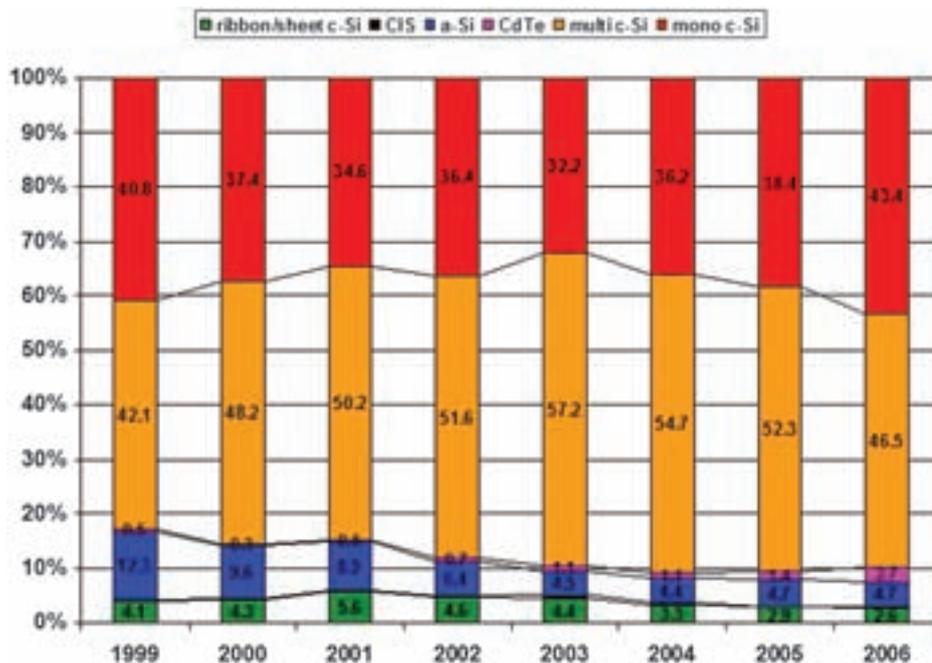


Figura 1.5 – Participação das principais tecnologias utilizadas comercialmente na confecção de células e módulos fotovoltaicos [PHOTON INTERNATIONAL, 2007]

A maioria dos materiais utilizados na conversão fotovoltaica são cristalinos, caracterizando-se por terem uma estrutura de átomos que se repete. Atualmente, o silício ainda é o material mais utilizado na produção de células FV, podendo ser encontrado nas formas monocristalina, multicristalina ou policristalina, e amorfa.

Todas as tecnologias acima citadas são mais bem descritas a seguir:

1. Células de Silício Monocristalino: são atualmente as mais utilizadas comercialmente. O silício é o segundo material mais abundante na crosta terrestre e células fabricadas com esse material não apresentam problemas ambientais causados pela combinação dos seus elementos constituintes. Apresentam elevada vida útil.
As células de silício monocristalino são desenvolvidas a partir de um único cristal. Comercialmente, a eficiência dessas células já atinge valores próximos a 16%. As desvantagens estão relacionadas com o alto custo de produção, devido ao processo construtivo, e ao alto consumo de energia nos processos de fabricação. Acredita-se que novas tecnologias empregadas na fabricação do silício possam alterar esse quadro.
2. Células de Silício Poli ou Multicristalino: são constituídas de diversos cristais em contato entre si, dispostos de maneira não alinhada. Esse procedimento visa reduzir custos de fabricação, embora haja uma pequena perda de eficiência. Os avanços tecnológicos vêm reduzindo bastante as diferenças de custo e eficiência entre as células mono e policristalinas, sendo essas diferenças atualmente pouco perceptíveis.
3. Células de Silício Amorfo: não apresentam qualquer ordenamento na estrutura dos átomos. Seus custos de material são reduzidos se comparados às células anteriores, porém apresentam eficiência também reduzida, com o máximo valor comercial atingindo 10%.
4. Células de Arseneto de Gálio (GaAs): têm estrutura similar à do silício, apresentando

eficiência ligeiramente superior. Ideais para utilização em sistemas com concentração, são pouco utilizadas em escala terrestre, principalmente devido ao complexo processo de produção envolvido, resultando em custos muito elevados.

5. Células de Disseleneto de Cobre-Índio (CIS): são compostas por um material policristalino, podendo captar uma larga faixa do espectro solar. No entanto, o gasto de material é maior do que no silício amorfo, devido à presença do Índio. Essa tecnologia pode ocasionar contaminação ambiental devido à combinação de seus elementos. Apresentam eficiências máximas laboratoriais de 19,2% e comerciais da ordem de 14%.
6. Células de Telureto de Cádmio (CdTe): também são compostas por arranjos policristalinos. Os riscos ambientais apresentados são mínimos, porém apresentam dificuldade no processo de dopagem. Atingem eficiências máximas laboratoriais da ordem de 16,5% e comerciais da ordem de 11%.

A respeito da tecnologia de produção de eletricidade utilizando-se o efeito fotovoltaico, pode-se separar o mercado em dois principais setores: o silício cristalino (monocristalino e o policristalino) e o silício amorfo. A figura abaixo ilustra três painéis correspondentes às tecnologias cristalina e amorfa:

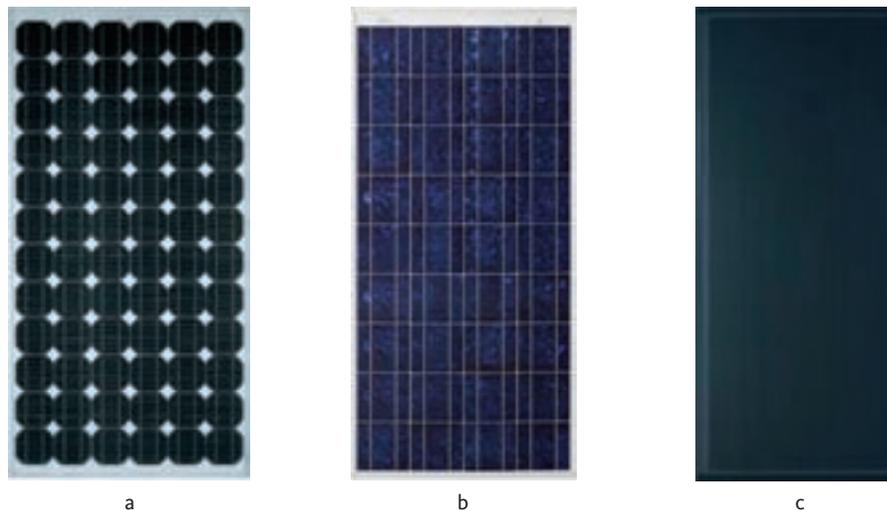


Figura 1.6 – Módulos FV fabricados comercialmente a partir de células de silício (a) monocristalino, (b) policristalino e (c) amorfo

Em localidades sem o atendimento elétrico convencional, os módulos fotovoltaicos constituem uma alternativa viável quando comparada com a extensão da rede elétrica, diesel e outras fontes.

Os sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica são mais eficientes, econômicos, em média 40% mais baratos, e de maior durabilidade que os sistemas fotovoltaicos autônomos, pois não necessitam de sistemas de armazenamento. Atualmente, os sistemas de fornecimento de eletricidade isolados vêm se tornando cada vez mais padronizados e flexíveis. Isso se deve, basicamente, à semelhança cada vez maior entre as características elétricas de atendimento dos sistemas convencionais (rede elétrica) e as características de atendimento dos sistemas destinados a localidades isoladas. Um exemplo prático desse desenvolvimento está justamente na utilização de sistemas fotovoltaicos interligados a minirredes isoladas para o atendimento de pequenas comunidades, fornecendo energia diretamente no barramento CA, semelhante ao que acontece nos grandes centros urbanos.

ENERGIA EÓLICA

Em sistemas híbridos do tipo fotovoltaico-eólico-diesel a energia eólica, assim como a energia solar, desempenha papel fundamental para o bom desempenho do sistema. O conhecimento de suas características, desde as mais fundamentais até as mais particulares, é de extrema importância para garantir um projeto bem dimensionado, a escolha de equipamentos adequados para cada situação, bem como para uma correta instalação.

As características do vento, seus conceitos básicos e suas formas de circulação na atmosfera terrestre são temas fundamentais e de grande importância para o estudo da energia eólica como fonte de geração de eletricidade. Os ventos são resultantes do movimento do ar na atmosfera, e são originados, basicamente, pelo aquecimento heterogêneo da superfície terrestre pela radiação solar e pelo movimento de rotação da Terra. São classificados como gerais e locais; os primeiros sopram sobre a atmosfera e os últimos sopram próximo à superfície.

A velocidade de vento, parâmetro mais importante no estudo da conversão eólico-elétrica, varia com a altura, sendo essa variação nula na superfície do solo, mais acentuada em alturas próximas à superfície, pouco significativa a alturas próximas a 150 m, e nula a aproximadamente 2 km sobre o solo. O fenômeno de variação da velocidade de vento com a altura é denominado de perfil vertical de vento. Esta variação pode ser extrapolada, conhecendo-se a velocidade de vento a uma altura qualquer, a fim de se obter o novo valor de velocidade a uma altura diferente, através de dois modelos, conhecidos como perfis da lei de potência e logarítmico do vento (figura 1.7).

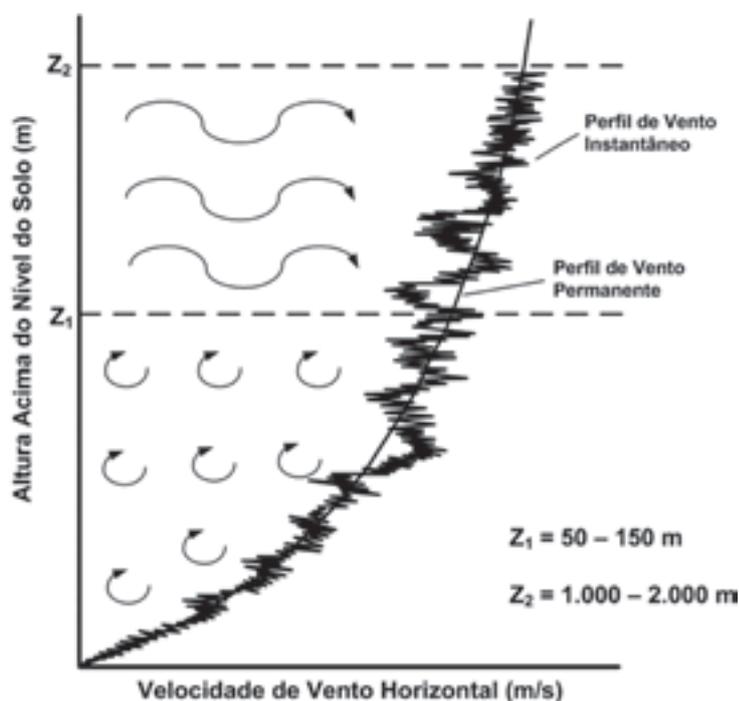


Figura 1.7 – Perfil vertical de vento

A primeira etapa no estudo da energia eólica para conversão em eletricidade é a avaliação do potencial eólico. A avaliação é iniciada com a medição dos parâmetros de interesse. Instrumentos de medição como anemômetros, sensores de direção de vento, termômetros e barômetros são utilizados para medição, respectivamente, de velocidade e direção de vento, temperatura e pressão

atmosférica. A umidade relativa do ar, medida por higrômetros, apesar de não influenciar diretamente no aproveitamento eólico, é avaliada para a determinação de influências indiretas.

De posse dos dados medidos, a avaliação é normalmente realizada através de modelos probabilísticos. Valores médios, desvio padrão e funções de distribuição são utilizados para avaliar o comportamento do potencial eólico. A distribuição de Weibull é o modelo probabilístico mais utilizado para representar as curvas de frequência de velocidade do vento.

A potência disponível no vento é proporcional ao cubo da velocidade de vento. Outros parâmetros de importância são a densidade do ar e a área varrida pelas pás do rotor eólico. O coeficiente de potência é um fator limitante da potência efetivamente aproveitada por um sistema eólico, e representa a parcela de potência do vento que pode efetivamente ser aproveitada por uma turbina eólica. Seu máximo teórico é definido pelo limite de Betz (16/27, ou 0,593), porém alcança valores menores na prática. Se consideradas as demais perdas envolvidas no processo de conversão, como as perdas aerodinâmicas, mecânicas e elétricas, o coeficiente de potência pode ser igualado à eficiência global de conversão.

Os aerogeradores são os equipamentos responsáveis pela conversão eólio-elétrica. O rotor eólico é o componente mais característico de um aerogerador. Uma das classificações típicas de aerogeradores é aquela dada em função da direção de seu eixo de rotação em relação ao vento. Atualmente, os aerogeradores mais comuns são aqueles de eixo horizontal. Os componentes principais de aerogeradores de eixo horizontal, além do rotor eólico e suas pás, são os eixos de baixa e alta velocidade, sistema de multiplicação, sistema de orientação, mecanismos de controle, e gerador elétrico. A nacela, também conhecida por gôndola, é o compartimento responsável pelo abrigo, proteção e sustentação de todos os componentes do aerogerador, com exceção do rotor. A torre tem como função básica o suporte do rotor e demais componentes do aerogerador, bem como sua localização em uma altura adequada para o melhor aproveitamento da potencialidade eólica disponível (figura 1.8).

- 1- Grua de manutenção
- 2- Gerador
- 3- Sistema de refrigeração
- 4- Unidade de controle
- 5- Sistema de multiplicação
- 6- Eixo principal
- 7- Sistema de bloqueio do rotor
- 8- Pá
- 9- Cubo do rotor
- 10- Cone
- 11- Suporte das pás
- 12- Nacela
- 13- Sistema hidráulico
- 14- Amortecedor
- 15- Anel de orientação
- 16- Freio
- 17- Torre
- 18- Sistema de orientação
- 19- Eixo de alta velocidade

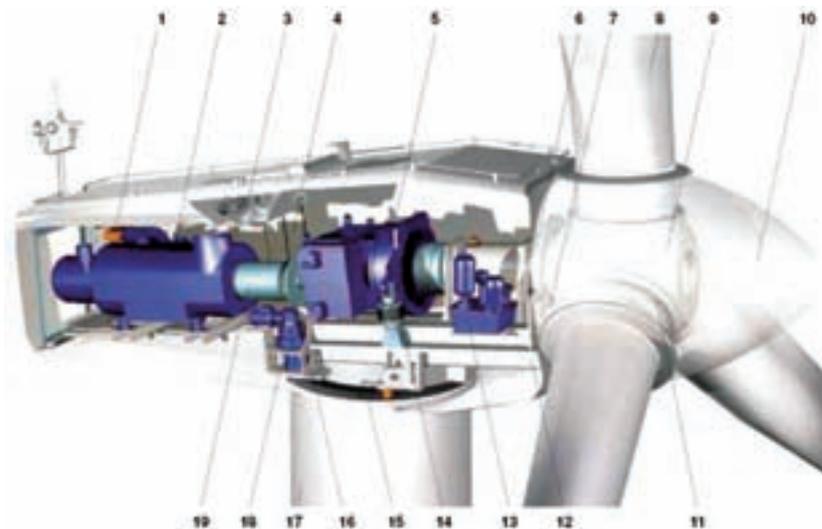


Figura 1.8 – Algumas partes constituintes de um aerogerador. Fonte: GAMESA, 2007

O desempenho dos aerogeradores é normalmente determinado em função de sua curva de potência, que determina os valores de potência disponíveis na saída do aerogerador, para cada faixa de velocidade de vento. Os principais valores de velocidade de vento de uma curva de potência são

a velocidade de partida, a mínima para que o rotor saia de seu estado de repouso inicial e inicie a geração de energia; a velocidade nominal, aquela na qual a potência nominal do aerogerador é extraída; e a velocidade de corte, na qual o movimento do rotor eólico é interrompido, protegendo-o contra danos estruturais. Outra forma de se determinar o desempenho de aerogeradores é através do fator de capacidade, que indica o real rendimento de um aerogerador, considerando todas as perdas no processo de conversão. O fator de capacidade é a razão entre a energia efetivamente gerada por um aerogerador e sua potência nominal, considerando-se um período de tempo qualquer. Quanto maior o fator de capacidade, melhor o desempenho do aerogerador.

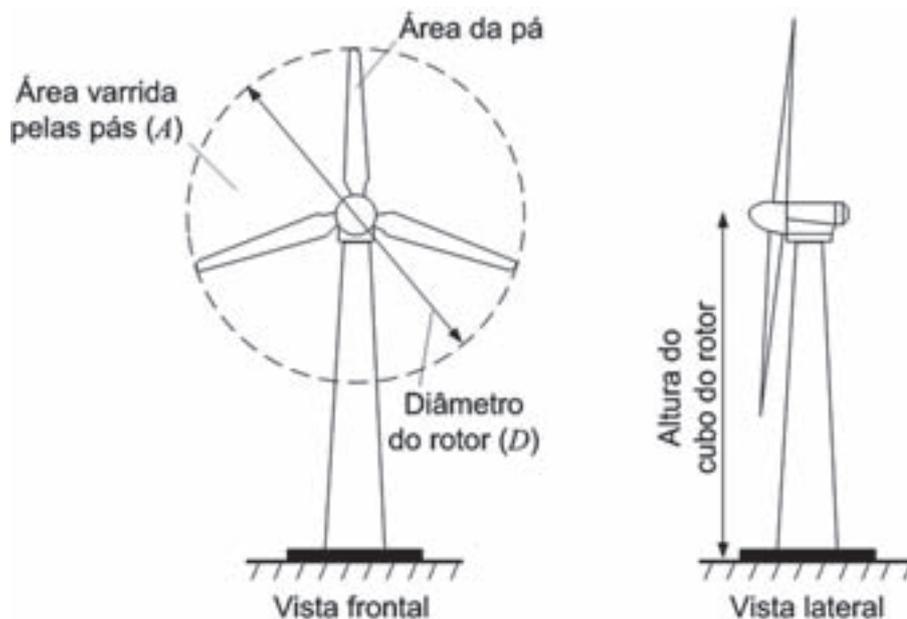


Figura 1.9 – Conceitos relacionados a um rotor eólico

Sistemas eólicos podem ser instalados em terra (*onshore*) e no mar (*offshore*), e podem ser a única fonte de geração em um sistema isolado, estar conectados ao sistema interligado, configurando o que se conhece como geração distribuída, ou ainda compor, com outras fontes de geração, um sistema híbrido isolado.

Os impactos ambientais de sistemas eólicos podem ser considerados de pequena escala. O visual é basicamente comum a todas as fontes de geração, o sonoro é bastante reduzido se comparado a outras fontes de ruídos, e a ocupação de áreas está sendo minimizada com a instalação de sistemas no mar. Outros impactos, típicos de sistemas eólicos, mas que vêm sendo bastante minimizados com o passar do tempo, são os desvios de rotas migratórias e mortes de aves, morcegos e insetos, e a interferência eletromagnética, causada pela reflexão ou distorção de ondas eletromagnéticas emitidas por sistemas de transmissão de sinais.

GRUPOS GERADORES

Os grupos geradores são máquinas muito utilizadas para o fornecimento de energia elétrica. Dentro da região amazônica, eles são bastante aplicados para atender a localidades situadas em zonas rurais e em lugares isolados do sistema interligado nacional.

Na maioria das vezes, a operação de um grupo gerador é feita através da inserção de combustível no motor de combustão interna, que pode ser do tipo otto ou diesel, e ao iniciar a partida esse motor aciona o eixo de um gerador elétrico fornecendo tensão nos seus terminais.

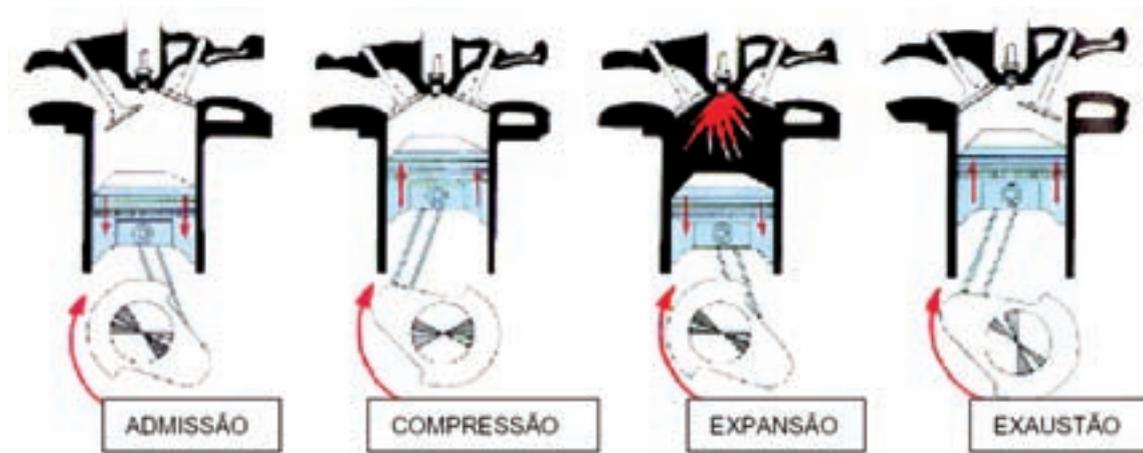


Figura 1.10 – Esquema de combustão para o motor de quatro tempos [http://mea.pucminas.br/ricardo/pos/Aula_01.pdf, 2007]

A fácil aquisição desse maquinário, principalmente por apresentar uma ampla faixa de potência comercialmente disponível, o preço de aquisição menor quando comparado com outras fontes de energia (eólica, solar), além de sua robustez o torna atrativo para atendimento de localidades isoladas.

Dependendo do porte dos grupos geradores, existirá a necessidade ou não da utilização de unidades de supervisionamento e controle em corrente alternada (USCA), onde o operador poderá realizar a partida e parada da máquina além de monitorar as grandezas elétricas tais como tensão, corrente, frequência.

A desvantagem em utilizar grupos geradores está no fato de que o custo de operação e manutenção é elevado, além de a logística para a obtenção do combustível ser onerosa. Outro fator está relacionado com a poluição do meio ambiente, tanto no transporte e armazenamento do combustível com possibilidade de vazamentos do material como no funcionamento do grupo gerador através da emissão de gases poluentes para a atmosfera.

Os grupos geradores podem ser utilizados em conjunto com outras fontes de energia, caracterizando assim os denominados sistemas híbridos.

Atualmente, além de essas máquinas operarem em sua maioria com o diesel, existe grande interesse por parte do governo em realizar adaptações nos motores para que eles passem a funcionar com a utilização de biodiesel, contribuindo assim para a diminuição dos impactos ambientais.

SISTEMA DE ARMAZENAMENTO

A natureza das fontes renováveis solar e eólica é intrinsecamente variável no tempo, dependendo dos ciclos diários, das estações do ano e das variações aleatórias da atmosfera. Como consequência disso, são muitos os momentos nos quais a potência elétrica que pode ser entregue pela parte renovável difere, por excesso ou por déficit, da qual é demandada por uma determinada aplicação. No caso particular dos sistemas híbridos de produção de eletricidade, o correto fornecimento

elétrico da aplicação exige, portanto, poder armazenar energia nos momentos em que a produção excede a demanda, para utilizá-la em situação inversa. Denomina-se de *sistema de armazenamento* ao componente do sistema que se encarrega de realizar tal função. Historicamente, o sistema de armazenamento mais utilizado em sistemas híbridos é aquele constituído de acumuladores eletroquímicos (ou baterias) de chumbo-ácido.

Uma bateria é constituída de duas ou mais células conectadas em série. Uma célula básica é formada de dois eletrodos. Comumente um é chamado de eletrodo positivo e o outro de eletrodo negativo.

Normalmente, a tensão nominal de uma célula situa-se entre 1,2 e 3,6 V. Dessa forma, é comum a utilização de várias células conectadas em série para formar uma combinação com tensão nominal mais elevada. A tensão nominal de uma bateria é assim definida pelo número de células conectadas em série, vezes a tensão nominal de uma única célula. As células são integradas e conectadas em série com somente um conjunto de terminais. Um exemplo bem conhecido é a bateria usada para partida, iluminação e ignição de automóveis, em que 6 células são conectadas em série, porém vendidas como um bloco de 12 V.

As baterias podem ser classificadas, quanto à disponibilidade de carga, como primárias (ou não recarregáveis) e secundárias (ou recarregáveis). Dentre os tipos de baterias primárias podem ser citadas as pilhas, não recarregáveis, e a maioria das baterias usadas em relógios e brinquedos eletrônicos. Com relação às baterias secundárias, as baterias automotivas são as mais conhecidas.

Existem diversos tipos de baterias recarregáveis disponíveis comercialmente, e suas características variam em função da sua forma construtiva e dos elementos que as compõem. Com relação ao eletrólito que as compõem, podem ser classificadas basicamente por abertas e seladas.

As baterias abertas são aquelas onde o nível de eletrólito deve ser periodicamente verificado, devendo trabalhar na horizontal. Nas seladas, o eletrólito é confinado no separador ou sob a forma de gel. São usualmente conhecidas como “livres de manutenção”. Baterias de Pb-Ácido utilizam em suas grades ligas de Pb-Ácido, de modo a reduzir a perda de água decorrente da eletrólise da água, durante o processo de carga.

Em relação ao tipo de utilização, as mais comuns são as automotivas, estacionárias, tração e fotovoltaicas. A seguir são apresentadas as principais características de cada uma delas:

- ♦ Automotivas: Projetadas para regimes de carga e descarga rápidos com elevadas taxas de corrente ($>3I_{20}$) e reduzidas profundidades de descarga, da ordem de 30% (partida). Como característica principal desse tipo de bateria destaca-se a baixa resistência aos ciclos de carga e descarga;
- ♦ Estacionárias: Projetadas para permanecer em flutuação e ser solicitadas ocasionalmente (*backup*). Além disso, podem operar com regimes de carga elevados. Dentre as principais características destacam-se a moderada resistência ao processo de ciclagem e o baixo consumo de água;
- ♦ Tração: Projetadas para operar com ciclos profundos e freqüentes e regime de descarga moderados. Suas principais características são: alta resistência a ciclagem, alto consumo de água e manutenção freqüente;
- ♦ Fotovoltaicas: Projetadas para ciclos diários rasos com taxas de descarga reduzidas (descargas profundas esporádicas, da ordem de até 80%). Como características principais destacam-se a resistência ao processo de ciclagem e a pouca manutenção.

Diferentes tipos de baterias recarregáveis, passíveis de serem usadas nas aplicações autônomas

de fornecimento de energia elétrica, são constantemente disponibilizados pelo mercado (Ni-Fe, Ni-Zn, Zn-Cl). Entretanto, a disponibilidade do mercado reduz a possibilidade de escolha dos tipos que podem ser empregados em sistemas isolados, tais como os sistemas híbridos. Dessa maneira, as baterias de chumbo-ácido (Pb-Ácido) e níquel-cádmio (Ni-Cd) tornaram-se algumas das poucas opções para os projetistas e, portanto, as mais usuais. O preço das últimas é, para a mesma quantidade de energia, da ordem de quatro ou cinco vezes superior ao das primeiras.

Assim, a questão econômica associada à disponibilidade do mercado fez com que a maioria dos acumuladores utilizados nos sistemas fotovoltaicos, eólicos, ou híbridos, sejam constituídos de baterias recarregáveis de chumbo-ácido.

As condições de operação variam consideravelmente de acordo com a localização, tipo de aplicação, padrão da carga, geradores instalados e a estratégia de operação empregada. Os parâmetros mais importantes para classificação das condições de operação são as correntes de carga e descarga, temperatura, e o perfil do estado de carga ao longo do ano.

Para se obter bancos de baterias mais robustos deve-se associar várias baterias de menor capacidade em série e/ou paralelo de modo a se obter o tamanho do banco desejado. Para a composição do banco de baterias, vários aspectos devem ser considerados, dentre os quais se destacam: a escolha adequada da tensão do banco de baterias e o correto dimensionamento dos cabos usados na transferência de energia da e para a bateria.

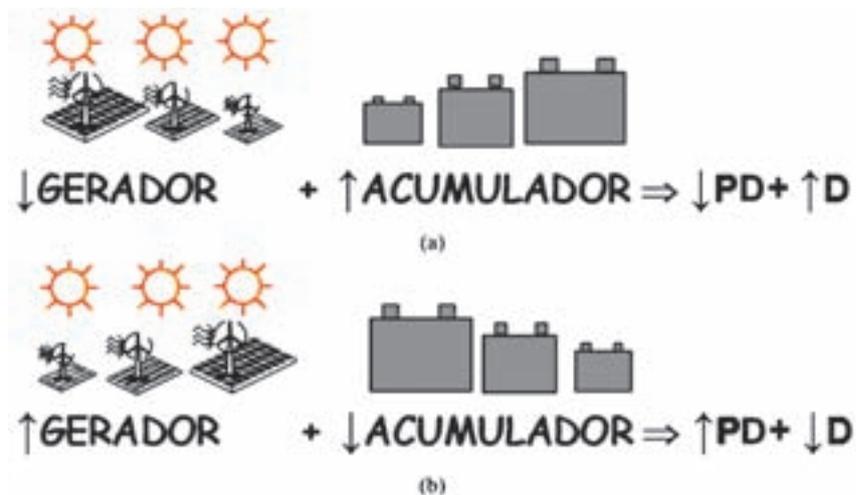


Figura 1.11 – Influência do dimensionamento do gerador e da bateria nos parâmetros PDe, e D: (a) diminuindo o tamanho do gerador e aumentando o acumulador, e (b) aumentando o tamanho do gerador e diminuindo o tamanho do acumulador

SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE POTÊNCIA

O sistema de condicionamento de potência é composto por equipamentos cuja função principal é otimizar o controle geração/consumo visando ao aproveitamento ótimo dos recursos, aliado à qualidade e continuidade na entrega da energia ao usuário. Assim como as baterias, alguns componentes do sistema de condicionamento de potência são essenciais para o bom desempenho de sistemas híbridos. Os principais equipamentos são os controladores de carga, inversores de tensão, retificadores, conversores, transformadores e diodos.

O controlador de carga é um equipamento normalmente associado ao arranjo fotovoltaico, responsável por gerenciar os processos de carga (sentido arranjo FV – bateria) e descarga (sentido bateria – carga) das baterias, contribuindo, assim, para a preservação da vida útil das mesmas.

Os controladores devem ser utilizados com os tipos de baterias para os quais foram projetados, ou ser ajustados para cada tipo, no caso daqueles que permitem o ajuste de seus parâmetros (*setpoints*) por parte do usuário. O controle é normalmente desenvolvido através de dois métodos, o liga/desliga, mais simples, e o de tensão constante, no qual a regulação dos níveis de carga da bateria é realizada de forma otimizada. Com relação à forma como desconectam o arranjo FV das baterias, os controladores são classificados pelos métodos paralelo (*shunt*) e série. As características mais importantes de controladores de carga a serem consideradas na etapa de dimensionamento são a sua capacidade (A) e a sua tensão de operação (V_{CC}).

O retificador de tensão é responsável pela conversão da potência dos aerogeradores e grupos geradores a diesel que estão conectados no barramento CA para uma potência CC, seja para carregar baterias, seja para suprir eventualmente alguma carga CC. Aerogeradores de pequeno porte são normalmente acompanhados por retificadores de tensão que, por sua vez, são usualmente combinados com um sistema de controle de carga.

O inversor de tensão converte a corrente contínua, proveniente dos equipamentos de geração e armazenada pelas baterias, em corrente alternada, sendo também conhecido como conversor CC-CA. Sua utilização é fundamental devido à maior facilidade de se encontrar no mercado equipamentos eletro-eletrônicos de uso final que operam em corrente alternada. Dentre as características principais dos inversores estão as suas tensões de operação de entrada (CC) e saída (CA), frequência, potência nominal, capacidade de surto, eficiência e forma de onda de saída, que pode ser de três tipos: quadrada, quadrada modificada e senoidal.

O conversor CC-CC é um equipamento que ajusta um valor de tensão CC diferente do fornecido pelo sistema de geração/armazenamento, ou quando se deseja obter vários valores de tensão a partir de uma única entrada. Os conversores CC-CC podem elevar a tensão (*boost*) ou baixá-la (*buck*). Este equipamento pode conter um sistema seguidor de ponto de máxima potência, muito utilizado com o objetivo de se obter a máxima potência disponível do arranjo FV.

O diodo de bloqueio é um dispositivo eletrônico utilizado em sistemas FV, cuja função é evitar que os módulos FV atuem como carga para as baterias em períodos de indisponibilidade de geração, e que módulos operando em condições normais injetem correntes elevadas em um grupo de módulos em condições anormais de funcionamento. Já o diodo de passagem evita que, em uma associação em série, um módulo operando em condições anormais (devido a um defeito de fabricação ou condições de sombreamento, por exemplo) influencie negativamente no desempenho do arranjo como um todo. Os diodos de bloqueio devem ser dimensionados e instalados de acordo com a capacidade do arranjo FV, o diodo de passagem, por sua vez, é normalmente fornecido por alguns fabricantes de módulos, já vindo instalado na caixa de conexões do módulo.

Transformadores também podem estar presentes em sistemas híbridos, estando normalmente instalados entre o aerogerador e o retificador de tensão, e sua função é adequar os níveis de tensão CA do sistema.

Demais acessórios presentes em sistemas híbridos são equipamentos elétricos gerais, como cabos, disjuntores, chaves e conectores, entre outros.

SISTEMAS HÍBRIDOS

As fontes de energia renováveis solar (fotovoltaica), eólica, hídrica (MCH e PCH) e biomassa constituem alternativas reais para geração de eletricidade em áreas isoladas. Há áreas onde mais

de uma fonte renovável se destaca, podendo ser combinadas em um único sistema, definindo o conceito de sistema híbrido de energia, ou simplesmente, sistema híbrido – aquele que utiliza mais de uma fonte que, dependendo da disponibilidade dos recursos, deve gerar e distribuir eletricidade, de forma otimizada e com custos mínimos, a uma determinada carga ou a uma rede elétrica, isolada ou conectada a outras redes.

A utilização dos sistemas híbridos teve seu início na década de 1970, frente à crise do petróleo (1973). Atualmente, a utilização desses sistemas volta-se também com a questão ambiental.

Diversos são os tipos de sistemas híbridos em utilização no mundo. Dentre esses, destacam-se como principais: eólico-diesel; fotovoltaico-diesel; fotovoltaico-eólico-diesel; fotovoltaico-eólico. Salienta-se que a combinação das fontes renováveis busca explorar satisfatoriamente a complementaridade entre ambas ao longo do tempo.

Os sistemas híbridos podem ser classificados: quanto à Interligação com a rede elétrica convencional – isolado ou interligado; quanto à prioridade de uso das fontes de energia – baseado no recurso não renovável ou no renovável; quanto à configuração – série, chaveado ou paralelo; e quanto ao porte – micro, pequeno, médio ou grande.

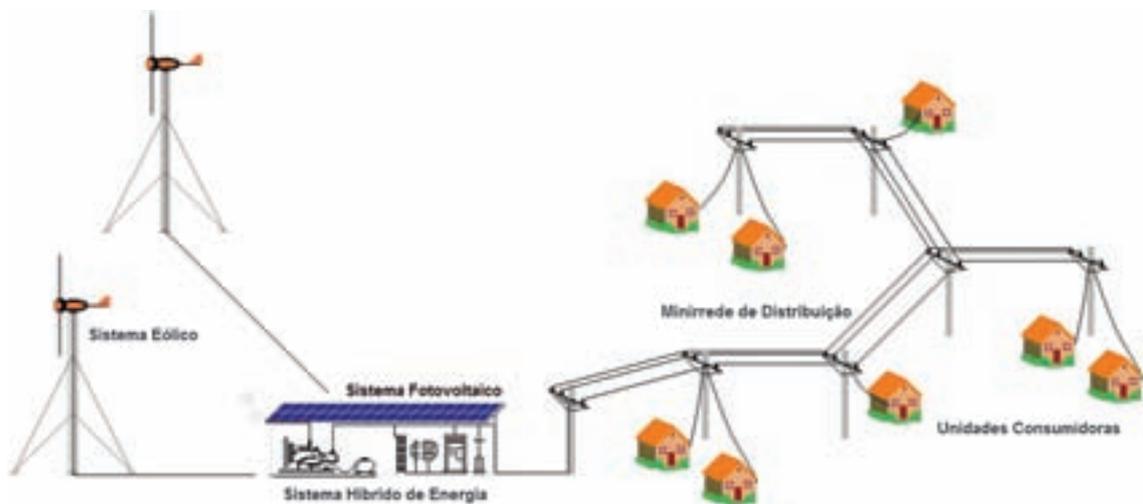


Figura 1.12 – Sistema híbrido isolado

As principais vantagens desses sistemas incluem: utilização dos recursos locais; modularidade; pouca necessidade de manutenção; geração descentralizada; reduzido nível de emissão de GEE, entre outros. Por outro lado, como principais desvantagens, destacam-se: recursos precisam ser favoráveis para geração de eletricidade; investimento inicial bastante elevado; necessidade de um sistema de armazenamento de energia, geralmente baterias.

As estratégias de operação utilizadas pelos sistemas híbridos são semelhantes e visam, principalmente, a um atendimento contínuo e de qualidade, como também à redução do consumo de óleo combustível.

A maioria dos sistemas híbridos está instalada em locais remotos, de difícil acesso e, especialmente, com falta de mão-de-obra qualificada para operá-los. Isso justifica a automatização e monitoração remota ou local desses sistemas, o que assegura a redução nos custos operacionais e a maior confiabilidade.

Outro instrumento que também visa reduzir custos operacionais, bem como permitir maior controle do consumo por parte do usuário, é a implementação do sistema pré-pago de energia,

ou seja, o pré-pagamento (compra antecipada, semelhante à da telefonia celular) pelo serviço de eletricidade.

Com relação aos impactos proporcionados pelos sistemas híbridos, os mesmos apresentam características mais benéficas do que prejudiciais, especialmente por se tratarem de sistemas de pequeno a médio porte, baseados nos recursos renováveis.

Nos sistemas híbridos, como em qualquer outro sistema elétrico, o uso racional da energia é um fator muito importante, dada especialmente a limitação de geração e a intermitência das fontes primárias. Portanto, a adoção de equipamentos elétrico-eletrônicos eficientes e o esclarecimento dos usuários sobre como utilizar a energia elétrica são ações fundamentais para um uso mais racional.

Ultimamente, a procura de maior eficiência global dos sistemas híbridos motiva estudos da inserção de outras formas de geração nos mesmos. A biomassa (especialmente na Amazônia) e a célula a combustível destacam-se nesse aspecto.

PROJETO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

A primeira etapa para o projeto de um sistema híbrido é a análise do recurso disponível para aproveitamento das energias solar e eólica no local da futura implantação do sistema, como também a identificação e a avaliação preliminares das áreas potenciais para a instalação dos sistemas de geração e distribuição de energia elétrica. Os passos para a avaliação dos recursos energéticos naturais (solar e eólico) de uma determinada localidade seguem a partir de uma avaliação preliminar, identificando áreas onde os aproveitamentos solar e eólico são potencialmente viáveis. Dentre as formas de avaliação preliminar destacam-se: a consulta em atlas eólicos e solarimétricos; a consulta em programas computacionais destinados a estimativas de potenciais baseados em medições de estações meteorológicas próximas; a obtenção dos dados de estações meteorológicas de localidades próximas.

O segundo passo do levantamento é realizado com a visita ao local para a observação de indicadores naturais, medições pontuais no período da visita, a obtenção de informações com os moradores sobre as características meteorológicas locais e a avaliação da acessibilidade ao local. Por último, tendo o indicativo preliminar de bom potencial para aproveitamento das energias solar e/ou eólica, o passo seguinte se dá com a instalação de sensores de medição (anemômetros, anemoscópios, piranômetros, barômetros, termohigrômetros), normalmente realizados em torres, sob a forma de estação meteorológica.

Após o levantamento dos recursos solar e eólico disponíveis na localidade, a análise do potencial para aproveitamento dos mesmos para geração de energia elétrica é uma etapa imprescindível para um criterioso estudo de viabilidade técnica de empreendimentos que utilizem as fontes solar e eólica. Caso constatada a viabilidade preliminar, a disponibilidade de dados confiáveis em um período satisfatório e bem analisados passa a ser fundamental para garantir a elaboração de projetos dimensionados de forma tal que apresentem relação ótima entre a participação de cada uma das fontes no sistema híbrido. No dimensionamento do sistema leva-se em conta uma série de fatores como o custo da energia gerada, confiabilidade, eficiência e facilidade de manutenção, entre outros.

Torna-se também importante avaliar a logística de abastecimento de combustível para a localidade, pois em muitas estratégias de operação de sistemas híbridos faz-se o uso de grupos geradores (como os acionados por motores a diesel) atuando como complementação ao sistema

renovável, visando ao aumento da confiabilidade do suprimento de energia elétrica.

Avaliado o recurso energético disponível, e se preliminarmente constatada a viabilidade da instalação de sistemas de geração no local, a etapa seguinte é a elaboração do projeto. O primeiro passo no desenvolvimento do projeto do sistema de geração é a análise da demanda, ou seja, a verificação dos tipos de cargas que serão atendidas pelo sistema, assim como seus regimes de utilização e considerando ainda as perdas envolvidas no sistema e a demanda reprimida, para, a partir daí, iniciarem as etapas: de escolha da estratégia de operação do sistema híbrido; de dimensionamento das fontes de geração consideradas, ou seja, o dimensionamento do sistema solar-eólico-diesel e de seus sistemas complementares (armazenamento, condicionamento de potência); bem como dos sistemas de controle e proteção e da minirrede de distribuição de energia elétrica. Feita a escolha dos equipamentos/dispositivos do sistema híbrido, realiza-se a análise de desempenho dos mesmos inseridos no sistema e o balanço energético resultante entre produção e demanda de energia elétrica.

Uma boa estratégia de operação do sistema híbrido visa garantir aos usuários do sistema de geração um atendimento confiável e de qualidade, minimizando simultaneamente os seus custos de implantação e de operação e manutenção. Para essa otimização, é necessário realizar diferentes combinações de configurações, estratégias de despacho e períodos de atendimento da minirrede, para buscar a estratégia de operação, dependendo da aplicação, mais adequada ao sistema híbrido a ser implantado em determinada localidade.

INSTALAÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Com relação à instalação de sistemas híbridos, verifica-se uma relativa independência entre seus sistemas e subsistemas (geração, armazenamento, condicionamento de potência e distribuição de energia) durante o processo até as conexões finais. O compromisso básico a ser estabelecido é a busca pela instalação dos subsistemas o mais próximo possível entre si (redução de custos e de perdas), seguindo para isso técnicas de instalação apropriadas.

Os módulos fotovoltaicos, sob a forma de arranjos (ligações série/paralelo), devem ser instalados em locais onde não sejam expostos a nenhuma situação de sombreamento durante o ano e de insegurança. Os locais ainda devem permitir o acesso fácil a uma eventual manutenção. Para maximizar a captação da radiação solar média ao longo do ano, a orientação (norte – hemisfério sul e sul – hemisfério norte) e a inclinação (latitude local) dos arranjos precisam ser seguidas conforme técnicas de instalação.

Os aerogeradores e suas torres (treliçada, autoportante ou tubular) devem ser instalados em áreas com dimensões apropriadas e que não possuam obstáculos, naturais ou não, em seus arredores que possam causar interferência prejudicial ao fluxo de vento que atinge o rotor eólico.

Quando se pensa em mais de um aerogerador (parque eólico), além da preocupação com os obstáculos do entorno há também a preocupação com o efeito esteira causado pelos próprios rotores dos aerogeradores. Para mitigar esses efeitos prejudiciais, distâncias mínimas entre os aerogeradores e os obstáculos, ou entre os próprios aerogeradores, o posicionamento do rotor eólico a uma determinada altura, entre outras técnicas de instalação, necessitam ser adotados.

Os grupos geradores a diesel e demais acessórios devem ser instalados em uma edificação própria (casa de força), a qual abriga também outros equipamentos pertencentes aos subsistemas de armazenamento e condicionamento de potência.

A casa de força deve contemplar um projeto estrutural que suporte os esforços mecânicos solicitados pelos equipamentos, ter boa ventilação e isolamento acústica, entre outros itens.

Referindo-se ao subsistema de armazenamento, as baterias não devem ser instaladas diretamente sobre o solo, ou em locais úmidos. Geralmente utiliza-se um armário em ferro com prateleiras de madeira para o condicionamento das baterias (banco de baterias – ligação série/paralelo).

Os controladores de carga, inversores de tensão e retificadores são normalmente instalados nas paredes ou em local específico da casa de força, sempre o mais próximo possível das baterias e dos equipamentos de geração. Pontos de operação, quando disponíveis nesses equipamentos, devem ser ajustados conforme o projeto.

Para preservar todos os equipamentos do sistema híbrido, fornecer segurança às pessoas junto ao sistema elétrico, bem como realizar eventuais manobras como estratégias de operação, fazem-se necessários a instalação e uso de disjuntores e/ou chaves seccionadoras. Salienta-se que, para uma boa qualidade de instalação, o cabeamento do sistema híbrido precisa ser bem projetado.

A minirrede de distribuição de energia deve ser instalada seguindo as técnicas de instalação dos seus componentes principais: transformadores, cabos condutores, chaves seccionadoras, postes, luminárias, pára-raios de distribuição, aterramento, cruzetas, isoladores e conectores.

OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Para o funcionamento de qualquer sistema híbrido de energia deve-se levar em consideração a operação e manutenção correta dos equipamentos envolvidos desde a geração, passando pelo sistema de distribuição até as unidades consumidoras.

Através da realização de um plano de manutenção e operação, além das recomendações feitas pelos fabricantes dos equipamentos e a capacitação dos operadores, é possível fazer o sistema operar de forma confiável e com segurança para os equipamentos bem como para os consumidores.

Muitas das tarefas relacionadas com a operação podem ser automatizadas, tais como a partida e parada do grupo gerador, chaveamento de disjuntores, carga e descarga das baterias, dentre outros.

Na parte da manutenção, as tarefas podem ser simples, desde a limpeza dos módulos fotovoltaicos com um pano macio, a podagem de árvores para que não toquem nos cabos elétricos da rede, até tarefas como inspeção das partes girantes dos grupos geradores, troca de óleo lubrificante do transformador, inspeção dos cabos e da torre do aerogerador.

SEGURANÇA EM SISTEMAS HÍBRIDOS

A segurança é um aspecto ao qual se deve ter especial atenção para os sistemas híbridos de geração de energia suprindo minirredes, porque várias são as fontes e os equipamentos envolvidos e, portanto, deve-se redobrar os cuidados. Um sistema híbrido, por exemplo, eólico-fotovoltaico-diesel, necessita, além de parâmetros para segurança da vida de pessoas e animais, de procedimentos de segurança para os sistemas de geração, condicionamento e distribuição de energia elétrica, a fim de garantir o funcionamento adequado das instalações, redução das perdas de energia e preservação contra danos aos bens e ao ambiente.

Quando se faz uso ou se manuseiam sistemas com energia elétrica é extremamente importante obedecer às normas básicas de segurança. Ainda que os níveis de tensão e corrente sejam considerados baixos, não se devem subestimar os danos que a eletricidade pode trazer ao ser humano, sendo o mais grave os causados pelo choque e o arco elétrico. Logo, deve-se estar em alerta sobre os perigos associados à eletricidade, de forma que sejam controlados ou eliminados desde a fase de projeto e na execução das tarefas ao instalar, operar ou manter um sistema elétrico.

Também é muito importante que sejam adotadas medidas de segurança nas instalações elétricas dos usuários do sistema, assim como a educação destes para o uso adequado e seguro da eletricidade, uma vez que ainda não possuem costume com a mesma.

Em todos os tipos de sistemas híbridos de geração de energia, os procedimentos de implantação, operação e manutenção devem ser executados apenas por pessoas devidamente treinadas para tal, utilizando-se dos equipamentos de proteção individual (EPI) apropriados para cada função ou coletivos (EPC), dependendo da situação. Também se recomenda que esses procedimentos sejam feitos sempre por pelo menos duas pessoas, facilitando o socorro, caso necessário. Nas atividades realizadas, devem-se evitar os improvisos, tais como: *bypass* de equipamentos de segurança e controle; ligações com materiais fora dos padrões de segurança (exposição de emendas de cabos, ou sua inadequada isolação, cabos com bitolas inadequadas); uso de ferramentas inadequadas.

Cartazes com orientações e placas de sinalização nas usinas ou casas de força, ou mesmo afixados nos equipamentos, descrevendo os riscos potenciais e os procedimentos a serem seguidos, devem ser dispostos em locais de fácil visibilidade. Manuais básicos de segurança, operação e manutenção também devem estar disponíveis nas usinas, para uso dos responsáveis pelo sistema. Estojos de primeiros socorros e de combate a incêndios devem ser disponibilizados aos usuários.

É importante também que sejam observadas as normas técnicas vigentes; que seja realizado um correto dimensionamento dos sistemas de aterramento e proteção elétrica; e, ainda, que seja realizada uma vistoria constante em todas as instalações que compõem o sistema híbrido, seguindo um plano de operação e manutenção, a fim de manter a segurança nas mesmas.

ANÁLISE ECONÔMICA APLICADA A SISTEMAS HÍBRIDOS

A análise econômica aplicada a sistemas híbridos é utilizada para se avaliar a viabilidade econômica do empreendimento, garantindo um possível retorno do investimento realizado, ou simplesmente para se determinar a opção mais viável dentre as fontes de geração disponíveis. O correto estudo de viabilidade econômica, além das características particulares do sistema de geração, passa pela utilização mais adequada das figuras de mérito econômico.

O diagrama de fluxo de caixa apresenta, sob a forma gráfica, as receitas e despesas de cada alternativa, ordenadas por períodos. Tais receitas e despesas podem ser apresentadas através de seus reais valores no momento de cada desembolso, como também podem ser trazidas ao presente, levadas ao futuro, ou ainda atualizadas. Estes conceitos definem o valor temporal do dinheiro e são de fundamental importância para a elaboração de estudos de viabilidade econômica.

O horizonte de planejamento e a taxa mínima de atratividade do projeto são indicadores importantes para se analisar o tempo e a taxa de retorno esperadas pelo empreendimento.

Dentre os indicadores financeiros mais difundidos na engenharia econômica estão o valor presente líquido (VPL), o índice benefício/custo (IBC), o retorno adicional sobre o investimento (ROIA), a taxa interna de retorno (TIR) e o tempo de retorno de investimento (*payback*). Eles podem ser utilizados, isoladamente ou em conjunto, no estudo de viabilidade econômica, cada um com suas características particulares. O método do VPL, um dos mais utilizados, é um método simples, porém criterioso, por considerar o valor temporal do dinheiro. O IBC auxilia no cálculo do retorno adicional sobre o investimento; porém, isoladamente não fornece uma estimativa real de rentabilidade. O ROIA fornece a estimativa real de rentabilidade de um investimento; porém, não indica com precisão os riscos envolvidos na análise. A TIR indica conjuntamente o retorno esperado e o risco de um projeto, mas suas soluções são trabalhosas e não são aplicáveis a todos os casos. Por fim, o *payback* é um indicador de fácil interpretação, mas não considera fluxos de caixa após o instante do retorno de investimento.

Os custos associados a sistemas híbridos podem ser divididos em custos de despesa e custos de receita. Os custos de receita estão normalmente associados ao lucro obtido com a venda da energia gerada, ou a uma eventual economia resultante da redução no consumo de combustível ou de outras taxas. Já os custos de despesa podem ser relacionados aos custos de investimento inicial, custos de operação e manutenção (O&M) e custos de reposição de equipamentos.

Os custos de despesa estão divididos em custos de investimento inicial, que correspondem a custos de projeto, de aquisição e transporte de materiais e equipamentos, e de instalação; custos de O&M, que compreendem custos fixos anuais, relacionados ao pagamento de operadores, aos gastos com combustível, com as leituras e envio de faturas, aos procedimentos periódicos de manutenção preventiva e corretiva, dentre outros; e custos de reposição de equipamentos, que referem-se às substituições dos componentes principais do sistema, devido ao fim de suas vidas úteis.

Sistemas fotovoltaicos e eólicos são caracterizados por apresentarem custos de investimento mais elevados, e custos de operação e manutenção baixos. Sistemas diesel-elétricos apresentam comportamento inverso, apresentando baixos custos de investimento inicial e elevados custos de operação e manutenção. Com relação aos custos de reposição, as baterias são os equipamentos de sistemas híbridos que requerem substituições mais constantes, devido à vida útil mais curta que a dos demais componentes do sistema.

Determinados todos os custos envolvidos, o valor presente líquido anualizado do projeto, que na engenharia também é conhecido como custo do ciclo de vida anualizado, é dividido pela energia consumida pela carga para se determinar o custo da energia do sistema. Este custo pode indicar o valor mínimo de tarifa a ser cobrado para que o sistema gere lucros, ou pode ser comparado ao custo da energia de outras tecnologias de geração para se determinar aquela que é a mais viável.

SISTEMAS INSTALADOS E EXPERIÊNCIAS ADQUIRIDAS NA AMAZÔNIA

Desde 1994, estudos, simulações e instalações de sistemas híbridos em pequenos aglomerados populacionais dispersos e semi ou totalmente isolados têm sido realizados na região amazônica por instituições nacionais e internacionais.

Nos últimos 14 anos foram seis sistemas híbridos instalados e um atualmente em processo de implantação, a saber: (1996) fotovoltaico-diesel de Campinas/AM; (1997) fotovoltaico-eólico de Joanes/PA; (1998) eólico-diesel de Praia Grande/PA; (1999/2007) eólico-diesel de Praia Grande/PA; (2001) fotovoltaico-diesel de Araras/RO; (2003) fotovoltaico-eólico-diesel de São Tomé/PA; e (2008) fotovoltaico-eólico-diesel de Sucuriju/AP.

Tecnicamente, a seleção dessas vilas para a implantação dos sistemas híbridos baseou-se na avaliação objetiva e equilibrada do potencial das fontes solar e eólica, da acessibilidade do local, da disponibilidade de área apropriada para instalação e da disponibilidade de óleo diesel.

A carga do tipo residencial (televisores, refrigeradores, ferro de passar, lâmpadas incandescentes e fluorescentes etc.) predomina na demanda total de eletricidade das vilas. Dentre estas cargas, os eletrodomésticos correspondem a mais de 70%. Quanto aos tipos de cargas de iluminação, destacam-se as lâmpadas fluorescentes, fluorescentes compactas e as incandescentes de várias potências.

O perfil de carga das localidades é bem semelhante, com a demanda máxima sempre ocorrendo nas primeiras horas do anoitecer (18h00 às 21h00), decorrentes das entradas de cargas comumente usadas neste período (lâmpadas e televisores, por exemplo), enquanto que as menores demandas ocorrem no período da manhã, através da utilização de cargas eventuais (ferro de passar, máquina de lavar etc.).

Os custos operacionais dos sistemas híbridos são inferiores comparados aos de um sistema unicamente a diesel. A redução decorre da penetração da geração renovável e do hibridismo das fontes de energia, o que agrupa os benefícios de cada subsistema de geração.

Todavia, constata-se ainda o elevado custo do kWh gerado, em comparação com a tarifa média cobrada na região para o atendimento convencional. Isso se deve ao elevado custo de aquisição dos “geradores renováveis” (importados). O desenvolvimento de equipamentos com tecnologia nacional de baixo custo poderá amenizar esse quadro.

Dentre os problemas de qualidade de energia enfrentados pelos sistemas híbridos, destacam-se como os principais: distorções harmônicas (utilização de cargas não lineares, por exemplo, lâmpadas PLs, refrigeradores, televisores); desbalanceamento de potência nas fases; afundamentos de tensão (elevada corrente de surto devida ao acionamento de motores elétricos); quedas de tensão (principalmente, nos finais de rede); variação de frequência (sistema diesel-elétrico operando – falta de controle tensão/frequência apropriado); descontinuidade no fornecimento (intermitência das fontes renováveis, aliada à falta de recursos financeiros suficientes para a compra de óleo diesel).

Com relação aos impactos ambientais, os mesmos são insignificantes. Isso pode ser evidenciado por nenhuma manifestação de descontentamento com o ruído por parte dos moradores próximos dos sistemas; atração visual que se tornaram os sistemas híbridos com os aerogeradores e suas grandes torres; pequeno espaço físico utilizado pelos sistemas, que não ocasiona perda de espaço para outras finalidades. Na fauna, até o presente momento, não há nenhum impacto significativo, com exceção de duas ocorrências de colisão de urubus contra os aerogeradores dos sistemas híbridos de São Tomé e Tamaruteua.

Dentre os impactos socioeconômicos, destacam-se: substituição total ou parcial das mais diversas fontes de energia elétrica; crescimento populacional das vilas; aumento de atividades comerciais de comércios/bares, padarias, armazéns, entre outros; aumento na renda familiar.

Visitas de pessoas, grupos nacionais e estrangeiros de pesquisa interessados nas experiências

adquiridas com os sistemas híbridos e o crescimento acentuado da carga instalada e de UCs configuram-se como outros impactos.

Referindo-se à gestão desses sistemas, dois modelos são utilizados. Em um, os moldes administrativos são delineados pela própria concessionária local, a qual é a única responsável pelo gerenciamento do sistema, determinando as estratégias de operação, manutenção e aplicando as tarifas pelo serviço de energia elétrica prestado (Campinas e Joanes). O outro modelo tem seus arcabouços sustentados por uma administração realizada pelas próprias comunidades (associação comunitária), em parceria com as prefeituras municipais e, temporariamente, com o agente executor do projeto (Praia Grande, Tamaruteua e São Tomé). Com relação à captação dos recursos (tarifação pelo serviço de energia), em Praia Grande aplicam-se taxas mensais, cujos valores variam de acordo com o número de equipamentos eletro-eletrônicos instalados nas UCs. Em São Tomé e, recentemente, em Tamaruteua (revitalização), destaca-se o sistema de pré-pagamento de energia. Araras é a exceção dos modelos expostos, gestão feita por um produtor independente de energia (PIE-GUASCOR).

Problemas operacionais devidos principalmente à falta de manutenção e ao crescimento demasiado da demanda comprometeram o funcionamento dos sistemas híbridos de Campinas e Joanes.

Por fim, a má gestão também se faz presente em alguns sistemas, caso de Praia Grande e Tamaruteua (antes da revitalização), onde tais sistemas, após períodos satisfatórios de operação (3 e 4 anos, respectivamente), entraram em processo de falência operacional devido basicamente à: escassez de recursos financeiros captados para manutenção; aplicação de manutenção inadequada por pessoas não especializadas; quase nenhuma participação das prefeituras municipais.

MODELOS DE GESTÃO E REGULAÇÃO

Os problemas de gestão de sistemas com fontes intermitentes suprindo minirredes estão intimamente associados com a sustentabilidade dos mesmos e a questões de ausência de regulamentação. No atual contexto, onde o próprio caráter intermitente das fontes, associado a uma cultura de utilização pouco racional da carga, favorece situações de descontinuidade no atendimento, a administração destes sistemas por parte da concessionária é um risco grande, uma vez que falhas no atendimento podem resultar em onerosas penalidades à concessionária.

Partindo do cenário atual, onde a maioria dos sistemas híbridos instalados no Brasil é de caráter experimental, o primeiro problema de gestão a ser solucionado insere-se na realidade das comunidades onde os sistemas pilotos foram instalados: sistema inicialmente sem a figura de um responsável legal, que deve manter-se através de esforços da própria comunidade, com participação de órgãos governamentais, não-governamentais, universidades e outros, bem como da própria entidade executora do projeto, quando for o caso.

Neste caso, modificações na forma de gerir o sistema devem ser providenciadas. A primeira ação proposta é a formação de uma comissão gestora na comunidade, atuando de forma conjunta para gerir e administrar o sistema, buscando sua sustentabilidade. Tal comissão deve incluir, entre outros participantes, os operadores do sistema, outros membros da comunidade, necessariamente de grupos distintos, representantes da administração municipal e técnicos especialistas dos agentes executor, financiador e colaborador do projeto, mesmo que façam parte da comissão temporariamente.

Dentre os atributos da comissão gestora, destacam-se: a definição de planos estratégicos; o esclarecimento das limitações de geração do sistema híbrido; a educação da comunidade quanto ao uso racional da energia elétrica; o estabelecimento de parcerias com instituições diversas; a avaliação do valor da tarifa pelo serviço; a avaliação dos tipos de setores que terão prioridade no serviço; a capacitação, por parte dos agentes externos, dos membros da comunidade que compõem a comissão gestora; o envolvimento da comunidade no processo de instalação/expansão do sistema; o atendimento das unidades consumidoras desassistidas; e o acompanhamento e fiscalização do sistema de eletrificação.

Estas ações constituem-se em importante passo para garantir a sustentabilidade do sistema. Porém, em casos onde os critérios de atendimento devam ser compatíveis com os atualmente verificados na legislação do setor elétrico, os modelos de gestão que sigam as diretrizes aqui apontadas por si só não garantem a sustentabilidade de um sistema híbrido. Surge a necessidade da proposta por modelos regulatórios que tornem a legislação adequada à realidade de sistemas com as características de sistemas híbridos suprimindo minirredes.

Os modelos regulatórios propostos são centrados em três pontos: a inserção de subsídios ao sistema; a flexibilização do período de atendimento; e a definição de um sistema de tarifação adequado.

A inserção de subsídios faz-se necessária devido à discrepância atualmente verificada entre o custo da energia gerada por sistemas híbridos e o custo de tarifas praticadas pelas concessionárias nacionais, principalmente no atendimento a consumidores de baixa renda, casos típicos de comunidades isoladas. A proposta é pela criação de um benefício, em moldes similares aos da Conta de Consumo de Combustíveis Fósseis (CCC), que privilegie os sistemas isolados, independentemente da fonte de geração. O benefício substituiria, então, a CCC, sendo criada uma Conta de Geração de Energia (CGE).

A flexibilização do horário de atendimento, já um anseio de concessionárias que operam sistemas termelétricos isolados, seria aplicada a casos específicos, onde o perfil dos moradores seja condizente com a flexibilização, e onde a localidade disponha de recursos renováveis moderados, com o atendimento ininterrupto resultando em custos muito elevados, associados ao superdimensionamento dos sistemas de geração e armazenamento. Algumas características desta flexibilização, já encontradas em forma de minuta de resolução, são: potência nominal inferior a 300 kW para o sistema de geração; fornecimento de energia elétrica observando um total mínimo de seis horas diárias, divididas no máximo em dois períodos diários; e fornecimento de energia em período reduzido, não aplicável para localidades que já possuam serviço público essencial ou de interesse da coletividade. A proposta é pela simples adequação desta minuta para a realidade de sistemas híbridos, onde, por exemplo, os períodos de atendimento podem ser distintos entre várias unidades consumidoras, uma vez que tecnologias de medidores eletrônicos permitem tal facilidade, além do fato de, em sistemas renováveis, o custo para manter o sistema operando para atender apenas uma unidade não ser proibitivo como no caso de unidades geradoras termelétricas.

Sistemas de tarifação adequados a sistemas híbridos suprimindo minirredes possuem dois pontos principais: a utilização de tecnologia de medição adequada e a limitação do uso da energia por parte do consumidor. Com relação ao primeiro ponto, a proposta é pela adoção de sistemas pré-pagos de medição, visando à redução dos custos operacionais. Estes sistemas agregam as principais vantagens do sistema de medição convencional à maior simplicidade operacional do sistema de cobrança de taxas fixas. Quanto à limitação do uso da energia, a proposta é pelo

estabelecimento de faixas de consumo para cada comunidade, com base no recurso renovável disponível e na energia demandada pela carga. Períodos de recursos renováveis escassos seriam associados à maior limitação no uso da energia, com a geração diesel-elétrica impedindo que essa redução seja muito drástica. Em contrapartida, em períodos de recursos fartos a limitação seria pouco significativa. Propõe-se ainda a divisão dos consumidores por classes, com aqueles de maior consumo, como os estabelecimentos comerciais, compondo uma classe com maior limite de consumo, enquanto que aqueles de menor consumo compõem outra classe, com menores limites. Todas as características descritas podem ser associadas a medidores eletrônicos, que seriam responsáveis pelos cortes por tempo ou por excedente de demanda, alertas ao usuário, entre outras funções.

2 Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos

SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA A AMAZÔNIA

Geraldo Lúcio Tiago Filho (*coordenador*)

Ângelo Stano Júnior

Antônio Brasil Júnior

Jason Tibiriçá Ferrari

Helmo Lemos

Caroline Fernandes Nunes

Camila Fernandes Nunes

Juliana Sales Moura

Luis Henrique de Faria Alves

Rodrigo Ramos

Rudi Van Els

Frederico Leite

INTRODUÇÃO

O uso da energia elétrica para o meio rural é um dos processos mais importantes a serem incentivados no Brasil, pois a eletrificação é fundamental para a implementação de programas de desenvolvimento, além de ser um fator-chave para aumentar a produtividade no campo e para melhorar as condições de trabalho e de vida.

A eletrificação de comunidades isoladas deve ser um processo humano, social, econômico e ambiental em cujo contexto devem estar inseridos a sociedade e o meio ambiente, que são formadas por indivíduos, famílias, vizinhos e diversos grupos sociais e espécies que, por sua vez, têm seus interesses e suas necessidades quanto à educação, saúde e disposição ao trabalho, às atividades produtivas, geração de renda e melhoria da sua qualidade de vida e desenvolvimento social.

Entretanto, em se tratando da região da Amazônia Legal, os desafios para o atendimento de uma população extremamente dispersa ao longo das calhas dos rios, apresentam-se extremamente grandes, principalmente no que se refere à operação e manutenção da sustentabilidade da unidade geradora.

Diante do grande potencial existente na região, as microcentrais (μ CH) e as minicentraís (mCH) hidrelétricas podem vir a ser uma boa opção para o atendimento dessas comunidades.

Esse capítulo procura mostrar a tecnologia existente que envolve esse tipo de empreendimento e apresenta alguns casos concretos desenvolvidos na região.

DISTRIBUIÇÃO DA POPULAÇÃO NA AMAZÔNIA LEGAL

De acordo com estimativas do IBGE, em 2004 a população da Amazônia Legal, com uma área correspondente a 59% do território brasileiro, compunha-se de aproximadamente 12,34% da população do País, ou seja, em torno de 22 milhões de pessoas, cuja distribuição ocorre de forma heterogênea, com grande concentração populacional nas capitais e bastante pulverizada no interior, em localidades distribuídas em áreas de difícil acesso. De acordo com o grau de pressão exercida pela atividade humana sobre o ambiente, as áreas ocupadas podem ser:

- ♦ Áreas com baixa pressão ambiental, geralmente ocupadas por terras indígenas e povoamentos dispersos, localizados principalmente em Roraima, no norte do Pará, noroeste do Amapá, no sudeste do Amazonas e no Acre;
- ♦ Áreas com elevada pressão ambiental, ocupadas por povoamentos influenciados pela fronteira agrícola e de exploração mineral e de madeira, como a Amazônia central, o oeste de Rondônia e o centro-sul do Pará.

Além do Maranhão, também fazem parte da Amazônia Legal os Estados do Tocantins e do Mato Grosso, sendo que nesses dois últimos há uma forte pressão sobre o ambiente, principalmente devido às atividades agrícolas, com a plantação da soja e a criação de gado.

O ATENDIMENTO DE ELETRICIDADE ÀS COMUNIDADES ISOLADAS

A energia é fator primordial para a humanidade, constituindo-se num dos pilares para que se possa obter desenvolvimento social e econômico e para alcançar a qualidade de vida desejável a qualquer ser humano.

É de fundamental importância conceber o fornecimento da energia elétrica na totalidade de seu uso, considerando sua inserção num contexto social, econômico e ambiental, de forma racional, prudente e equilibrada, e ao mesmo tempo, que permita alavancar o desenvolvimento sustentável da comunidade e, conseqüentemente, da Amazônia Legal e do País.

O plano de gestão energética deverá ser participativo e sustentável, sendo necessário criar estratégias que suportem esse crescimento proporcionado pela energia elétrica e o benefício advindo do uso produtivo da energia.

No Brasil, convencionalmente, o sistema de transmissão e distribuição é caracterizado por dois sistemas distintos:

- ♦ **Interligado** – o mais importante, é caracterizado pela geração concentrada em grandes centrais, principalmente hidrelétricas, interconectadas a um sistema de transmissão construído de forma a atender os grandes centros consumidores do País. Esse sistema corresponde a 96,7 % da capacidade instalada e atende 98% do mercado de energia do Brasil.
- ♦ **Isolado** – com apenas 3,13% da capacidade instalada, é de predominância térmica e está distribuído na região amazônica, onde uma parte da população está concentrada em alguns centros urbanos e os demais moradores em pequenos núcleos habitacionais dispersos ao longo das margens das calhas dos rios.

Vê-se que o mercado do sistema interligado é mais atraente do que o do isolado. Além disso, os altos custos para construção das extensões das linhas; as dificuldades para a transposição dos acidentes geográficos (grandes áreas de floresta, áreas alagadas, grandes rios) o alto nível de dispersão dessas áreas; e a baixa demanda por energia levam, muitas vezes, ao desinteresse por parte das concessionárias ao atendimento adequado a essas comunidades.

De acordo com Di Lascio (2006), o censo realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em 2000, indicou que o número de habitações sem o atendimento de energia elétrica na Amazônia era de 770 mil, o que resultaria numa população em torno de 3,8 milhões de pessoas. Dessas, calcula-se que aproximadamente 615 mil residências estariam em condições de serem atendidas via “extensão de redes”, o que deixa um saldo de 155 mil residências. Segundo o autor, desse total, 55 mil encontram-se extremamente isoladas, ou reunidas em duas ou três casas que poderão ser supridas preferencialmente por sistemas fotovoltaicos. As 100 mil habitações restantes estariam distribuídas em vilarejos, de 4 a 100 residências, onde o mais adequado será o atendimento por uma unidade geradora, cuja energia deverá ser distribuída por minirredes.

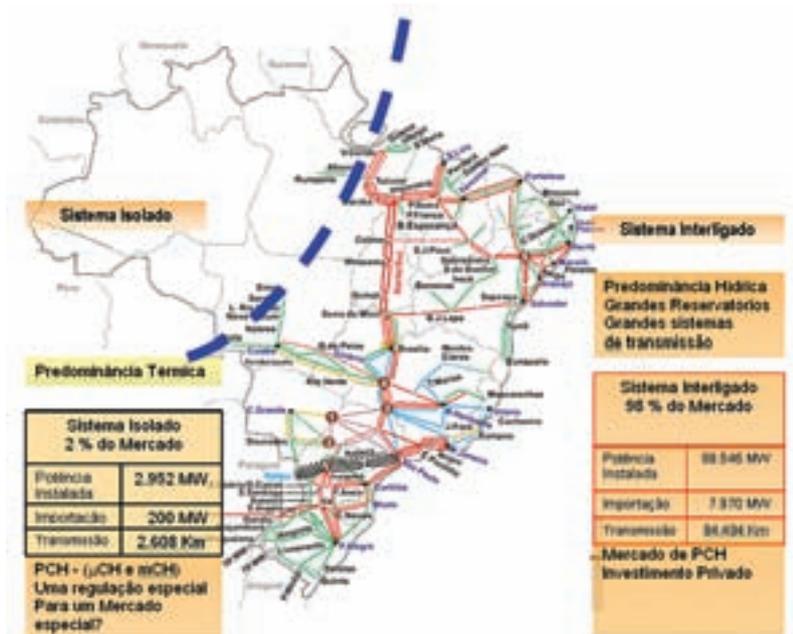


Figura 2.1 – Sistema brasileiro de distribuição de energia elétrica: sistema isolado e sistema interligado

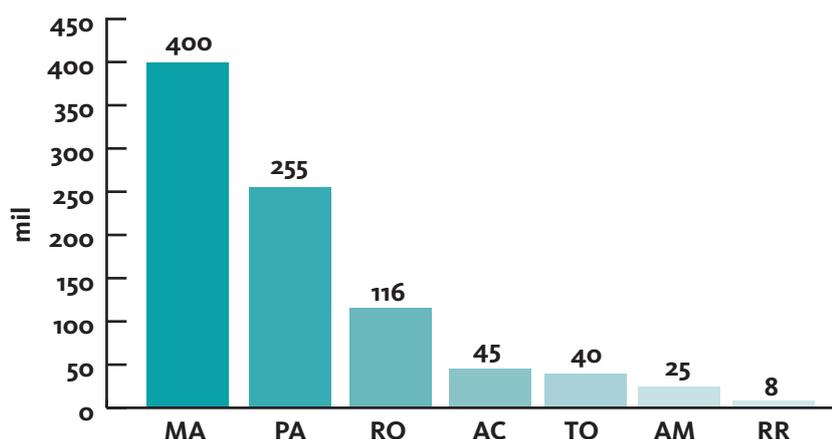
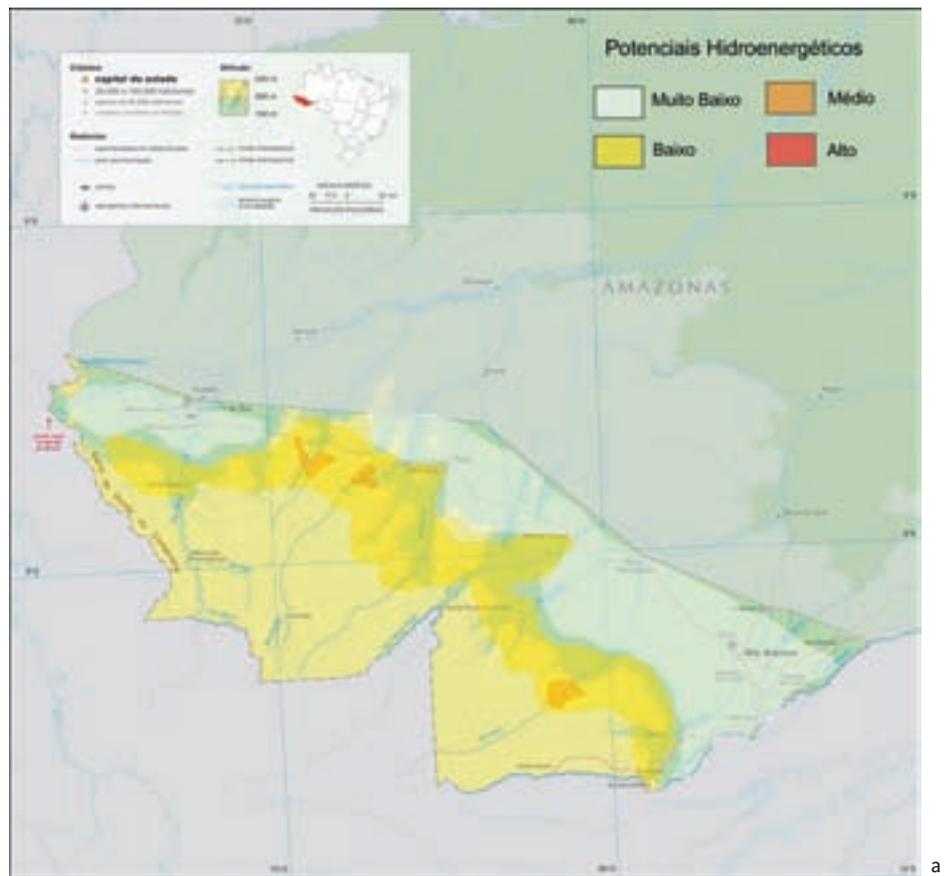


Figura 2.2 – Domicílios não atendidos por energia elétrica nos estados da Região Norte. Fonte: ABRADÉE (apud Rodrigues 2006)

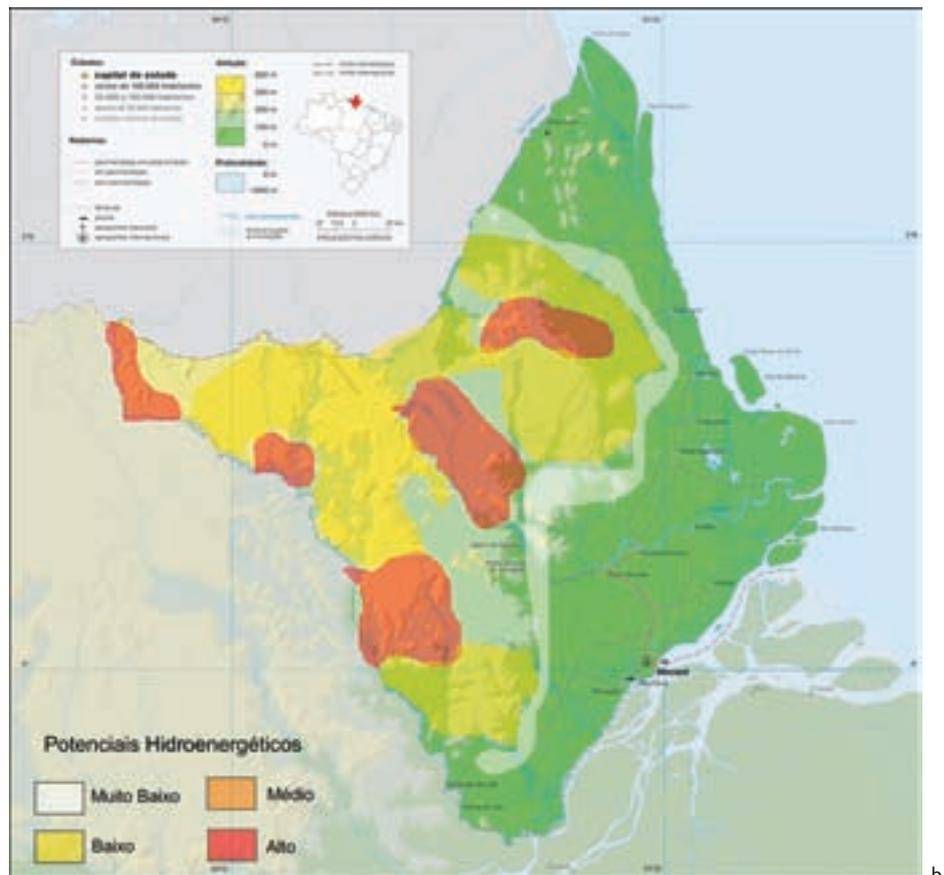
O gráfico apresentado na figura 2.2 mostra, por Estado, o número de habitações sem atendimento de energia elétrica da Amazônia Legal. Embora o menor número encontre-se no Amazonas e em Roraima, o desafio de atendê-los é ainda maior.

O ATENDIMENTO ÀS COMUNIDADES ISOLADAS

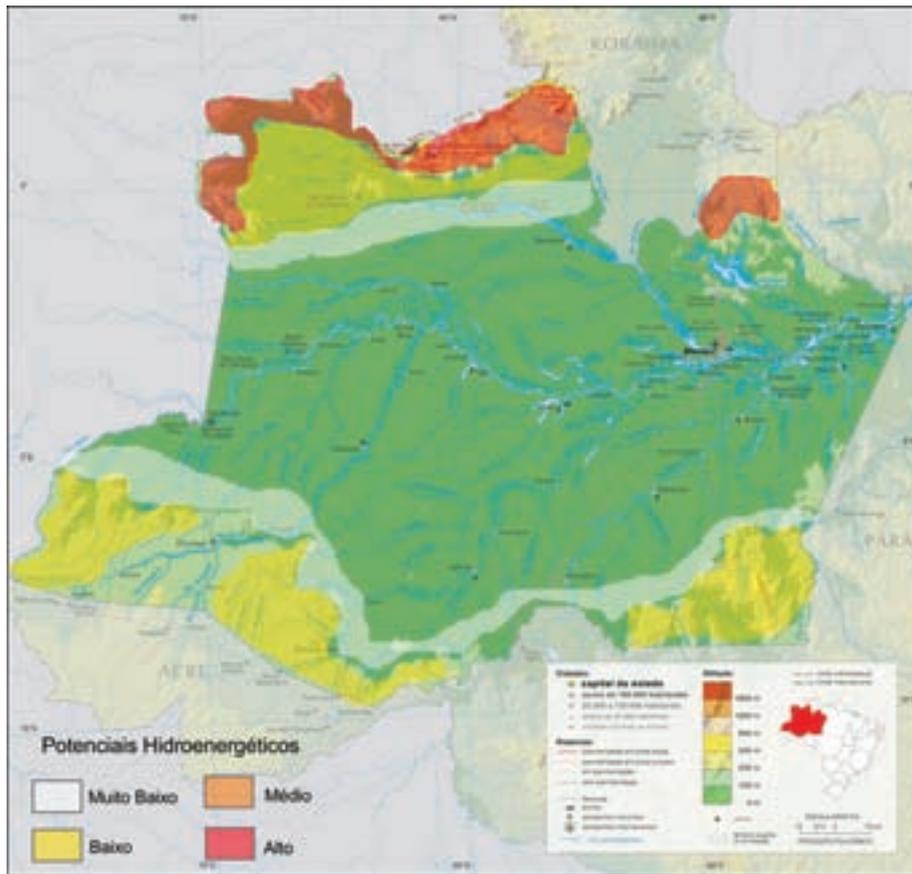
A despeito da grande disponibilidade hídrica, a topografia pouco acidentada, a baixa declividade e as grandes dimensões dos rios e a baixa demanda *per capita* têm inibido ou inviabilizado a implantação de unidades de μCH e mCH na região amazônica. Entretanto, sítios localizados nas bordas da Amazônia Legal mostram-se propícios à implantação dessas pequenas unidades de geração, tais como os mostrado nos mapas mostrados na figura 2.3.



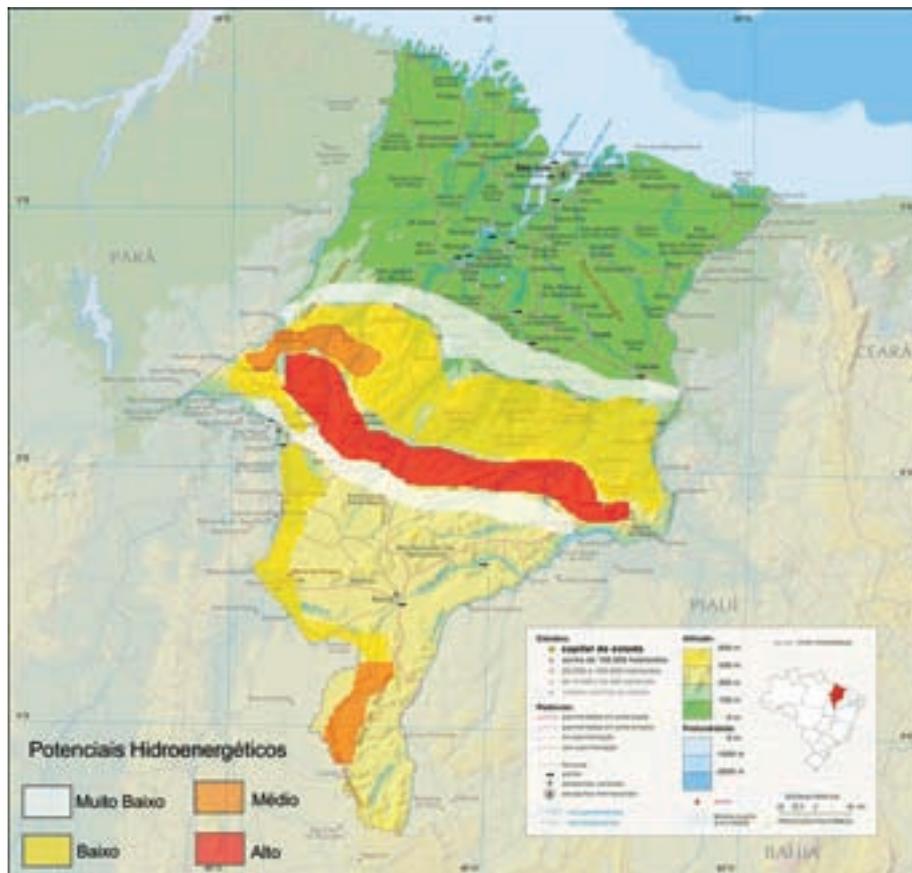
a



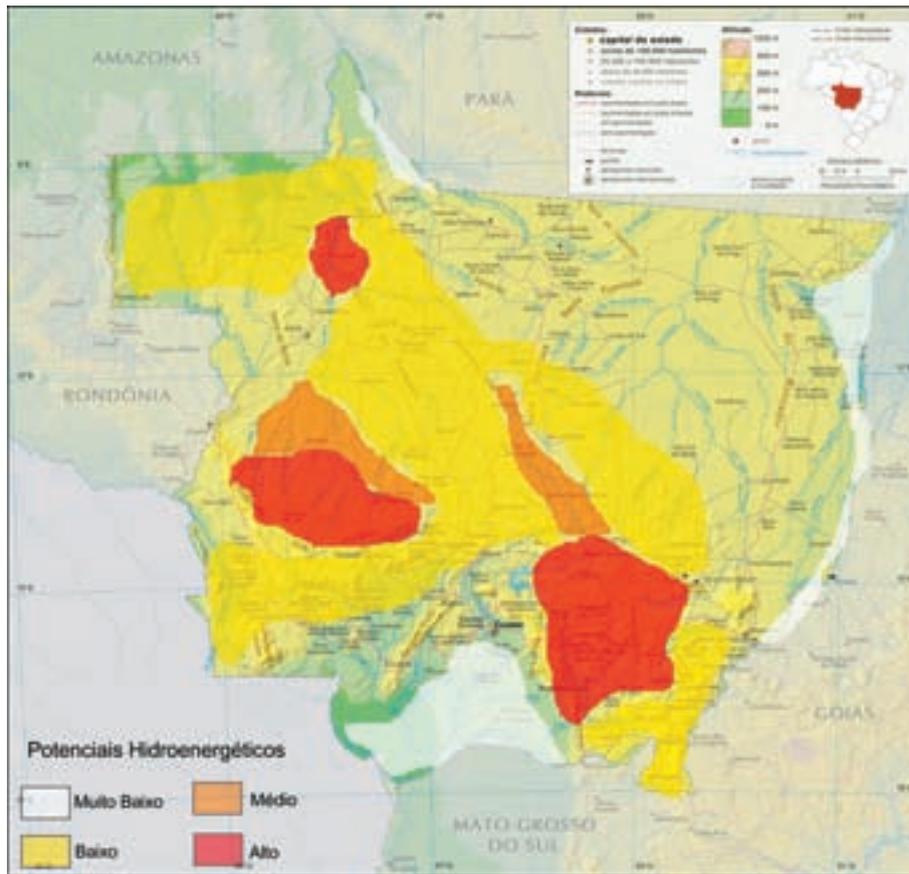
b



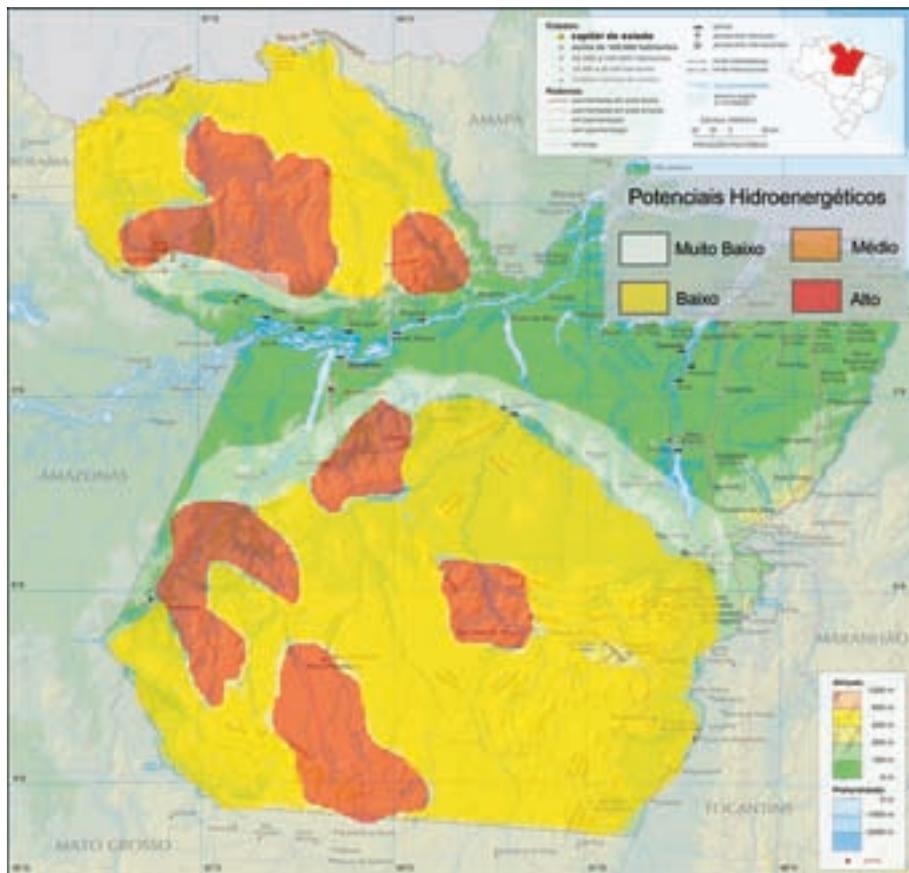
c



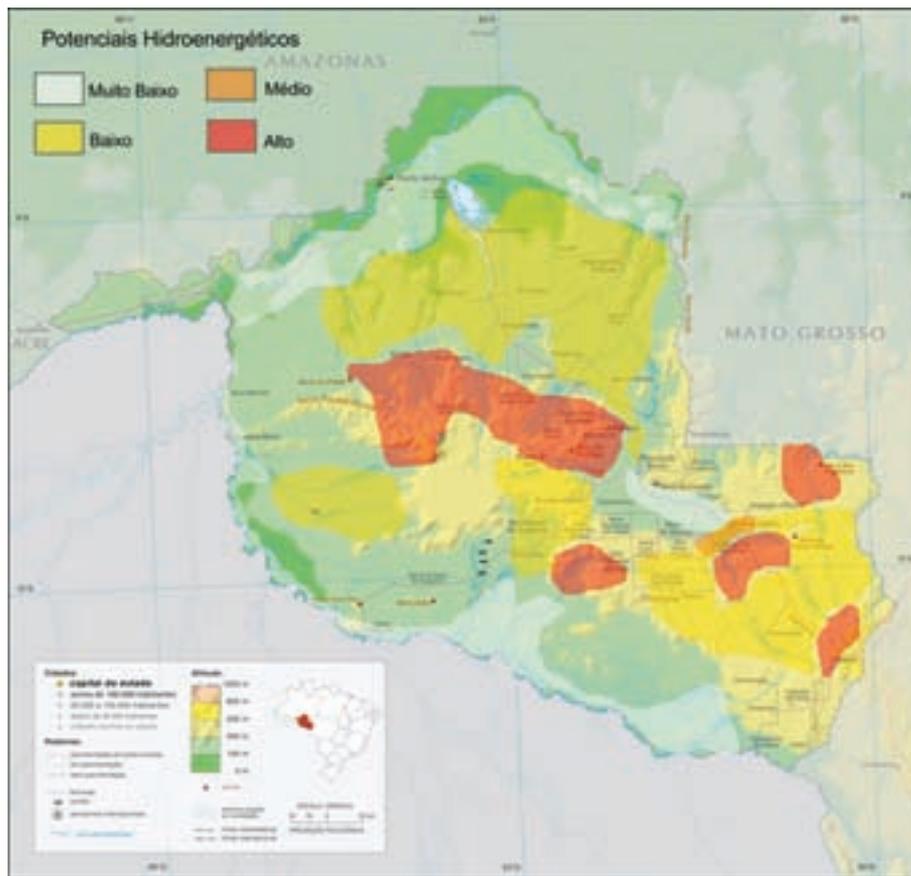
d



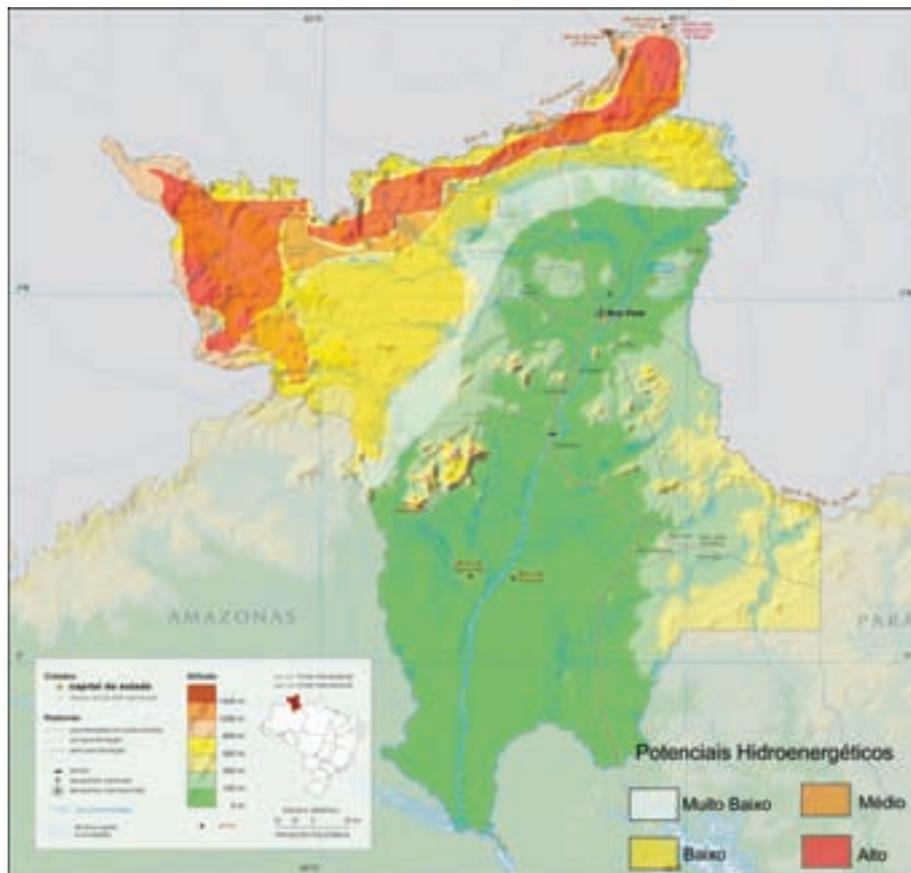
e



f



g



h

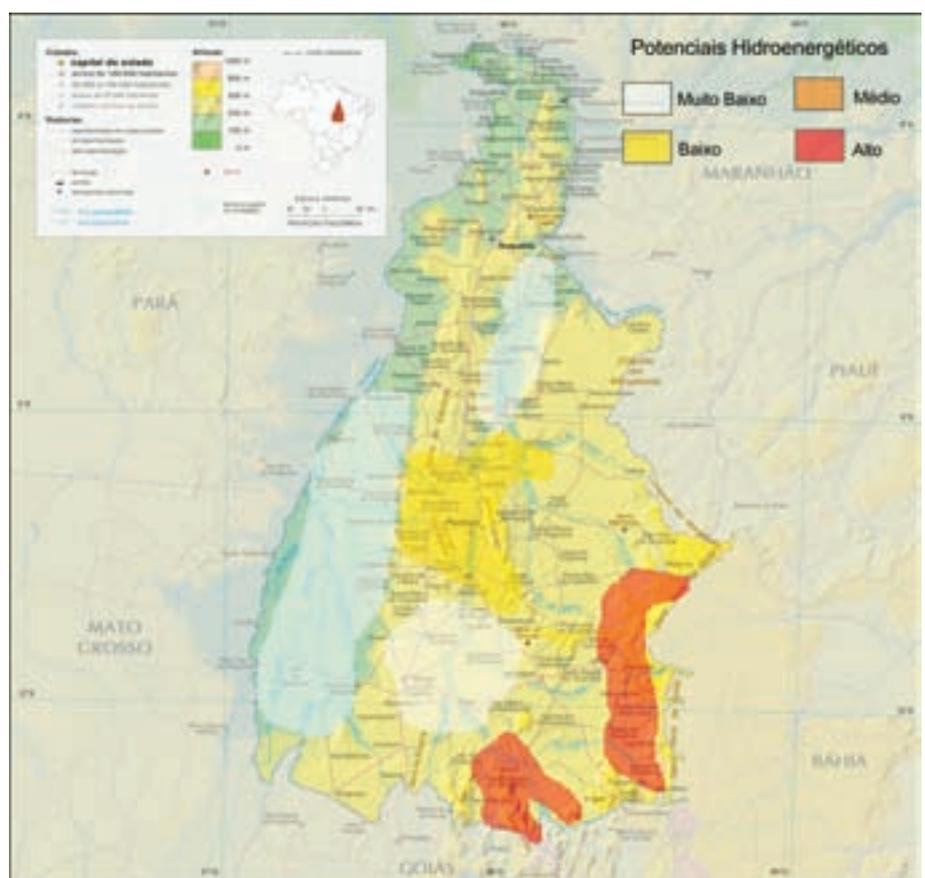


Figura 2.3 – Campos propícios à implantação de μ CH e mCH na Amazônia Legal: (a) Acre; (b) Amapá, (c) Amazonas, (d) Maranhão; (e) Mato Grosso, (f) Pará; (g) Rondônia (h) Roraima; (i) Tocantins

Embora a biomassa e os recursos hídricos sejam predominantes na região amazônica, a maioria das comunidades isoladas, quando supridas por energia elétrica, o são por geradores diesel, mais fáceis de serem instalados. Nestes casos é comum que o grupo gerador seja de propriedade privada, individual ou comunitária, cujos proprietários o adquirem e o administram juntamente com a minirrede, se existente. Na maioria das vezes a capacidade de geração destas unidades está entre 5 e 50 kW, com o combustível comprado por atravessadores que o transportam e oferecem em barcaças, praticando custos abusivos. Aqueles que dispõem de recursos de transporte podem comprar o combustível na sede do município, porém, muitas vezes, o custo do transporte anula a economia feita.

Outro agravante é o fato de que, por falta de informação e de mão-de-obra qualificada nas comunidades, a maioria desses geradores encontra-se em estado de conservação precário, resultando em baixas eficiências e alto consumo de combustível. De acordo com Di Lascio (2006), alguns desses geradores, quando bem conservados, apresentam um consumo de óleo diesel de 350 g/kWh, mas, quando mal conservados, podem chegar a um consumo de combustível próximo de 500 g/kWh. Ao se considerar o custo do combustível praticado na região, chega-se a valores da ordem de R\$0,77 a R\$2,00 o kWh gerado.

As μ CH e mCH

Conforme mostra a figura 2.4, uma central hidrelétrica é composta por um sistema de captação e de adução da água até o grupo gerador que transforma a energia hidráulica disponibilizada em eletricidade. Essa é transmitida até o ponto de consumo e/ou de interligação, através de cabos elétricos.

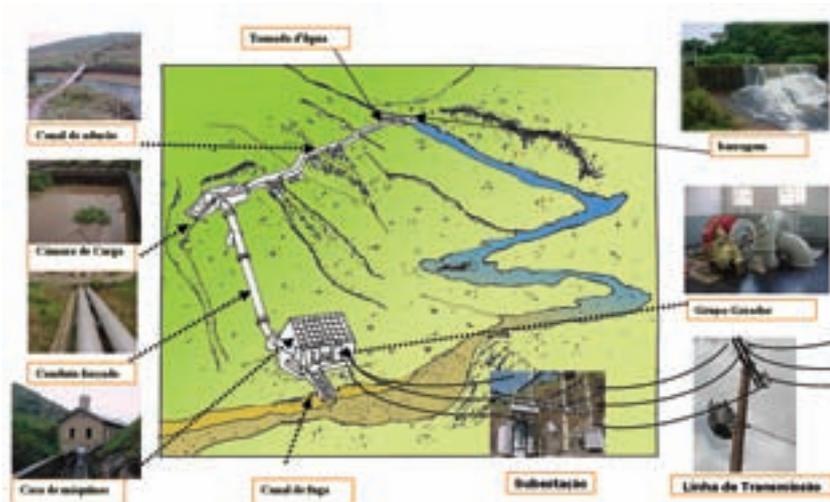


Figura 2.4 – Componentes principais de centrais hidrelétricas de pequeno porte. Fonte: Manual OLADE (1992)

No Brasil, de acordo com a Resolução ANEEL N° 394, de 4 de dezembro de 1998, são classificadas como pequenas centrais hidrelétricas os aproveitamentos hidroenergéticos que tenham potência superior a 1 MW e igual ou inferior a 30 MW e área total do reservatório igual ou inferior a 3,0 Km², determinado pelo nível da água referente à cheia com o tempo de recorrência de 100 anos. Entretanto, a Resolução ANEEL N° 652 de 2003 ampliou o limite da área do reservatório para até 13 km², desde que verificada a seguinte relação:

$$S_{\text{reservatório}} \leq \frac{P}{H} \leq 13 \text{ km}^2 \quad \text{equação 2.1}$$

P [kW] e H [m].

Contudo, se for levada em conta a Portaria N° 136, de 6 de outubro de 1987, do Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica (DNAEE), e a Resolução N° 394 da ANEEL, sugere-se que as PCHs sejam classificadas de acordo com a potência, conforme mostra a tabela 2.1, onde está acrescida a classe da picocentral hidrelétrica (π CH), já em uso em alguns países.

Classificação	Sigla	Faixa de potência KW		
		DNAEE	ANEEL	Proposta CERPCH
Picocentral Hidrelétrica*	π CH	Até 5	-	Até 5
Microcentral Hidrelétrica	μ CH	De 5 até 100	-	De 5 a 100
Minicentral Hidrelétrica	mCH	De 100 até 1000	-	De 100 a 1000
Pequena Central Hidrelétrica	PCH	De 1000 até 10000	1 a 30 000	1 a 30.000

(*) classificação não oficial, proposta pelo CERPCH

Tabela 2.1 – Classificação das PCHs, segundo a Resolução N° 394 da ANEEL e Portaria N° 136 do DNAEE

Porém, levando-se em conta que, a princípio, as PCHs devem ser empreendimentos com baixos impactos ambientais e, para efeito de crédito de carbono no mecanismo de desenvolvimento limpo previsto pelo Protocolo de Quioto, elas devem apresentar a relação de 4 km²/kW, sugere-se que a área do reservatório para as μ CH e mCH não deva ultrapassar essa relação, ou seja:

$$S_{RES} \leq 0,8 \cdot Q^{0,75} \leq 4 \text{ km}^2 \quad \text{equação 2.2}$$

Onde S_{RES} [km²], Q [m³/s]

O ESTADO DA ARTE DAS μ CH E MCH

A indústria nacional está qualificada e bem aparelhada para fornecer todos os equipamentos elétricos e hidromecânicos para as centrais hidrelétricas, principalmente para as μ CH e mCH, como comportas, condutos, válvulas, turbinas hidráulicas, geradores, reguladores de velocidade, sistemas de controle, comando, de automação e de supervisão das centrais.

A figura 2.5 mostra a vista geral de dois grupos geradores: o primeiro, da PCH do Alto Jaurú, de 15 mW de potência; e o segundo, de 800 kW, da PCH Luiz Dias.



Figura 2.5 – Grupo Gerador: (a) PCH Alto Jaurú: a excitatriz, o gerador, a caixa espiral da turbina e a válvula borboleta; (b) PCH Luiz Dias, a excitatriz, o gerador, o volante de inércia, o regulador de velocidade óleo hidráulico e a caixa espiral da turbina hidráulica.

Turbinas Hidráulicas

Basicamente, as turbinas hidráulicas são classificadas como de ação e de reação, conforme a tabela 2.3, a seguir, onde estão resumidas as principais características das turbinas, que são classificadas em função da rotação específica, n_{qa} , determinada pela relação:

$$n_{qa} = 3 \cdot n \cdot \frac{Q^{0,5}}{H^{0,75}} \quad \text{equação 2.3}$$

Onde: n [rpm]; Q [m³/s] e H [m].

As tabelas 2.2 e 2.3 apresentam os diferentes tipos de turbinas convencionais e não convencionais para as μ CHs e mCHs fabricadas no Brasil, cujos campos de aplicação são apresentados nas figuras 2.13 e 2.14.

TIPO	Nome	Rotação Específica n_{qa}		Vazão Q [m³/s]	Queda H[m]	Potência kW	$\eta_{m\acute{a}x}$
		Nº jatos	N_{qa}				
AÇÃO	Pelton	1	4 a 30	0,05 a 0,8	30 a 500	0,1 a 1.000	70 a 91
		2	6 a 42				
	Francis	Tipo	N_{qa}	0,01 a 10	2 a 150	1 a 1.000	80 a 93
		Lenta	60–180				
		Normal	150–260				
		Rápida	260–350				
REAÇÃO	Hélice	260–800		0,8 a 25	2 a 40	5 a 1.000	88 a 93
	Kaplan	300 a 800					
	Tubular						
	Bulbo			1 a 30			

Tabela 2.2 – Campo de aplicação das turbinas hidráulicas convencionais para μ CH e mCH.

TIPO	Nome	Rotação Específica n_{qa}	Vazão Q [m³/s]	Queda H[m]	Potência kW	$\eta_{m\acute{a}x}$
Ação	Turgo*	60 a 260	0,01 a 4	5 a 250	5 a 1.000	85 a 90
	Michell-Banki	45 a 180	0,01 a 1,2	1 a 50	1 a 150	65 a 82
REAÇÃO	Bomba Funcionando Como Turbina – BFT**	60 a 180	0,015 a 0,2	5 a 100	1 a 80	65 a 80
	Gerador periférico**	300 a 800	1 a 30	2 a 30	25 a 200	90 a 93

* não fabricada no Brasil; ** em fase experimental.

Tabela 2.3 – Principais características – turbinas hidráulicas não convencionais para μ CH e mCH.

Também é possível distribuir os diferentes tipos de turbinas em diagramas que mostrem os tipos de máquinas que melhor se adaptam às condições de queda e de rotação específica, conforme apresentado no diagrama da figura 2.6.

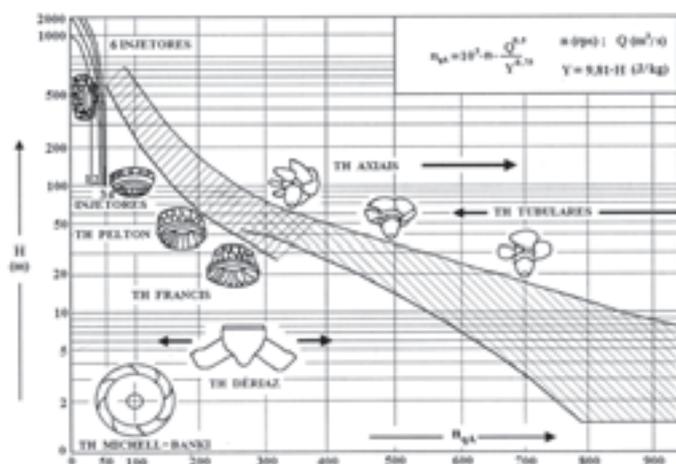


Figura 2.6 – Diagrama de Cordier: campo de aplicação das turbinas hidráulicas em função da sua rotação específica e queda disponível. Fonte:Souza (1999).

Turbinas Convencionais

Conforme mostrado nas tabelas 2.2 e 2.3, as turbinas hidráulicas convencionais normalmente aplicadas em centrais hidrelétricas de uma maneira geral são: a Pelton, a Francis, a Hélice e a Kaplan, e que estão apresentadas nas figuras 2.7 a 2.10. Conforme mostram os gráficos das figuras 2.13 e 2.14, estas atendem praticamente a todo o campo de aplicação das μ CH e mCH.



Figura 2.7 – Rotor Francis: a) lento; b) normal; c) rápido.



Figura 2.8 – Rotor de turbina Kaplan: (a) vista frontal; (b) vista lateral.



Figura 2.9 – Turbina Kaplan “S” com acoplamento do gerador: (a) e (b) Turbina “S” fabricação Haker – SC, Brasil.



Figura 2.10 – Turbina Bulbo: (a) com rotor de pás móveis, gerador interno, a montante, sendo inspecionada na fábrica; (b) tipo tubular com acoplamento do gerador a jusante, em operação.

Turbinas não convencionais

Como tipos de turbinas não convencionais têm-se: a Turgo – ainda não fabricada no Brasil –, a Michell-Banki, a Bomba Funcionando como Turbina (BFT) e a axial com gerador periférico, ainda experimental, mostradas nas figuras 2.11 e 2.12. Estas turbinas atendem a pequenos potenciais, cujos campos de aplicação também estão plotados nos gráficos das figuras 2.13 e 2.14.



Figura 2.11 – Turbinas Hidráulicas desenvolvidas pela Unifei: (a) Michell-Banki e (b) Bomba Funcionando como Turbina – BFT



Figura 2.12 – Roda Pelton: (a) Grupo gerador com roda Pelton, fabricação Alterima (no primeiro plano vê-se um grupo gerador com turbina Michell-Banki – Unifei); (b) roda Pelton.

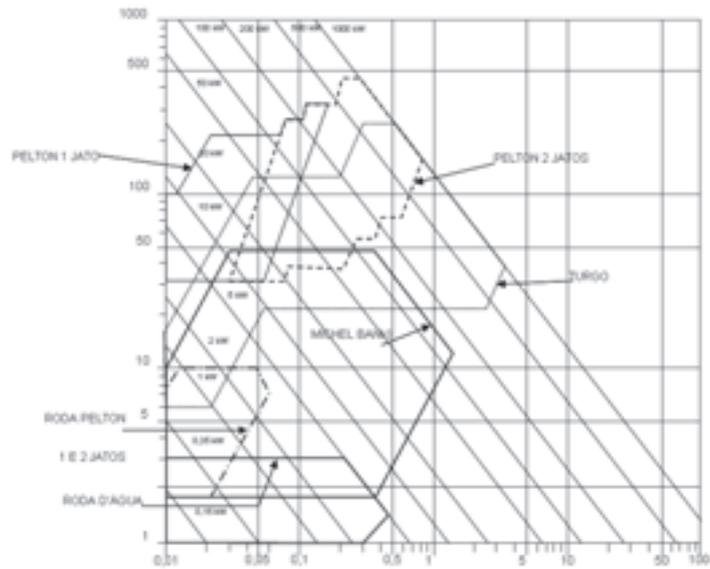


Figura 2.13 – Campo de aplicação das principais turbinas de ação para μ CH e mCH com potência até 1000 kW, de fabricação brasileira

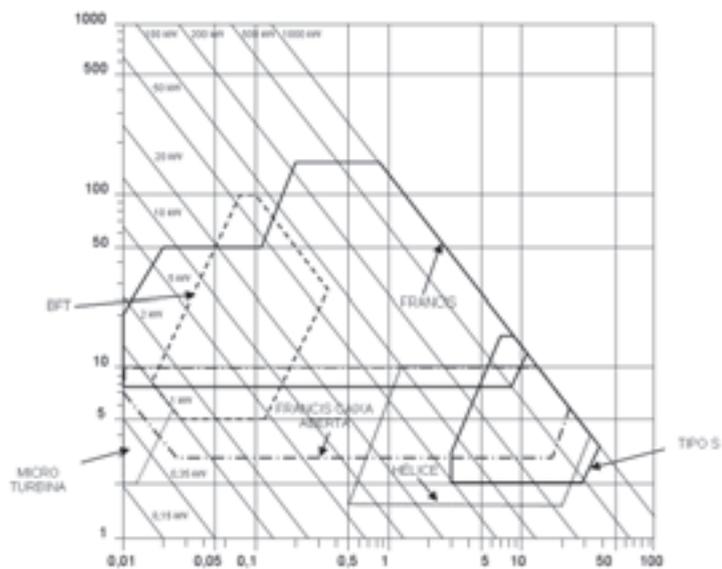


Figura 2.14 – Campo de aplicação das principais turbinas de ação para μ CH e mCH com potência até 1000 kW, de fabricação brasileira

TURBINAS PARA QUEDAS MUITO BAIXAS E HIDROCINÉTICAS

Recentemente, têm-se apresentado propostas para aproveitamentos de baixíssimas quedas, tais como a turbina axial com gerador periférico, desenvolvida por uma pequena indústria nacional, e que atende de 10 a 200 kW, com desníveis de até 3 metros, mostrada na figura 2.15 (a). Há também as turbinas hidrocinéticas, que utilizam a energia cinética das correntezas dos cursos d'água e são adequadas para atender a pequenas cargas, de algumas centenas de Watts até 10 kW, como a de fluxo cruzado com pás helicoidais, com a turbina Gourlov, apresentada na figura 2.15(b), e a desenvolvida pela Universidade de Brasília, apresentada na figura 2.16.

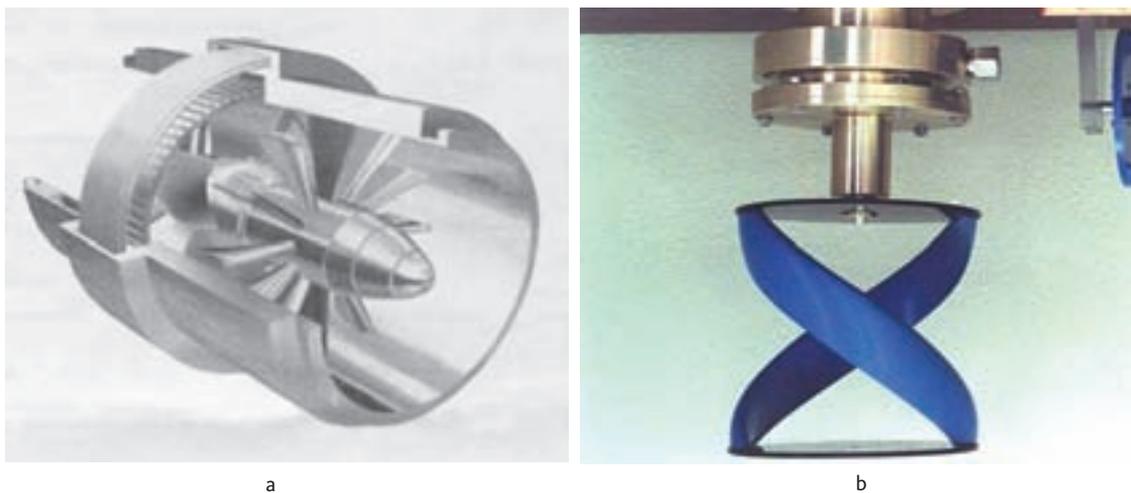


Figura 2.15 – (a)Turbina Hidráulica para baixíssimas quedas, tipo axial, com gerador periférico, Turbo-Silva; (b) turbina hidrocínética tipo fluxo-cruzado, tipo Gourlov.



Figura 2.16 – Turbina Hidrocínética, desenvolvida pela Universidade de Brasília: (a) vista frontal; (b) vista lateral; (c) instalada num curso d'água em Correntinas; (d) montada sobre estrutura flutuante. Fonte: UnB

TURBINAS HIDRÁULICAS COM TÉCNICAS ALTERNATIVAS

Além dos tipos clássicos apresentados, em áreas mais remotas do País há diversos pequenos fabricantes que fornecem grupos geradores constituídos por turbinas hidráulicas e sistemas

de controle desenvolvidos e fabricados por processos alternativos, com tecnologias bastante rudimentares, porém robustas e de baixo custo, como a turbina Indalma apresentada na figura 2.17, que tem sido comercializada na região Norte do País e tem alcançado sucesso relativo junto aos seus usuários.



Figura 2.17 – Turbina tipo Indalma: (a) vista lateral; (b) vista frontal.

Há ocasiões em que os fabricantes destes tipos de turbinas costumam desenvolver tecnologias singulares e interessantes, tal como o uso da técnica da “argila perdida”, que é utilizada para a construção da caixa espiral da turbina. Essa técnica constitui-se no seguinte: tendo o rotor da turbina e o seu tubo de sucção em uma plataforma de concreto, faz-se o desenho da caixa espiral no seu entorno. Sobre o desenho da espiral, utilizando-se de argila, molda-se a caixa espiral em torno do rotor. Ao longo do barro moldado, constrói-se uma armadura, feita com ferros de construção de pequenos diâmetros e em forma de malha. Sobre essa malha lança-se o concreto até que toda a espiral no entorno do rotor esteja completada. Tendo aguardado o tempo de cura, uma vez o concreto seco, abre-se a válvula na entrada da caixa espiral, fazendo com que a água entre na caixa espiral, forçando a saída da argila. Assim que toda a argila tenha saído, a turbina fica pronta para operar. A figura 2.18 apresenta um esquema desse tipo de tecnologia.



Figura 2.18 – Construção da caixa espiral pelo método “argila-perdida”: (a) molde em barro com armadura de ferro; (b) turbina com a caixa espiral já concretada.

Geradores

Os geradores disponíveis no mercado brasileiro podem ser classificados basicamente em dois tipos: síncronos ou assíncronos.

Os geradores síncronos podem ser:

- ♦ De baixa velocidade, que normalmente são acionados por um motor ou por uma turbina hidráulica e se caracterizam fisicamente por ter pólos salientes, um grande diâmetro e pequeno comprimento axial (figura 2.20a).
- ♦ De alta velocidade, também chamados de turbogerador, que normalmente são utilizados em centrais termoelétricas.

Geradores com velocidade muito baixa exigem grande número de pares de pólos, resultando em máquinas com dimensões maiores, o que aumenta os custos, sendo pouco aplicados em μ CH e mCH.

No caso de haver impedimento para adequar a rotação da turbina com a rotação síncrona do gerador, costuma-se, em μ CH e mCH, especificar geradores com no mínimo 600 rpm. Em aproveitamentos com quedas muito baixas torna-se muito difícil assumir uma rotação síncrona para a turbina acima deste valor. Neste caso recomenda-se utilizar os multiplicadores de velocidade do tipo correia e polia ou caixa de transmissão mecânica. Entretanto, o uso desses dispositivos costuma resultar em perdas mecânicas e no aumento no trabalho de manutenção do grupo gerador.

O gráfico da figura 2.19 mostra os geradores elétricos síncronos disponíveis no mercado em função da potência e do número par de pólos (rotação síncrona).

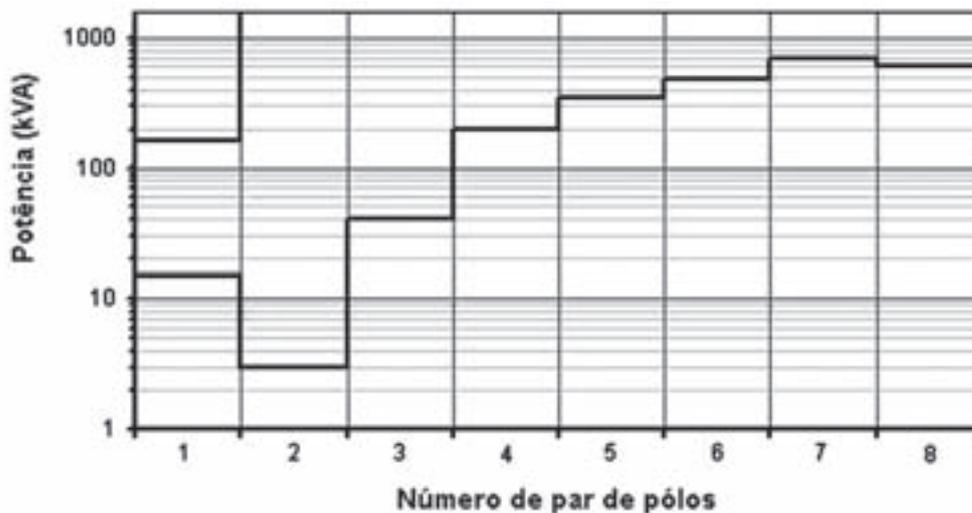


Figura 2.19 – Potências disponíveis para μ CH e mCH de geradores síncronos em função do número de pares de pólos. Fonte: Tiago Filho (2003)

Os geradores síncronos necessitam produzir suas próprias excitações (figura 2.20b) ou recebê-las de um sistema dedicado (excitação estática). Atualmente, tem-se adotado a excitatriz estática do tipo “brushless”, cuja manutenção é quase nula.

Já em centrais de porte muito pequeno, como as picocentrals hidrelétricas (π CH), costuma-se utilizar geradores de corrente contínua ou os alternadores de ímãs permanentes, que podem ser com armadura rotativa ou com o campo rotativo, como os apresentados na figura 2.21.



Figura 2.20 – Gerador: (a) vista do rotor e extrator de um gerador de uma PCH; (b) excitatriz.

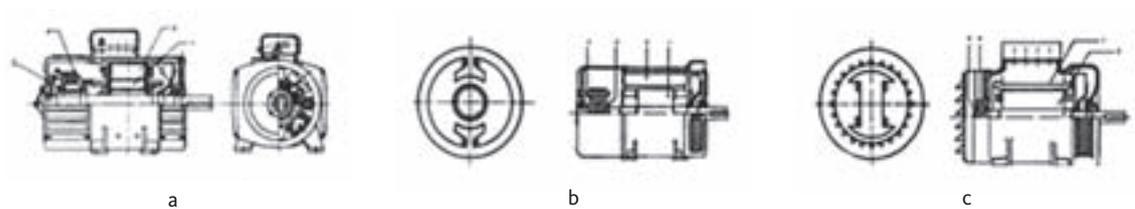


Figura 2.21 – Geradores elétricos para π CH e μ CH: (a) gerador de corrente contínua; (b) alternador com armadura rotativa; (c) alternador com campo rotativo

Reguladores de Velocidade e Sistemas de Controle e Automação

Os reguladores de velocidade, tradicionalmente, são fabricados do tipo óleo-hidráulico e fornecidos pelos próprios fabricantes da turbina (figuras 2.22a e 2.22b). Mais recentemente também foram desenvolvidos reguladores eletrônicos de carga, muito utilizados em π CHs, que através de uma carga de lastro mantém a frequência da rede constante. A figura 2.22 (c) apresenta um destes reguladores.

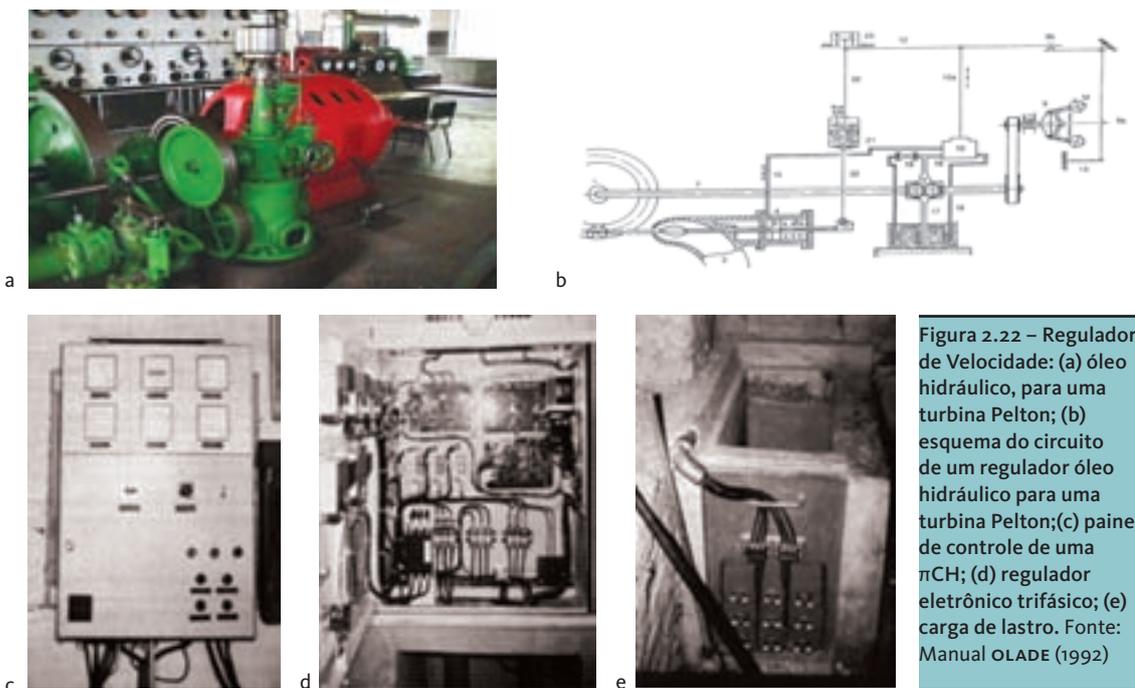


Figura 2.22 – Regulador de Velocidade: (a) óleo hidráulico, para uma turbina Pelton; (b) esquema do circuito de um regulador óleo hidráulico para uma turbina Pelton; (c) painel de controle de uma π CH; (d) regulador eletrônico trifásico; (e) carga de lastro. Fonte: Manual OLADE (1992)

Em projetos mais recentes de centrais hidrelétricas, prevê-se a automatização parcial ou total da central.

A automatização em μ CH e mCH, basicamente, é composta por um CLP (Controlador Lógico Programável) cuja função lógica monitora a frequência com a qual a energia está sendo gerada e comanda a ação do servomecanismo do regulador de velocidade de rotação do grupo gerador, além de comandar a sua partida e a parada que, por sua vez, também pode ser feita manualmente, por iniciativa do operador.

O CLP também pode ter outras funções, tais como atuar nos demais processos e sistemas da central, como na subestação, na tomada d'água, nos serviços auxiliares.

Além disso, esse tipo de sistema permite a implantação de um sistema de supervisão do grupo gerador, de forma a monitorar todos os parâmetros importantes da sua operação, como a vazão turbinada, a pressão na entrada da turbina, a potência gerada, a intensidade e tensão da corrente, temperatura dos mancais, posição de manobra das válvulas, dentre outros, sendo também um meio para o monitoramento remoto da central.

Barragens

As barragens têm como função reter a água de forma a conduzi-la ao sistema de adução da central hidrelétrica, além de implicar uma obra estratégica para prover recursos para o uso múltiplo da água. Para a sua construção podem-se utilizar diferentes materiais, tais como madeira, terra, pedra e concreto em diversas concepções, tal como mostrado nas figuras 2.23 a 2.25.



Figura 2.23 – Barragem de terra homogênea: (a) PCH Palmeiras; (b) PCH Piau



Figura 2.24 – Barragem de enrocamento – PCH Machado Mineiro: (a) vista de jusante; (b) vista de montante



Figura 2.25 – (a) Barragem de concreto; (b) barragem de pedra argamassada

O mais comum é utilizar barragens de terra e rocha, quando a obra é do tipo não galgável, e concreto, quando a obra é do tipo galgável. Entretanto, devido ao alto custo dos materiais, houve um aumento de popularidade das barragens feitas com concreto compactado a rolo (CCR). Esse tipo de técnica alia a resistência do concreto à praticidade de construção das barragens de terra e de rocha.

Barragens móveis

Em se tratando de rios com baixas declividades, onde por diferentes motivos há a necessidade de se manter a água dentro da calha do rio, ou se deseja aumentar a altura da barragem e controlar o nível da água no reservatório, pode-se utilizar as “barragens móveis”. Essas podem ser construídas na forma inflável feitas com borracha, conforme mostram as figuras 2.26 (a) e 2.26 (b), ou na forma basculante, como apresentado nas figuras 2.27 (a) e 2.27 (b).



Figura 2.26 – Barragem de borracha inflável – fabricante Bridgestone: (a) instalada sobre um vertedor; (b) instalada sobre o leito de um curso d’água



Figura 2.27 – Barragens móveis: (a) operada por meio de colchões infláveis; (b) operada por pistão óleo-hidráulico

Com o objetivo também de aumentar o nível do reservatório e garantir segurança à estrutura em condições de vazões extremas, há fabricantes que sugerem o uso de “barragens” ou “comportas fusíveis”.

Como o próprio nome diz, esse tipo de obra funciona como um “fusível” contra as enchentes. Sua operação só ocorre em condições extremas, quando a vazão de cheia ultrapassa o seu valor nominal. Neste caso a comporta (ou barragem) móvel tomba, abrindo uma passagem extra sobre a soleira do vertedor, onde a comporta está instalada, aumentando a sua capacidade de vertimento. Desta forma garante-se a segurança da barragem e das populações que porventura estejam localizadas a jusante da obra (figuras 2.28a, 2.28b e 2.28c).

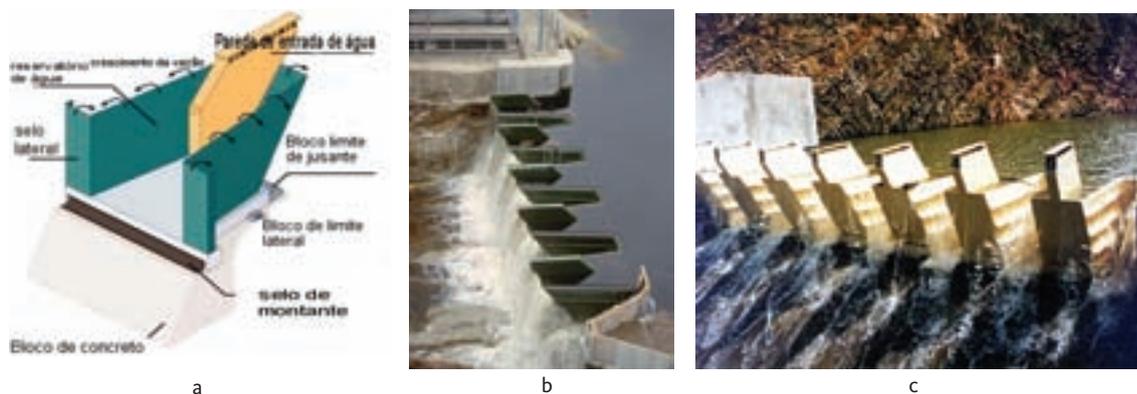


Figura 2.28 – Comporta-fusível, fabricação HYDROPLUS®: (a) esquema em perspectiva; (b) Instaladas na barragem ST-HERBOT, na França; (c) sobre o vertedor de uma barragem

Esse tipo de solução permite diminuir custos na construção da barragem, além de aumentar o comprimento do vertedor, diminuir a altura da lâmina d’água sobre o vertedor, aumentar o nível do reservatório já implantado e, conseqüentemente, quando desejável, aumentar a capacidade de um reservatório e a potência da central.

Em centrais de baixas quedas, as barragens móveis podem ser utilizadas para controlar o nível d’água do reservatório, por exemplo, ou fazer com que a água permaneça confinada no interior da calha do rio, mesmo por ocasião das cheias.

ALGUNS PROJETOS DE μ CH DESENVOLVIDOS NA REGIÃO AMAZÔNICA

A seguir são apresentados algumas experiências sobre implantação de μ CHs na região Norte do País.

Projeto μ CH Canaã

Esse projeto tinha como meta implantar uma μ CH no rio Roosevelt, na comunidade denominada Assentamento Canaã, no município de Pimenta Bueno, ao sudeste do Estado de Rondônia.

A comunidade é formada por 55 famílias, assentadas pelo INCRA, em uma área vizinha à reserva indígena dos “Cintas-Largas”.

Previa-se construir a μ CH na margem esquerda do rio Roosevelt. Não haveria barragem, apenas um espigão para conduzir a água ao sistema adutor. A queda disponível era de 12 metros e previa-se, numa primeira fase, gerar 60 kW.

Infelizmente, o projeto não logrou êxito devido à intransigência e a falta de espírito público do proprietário da terra, que não autorizou a sua construção. Ficou a experiência do contato com a comunidade, o conhecimento das dificuldades pelas quais elas estão sujeitas e a necessidade de prover meios para que uma população desassistida como essa possa alcançar melhor qualidade de vida. A figura 2.29 mostra alguma situação encontrada na comunidade e o arranjo proposto para a μ CH.



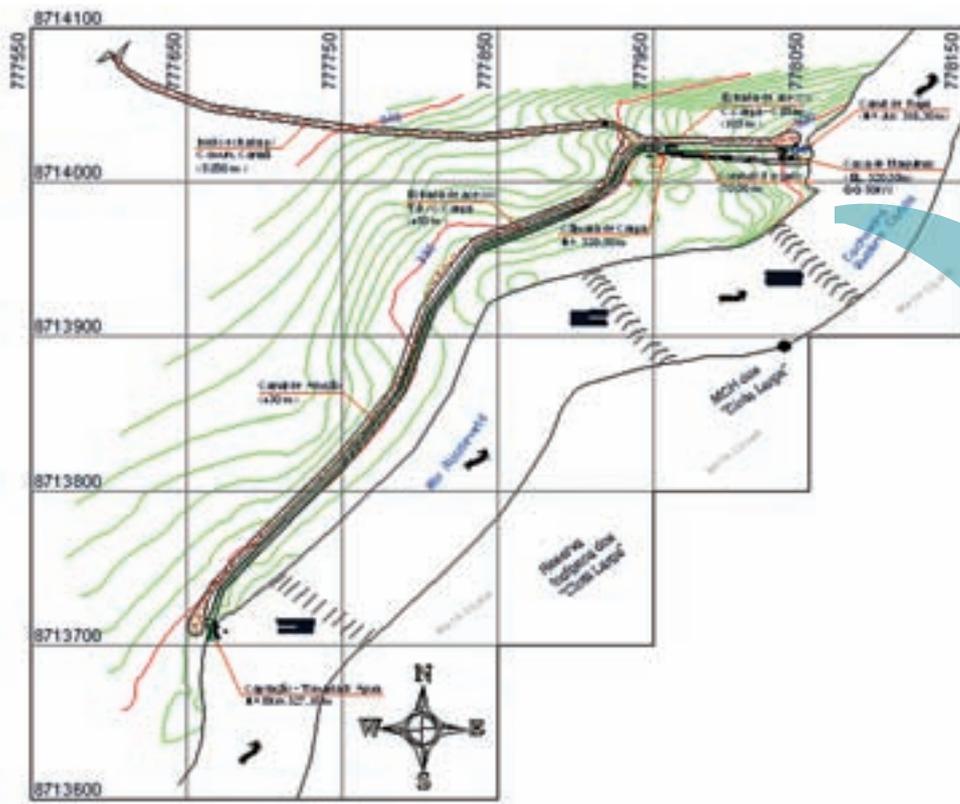
a



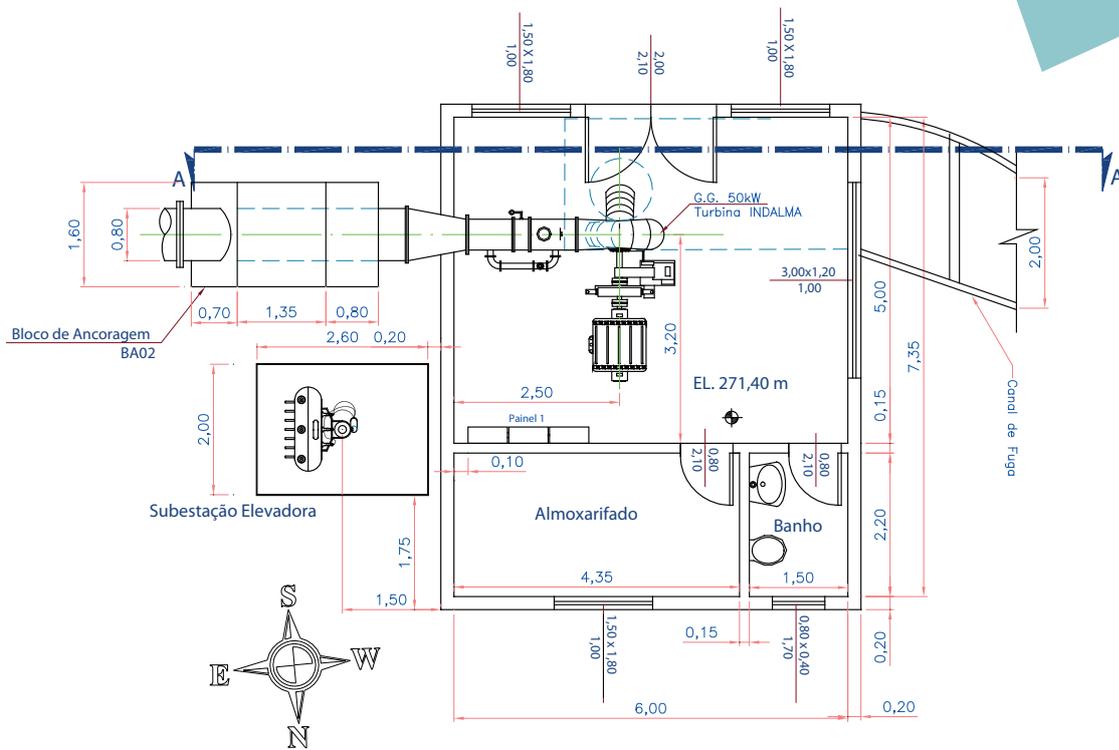
b



c



d



e

Figura 2.29 – Projeto μ CH Canaã: (a) Rio Roosevelt seção da tomada d'água; (b) e (c) grupo gerador diesel para atendimento individual; (d) arranjo da μ CH Canaã; (e) arranjo da casa de máquinas – vista em planta

Projeto Cachoeira do Aruã

Trata-se de um projeto que, também com recurso do CT-Energ e do Ministério de Minas e Energia, teve como objetivo implantar um projeto-piloto de geração descentralizada em comunidades isoladas na região amazônica de forma a implantar uma gestão comunitária que permitisse a auto-suficiência do empreendimento.

A μ CH, de 50 kW, foi implantada no rio Aruã, numa comunidade distante 14 horas de barco de Santarém, no centro-sul do Estado do Pará. A função foi atender as famílias residentes, uma escola, uma bomba hidráulica para recalcar água ao reservatório de distribuição à comunidade e duas unidades produtivas que foram implantadas pelo projeto. As referidas unidades produtivas eram uma oficina moveleira e uma central de congelamento de polpa de frutas, que tinham como objetivo permitir o uso produtivo da energia gerada pela μ CH e gerar renda à comunidade. As figuras 2.30, 2.31 e 2.32 apresentam características da comunidade de Aruã, bem como aspectos da μ CH.



Figura 2.30 – Atendimento à comunidade de Aruã: (a) linha de transmissão e distribuição; (b) escola atendida pelo projeto; (c) habitação atendida pelo projeto



Figura 2.31 – Aspectos da μ CH Cachoeira do Aruã: (a) barragem e tomada d'água; (b) casa de máquinas; (c) grupo gerador e quadro elétrico

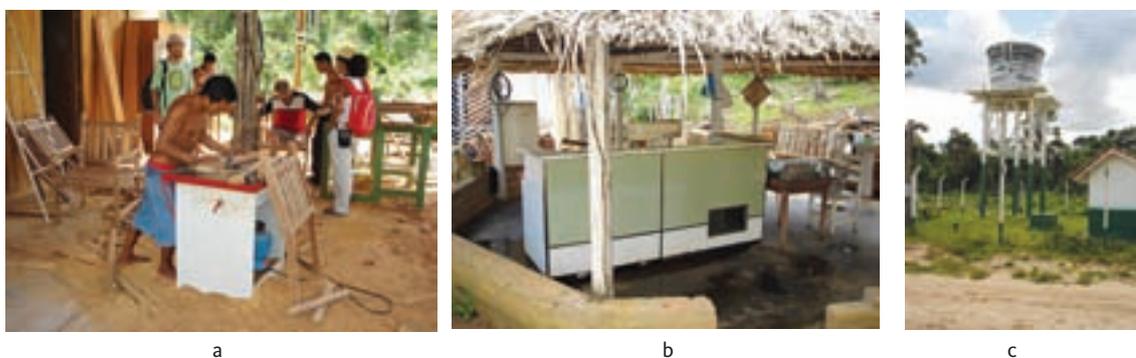


Figura 2.32 – Usos produtivos da energia: (a) unidade moveleira; (b) congelador de polpa de frutas; (c) bombeamento para o sistema de distribuição de água potável

Dos dois projetos em que se previam a mobilização e organização da população para a implantação de um sistema de gestão comunitário que desse auto-suficiência à unidade geradora, esse foi aquele em que se conseguiu o maior índice de sucesso. Para tanto, o projeto contou com a colaboração da Fundação Winrock e com a ONG Alegria, cujo apoio foi fundamental para o sucesso do projeto.

Projeto μ CH Novo Plano

Esse projeto foi desenvolvido junto à comunidade Novo Plano, localizada no município de Chupinguaia, no Estado de Rondônia. Com uma potência instalada de 55 kW, prevê-se o atendimento de 40 famílias da comunidade.

Trata-se de um projeto de repotenciação de uma μ CH já existente, construída pelos próprios moradores, que atendia apenas três moradias e encontrava-se em péssima condição de manutenção, conforme pode ser visto na figura 2.33.

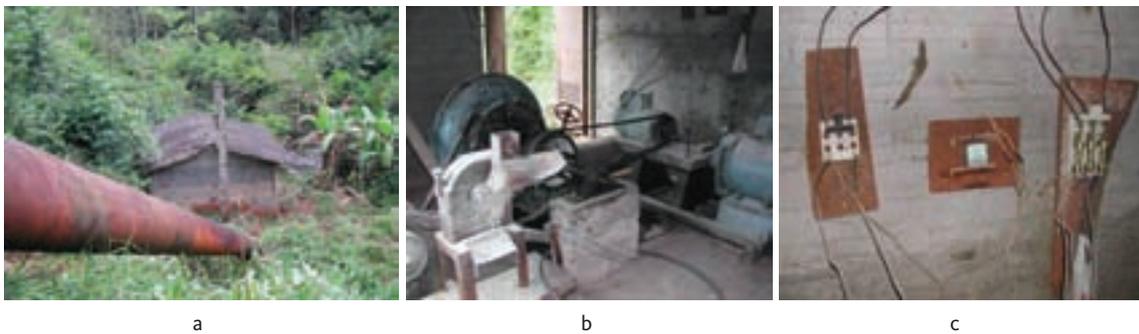
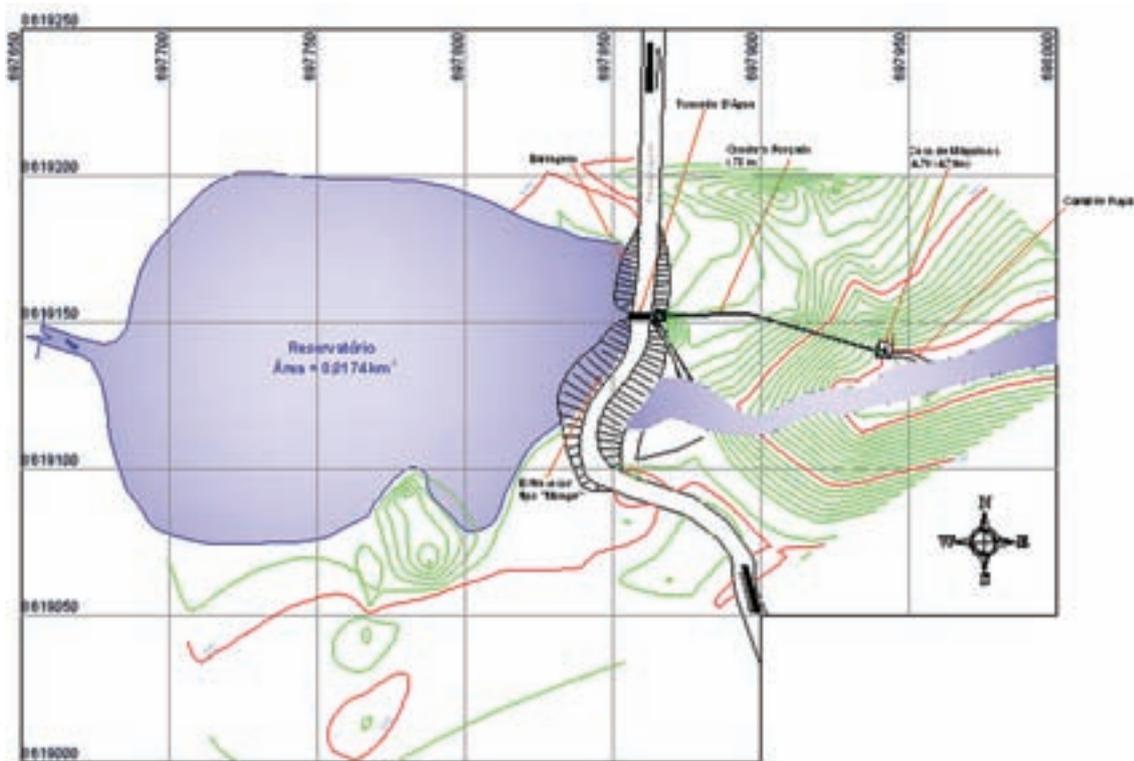


Figura 2.33 – Antigas condições da μ CH Novo Plano: (a) tubulação forçada e casa de máquinas; (b) grupo gerador; (c) “quadro elétrico” da central



a



Figura 2.34 – Projeto μ CH Novo Plano: (a) arranjo físico; (b) novo conduto forçado; (c) turbina hidráulica tipo Francis

O projeto de repotenciação previu a construção de uma nova tomada d'água, a troca dos condutos forçados e do grupo gerador e um aumento substancial na potência gerada. A figura 2.34 mostra alguns aspectos da central repotenciada.

Esse projeto contou com grande cooperação da comunidade e, durante sua construção, a maior dificuldade encontrada foi a grande freqüência de chuva na região.

Projeto μ CH Jatoarana

O projeto μ CH Jatoarana foi desenvolvido para atender duas comunidades: a de Nova Olinda e a de Santa Luzia, no município de Belterra, a 140 km de Santarém, na região central do Estado do Pará.

Com a potência de 55 kW, ele é responsável pelo atendimento de 40 famílias, cujas habitações estão espalhadas em pequenas aglomerações ao longo de 8 km.

A figura 2.35 apresenta diversos aspectos técnicos da μ CH.



Figura 2.35 – Projeto μ CH Jatoarana: (a) barragem de terra com vertedor lateral; (b) casa de máquinas; (c) canal de adução, escavado em terra sem revestimento; (d) turbina hidráulica tipo Indalma; (e) linha de transmissão; (f) habitação sendo atendida

MODELOS DE GESTÃO PARA UNIDADES DE GERAÇÃO EM COMUNIDADES ISOLADAS

Os projetos apresentados no item anterior fizeram parte de um programa do Ministério de Minas e Energia de disseminação da tecnologia na região amazônica para desenvolver modelos de gestão comunitária participativa que dêem auto-sustentabilidade às unidades de geração implantadas em comunidades isoladas.

A princípio os modelos de gestão consistem em: organizar a comunidade em uma associação, o governo ou outro agente responsável pelo desenvolvimento social, implantar a unidade geradora a ser registrada na ANEEL e repassada em comodato à associação.

- ♦ *Modelo Prisma*: a associação se torna produtor independente e assina um PPA e outro contrato de O&M com a concessionária local. Os recursos obtidos com a venda da energia e com o serviço de O&M são utilizados para a operação e manutenção da unidade geradora. Parte da energia entregue à concessionária é consumida em instalações produtivas, como oficina moveleira, congelamento de polpas de frutas, ou outras atividades às quais a comunidade seja vocacionada. A renda obtida com essas atividades gera mais receita que, por sua vez, permite pagar à concessionária pela energia consumida e, com o restante, obter meios para alcançar a melhora na sua qualidade de vida. Esse modelo está, em parte, sendo testado na comunidade de Aruã, e pode ser visualizado na figura 2.36.
- ♦ *Modelo autoprodução*: No princípio segue o mesmo procedimento do modelo anterior, com a diferença que a associação seria registrada na ANEEL como um autoprodutor que venderia apenas parte da energia à concessionária, o suficiente para atender às habitações. A outra parte da energia seria consumida pelas instalações produtivas que gerariam empregos e renda à comunidade, aumentando o valor agregado aos produtos da comunidade. Esse modelo, observado na figura 2.37, infelizmente não pôde de ser implantado devido ao fato do impedimento à construção da μ CH Canaã.

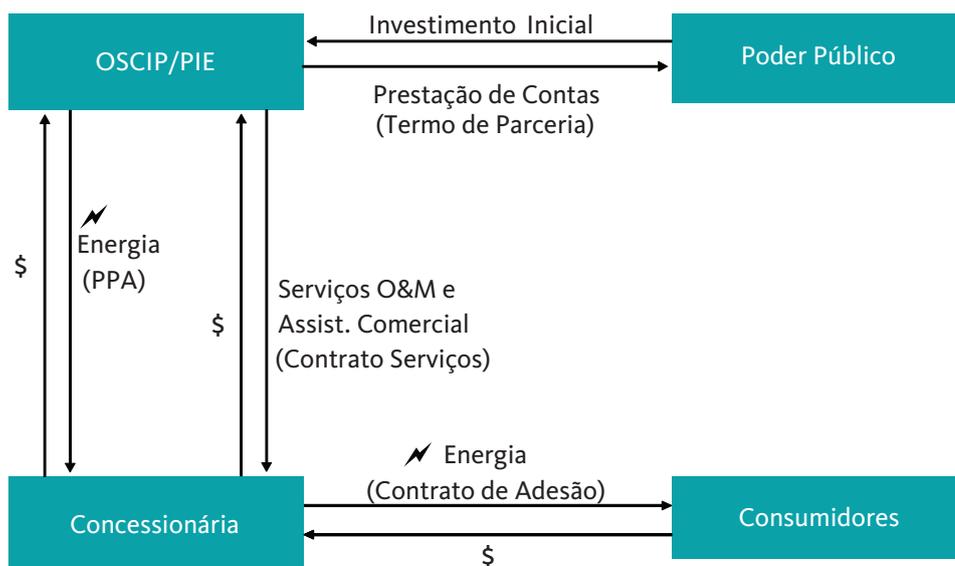


Figura 2.36 – Modelo Prisma – gestão comunitária de unidades geradoras em comunidades isoladas, estruturadas em produtor independente de energia – PIE. Fonte: Oliver (2005)

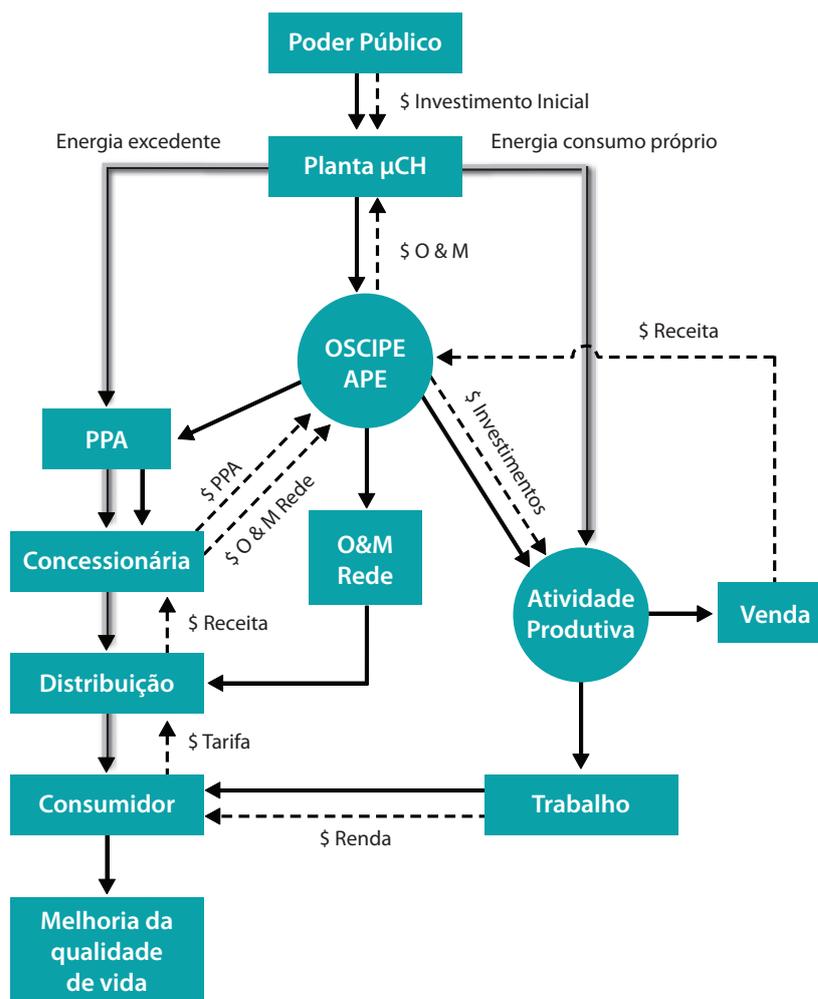


Figura 2.37 – Modelo de gestão comunitária participativa, para auto-sustentabilidade de unidades geradoras em comunidades isoladas, estruturada em autoprodutor de energia – APE

COMENTÁRIOS FINAIS

Com os trabalhos desenvolvidos na Amazônia Legal, na implantação de quatro projetos-pilotos, onde três lograram sucesso, observou-se que o fornecimento de energia elétrica por si só, sem uma fase preliminar de planejamento de estudos que possibilite identificar, reunir e integrar os recursos diversos que podem ser aproveitados, preservados e potencializados, não é suficiente para se alcançar tal desenvolvimento.

O fornecimento de um sistema de geração de energia elétrica em comunidades isoladas deve conter um plano de gestão participativo e sustentável, e devem-se criar estratégias que dêem suporte ao crescimento proporcionado pela chegada da energia elétrica que beneficiem os indivíduos, gerando renda através do uso produtivo da energia.

Em se tratando de µCH e mCH, a região amazônica mostra-se bastante propícia. A tecnologia envolvida nesse processo é totalmente dominada pela indústria nacional e, o mais importante, pela indústria local. Porém, as condições locais, de rios caudalosos e com pequenas declividades em sua maioria, impõem soluções que ainda não se encontram em estágio adequado no Brasil, o que pode dificultar a implantação dessas µCH e mCH, ou destiná-las apenas à regiões do entorno

da bacia amazônica, onde a topografia mostra-se mais adequada.

Além disso, é de fundamental importância conceber o fornecimento da energia elétrica na totalidade de seu uso, considerando sua inserção num contexto social, econômico e ambiental, de forma racional, prudente e equilibrada, e ao mesmo tempo, que permita alavancar o desenvolvimento sustentável da comunidade e, conseqüentemente, à região e ao País.

É nosso dever apontar as possíveis soluções e os meios de alcançá-las; à população das comunidades isoladas compete definir o seu desejo de mudança e se organizar e trabalhar para isso. Meios existem, é necessário desejar as mudanças e colocá-las em prática.

Agradecimentos

Agradecemos à Secretaria de Energia do Ministério de Minas e Energia, ao Programa Luz Para Todos e ao Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD por terem acreditado no trabalho do CERPCH, proporcionando os meios para o desenvolvimento dos projetos pilotos apresentados e dessa bibliografia. A experiência adquirida foi e será muito importante para o desenvolvimento das atividades do centro, bem como para as comunidades envolvidas.

Agradecemos aos parceiros envolvidos nos projetos, como a Fundação Winrock Comunidade Alegria, cuja participação foi fundamental para o sucesso dos mesmos.

Agradeço à equipe do CERPCH, que foi solidária no desenvolvimento dos projetos e na elaboração do guia, do livro e deste capítulo, dos quais são co-autores.

3 Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida

SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA A AMAZÔNIA

Gonçalo Rendeiro (*Coordenador*)
Manoel Fernandes Martins Nogueira (*Editor*)
Augusto César de Mendonça Brasil
Daniel Onofre de Almeida Cruz
Danielle Regina da Silva Guerra
Emanuel Negrão Macêdo
Jorge de Araújo Ichihara

Co-autores:

André Augusto Azevedo Montenegro Duarte
Antonio Geraldo de Paula Oliveira
Hendrick Maxil Zárate Rocha
Robson Evilácio de Jesus Santos
Sergio Aruana Elarrat Canto
Wilson Negrão Macêdo

CARACTERIZAÇÃO DA GERAÇÃO NA AMAZÔNIA

Havia, no início de 2006, 294 sistemas isolados em operação autorizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A sua distribuição espacial era a seguinte:

- ♦ Na região Norte: 288;
- ♦ No Estado de Mato Grosso: 32;
- ♦ Nos Estados de Pernambuco, Bahia, Maranhão e Mato Grosso do Sul: 4.

Tomados em conjunto, estes sistemas cobrem quase 50% do território nacional, consomem aproximadamente 2% da energia elétrica utilizada no País e representam a mesma proporção do PIB. Cabe ressaltar que, além dos 294 sistemas isolados autorizados, existem centenas de sistemas isolados em operação sem autorização, mesmo quando pertencentes a concessionárias, e outras tantas centenas de localidades sem atendimento.

Os sistemas isolados mais importantes, do ponto de vista da dimensão do consumo, são os que atendem as capitais da região Norte (Manaus, Porto Velho, Macapá, Rio Branco e Boa Vista), com exceção de Belém, que está integrada ao sistema interligado nacional. Estes sistemas representam cerca de 80% da carga total dos sistemas isolados.

Nos sistemas de Manaus, Porto Velho e Macapá, a geração de eletricidade provém de sistemas hidrotérmicos. Em Rio Branco, o atendimento era puramente térmico, situação que foi alterada ao final de 2002, com a interligação ao sistema de Porto Velho em 230 kV. O sistema que atende Boa Vista e parte do interior do Estado de Roraima passou a ser suprido, a partir de julho de 2001, com importação de energia da Venezuela, por meio da interligação ao sistema da hidrelétrica de Guri em 230 kV naquele país vizinho.

A grande maioria dos sistemas do interior dos Estados da região Norte é suprida por unidades dieselétricas de pequeno porte. Contudo, existe, também, um parque hidrelétrico composto por pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), totalizando cerca de 42 MW de potência instalada em 22 usinas nos Estados de Rondônia, Roraima e Mato Grosso. Este parque será expandido com a instalação, até o final de 2006, de 14 novas PCHs, adicionando mais 110 MW à potência desses sistemas.

Até recentemente, a geração nos sistemas isolados possuía um certo arcabouço legal, ainda que insatisfatório. A mudança processada nessa legislação, durante o processo de privatização, revogou itens, o que conduziu à situação atual de completo vácuo legal, contribuindo para a desestabilização e insolvência dos agentes, a aceleração do desequilíbrio e, com o fim das concessões, a obsolescência do parque gerador.

Os principais agentes que operam nos sistemas elétricos isolados do País são a Eletrobrás e Eletronorte com suas respectivas subsidiárias, os governos dos Estados do Amapá e Roraima, as

concessionárias privadas CELPA e CEMAT do Grupo Rede, e alguns produtores independentes.

A Eletronorte é controladora das subsidiárias Manaus Energia (Mesa), responsável por 89,5% da energia distribuída no Estado do Amazonas (a grande maioria na capital, Manaus) e proprietária da usina hidrelétrica (UHE) Balbina e usinas termelétricas (UTES) Mauá, Aparecida e Electron; e a Boa Vista Energia (Bovesa), que responde por 84% da energia distribuída no Estado de Roraima (essencialmente na capital, Boa Vista).

A Eletronorte é supridora dos sistemas isolados das capitais do Amapá, através da UHE Coaracy Nunes e UTE Santana; de Roraima, através de importação da empresa venezuelana Edelca e UTE Floresta; do Acre, através das UTES Rio Branco e Rio Acre; e de Rondônia, através da UHE Samuel e UTE Rio Madeira.

A Eletrobrás é controladora da Eletronorte e das empresas concessionárias distribuidoras federalizadas que operam em sistemas isolados, Companhia Energética do Amazonas (Ceam), Centrais Elétricas de Rondônia (Ceron) e Companhia de Eletricidade do Acre (Eletroacre). A Ceam é suprida parcialmente pela Mesa e possui pequenas centrais termelétricas (PCTs). A Ceron possui PCHs e PCTs.

Os governos dos Estados do Amapá e Roraima são controladores da Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) e Companhia de Eletricidade de Roraima (CER), respectivamente. A CER é suprida parcialmente pela Bovesa.

Os principais produtores independentes de energia (PIEs) que suprem os sistemas isolados possuem as seguintes usinas:

- ♦ UTES El Paso Amazonas, El Paso Rio Negro e BK, no Estado do Amazonas;
- ♦ UTES Termonorte I e II consórcio CS Participações/El Paso, no Estado de Rondônia;
- ♦ UTE Barro Vermelho SoEnergy, no Estado do Acre;
- ♦ CELPA: 38 sistemas com 75 MW efetivos, e CEMAT: 34 sistemas com 87 MW efetivos, SoEnergy: 55 sistemas com 77 MW.

Há diversas PCHs de produtores independentes no Estado de Rondônia. O produtor independente Guascor supre diversas localidades no interior dos Estados de Rondônia, Acre e Pará, enquanto que o produtor independente Rovema, atende a localidades no interior de Rondônia.

PRINCÍPIOS PARA USO DE BIOMASSA COMO COMBUSTÍVEL

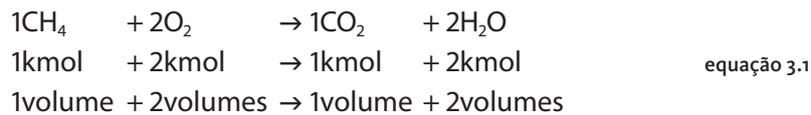
Dois são os processos de conversão da energia contida na biomassa que são abordadas neste livro: combustão e gasificação. Ambos os processos consistem da reação dos componentes da biomassa com ar. A combustão ocorre com excesso de oxigênio enquanto que a gasificação ocorre com falta de oxigênio. Excesso ou falta é com relação a uma quantidade de referência denominada quantidade de ar estequiométrica. Este capítulo apresentará os conceitos básicos das reações de combustão e gasificação e ensinará a quantificar as massas de combustível e ar requeridos para esses processos, bem como o poder calorífico dos combustíveis e a temperatura adiabática da reação.

Conversão Energética da Biomassa

É uma reação química de oxidação de materiais combustíveis. Os reagentes, geralmente o oxigênio do ar e um hidrocarboneto, colidem entre si causando a sua destruição. Os elementos químicos

resultantes dessa destruição se recombinaem formando novas espécies químicas denominadas de produtos. Essa destruição seguida de recombinação numa região espacial específica libera calor e eventualmente emite luz. Resumindo, a combustão é uma reação química exotérmica entre um combustível e um comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor, formando como produto um grupo de espécies diferente dos reagentes.

Todo processo de combustão somente ocorre na fase gasosa. Um processo de combustão de gases pode ser exemplificado pela reação abaixo. Nela o gás metano reage com o oxigênio puro (o oxigênio contido no ar vem acompanhado com nitrogênio. Para cada átomo de O₂ recolhido no ar, vem acompanhando 3,76 átomos de N₂).



Nessa reação, os reagentes são o metano e o oxigênio, que reagem entre si formando os produtos CO₂ e H₂O liberando o calor de reação. Note que para essa reação acontecer, são necessárias quantidades exatas de átomos envolvidos. Para cada átomo de carbono, é preciso que tenhamos dois átomos de oxigênio para formar CO₂ e para cada dois átomos de hidrogênio é preciso fornecer um átomo de oxigênio para formar uma molécula de água. Essa reação com quantidades de combustível e oxidante nas quantidades exatas é denominada de reação estequiométrica. A quantidade de oxidante numa reação estequiométrica depende do combustível e é obtida a partir do balanço de átomos dos reagentes e dos produtos.

Processos de combustão e gasificação na presença de oxigênio puro só se justificam para plantas de grandes potências devido ao custo de separar o oxigênio do ar do nitrogênio. Nos outros casos utiliza-se o oxigênio do ar, que possui o inconveniente de para cada molécula de oxigênio trazer consigo 3,76 moléculas de nitrogênio, que é um inerte.

A presença de nitrogênio reduz a temperatura da chama e conseqüentemente a temperatura dos gases resultantes da combustão, pois absorve o calor liberado pela reação para elevar sua temperatura. Sem a presença de nitrogênio, a temperatura da chama pode ultrapassar os 2.000°C, capaz de derreter as paredes da câmara de combustão. A desvantagem da presença do nitrogênio é que a altas temperaturas ele se dissocia e se associa com o radical oxigênio livre formando NO. NO reage com oxigênio do ar formando ozônio, que é um poluente. Processos de combustão normalmente usam ar.

Para o caso de combustão com ar, é preciso definir a razão ar-combustível.

$$\lambda = \frac{\text{massa de ar}}{\text{massa de combustível}}
 \qquad \text{equação 3.2}$$

Essa é a razão ar-combustível estequiométrica. Este texto adotará que se mais ar for adicionado do que o ar estequiométrico, a mistura será pobre (por enquanto se paga somente pelo combustível) e ocorrerá $\lambda > \lambda_{\text{est}}$. Se menos ar for adicionado à combustão que o requerido pela reação estequiométrica, a mistura reagente será denominada rica e terá $\lambda < \lambda_{\text{est}}$. Reagentes pobres e ricos terão diferentes produtos como será visto na próxima seção. Diferentes combustíveis possuem diferentes razões ar-combustível.

Reagentes com misturas ricas e pobres – Razão de Equivalência

Quando os reagentes possuem misturas ricas ou pobres, a composição dos produtos é diferente dos produtos de uma reação estequiométrica (CO_2 , H_2O e N_2).

Numa mistura pobre, existe excesso de oxigênio. Supondo não existir dissociação, o excesso de oxigênio não tem com quem reagir e passa pela chama como se fosse um inerte e aparece nos produtos. Então os produtos de uma mistura pobre serão CO_2 , H_2O , N_2 e O_2 .

Numa mistura rica, existe falta de oxigênio. Supondo não existir dissociação, falta oxigênio para reagir com todo o carbono e hidrogênio disponíveis, propiciando a formação de CO e H_2 . Então os produtos de uma mistura rica serão CO_2 , H_2O , N_2 , CO e H_2 .

No processo de gasificação, busca-se converter o combustível em CO e H_2 , e é indesejável produzir CO_2 e H_2O . Assim sendo, esse projeto é feito em falta de oxigênio, excesso de combustível, caracterizando que os reagentes são uma mistura rica. Esses processos geralmente operam com 30% da quantidade de ar estequiométrico.

Razão de equivalência é definida como a razão combustível-ar dos reagentes pela razão combustível-ar em condição estequiométrica. Essa definição é válida tanto na base molar quanto na base mássica. Alguns autores preferem utilizar a razão de equivalência definida como razão ar-combustível utilizada nos reagentes pela razão ar-combustível na condição estequiométrica. Este texto adotará a primeira definição. Então razão de equivalência é:

$$\Phi = \frac{\frac{N_{\text{comb}}}{N_{\text{ar}}}}{\left(\frac{N_{\text{comb}}}{N_{\text{ar}}}\right)_{\text{est}}} = \frac{\frac{m_{\text{comb}}}{m_{\text{ar}}}}{\left(\frac{m_{\text{comb}}}{m_{\text{ar}}}\right)_{\text{est}}} \quad \text{equação 3.3}$$

Onde N_{comb} e N_{ar} são os números de moles do combustível e do ar na mistura que estão sendo empregados e $(N_{\text{comb}}/N_{\text{ar}})_{\text{est}}$ é a razão combustível-ar estequiométrico. Nesta definição de $\Phi > 1$, a mistura é rica e se $\Phi < 1$, a mistura é pobre.

Processos de combustão utilizam Φ de aproximadamente 0,95 enquanto processos de gasificação utilizam Φ em torno de 3.

Calor de Reação e Poder Calorífico

Calor de reação é definido como a quantidade de calor liberado durante a reação estequiométrica de combustão até que o produto alcance a mesma temperatura do reagente. Exemplificando, considere um recipiente a pressão constante cheio de metano e oxigênio com razão ar-metano igual à estequiométrica e temperatura 298 K. Iniciando a combustão (talvez com uma centelha), a temperatura sobe até alcançar o máximo possível (por exemplo, 1700 K). Como o exterior do recipiente está a 298 K, calor é removido e a temperatura no seu interior baixa, e depois de certo tempo, o produto da combustão no interior do recipiente entra em equilíbrio com o meio externo a 298 K. A quantidade de calor removido é denominada calor de reação.

Para quantificar o calor de reação utiliza-se a primeira Lei da Termodinâmica, que estabelece, no caso de processo a pressão constante, que a energia liberada é igual à variação de entalpia entre produto e reagentes.

$$Q_R = H_{\text{produto}} - H_{\text{reagente}} \quad \text{equação 3.4}$$

Onde Q_R é o calor de reação, H_{produto} e H_{reagente} são respectivamente as entalpias do produto e do reagente. Essas entalpias podem ser quantificadas pela expressão

$$H = \sum_i^n N_i \cdot \overline{h}_i \quad \text{equação 3.5}$$

Onde N_i é o número de moles da espécie “i” contida na mistura e \overline{h}_i é a entalpia molar dessa espécie na temperatura da mistura (kJ/mol). O número de moles de cada espécie é obtido da reação estequiométrica e a entalpia molar é a soma da entalpia de formação a temperatura de 298 K e da entalpia sensível que a mistura possui a certa temperatura.

Poder calorífico é definido como o calor de reação, com o sinal invertido e na base mássica. PCS é calculado utilizando a quantidade de calor extraído da reação química, de maneira que a água no produto condensa e fica na fase líquida. Se a temperatura do reagente e do produto for 298 K a 1 atm, necessariamente a água nos produtos estará na fase líquida. Então nesse caso, esse será o PCS.

$$\text{PCS} = \frac{-Q_R}{\text{PM}_{\text{comb}}} \quad [\text{kJ/kg de combustível}] \quad \text{equação 3.6}$$

PCI é calculado com uma quantidade menor de calor extraído do que a extraída para quantificar o PCS, de maneira que a água nos produtos permaneça na fase vapor. O PCI é calculado subtraindo da energia liberada na reação pela quantidade de energia liberada durante a condensação, conforme descrito na equação 3.7:

$$\text{PCI} = \text{PCS} - \frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{m_{\text{comb}}} \cdot h_{\text{lv}} \quad \text{equação 3.7}$$

Combustão dos Líquidos e Sólidos

A combustão de um combustível líquido em uma região acontece realmente na forma gasosa. Isto quer dizer que quem reage liberando calor é o gás, não o líquido. Portanto, um líquido inflamável normalmente só entrará em combustão acima de uma temperatura, do seu ponto de fulgor e na presença de uma fonte quente para iniciar a reação. Iniciada a reação ela se auto-mantém.

Ponto de fulgor é a menor temperatura na qual um líquido libera vapor ou gás em quantidade suficiente para formar com o ar atmosférico uma mistura inflamável. Abaixo dessa temperatura, o líquido não evaporará com rapidez suficiente para sustentar o fogo caso a fonte de ignição seja removida.

A combustão de sólidos consiste em três fases relativamente distintas: *Secagem* – Quando é retirada a umidade do combustível através da evaporação da água incorporada ao combustível sólido. Depois, os gases inflamáveis do sólido começam a ser liberados através de um processo chamado *Pirólise*, onde a mistura desses voláteis com oxigênio provoca a ignição, sendo a energia produzida na forma de calor e luz. O fogo normalmente é visível nesta fase. *Gasificação* – Após, ocorre todo o processo de volatilização do sólido, o material carbonizado gaseifica formando CO , CH_4 , H_2 , que reage com o oxigênio numa reação exotérmica, tendo como produtos CO_2 + H_2O + Calor.

CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS

Para poder avaliar a capacidade energética de uma biomassa é preciso fazer a caracterização energética da mesma. Essa caracterização é feita com três grupos de procedimentos: determinação do poder calorífico, a análise elementar e a análise imediata.

A determinação do poder calorífico quantifica a energia contida na biomassa, com a determinação do seu poder calorífico superior e inferior. A análise elementar quantifica os percentuais, em massa, dos elementos C, H, O, N, S e cinzas contidas na biomassa. A análise imediata determina os teores de umidade, voláteis, carbono fixo e cinzas contidas na biomassa.

Determinação do Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) e Análise Elementar

Os ensaios de determinação do poder calorífico superior são realizados obedecendo à norma NBR 8633 (Determinação do Poder Calorífico), na qual é medido o poder calorífico superior em base seca da biomassa. Para este ensaio, pode ser utilizada uma bomba calorimétrica digital.

O poder calorífico superior de uma biomassa também pode ser determinado com a ajuda dos resultados da análise elementar. É possível fazer o relacionamento do PCS de uma biomassa com a quantidade de ligações químicas envolvendo seus elementos. Assim sendo, conhecendo a fração mássica dos componentes da biomassa, é possível calcular o PCS. A equação (3.8) é um exemplo desse tipo de correlação. Em 2007, não havia correlações específicas para espécies amazônicas.

$$PCS = 437,1m_c - 1669,4 \quad \text{equação 3.8}$$

Onde m_c é a fração mássica de carbono na biomassa combustível seca, e o PCS é obtido em kJ/kg de biomassa seca.

O poder calorífico inferior (PCI) pode ser obtido através da equação (3.9):

$$PCI_u = (1 - a) \cdot PCS - 9 \cdot (1 - a) \cdot h \cdot h_{IV(25^\circ C)} - a \cdot h_{IV(25^\circ C)} \quad \text{equação 3.9}$$

Onde PCS: poder calorífico inferior (kJ/kg de biomassa úmida); PCS: poder calorífico superior (kJ/kg de biomassa seca); a: teor de umidade da biomassa (massa base úmida); h: teor de hidrogênio na biomassa (massa base seca); $h_{IV(25^\circ C)}$: entalpia de vaporização da água a 25°C (kJ/kg), igual a 2442 kJ/kg.

Para o PCI ser calculado através da equação (3.9), é preciso conhecer os teores de umidade e de hidrogênio da biomassa que será utilizada como combustível. Quanto maior o teor de umidade, menor será o PCI, implicando que menor energia poderá ser extraída da biomassa. Se o teor de umidade da biomassa for acima de 0,7 não ocorrerá combustão. Biomassas estocadas em pátios abertos possuem o seu teor de umidade entre 0,4 e 0,55. Biomassas que tenham sido secas têm o seu teor de umidade entre 0,08 e 0,12.

O teor de hidrogênio da biomassa seca é obtido em laboratório através de um ensaio denominado análise elementar. Esse ensaio fornece os percentuais mássicos dos elementos “C”, “H”, “O”, “N”, “S” e “cinzas” da biomassa. Um resultado típico da análise elementar pode ser visto na tabela 3.1.

Espécie	C	H	N	S	O	Cinzas
Casca de arroz	38,24	4,40	0,80	0,06	35,50	21
Pinheiro	59	7,2	-	-	32,7	1,1
Caroço de açaí	46	6	0,8	-	46	1,2

População H/C aproximadamente 1,5 e de O/C de aproximadamente 0,6

Tabela 3.1 – Resultado da análise elementar de algumas espécies vegetais em percentual mássico

Análise Imediata, Teor de Voláteis, Umidade, Carbono Fixo, Cinza; Descrição dos Métodos

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DE BIOMASSAS

Para a determinação do teor de umidade, utiliza-se a norma NBR 8112 (Análise Imediata), sendo que as amostras devem ser preparadas conforme a NBR 6923 (Amostragem e Preparação da Amostra). 500g de amostra de biomassa com granulometria inferior a 19 mm são colocados numa estufa previamente aquecida a 105°C até que a massa da amostra permaneça constante.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE VOLÁTEIS DE BIOMASSAS

Expressa a quantidade mássica dos componentes da biomassa que primeiramente entram em combustão. Esses componentes, os voláteis, são hidrocarbonetos que são vaporizados da biomassa e facilmente entram em combustão. O teor de voláteis é definido como a fração em massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850°C num forno mufla, por 7 (sete) minutos (NBR 8112 – Análise Imediata).

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CINZAS DE BIOMASSAS

Os procedimentos para determinação do teor de cinzas de amostras de biomassa são baseados na NBR 8112 (Análise Imediata). As cinzas são resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos em um forno mufla, sob rígido controle de massa, temperatura, tempo e atmosfera. Um grama de biomassa já sem umidade e voláteis é colocado num cadinho e levado ao interior do forno. Sua temperatura é então elevada para 710°C e, nessa condição, fica por uma hora.

DETERMINAÇÃO DO TEOR DE CARBONO FIXO DE BIOMASSAS

Os procedimentos para cálculo do teor de carbono fixo em base seca, de amostras de biomassa, são baseados na NBR 8112 (Análise Imediata).

Caracterização Energética de Algumas Espécies Amazônicas

A tabela 3.2 abaixo mostra alguns resultados de caracterização de espécies de biomassa existentes na Amazônia.

ID	Nome Comercial	PCS [MJ/kg]	Carbônio Fixo [%]	Teor de Voláteis [%]	Teor de Cinzas [%]	Massa Específica a Granel [kg/m ³]	Densidade Energética [MJ/m ³]
1	Acapú	20,70	20,9	78,7	0,4	250	5175
2	Andiroba	19,76	10,1	89,9	0,0	290	5732
3	Angelim	17,51	15,1	70,0	14,9	280	4904
4	Angelim Pedra	19,84	17,2	81,6	1,3	265	5258
5	Angelim vermelho	20,44	20,3	79,6	0,0	250	5109
6	Bambu	18,98	17,8	81,3	0,9	267	5068

Tabela 3.2 – Caracterização energética de algumas espécies amazônicas, EBMA, UFPA, 2004

PRÉ-TRATAMENTO DA BIOMASSA

A biomassa a ser utilizada como combustível tanto na combustão direta como na gasificação, na maioria das vezes não pode ser usada na forma em que se encontra disponível, necessitando de algum tratamento mecânico para sua eficaz utilização. Dentre os tratamentos mecânicos usuais, dependendo do custo final do combustível e da energia gerada por ele, pode-se utilizar:

Secagem

O processo de secagem é realizado por evaporação e é uma operação na qual a água contida em uma biomassa é diminuída pela remoção dessa água. Durante a secagem é necessário o fornecimento de calor para evaporar a umidade da biomassa. Este processo, de fornecimento de calor de uma fonte quente para a biomassa úmida, é que promoverá a evaporação da água do combustível. Uma vez que a biomassa é colocada em contato com ar quente, ocorre uma transferência do calor do ar à biomassa sob o efeito da diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície da biomassa determina uma transferência de matéria para o ar. Esta última se faz na forma de vapor de água. Uma parte do calor que chega à biomassa é utilizada para vaporizar a água.

Torrefação de Biomassa

A torrefação pode ser definida como um processo de pré-carbonização, o qual se desenvolve justamente na fase endotérmica da pirólise, entre 250 e 300°C. Nestas condições a hemi-celulose é degradada, sendo removida a umidade, o ácido acético, frações de fenol e outros compostos de baixo poder calorífico. Deste processo, resulta um material intermediário entre a biomassa e o carvão, com altos rendimentos energéticos. O objetivo fundamental da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um produto formado em curto tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto.

Briquetes

Quando pequenas partículas de materiais sólidos são prensadas para formar blocos de forma definidas e de maior tamanho, o processo é denominado de briquetagem. Através deste processo, os finos de materiais diversos, subprodutos do beneficiamento industrial, são convertidos em produtos de maior valor comercial. Neste trabalho será dada maior ênfase aos briquetes de carvão vegetal, denominado “carvão ecológico”. No nível de comparação, observa-se que o briquete tem poder calorífico superior ao da lenha, que está em torno de 3.000 kcal/kg e densidade três

vezes maior que o carvão in natura, mantendo o mesmo poder calorífico.

Péletes

Os péletes são fontes de energia renováveis e pertencentes à classe da biomassa. O pélete é um composto 100% natural, com elevado poder calorífico devido à reduzida umidade. Os péletes podem ser produzidos de várias formas, a partir das limpezas das florestas e dos desperdícios das indústrias de madeiras, serrações, carpintarias. Esses resíduos devem ser recolhidos, secos, triturados e moídos. Esse pó de madeira ou serragem é depois comprimido nas chamadas peletizadoras (máquinas para fazer péletes) obtendo assim a forma final. Tal como a lenha, os péletes são considerados uma energia renovável.

Trituração

A trituração é um pré-requisito para vários processos de reaproveitamento de produtos, dentre os quais se destaca a utilização da biomassa para fins energéticos. Este processo torna-se necessário quando se visa à redução de tamanho a dimensões abaixo de 5–20 mm, proporcionando melhor alimentação na fornalha com aumento significativo da área do combustível. O processo de trituração pode ser feito de diversas maneiras: compressão, impacto por compressão, desgastes nas arestas (“*nibbling*”), impacto, abrasão, raspagem (“*shredding*”), sendo que a forma e distribuição do produto variam com o tipo de biomassa e o tipo de equipamento utilizado. A energia necessária para o processamento de uma trituração é proporcional à nova superfície específica obtida, portanto, quando se desejam dimensões reduzidas, há aumento considerável de tempo e da potência gastos, o que influi nos custos.

PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

Ciclos a Vapor

Os ciclos térmicos de potência são utilizados para converter energia térmica em trabalho, podendo usar água ou gases como fluidos de trabalho. 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. 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 3.1 apresenta de forma esquemática o ciclo a vapor.

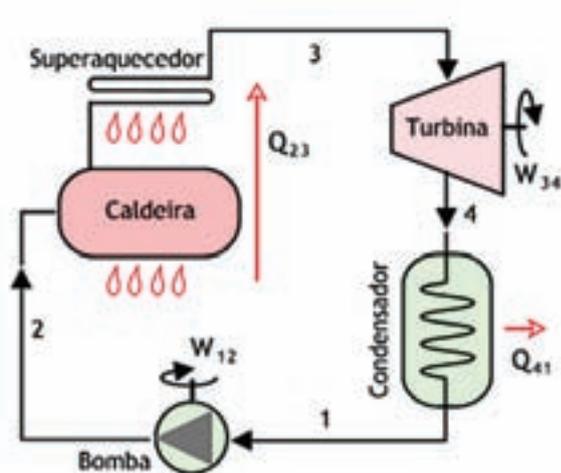


Figura 3.1 – Esquema de um ciclo a vapor

Observando a figura 3.1, o funcionamento do ciclo é descrito a seguir. 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. O vapor de água é coletado na saída superior da caldeira, escoando por uma serpentina imersa nos gases residuais, e a alta temperatura, da câmara de combustão. Esse equipamento denomina-se superaquecedor. Na saída do superaquecedor, os gases residuais são enviados para a chaminé e o vapor para a turbina. O vapor, ao entrar na turbina, está na sua temperatura e pressão mais altas. Esse vapor é injetado contra as pás de uma turbina de maneira similar à que o ar incide nas pás de um cata-vento, fazendo girar o eixo da turbina, 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.

O ciclo é fechado colocando um condensador após a turbina. Esse condensador recebe o vapor de água que sai da turbina, retira seu calor condensando-o e tornando-o líquido, mas à alta temperatura (aproximadamente 60°C). 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 3.1, passa por uma bomba centrífuga onde sua pressão é elevada para a pressão de trabalho da caldeira, fechando o ciclo.

A figura 3.1 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. Diferentemente 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.

A definição da eficiência energética de uma central térmica a vapor é a razão entre a energia elétrica produzida no gerador pela energia da biomassa que alimenta a caldeira, na mesma unidade de tempo. Essa definição está expressa na equação (3.10).

$$\eta_{ctv} = \frac{W_{elet}}{m_{bio} \cdot PCI_{bio}} \quad \text{equação 3.10}$$

η_{ctv} : Eficiência da central térmica a vapor

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 30%.

Consumo de Biomassa de uma Planta a Vapor

O consumo específico de vapor 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 eletricidade produzido no gerador. Por razões construtivas, estes equipamentos não admitem pressões de entrada superiores a 18 atm e estão disponíveis no mercado brasileiro para potências não superiores a 250 kW.

O consumo específico de vapor 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 5 kW até 60 MW. Estas turbinas são projetadas para admitir pressões do vapor de entrada na faixa desde 8

até 60 atm e pressões do vapor na saída desde 0,1 atm. O consumo específico de vapor de uma turbina pode ser calculado usando a equação (3.11).

$$CE_{\text{vapor}} = \frac{m_{\text{vapor}}}{W_{\text{elet}}} = \frac{1}{H_i \cdot \eta_{\text{turb}} \cdot \eta_{\text{ger}}} \quad \text{equação 3.11}$$

CE_{vapor} : Consumo específico de vapor, em kg/kWh; m_{vapor} : Consumo de vapor (kg/s); W_{elet} : Potência elétrica disponível nos bornes do gerador (kW); H_i : Salto entálpico do vapor na turbina (kJ/kg), o qual é a variação da entalpia do vapor entre a entrada e a saída da turbina; η_{turb} : Eficiência mecânica da turbina; η_{ger} : Eficiência do gerador (leva em consideração as perdas elétricas e mecânicas).

As caldeiras disponíveis no mercado brasileiro operam com rendimento na faixa de 85%. Uma caldeira operando a 21 atm e sendo alimentada com biomassa com 50% de umidade, para um consumo médio de 1 kg/h de biomassa, irá produzir 4 kg/h de vapor gerado. Finalmente, uma central a vapor, operando a 21 atm e consumindo biomassa com 50% de umidade, terá um consumo específico de 2 a 5 kg/h de biomassa para 1 kW produzido.

Central com Gasificação

Aqui será tratado de gasificadores de leito fixo tipo extração por baixo (ou Downdraft; ver figura 3.2). Escolhido por sua capacidade de produzir gás com menos alcatrão que outros modelos de gasificadores de leito fixo, como o de extração por cima (ou updraft), o que o torna preferencial para o uso com motores de combustão interna. É preciso lembrar que a tecnologia de gasificadores ainda está em desenvolvimento e possui muitas limitações, embora experiências demonstrem que ela pode ser útil e econômica em várias aplicações.

Características da Biomassa para Uso num Gasificador de Extração por Baixo (Downdraft)

Gasificadores exigem que a sua biomassa de alimentação tenha uma especificação própria, que depende do projeto do gasificador. Como estes combustíveis diferem muito em suas propriedades químicas, físicas e morfológicas, terão diferentes exigências do método de gasificação. Por isso é necessário conhecer as propriedades da biomassa disponível e em muitos casos processá-la e adaptá-la às exigências do gasificador.

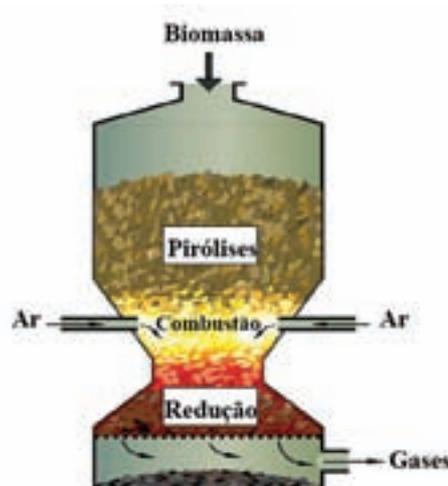


Figura 3.2 – Gasificador Downdraft

Sistema de Limpeza

Partículas sólidas podem ser abrasivas e, misturadas ao alcatrão, podem ser responsáveis pelo entupimento de válvulas, tubulações e travamento de partes móveis. Devido a isto, estes contaminantes são altamente indesejáveis ao final do processo de gasificação, exigindo assim um sistema de limpeza após a saída dos gases do gasificador. Um sistema de gasificação para ser utilizado com motores de combustão interna deve emitir um gás com no máximo 10 mg/Nm^3 de alcatrão e particulado.

Os primeiros passos para a produção de um gás limpo é a escolha do tipo de gasificador que minimize a quantidade de alcatrão e particulados a serem removidos. O segundo passo é determinar a seqüência de remoção dos contaminantes para a instalação seqüencial dos separadores de acordo com as necessidades de utilização dos gases. É necessário remover o alcatrão, a água e os particulados na ordem correta e na temperatura ideal a tornar o processo eficiente. Se os gases são imediatamente resfriados, o carvão residual junto à água e ao alcatrão serão removidos, mas é necessário tomar precauções com a remoção desses resíduos, pois os mesmos formarão um único tipo de material que poderá entupir válvulas e tubulações.

Se os particulados são removidos primeiramente a uma temperatura superior ao ponto de condensação do alcatrão ($\sim 300^\circ\text{C}$), os outros contaminantes poderão ser extraídos separadamente de maneira mais eficiente. O alcatrão seria retirado em segundo lugar (sendo condensável a aproximadamente 150°C) e, por último, seria retirada a água a uma temperatura média de $30\text{--}60^\circ\text{C}$. Uma relação entre temperatura e cada operação de limpeza pode ser observada na figura 3.3.



Figura 3.3 – Relação esquemática de temperatura do gás para remoção de contaminante

ESPECIFICAÇÃO DE UMA PLANTA DE POTÊNCIA

Localização e Quantificação da Biomassa

No Estado do Pará 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 seis milhões de metros cúbicos de resíduo por ano. Deste volume, em torno de 3,61 milhões de metros cúbicos têm 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.

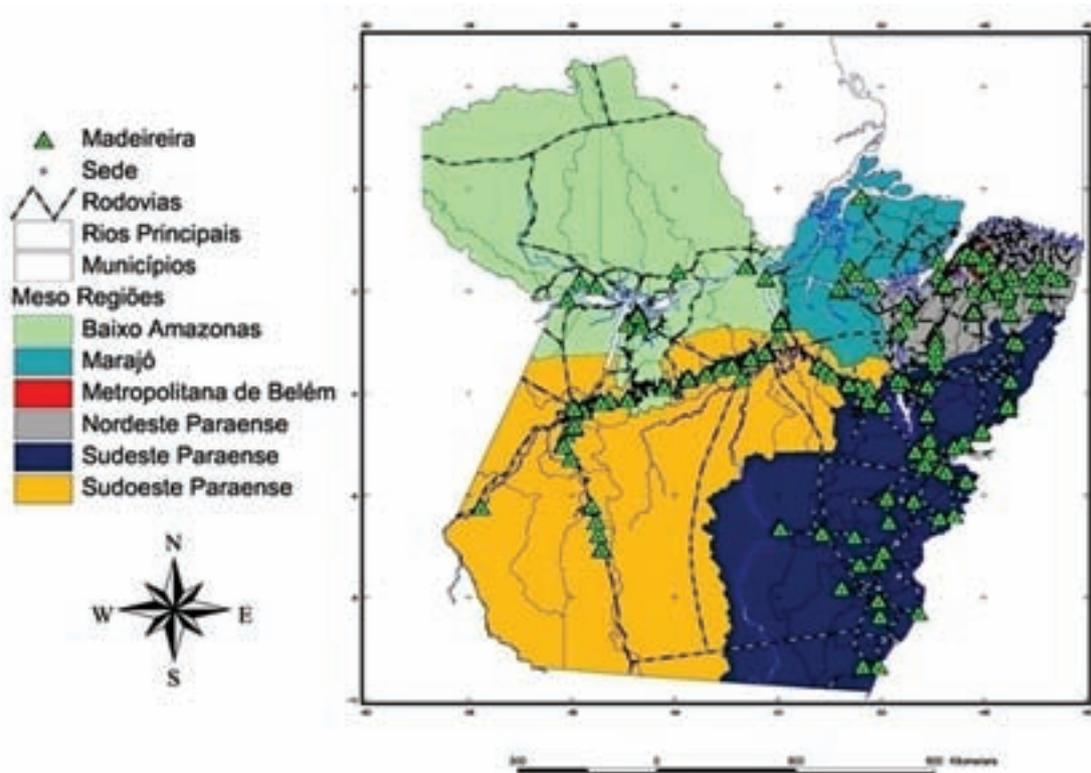


Figura 3.4 – Localização das madeireiras e suas respectivas disponibilidades dos potenciais anuais de geração de energia

A quantificação da disponibilidade de resíduos na biomassa só pode ser possível se estiverem disponíveis os seus parâmetros energéticos. Essa caracterização é feita com a medição do poder calorífico superior, dos teores de voláteis, cinzas e carbono fixo, dos teores de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e densidade a granel. A boa qualidade de uma biomassa será auferida pela comparação do resultado do produto do PCI vezes sua massa específica aparente. Este valor é conhecido como “densidade energética”. A umidade e a forma geométrica são também parâmetros influentes na qualidade. Quanto menores esses parâmetros, mais interessantes sua utilização no processo de combustão direta.

Dimensionamento da Carga a Ser Atendida pela Planta

Dentre as informações mais relevantes para se avaliar a magnitude do sistema que atenderá cada localidade em particular, pode-se mencionar:

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

Procedimento de Cálculo de Carga

Para calcular a carga de um equipamento ou de um conjunto de equipamentos numa residência, devemos, antes de tudo, conhecer a potência de cada equipamento. Inicialmente deve-se procurar nos manuais dos fabricantes dos equipamentos tais informações. Em seguida, devemos fazer os cálculos da seguinte forma:

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

$$C_{\text{unitária}} = \frac{P \times t}{1000} \quad [\text{kWh}] \quad \text{equação 3.12}$$

P: Potência do equipamento em Watts; t: Período de tempo que o equipamento é utilizado durante o dia (hora); C: Carga diária de energia que o equipamento consome em kWh.

Curva de Carga

A curva de carga representa a demanda em quilowatt a cada hora. A curva de carga para a comunidade isolada em questão é apresentada na figura 3.5.



Figura 3.5 – Curva de carga da comunidade tomada como exemplo, obtida para o período de 24 horas, segundo o cenário de consumo de energia elétrica

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.

Com relação à escolha da máquina térmica, esta recai no conhecimento prévio da curva de consumo específico do vapor por cada kWh gerado, pressões e qualidade do vapor de entrada e saída, temperatura do vapor na entrada. A não utilização do ciclo fechado implica em perdas significativas de água, por conseguinte, aumenta os custos com os produtos químicos utilizados no tratamento da água de alimentação.

IMPACTOS AMBIENTAIS E FORMAS DE MITIGAÇÃO

Este capítulo faz uma abordagem sobre como avaliar os impactos ambientais, e as respectivas ações mitigadoras, de usinas termelétricas a biomassa em substituição às termelétricas a diesel.

Inicialmente, o capítulo enquadra as exigências legais para avaliação dos impactos ambientais de usinas termelétricas. A seguir ao enquadramento legal são abordadas algumas definições gerais e conceituais. Após as definições e conceitos, são apresentadas algumas metodologias de avaliação dos impactos ambientais. Na seqüência, é feita uma breve explicação das emissões evitadas de gases de efeito estufa da utilização de biomassa como fonte renovável de energia. Ao final do capítulo propõe-se um roteiro de avaliação de impactos ambientais de uma usina termelétrica a biomassa, através de listas de impactos e possíveis ações mitigadoras.

Métodos e Modelos para Avaliação dos Impactos Ambientais

Há vários métodos para avaliação de impactos ambientais. Os métodos podem ser quantitativos ou qualitativos. Nos métodos quantitativos, os impactos ambientais são avaliados numericamente com valores e unidades, enquanto os métodos qualitativos avaliam por hierarquizações, tais como “nulo”, “pouco”, “significativo”, “muito”.

Método Espontâneo (*ad-hoc*) consiste na reunião de especialistas de áreas de conhecimento diferentes. Os impactos ambientais e as medidas mitigadoras são identificados pelo especialista de cada área através de opinião emitida para todos os outros especialistas. Em seguida, há uma rodada para cada área de conhecimento em que cada especialista emite sua opinião sobre a área em questão.

Listas de controle (*Check Lists*) são listas e tabelas que correlacionam os ambientes e os respectivos impactos. Há alguns tipos de listas de acordo com a complexidade desejada para avaliação dos impactos ambientais:

Listas simples relacionam os impactos diretos. Essas listas não são muito elaboradas e não identificam impactos secundários.

Listas descritivas são mais elaboradas que as listas simples, pois identificam as fontes geradoras dos impactos, mas não especificam a importância do impacto. Podem conter indicações numéricas com valores ou hierarquias.

Listas comparativas estimam as magnitudes dos impactos adotando valores comparativos entre as alternativas ao empreendimento. A comparação pode indicar a melhor alternativa, ou pode fornecer uma boa base para a tomada de decisão.

Listas de controle escalar é uma evolução das listas comparativas adotando valores comparativos entre os impactos ambientais, permitindo a comparação entre os impactos. Os valores, atribuídos por especialistas, podem ir de um mínimo de 0 a um máximo de 3, por exemplo, indicando os níveis de impacto ambiental.

Listas de controle ponderáveis são aquelas em que são atribuídos pesos aos impactos ambientais, permitindo a maior ou menor importância de um fator em relação a outros. Os valores e pesos são atribuídos por especialistas, mas pode-se aplicar questionário à população afetada para refinamento dos pesos.

Matrizes são métodos simples, mas de grande potencial para avaliação da interação entre os impactos. As matrizes podem ser qualitativas ou quantitativas, a exemplo das listas citadas acima. Nas matrizes, as ações estão associadas aos efeitos ambientais, contendo as respectivas magnitudes e importâncias (notas e pesos). As ações são apresentadas na horizontal (linhas da

matriz) e os efeitos na vertical (colunas da matriz). O modelo de matriz mais conhecido e utilizado em avaliação de impactos ambientais se chama Matriz de Leopold.

Os modelos são utilizados para prever os impactos ambientais, e assim simular vários cenários com as opções e alternativas dos empreendimentos. Dentre os modelos de simulação mais utilizados, podemos citar: *Modelo de qualidade do ar (dispersão atmosférica)*, *Modelo de propagação de ruídos* e *Modelos de qualidade da água*.

Avaliação dos Impactos de uma Usina Termoelétrica a Biomassa

Para análise das medidas mitigadoras dos impactos ambientais de uma usina termelétrica a biomassa (com ciclo a vapor ou gasificação) é necessário identificar os impactos em duas fases distintas:

- ♦ Impactos ambientais da construção da usina.
- ♦ Impactos ambientais da operação da usina.

Como descrito nos itens anteriores, a avaliação dos impactos ambientais e as propostas de ações mitigadoras devem ser apresentadas de acordo com uma metodologia ou roteiro. Sugerimos neste texto, portanto, listas simples dos impactos ambientais e suas possíveis medidas mitigadoras, tanto durante a construção quanto na operação de uma usina termelétrica a biomassa.

Impacto no Ciclo de Carbono – Emissões Evitadas

Sem dúvida, o maior impacto global de uma usina termelétrica a biomassa é a substituição de um combustível fóssil (diesel) por um combustível renovável (biomassa). Tal substituição afeta, sobretudo, as emissões dos gases de efeito estufa. Dentre os principais gases de efeito estufa, os mais conhecidos são o CO₂, CH₄ e NO_x. Segundo o Protocolo de Quioto, as emissões de gases provenientes de biomassa não são contabilizadas como contribuição aos gases de efeito estufa, já que o carbono emitido foi fixado em uma planta durante o processo de fotossíntese e, sendo assim, poderá voltar a ser fixado novamente.

Portanto, a substituição de combustíveis fósseis por biomassa em usinas termelétricas resulta em um impacto ambiental global positivo, conhecido como emissões evitadas de carbono. Ou seja, ao utilizar biomassa em termelétricas, as emissões dos gases de efeito estufa são mínimas (levando em conta todo o ciclo de vida da biomassa). Comparativamente às emissões de uma termelétrica a diesel, um kWh gerado por uma usina termelétrica a biomassa deixa de contabilizar cerca de 1,02 kg de CO₂, para efeito do Protocolo de Quioto. Isso significa que 3.000 kg de biomassa úmida utilizada para geração de energia elétrica correspondem a 1.000 kg de emissões evitadas de CO₂.

VIABILIDADE ECONÔMICA

A conclusão quanto à viabilidade ou não de um empreendimento, em especial aos do tipo em estudo, que integram e interagem aspectos específicos e técnicos de engenharia com implicações e repercussões econômicas, financeiras, geopolíticas, sociais e ambientais intensas, não pode ser limitada apenas no seu contexto de exequibilidade técnica na implantação (dimensionamento da planta, execução e montagem das obras civis e dos equipamentos). Os estudos de viabilidade

devem aprofundar na análise de sustentabilidade do empreendimento.

A sustentabilidade é a condição de que algo possa ser sustentável (ou auto-sustentável). Existem inúmeros enfoques, visões, princípios e maneiras de se conceituar e definir esta condição, como por exemplo, nos aspectos ambiental, social, financeiro, econômico, técnico, energético, ecológico, ou mesmo em uma visão holística, a qual contemplaria, pelo menos em tese, todos estes aspectos, mas de maneira conjunta e integrada. As distintas visões apresentam posturas e, conseqüentemente, resultados muitas vezes antagônicos ou conflitantes entre si.

Os Métodos

A Engenharia Econômica possui, em seu escopo conceitual, vários métodos para se proceder à análise e definir valores e/ou indicadores. Embora não seja consensual, a seguir será apresentada uma divisão em três grandes grupos que englobam os principais métodos existentes na literatura, os quais podem ser adotados de maneira isolada (não recomendável por ser muito restritiva) ou de forma conjunta ou integrada, obtendo-se resultados advindos de dois ou mais métodos simultaneamente.

Métodos Determinísticos

Utilizam modelos (os fluxos de caixa) e baseiam-se na aplicação do princípio da causalidade de maneira rígida e até extremada, supondo que das mesmas causas, em circunstâncias iguais, sejam produzidos sempre os mesmos efeitos. Enfim, são métodos que fornecem uma única resposta para cada modelo.

- ♦ **Payback:** objetiva calcular quanto tempo o empreendedor ou investidor necessitará para recuperar o capital financeiro ou recursos (\$) que investiu no empreendimento.

Existem dois tipos: simples e descontado.

- ♦ **Valor presente líquido (VPL):** objetiva calcular a soma algébrica de todos os valores existentes no Fluxo de Caixa, sejam os com sinais positivos (entradas, receitas ou benefícios) quanto negativos (saídas, despesas ou custos), incluindo o investimento inicial, todos já descontados, ou seja, aplicando-se uma taxa de desconto.
- ♦ **Taxa interna de retorno (TIR):** objetiva definir a taxa de desconto com a qual o Valor Presente Líquido (VPL) é nulo, ou seja, que taxa de desconto faz com que a soma algébrica de todos os valores descontados seja igual a zero. Existem alguns aplicativos computacionais, como o EXCEL da Microsoft, que possuem mecanismos ou macros que efetuam o cálculo da TIR, mas o método matemático que o norteia ou no qual se baseia é a de interação, que, de maneira geral, pode ser entendido como a convergência para um valor pré-determinado.
- ♦ **Valor anual uniforme (VAU):** Caracteriza-se pela transformação de todos os valores monetários do fluxo de caixa (modelo) de tal forma que se obtenha uma série uniforme (constante) de valores, valores estes que se constituem, em verdade, no saldo líquido (receitas ou entradas menos custos ou saídas) de cada período. Como nos estudos de viabilidade geralmente se utiliza a periodicidade anual, embora se possa ou deva eventualmente adotar outra (como a mensal, para projetos de curto prazo), o método recebe o nome de valor anual.

Métodos não Determinísticos

São desdobramentos, aprofundamentos, aperfeiçoamentos, refinamentos ou derivações dos modelos utilizados pelos métodos determinísticos, porém admitindo de maneira mais oscilatória, dúbia ou imprecisa alguns componentes como as incertezas e a utilização de princípios estocásticos ou probabilísticos, o que minimiza a rigidez da relação causa e efeito, produzindo a existência ou a possibilidade de existência de mais de uma resposta, ou seja, mesmo utilizando um único método num mesmo modelo podem ser definidos vários indicadores de mesma natureza e calculados distintos valores para o mesmo empreendimento. Podem existir várias respostas.

ENFOQUE SOB ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Na análise de sensibilidade é estudado o efeito que a variação de uma determinada variável (ou dado ou componente) de entrada pode ocasionar no resultado. Sua operação consiste em manterem-se as grandezas de todas as variáveis constantes, excetuando-se uma, a que está sendo analisada, calculando-se com distintas entradas uma série de resultados. Refaz-se o procedimento, desta vez alterando-se a grandeza de outra variável, e a que havia sido testada anteriormente passa a ser tratada como as demais, ou seja, mantendo-se constante, obtendo-se outra série de dados. Pauta-se no princípio econômico *ceteris paribus*, termo latino que pode ser traduzido como “todos os demais constantes” ou ainda “todos os demais se mantêm constantes”.

TEORIA DOS JOGOS

Esta teoria se iniciou na primeira metade do século XX, através dos estudos pioneiros do matemático húngaro John Von Neumann, professor de Princeton (USA), e, com a colaboração decisiva do economista Oskar Morgenstern, se consolidou como uma disciplina de grande relevância da matemática. Ela se pauta nas decisões dos indivíduos (os jogadores) e apropria o conceito de que o resultado do jogo depende do conjunto de decisões tomadas, sustentando-se no Teorema de MinMáx (mínimo e máximo).

SIMULAÇÃO DE MONTE-CARLO

O Método de Monte-Carlo é, basicamente, uma técnica ou um algoritmo para estabelecer uma amostragem de números aleatórios ou pseudo-aleatórios e, desta amostragem, efetuar tratamentos estatísticos utilizando-se de princípios bayesianos ou estocásticos que simularão as respostas e os graus de probabilidades de suas ocorrências.

ÁRVORES DE DECISÃO

Utiliza-se de modelos (fluxos de caixa) cuja representação gráfica é diferente da tradicional, pois no mesmo modelo representa não só a seqüência dos eventos de um determinado empreendimento, mas também as alternativas de realização de outros projetos excludentes entre si, mediante a avaliação de cada um destes simultaneamente através do cálculo dos distintos VPL's em momentos ou tempos também diferentes. Pode ser entendido, de maneira bem simples, como um modelo cuja representação gráfica possibilita um estudo sistemático e racional de várias alternativas excludentes simultaneamente.

Conclusão sobre a viabilidade Econômica do Projeto

Quanto aos métodos adotados, as premissas fundamentais quanto à viabilidade são:

Payback: tempo de retorno do investimento calculado seja menor ou igual a uma expectativa do investidor ou a um tempo considerado compatível pelo segmento;

Em condições reais, para o tipo de investimento em tela, ou seja, as plantas para produção de energia com biomassa, pode-se, no estágio do estudo, definir um tempo razoável de Payback entre 5 e 8 anos, que corresponde a uma faixa de aproximadamente 20% a 30% do horizonte do projeto.

VPL: o Valor Presente Líquido, em unidade monetária (\$), tem de ser positivo, e não somente isto, deve estar acima de uma grandeza razoável para que remunere o risco e o trabalho do investidor, ou seja, tem um piso ou patamar mínimo, que pode ser estabelecido como um percentual do investimento inicial.

TIR: a Taxa Interna de Retorno tem de ter uma grandeza maior do que a TMA (Taxa Mínima de Atratividade), que seria uma expectativa mínima, expressa não em (\$), como na VPL, mas sim em percentual. A grandeza da TMA é bastante elástica e depende de muitos fatores. No contexto econômico atual ela está, na maioria dos setores e empreendimentos, flutuando próximo a 18% ao ano.

A análise pode e deve prosseguir, trabalhando-se com valores pesquisados ou estimados, calculado o VPL, e procedendo-se aos seguintes cálculos:

$VPL \div kW = R\$/kW$ – definirá o resultado por capacidade instalada, que deverá ser comparado a uma grandeza para referência sobre a viabilidade, caso a caso.

$VPL \div kWh = R\$/kWh$ – definirá o resultado em preço da energia gerada, que deverá ser comparado à tarifa praticada pela concessionária ou a preços de mercado de venda de energia para referência sobre a viabilidade, caso a caso. Pode-se ainda, dependendo do resultado, arbitrar ou definir a que nível ou grau pode flutuar ou modificar este preço, chegando a um preço mínimo que pode ser vendida a energia excedente, para se tornar mais competitiva no mercado, mas mantendo ainda a viabilidade do empreendimento, ou seja, conseguindo um VPL positivo.

RESULTADOS CONCRETOS

Centrais Térmicas a Vapor

Localização do Projeto Marajó

A Comunidade de Santo Antônio, localizada na Ilha de Siriri, no município de Breves, na Ilha do Marajó (ver figura 3.6), possuía em 2001 11 famílias ribeirinhas que tinham sua fonte de renda voltada ao desdobro da madeira, agricultura e pesca. A única fonte de energia elétrica até então utilizada era um pequeno grupo gerador a diesel de 3,2 kVA, que fornecia energia elétrica para a serraria e para as residências de forma precária e em períodos não muito longo devido ao alto custo do óleo diesel e sua dificuldade de obtenção.

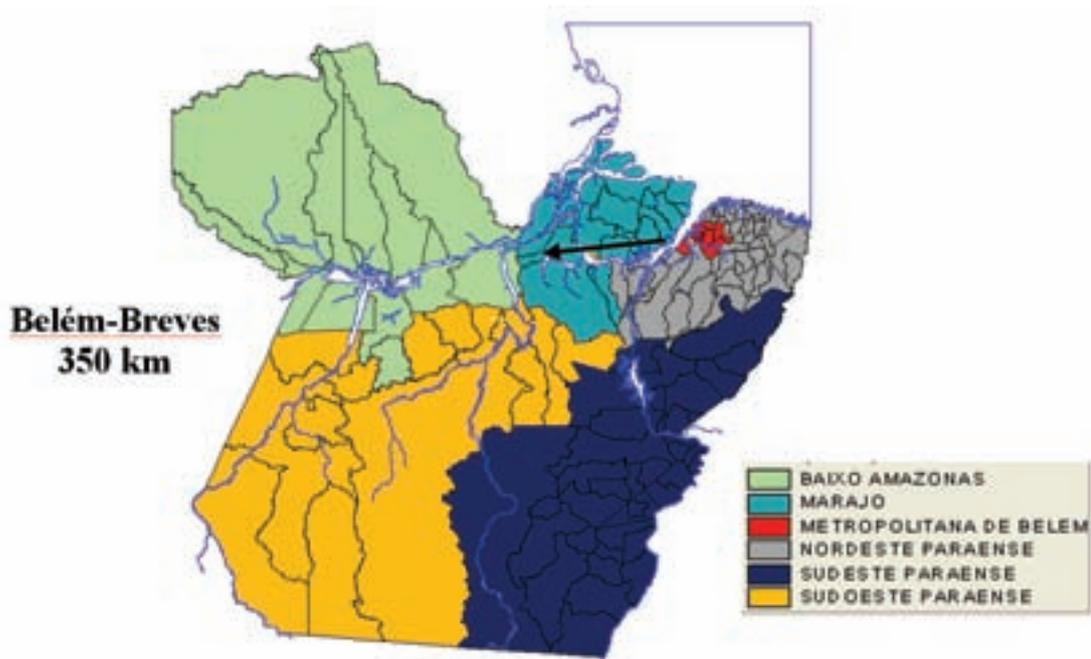


Figura 3.6 – Mesoregiões do Estado do Pará. Localização do Projeto Marajó: S 01° 47,658' W 50° 19,343'

Concepção do Projeto

O projeto consiste numa usina de geração de energia elétrica utilizando como combustível resíduo de biomassa com potência de 200 kW. Agregada à usina, uma fábrica de extração de óleo vegetal e uma fábrica de gelo com câmara frigorífica. Ver figura 3.7. Esse arranjo foi concebido para tirar proveito da demanda reprimida de produtos como gelo, serviços de conservação a frio, óleo vegetal e energia firme e de qualidade.

A usina de geração de energia consiste de uma caldeira flamo-tubular que queima resíduo de biomassa para gerar vapor. O vapor aciona uma turbina que move o gerador elétrico. A fábrica de extração de óleo vegetal com capacidade de esmagar 100 kg/h de polpa é composta de estufa de secagem, cozinhador a vapor, prensa, decantador, filtro prensa e tanque de armazenamento. A fábrica de gelo tem capacidade para produzir 10 ton/dia de gelo em escamas e a câmara frigorífica é de 60 m³.



Figura 3.7 – Estágio atual do projeto

Gestão

Modelo de Gestão: está em fase de constituição uma pessoa jurídica na forma de cooperativa, denominada Cooperativa Multiprodutos de Santo Antônio (CMSA), com objetivo social de indústria, comércio e serviços de energia elétrica, gelo, conservação a frio, óleos vegetais e produtos florestais.

Centrais Térmicas a Gasificação

Localização do Projeto Genipaúba

A usina é parte de um arranjo produtivo local (APL) localizado em Genipaúba, uma comunidade remanescente de quilombo, oficialmente reconhecida em 2002. Genipaúba faz parte do município de Abaetetuba que, por sua vez, integra a mesorregião do nordeste do Pará. Segundo levantamento feito pelo Programa Raízes, em 2003, na fase de implantação do projeto, Genipaúba tem em torno de 280 habitantes, divididos em quarenta e sete famílias. A comunidade está organizada e é representada no projeto pela Associação dos Remanescentes de Quilombos das Ilhas de Abaetetuba (ARQUIA).



Figura 3.8 – Localização da comunidade de Genipaúba

Sustentabilidade

Deve-se levar em consideração que o APL é composto por um complexo com duas unidades com funções distintas, mas interdependentes, de tal forma que uma unidade garanta a sustentabilidade da outra. O sistema ainda não entrou em operação, dificultando análises aprofundadas, mas é possível traçar uma análise de sustentabilidade da usina de gasificação com base em fatores conhecidos.

Como a alimentação dos motores do ciclo diesel é feita com gás de síntese, pode-se considerar como um sistema bi-combustível, uma vez que usa gás e uma complementação de 20% de óleo diesel. Esta configuração oferece a possibilidade de poder manter o sistema operando somente com diesel, caso a biomassa esteja inacessível, ou o gasificador esteja em manutenção. O aspecto negativo é manter a dependência de combustível fóssil, mesmo que em menor quantidade do que

um sistema convencional. Por outro lado, por ser diesel, o sistema é conhecido, tem facilidade de encontrar mão-de-obra e contar com uma grande rede de serviços e suprimentos. Caso a unidade de beneficiamento funcione 8 horas por dia, pode-se prever um consumo de 19,2 litros/dia de diesel. A obtenção é simples, pode ser feita na rede de distribuição comercial da sede do município, em Abaetetuba, que está a 15 minutos por barcos da comunidade. Um aspecto negativo será o desembolso e a dependência.

O suprimento majoritário de biomassa serão os caroços de açaí resultantes do despulpamento na usina de beneficiamento. Considerando que a unidade de despulpamento está a poucos metros da usina de gasificação e não haverá dispêndio com transporte, o custo total torna-se praticamente zero.

É grandemente favorável o uso de uma biomassa nativa, abundante, que faz parte da cultura local, e que serão usados os frutos rejeitados (o que por si só garante um suprimento praticamente inesgotável), mas deve-se atentar para a dependência do suprimento de biomassa com a safra do açaí, que ocorre na região entre os meses de agosto a dezembro, tornando prudente a silagem da biomassa para enfrentar os períodos de entressafra, para gerar energia para manter a câmara frigorífica em funcionamento. Caso ocorra a carência de biomassa, existe a alternativa de usar outra biomassa abundante no período, como os rejeitos do manejo dos açazais, feitos nesta época do ano.

O consumo teórico de biomassa pelo gasificador é de 20 kg/h. Embora não seja recomendável o funcionamento intermitente do gasificador. Para efeito de cálculo considere-se um regime de operação de 8 horas contínuas; então o consumo diário deverá ser de 160 kg por jornada de trabalho.

Resultados

A infra-estrutura idealizada para a usina de gasificação foi implantada, carecendo de obras complementares na unidade de beneficiamento de açaí para viabilizar o pleno funcionamento do complexo (figura 3.9 A e B).



Figura 3.9 – Vista do Complexo. Na figura A vê-se o prédio da usina de gasificação ao fundo; à direita a usina de beneficiamento de açaí; e em primeiro plano um dos postes de madeira implantados. Em B tem-se uma visão geral da implantação do complexo.

O prédio está edificado como mostra a figura 3.10, abrigando o gasificador e grupo gerador; nota-se um engenhoso sistema de estocagem e secagem de biomassa construído na cobertura do prédio.

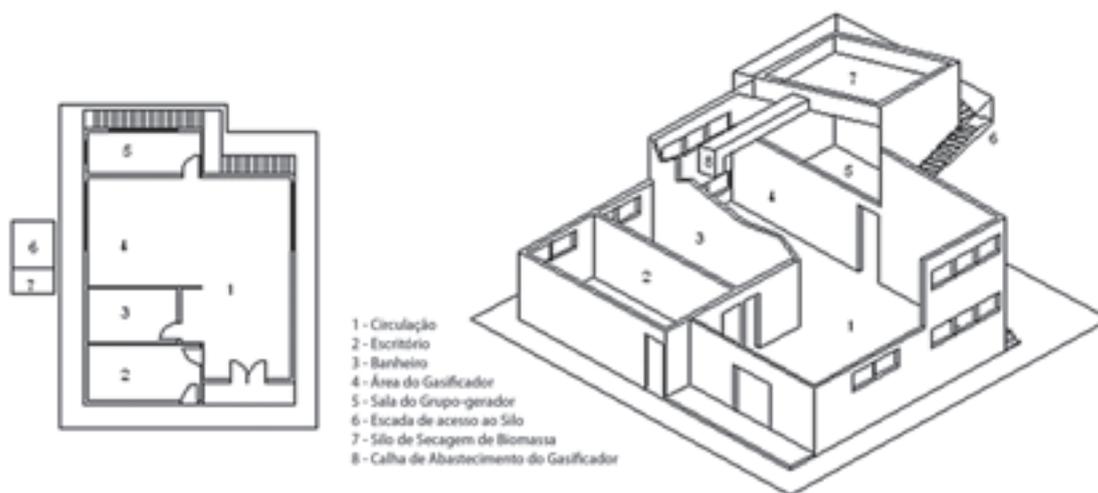


Figura 3.10 – Planta da usina de gasificação



Figura 3.11 – Planta baixa e perspectiva da usina de gasificação- Vistas da fachada do prédio onde se vê a escada de acesso ao silo de secagem (A e B)



Figura 3.12 – A: Depósito de secagem de biomassa, com cobertura móvel para proteger da chuva; B: Duto de ligação do silo com o gasificador

A usina aloja o gasificador e o grupo gerador projetado especificamente para este fim e conta com ambientes internos arejados para permitir a rápida dispersão dos gases, além de espaço suficiente para a realização dos trabalhos de operação e manutenção; a cisterna está no exterior do prédio (figura 3.11). O sistema de gasificação foi testado com sucesso durante três horas aproximadamente, no momento da entrega técnica. Os equipamentos instalados estão com a seguinte especificação técnica.

Especificações Técnicas						
1. Equipamento: Sistema de Gasificação de Biomassa						
Projeto de referência: CGPL, Combustion Gasification and Propulsion Laboratory, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore – India						
Modelo: Topo aberto, co-corrente.						
Dimensões do sistema – (L × A × P)(m): 2,5 × 2,5 × 3,4				Peso 3000 kg		
2. Dados de Operação						
Gases produzidos: CO: 20 + 1%; CH ₄ : 2,0 + 0,5%; H ₂ : 20 + 1%; CO ₂ : 12 + 1% e N ₂						
Nível de alcatrão e particulado no gás após resfriamento e limpeza: <100 ppm						
Poder Calorífico do gás 4,6 MJ/kg						
Capacidade de Geração			Elétrica: 20 kWe			
			Produção de gás: 50m ³ /h			
Carga Parasítica: 3,5 kWe						
Biomassa	Consumo: 20kg/h	Umidade máxima: 15%.	Tamanho Máximo: 60 × 25 × 25 mm	Taxa de rejeito: 4:1		
	Tipo: Qualquer bio-resíduo sólido de massa específica aparente maior que 250 kg/m ³ , conteúdo de cinzas menor do que 5%					
Eficiência a Conversão Biomassa Para Gás 80 %						
Percentual de Substituição de Diesel > 80 %						
Consumo de água 5.0 m ³ /h						
3. Grupo-gerador	Motor	Ciclo-Diesel	Potência 45cv (1800 rpm)	Marca- MWM	Modelo- 229/3	
	Alternador	síncrono	Potência 40kVA	Marca-Negrini	Tipo-Ate	

COMPUTACIONAL

Software CicloRank v1.0

Este modelo de simulação foi desenvolvido para uma dada configuração de fluxograma correspondente ao sistema de potência de um ciclo a vapor. A formulação da análise energética de cada um dos componentes do ciclo foi baseada nas leis da termodinâmica (ver figura 3.13).

Software ComGás v1.0

Esta ferramenta foi criada para realizar simulações em equilíbrio químico de processos de combustão e gasificação de maneira fácil e rápida. O programa é composto por uma janela principal dividida em quatro partes, onde o usuário tem total autonomia para introduzir os dados e selecionar as opções de sua preferência para obter os resultados desejados (figura 3.14).

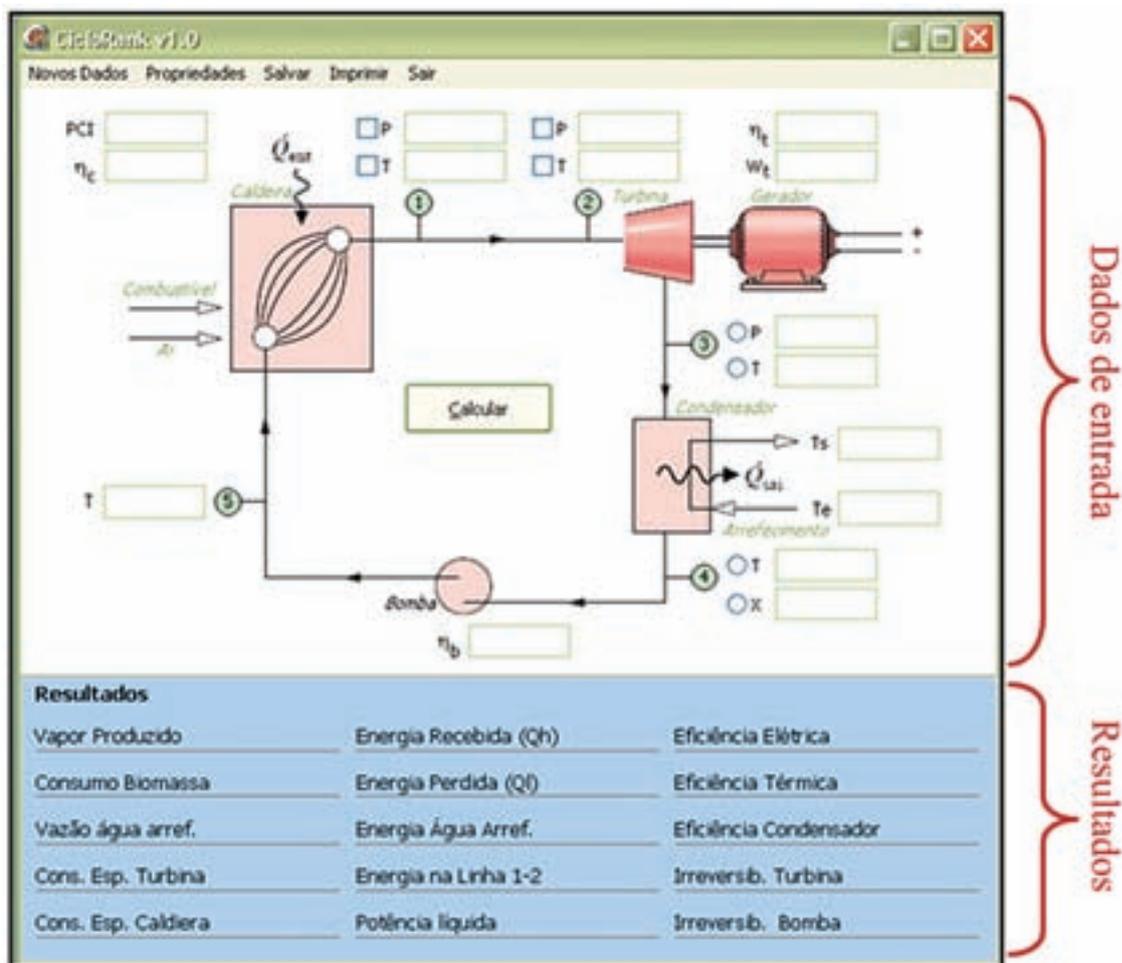


Figura 3.13 – Janela principal do Ciclo Rank

ESPECIE	M_w	ρ	ρ_{liq}	ρ_{sol}	ρ_{sup}	ρ_{sat}	ρ_{crit}	ρ_{triple}	ρ_{triple}	ρ_{triple}	ρ_{triple}
Combustível	25,26	2,283	1	0,7174918	0,3119813						
H ₂ O	18,015	9,809	1,0424703	0,9708467	0,2669126	26,716	0,99	265,646	4,1734,41		
O ₂	31,999	1,429	0,0000000	0,0000000	0,0000000	29,273	0,99	111,517	1,0995,29		
N ₂	28,013	1,251	0,0000000	0,0000000	0,0000000	11,457	1,0002,26	188,717	78,111,71		
Ar	39,948	1,782	0,0000000	0,0000000	0,0000000	37,2	1,00000,34	173,737	18,177,31		
CO ₂	44,01	1,977	0,0000000	0,0000000	0,0000000	21,9	1,00000,34	184,117	18,177,31		
H ₂	2,016	0,089	0,0000000	0,0000000	0,0000000	13,167	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
CH ₄	16,043	0,717	0,0000000	0,0000000	0,0000000	16,043	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂ H ₆	30,07	1,355	0,0000000	0,0000000	0,0000000	17,037	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃ H ₈	44,1	1,965	0,0000000	0,0000000	0,0000000	18,625	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₄ H ₁₀	58,12	2,599	0,0000000	0,0000000	0,0000000	20,213	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₅ H ₁₂	72,15	3,233	0,0000000	0,0000000	0,0000000	21,801	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₆ H ₁₄	86,17	3,867	0,0000000	0,0000000	0,0000000	23,389	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₇ H ₁₆	100,2	4,501	0,0000000	0,0000000	0,0000000	24,977	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₈ H ₁₈	114,23	5,135	0,0000000	0,0000000	0,0000000	26,565	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₉ H ₂₀	128,26	5,769	0,0000000	0,0000000	0,0000000	28,153	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₀ H ₂₂	142,29	6,403	0,0000000	0,0000000	0,0000000	29,741	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₁ H ₂₄	156,32	7,037	0,0000000	0,0000000	0,0000000	31,329	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₂ H ₂₆	170,35	7,671	0,0000000	0,0000000	0,0000000	32,917	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₃ H ₂₈	184,38	8,305	0,0000000	0,0000000	0,0000000	34,505	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₄ H ₃₀	198,41	8,939	0,0000000	0,0000000	0,0000000	36,093	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₅ H ₃₂	212,44	9,573	0,0000000	0,0000000	0,0000000	37,681	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₆ H ₃₄	226,47	10,207	0,0000000	0,0000000	0,0000000	39,269	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₇ H ₃₆	240,5	10,841	0,0000000	0,0000000	0,0000000	40,857	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₈ H ₃₈	254,53	11,475	0,0000000	0,0000000	0,0000000	42,445	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₁₉ H ₄₀	268,56	12,109	0,0000000	0,0000000	0,0000000	44,033	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₀ H ₄₂	282,59	12,743	0,0000000	0,0000000	0,0000000	45,621	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₁ H ₄₄	296,62	13,377	0,0000000	0,0000000	0,0000000	47,209	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₂ H ₄₆	310,65	14,011	0,0000000	0,0000000	0,0000000	48,797	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₃ H ₄₈	324,68	14,645	0,0000000	0,0000000	0,0000000	50,385	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₄ H ₅₀	338,71	15,279	0,0000000	0,0000000	0,0000000	51,973	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₅ H ₅₂	352,74	15,913	0,0000000	0,0000000	0,0000000	53,561	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₆ H ₅₄	366,77	16,547	0,0000000	0,0000000	0,0000000	55,149	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₇ H ₅₆	380,8	17,181	0,0000000	0,0000000	0,0000000	56,737	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₈ H ₅₈	394,83	17,815	0,0000000	0,0000000	0,0000000	58,325	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₂₉ H ₆₀	408,86	18,449	0,0000000	0,0000000	0,0000000	59,913	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₀ H ₆₂	422,89	19,083	0,0000000	0,0000000	0,0000000	61,501	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₁ H ₆₄	436,92	19,717	0,0000000	0,0000000	0,0000000	63,089	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₂ H ₆₆	450,95	20,351	0,0000000	0,0000000	0,0000000	64,677	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₃ H ₆₈	464,98	20,985	0,0000000	0,0000000	0,0000000	66,265	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₄ H ₇₀	479,01	21,619	0,0000000	0,0000000	0,0000000	67,853	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₅ H ₇₂	493,04	22,253	0,0000000	0,0000000	0,0000000	69,441	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₆ H ₇₄	507,07	22,887	0,0000000	0,0000000	0,0000000	71,029	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₇ H ₇₆	521,1	23,521	0,0000000	0,0000000	0,0000000	72,617	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₈ H ₇₈	535,13	24,155	0,0000000	0,0000000	0,0000000	74,205	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₃₉ H ₈₀	549,16	24,789	0,0000000	0,0000000	0,0000000	75,793	0,9999,34	111,517	1,0995,29		
C ₄₀ H ₈₂	563,19	25,423	0,0000000	0,0000000	0,0000000	77,381	0,9999,34	111,517	1,0995,29		

Figura 3.14 – Janela principal do programa ComGás v1.0

4 Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura

SOLUÇÕES ENERGÉTICAS PARA A AMAZÔNIA

Wilma Araújo Gonzalez (*Coordenadora*)

Eduardo José Fagundes Barreto

José de Castro Correia

Marcos Danilo de Almeida

Rodrigo Otávio Lopes de Souza

Cláudia Maria Campinha dos Santos

Claudia Rosembach Machado

Nilson Belo Mendonça

Ernani Pinheiro de Carvalho

Juliana da Rocha Rodrigues

Raquel Medeiros da Silva

Evandro Luiz Dall'Oglio

Paulo Teixeira de Sousa Jr

Vaniomar Rodrigues

Pedro Paulo Nunes

Nídia Maria Ribeiro Pastura

Luiz Eduardo Pizarro Borges

Alternativas Renováveis de Energia a Partir da Biomassa: Soluções Energéticas para a Amazônia

O uso de óleos vegetais como combustíveis substituindo o diesel, seguindo a mesma lógica do Pro-Álcool, começou a ser discutida pelo governo federal em 1975, sob a coordenação do Ministério da Agricultura, dando origem ao Pro-Óleo – Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos. Desde então, diversos estudos foram realizados para aplicação de óleos vegetais “in natura” ou de misturas ao petrodiesel em motores de ignição por compressão (GONZALEZ, 2003).

O grande aumento no consumo de energia proveniente de combustíveis fósseis observado, sobretudo no último século, junto com o aumento nos preços, forçou muitos países nos últimos trinta anos a procurar fontes alternativas de energia e melhorar o consumo energético.

A busca por alternativas às fontes tradicionais de produção de energia abre caminho para um novo mercado no País. Ainda em seus primeiros passos, mas com imenso potencial, a geração por aproveitamento da irradiação solar (fotovoltaica), a força dos ventos (eólica) e a biomassa têm no Brasil o cenário ideal para desenvolver-se. Além disso, a necessidade de um marco regulatório para sistemas isolados corrobora esta procura, especificamente em Energia Renovável a partir de óleos vegetais.

O desenvolvimento e o aprimoramento de tecnologias para a eletrificação com biomassa, bem como para o fornecimento de energia limpa em todos os setores, incluindo o transporte, possui importância fundamental para melhorar o padrão de vida das populações excluídas. Essas tecnologias permitem ao mesmo tempo a substituição de usos tradicionais da biomassa (lenha para cozinhar e executar outras atividades no meio rural) por formas mais eficientes de sua conversão.

Segundo o Ministério das Minas e Energia (MME, 2005), o mapa da exclusão elétrica no País revela que as famílias sem acesso à energia estão majoritariamente nas localidades de menor Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) e nas famílias de baixa renda (cerca de 90% têm renda inferior a três salários mínimos). Na Amazônia, o índice de eletrificação rural ainda é muito baixo, com percentuais de não-atendimento superiores a 80% das propriedades rurais (ROCHA & SILVA, 2005).

O grande desafio consiste em suprir as necessidades energéticas de sistemas isolados; definir qual o modelo adequado para as comunidades, que leve em consideração a logística, as questões ambientais, as questões sócio-econômicas, a gestão, o consumo e o preço atual do diesel na região Amazônica.

Sabe-se que para os motores tipo Diesel várias soluções foram aventadas, ressaltando-se como principais a utilização do próprio etanol em mistura com explosivo conveniente e o aproveitamento dos óleos vegetais. Devido aos riscos decorrentes do uso de substâncias explosivas, que com o tempo poderiam se separar do etanol e concentrar-se nos tanques de combustível dos veículos, foi escolhida a alternativa da utilização do óleo vegetal, que por sinal já havia sido sugerida pelo próprio Diesel em 1912.

No aproveitamento do óleo vegetal para substituição do diesel, três linhas distintas são possíveis.

- 1ª) Utilização direta do óleo vegetal puro ou em mistura com o diesel do petróleo. Esta linha, embora sendo a de menor custo de obtenção do combustível, trazia problemas de ajuste de características físicas para empregos nos motores existentes, além do que, os produtos da combustão seriam diferentes, podendo comprometer as partes metálicas do motor, bem como pelo fato de lançar novos poluentes na atmosfera, possivelmente bastante tóxicos.
- 2ª) Transesterificação, transformando os triglicerídeos naturais do óleo vegetal em monoésteres do etanol ou do metanol. Nesta linha melhoravam-se as propriedades físicas do combustível aproximando-as às do diesel, com o custo não muito elevado; trazia, entretanto as seguintes desvantagens:
 - consumo elevado de álcool etílico ou metílico, numa proporção de 3 moléculas para cada molécula de triglicerídeo;
 - geração de uma quantidade muito elevada de glicerina, que teria, assim, que encontrar uma aplicação em grande escala;
 - persistia o problema de ser um combustível novo, exigindo talvez alguma adaptação do motor e trazendo ainda os inconvenientes já citados, de corrosão de partes metálicas do motor e liberação na atmosfera de novos poluentes com grau de toxidez alto como ácidos e aldeídos;
- 3ª) Transformação de óleo em uma mistura de hidrocarbonetos o mais semelhante possível ao diesel, através de uma degradação térmica ou catalítica dos triglicerídeos que constituem o óleo vegetal. Sob o ponto de vista da qualidade do combustível, esta é a linha que melhor atenderia ao problema. Não haveria necessidade de nenhuma modificação ou adaptação dos motores, bem como não teríamos nenhum problema novo de corrosão ou poluição, uma vez que o combustível seria idêntico, em sua natureza, ao já utilizado. Trazia, entretanto, como grande inconveniente o elevado custo do processo.

Uma das possibilidades de atendimento a estas necessidades como fonte de energia renovável é através do uso óleos vegetais como biocombustível, quer pelo uso “*in natura*” ou transformado quimicamente pelo processo de transesterificação e/ou esterificação ou por craqueamento.

Biodiesel é um combustível biodegradável derivado de fontes renováveis, que pode ser obtido por diferentes processos, tais como a transesterificação ou a esterificação.

O biodiesel é também um combustível renovável, ambientalmente correto, constituído de uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos de ácidos graxos, obtidos da reação de esterificação de ácidos carboxílicos ou transesterificação de qualquer triglicerídeo com um álcool de cadeia curta, metanol ou etanol. Pode ser produzido a partir de gorduras animais ou de óleos vegetais, existindo dezenas de espécies vegetais no Brasil que podem ser utilizadas, tais como mamona, dendê (palma), girassol, colza, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, dentre outras.

O biodiesel é uma evolução na tentativa de substituição do óleo diesel mineral por um óleo oriundo de biomassa. Os biocombustíveis são combustíveis naturais, não tóxicos, biodegradáveis e renováveis que apresentam uma queima limpa, sendo, portanto, ótimos substitutos do diesel do petróleo. A tabela 4.1 mostra as características físico-químicas do biodiesel de várias espécies vegetais e do óleo diesel convencional.

Portanto, o biodiesel substitui total ou parcialmente o óleo diesel de petróleo em motores ciclo diesel, automotivos (de caminhões, tratores, camionetas, automóveis, etc.) ou estacionários (geradores de eletricidade, calor, etc.). Pode ser usado puro ou misturado ao diesel em diversas proporções. A mistura de 2% de biodiesel ao diesel de petróleo é chamada de B2 e assim sucessivamente, até o biodiesel puro, denominado B100.

A Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) define o biodiesel como um combustível para motores a combustão interna com ignição por compressão, renovável e biodegradável, derivado de óleos vegetais ou de gorduras animais, que possa substituir parcial ou totalmente o óleo diesel de origem fóssil.

Características	Origem do biodiesel					
	Mamona	Babaçu	Dendê	Algodão	Piqui	Óleo Diesel
Poder calorífico (Kcal/Kg)	9046	9440	9530	9520	9590	10824
Ponto de névoa (°C)	-6	-6	6	nd	8	1
Índice de cetano	nd	65	nd	57,5	60	45,8
Densidade a 20°C (g/cm³)	0,919	0,886	0,8597	0,875	0,865	0,849
Viscosidade a 37,8 (cSt)	21,6	3,9	6,4	6,0	5,2	3,04
Inflamabilidade (°C)	208	nd	nd	184	186	55
Ponto de fluidez (°C)	-30	nd	nd	-3	5	Nd
Destilação a 50%	301	291	333	340	334	278
Destilação a 90%	318	333	338	342	346	373
Corrosividade ao cobre	0	0	0	0	0	£2
Teor de cinzas (%)	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,014
Teor de enxofre (%)	0	nd	nd	0	0	0,24
Cor (ASTM)	1,0	0	0,5	1,0	1,0	2,0
Resíduo de carbono	0,09	0,03	0,02	nd	0,01	0,35

Tabela 4.1 – Características físico-químicas do biodiesel. Fonte: NETO et al (2002)

As características físicas e químicas do biodiesel são semelhantes entre si, independentemente de sua origem, isto é, tais características são quase idênticas, e independem da natureza da matéria-prima e do agente de transesterificação, se etanol ou metanol. A tabela 4.2 apresenta as propriedades complementares ao biodiesel em comparação ao óleo diesel comercial.

Características	Propriedades Complementares
Características químicas apropriadas	Livre de enxofre e compostos aromáticos, alto número de cetanos, ponto de combustão apropriado, excelente lubricidade, não tóxico e biodegradável.
Ambientalmente benéfico	Nível de toxicidade compatível ao sal ordinário, com diluição tão rápida quanto a do açúcar (Departamento de Agricultura dos Estados Unidos).
Menos poluente	Reduz sensivelmente as emissões de (a) partículas de carbono (fumaça), (b) monóxido de carbono, (c) óxidos sulfúricos e (d) hidrocarbonetos policíclicos aromáticos.
Economicamente competitivo	Complementa todas as novas tecnologias do diesel com desempenho similar e sem a exigência da instalação de uma infra-estrutura ou política de treinamento.
Reduz aquecimento global	O gás carbônico liberado é absorvido pelas oleaginosas durante o crescimento, o que equilibra o balanço negativo gerado pela emissão na atmosfera.

Economicamente atraente	Permite a valorização de subprodutos de atividades agro-industriais, aumento na arrecadação regional de ICMS, aumento da fixação do homem no campo e de investimentos complementares em atividades rurais.
Regionalização	Pequenas e médias plantas para produção de biodiesel podem ser implantadas em diferentes regiões do País, aproveitando a matéria-prima disponível em cada local.

Tabela 4.2 – Propriedades Complementares Atribuídas ao Biodiesel em Comparação ao Óleo Diesel Comercial
 Fonte: NETO *et al* (2002)

A obtenção industrial de biodiesel tem sido realizada em fase homogênea e em presença de catalisadores básicos fortes como hidróxidos, metóxidos e etóxidos tanto de sódio quanto de potássio, visto que estes catalisam a reação obtendo-se conversões a biodiesel em torno de 100%. Estes catalisadores a base de sódio e potássio possuem a vantagem de ter um valor comercial baixo. O maior número de pesquisas na área de biodiesel tem por objetivo otimizar as condições reacionais do processo feito em fase homogênea e/ou heterogênea utilizando diferentes álcoois e catalisadores. Nesse contexto, alguns trabalhos de relevância são considerados.

De um modo geral, biodiesel foi definido pela “*National Biodiesel Board*” dos Estados Unidos como o derivado mono-alquil éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais ou gordura animal, cuja utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão (motores do ciclo Diesel).

BIODIESEL NO BRASIL

Embora o desenvolvimento de combustíveis alternativos no Brasil date do início do século passado, um apoio efetivo para pesquisas em biodiesel somente ocorreu na década de 1960. A motivação para estas pesquisas estava associada com considerações estratégicas e de segurança nacional do governo militar, sobretudo em comunidades isoladas em regiões de fronteira, onde o fornecimento de diesel era difícil por razões logísticas, justificando então uma produção local do combustível. Também era necessário estabelecer alternativas ao petróleo.

Nas décadas de 70 e 80, em resposta ao desabastecimento de petróleo, o governo criou, além do amplamente conhecido PROÁLCOOL, o Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Carburantes (PRO-ÓLEO), elaborado pela Comissão Nacional de Energia, através da Resolução nº 007, de 22 de outubro de 1980. Previa a regulamentação de uma mistura de 30% de óleo vegetal ou derivado no óleo diesel e uma substituição integral em longo prazo. No escopo deste programa de governo, foi proposta, como alternativa tecnológica, a transesterificação ou alcoólise de diversos óleos ou gorduras oriundos da atividade agrícola e do setor extrativista. Neste contexto, destacam-se os estudos da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), em parceria com o Ministério da Indústria e Comércio, da UFC, e da Unicamp realizados pelas equipes dos professores Expedito Parente e Ulf Schuchard, respectivamente. Muita pesquisa foi realizada durante esse período, resultando na solicitação da primeira patente internacional de biodiesel por cientistas brasileiros. No entanto, com a queda do preço do petróleo, o biodiesel foi abandonado em 1986, mas, mesmo após o fim do PRO-ÓLEO como programa de governo, as pesquisas em biodiesel continuaram sendo realizadas por pesquisadores brasileiros.

Esta situação permaneceu inalterada até a década de 1990, quando os países europeus, seguidos por muitos outros, motivados por questões ambientais e de incertezas no fornecimento de petróleo, começaram a utilizar o biodiesel. Em 2002 o Ministro de Ciência e Tecnologia do Brasil criou uma rede de instituições para estudar a produção e o uso do biodiesel produzido através da reação de transesterificação do óleo de soja com etanol. Em janeiro de 2003, após sua posse, o governo Lula estabeleceu um Comitê Interministerial (CI) para o biodiesel, com a incumbência de analisar a possibilidade de produção e uso do biodiesel no Brasil. O CI realizou uma série de audiências públicas com instituições públicas e privadas de todo o País, relacionadas com a cadeia produtiva do biodiesel (pesquisas, realização de testes, produção industrial, agricultura, dentre outras) e também com o parlamento federal e estadual de muitos Estados. As principais conclusões destas audiências foram as seguintes:

1. O biodiesel pode contribuir favoravelmente para minimizar muitos problemas fundamentais no Brasil, como a geração de empregos e renda (inclusão social); a redução na poluição ambiental, reduzindo custos para o sistema público de saúde; mitigação das desigualdades regionais e redução da importação de petróleo.
2. O biodiesel é utilizado em muitos países industrializados. A motivação comum reside na redução da poluição ambiental e na dependência do petróleo.
3. O Brasil realizou avanços na tecnologia para biodiesel desde a década de 1970. Entretanto, estes avanços foram discretos e não harmonizados. O Brasil pode produzir biodiesel por muitas rotas tecnológicas e matérias primas, que podem ser ajustadas à diversidade regional do País, de tal forma que todas as regiões podem ser envolvidas na produção de biodiesel, contribuindo para a redução das desigualdades regionais brasileiras.

Com base nestas conclusões o CI elaborou as seguintes recomendações:

1. A imediata inclusão do biodiesel na agenda oficial do governo, enviando um sinal positivo para a indústria do biodiesel;
2. A redução das desigualdades regionais e a inclusão social devem ser o princípio orientador do Programa Nacional para Produção e Uso do Biodiesel;
3. Autorizar oficialmente o uso de biodiesel no Brasil. O CI considerou este fato uma etapa importante para tornar o País um possível beneficiário do mercado de créditos de carbono (como um Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto);
4. Realizar testes reconhecidos e certificados (em motores veiculares e estacionários) e atividades de pesquisas e desenvolvimento em parceria com a indústria automobilística, os Estados da Federação e outros países;
5. Executar estudos técnicos para produção agrícola de matérias-primas viáveis economicamente em nível nacional;
6. Elaborar normas, regulamentos e padrões de qualidade para o biodiesel de acordo com seus diferentes usos;
7. Implementar políticas públicas (para financiamentos, assistência técnica e extensão rural e para permitir pesquisas) dirigidas para aumentar a eficiência na produção de biodiesel;
8. Evitar subsídios para o biodiesel e sua cadeia produtiva para prevenir distorções ao longo do tempo. Permitir incentivos fiscais para alcançar sustentabilidade econômica, social e ambiental na cadeia produtiva do biodiesel.

Para a implementação de todas estas recomendações foi criada uma Comissão Executiva Interministerial (CEI) subordinada diretamente à Presidência da República. Também foi criado um Grupo Diretor (GD) subordinado ao Ministro de Minas e Energia. Em 2004, o GD apresentou e obteve a aprovação de um plano de trabalho para implementar o biodiesel no Brasil. Desde então muitas leis e regulamentações foram propostas e adotadas para colocar o plano em prática.

Existem alguns aspectos da legislação brasileira para o biodiesel que devem ser destacadas para mostrar que este programa difere daqueles implantados em outros países e também do PROÁLCOOL anteriormente implementado no Brasil. A Lei 11116 (de maio de 2005) e o Decreto 5297 (de 06 de dezembro de 2004) isentam produtores de biodiesel do pagamento do IPI e regulamentam a redução das alíquotas de PIS/PASEP e COFINS, estabelecida em 0,6763. Incrementos na redução foram estabelecidos com valores dependentes do tipo de matéria-prima utilizada, se a matéria-prima for obtida da agricultura familiar e da região na qual foi produzida. Os maiores incentivos acumulam-se para biodiesel produzido de óleos de palmáceas e de mamona, obtidos nas regiões Norte, Nordeste ou semi-árido do País e adquiridos da Agricultura Familiar. Sob tais condições não é necessário o pagamento de PIS/PASEP e COFINS – um incentivo equivalente a R\$218,00/m³ do biocombustível. Os valores para a tributação Federal e Estadual nas diferentes regiões no Brasil podem ser observados na figura 4.1.

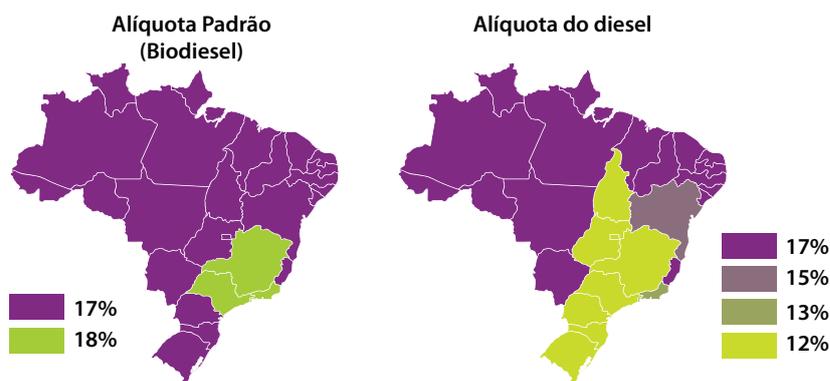


Figura 4.1 – Tributação Estadual sobre Biodiesel e Diesel. Fonte: GT Biodiesel MME, 2006.

Após um ano de amadurecimento, foi lançado o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) em sessão solene no Palácio do Planalto, no dia 4 de dezembro de 2004, sendo o seu principal objetivo garantir a produção economicamente viável do biocombustível, tendo como tônica a inclusão social e o desenvolvimento regional.

A principal ação legal do PNPB foi a introdução de biocombustíveis derivados de óleos e gorduras na matriz energética brasileira pela Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Esta lei prevê o uso opcional de B2 até o início de 2008, quando passará a ser obrigatório. Entre 2008 e 2013, poderão ser usadas blends com até 5% de biodiesel, quando o B5 será obrigatório. Finalmente, a Resolução Nº 3, de 23 de setembro de 2005, do Conselho Nacional de Política Energética, obriga os produtores e importadores de óleo a adquirir todo o biodiesel produzido por companhias ou associações agraciadas com o Selo de Combustível Social a partir de 1º de janeiro de 2006. Este biodiesel deve ser adquirido em leilões públicos controlados pela ANP (Agência Nacional de Petróleo e Biocombustíveis), mostrando que com este Programa de Biodiesel a intenção do governo é evitar as falhas observadas no PROÁLCOOL, notadamente a concentração da produção nas mãos de poucos e somente em algumas regiões do País.

No Brasil a produção de biodiesel em escala industrial começou após a introdução de biocombustível de óleos e gorduras na matriz energética brasileira, tema inserido na Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005. E já no primeiro ano, em 2005, teve uma produção de 736 m³, aumentando para 399.243 m³ em 2007 (tabela 4.3).

Estado	Produção 2005 (m ³)	Produção 2006 (m ³)	Produção 2007 (m ³)
Bahia	-	4.238	69.297
Ceará	-	1.956	47.348
Goiás	-	10.108	110.638
Maranhão	-	-	23.509
Mato Grosso	-	13	12.857
Minas Gerais	44	311	138
Pará	510	2.421	3.717
Paraná	26	100	12
Piauí	156	28.604	30.474
Rio Grande do Sul	-	-	42.696
Rondônia	-	-	99
São Paulo	-	21.251	35.684
Tocantins	-	-	22.773
Total	736	69.002	399.243

Tabela 4.3 – Produção de biodiesel – B100 por Estados – 2005 a 2007 (m³). Fonte: ANP/SRP. Nota: (m³) = metro cúbico.

A capacidade autorizada de plantas de biodiesel no Brasil em maio de 2008 chegou a 2.833.610 m³ e o número de plantas com autorização para produção de biodiesel pela ANP foi de 53 (tabela 4.4).

Estado	Número de Plantas de Produção de Biodiesel	Capacidade de Produção Anual (m ³)
Mato Grosso	19	713.598
São Paulo	8	555.872
Rio Grande do Sul	4	532.200
Goiás	3	259.800
Bahia	2	208.500
Tocantins	2	116.100
Ceará	2	108.720
Maranhão	1	108.000
Piauí	1	81.000
Paraná	3	57.000
Pará	2	34.500
Minas Gerais	3	21.720
Rondônia	2	18.600
Rio de Janeiro	1	18.000
Total	53	2.833.610

Tabela 4.4 – Capacidade Autorizada de Plantas de Produção de Biodiesel no Brasil até 08/05/2008. Nota: Capacidade anual limitada de acordo com licença ambiental de operação vigente. Data da última atualização: 08/05/2008. 300 dias de operação

A partir do dia 1º de julho de 2008 o percentual de mistura obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado aumentou de 2% para 3%. A decisão foi tomada pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). A resolução foi publicada no Diário Oficial da União (Resolução nº 2 de 13 de março de 2008).

Considerando a extensão e a localização geográfica do Brasil, tem-se três vantagens comparativas importantes. A primeira é a diversidade de clima, o que permite administrar de forma mais flexível o risco climático. O segundo aspecto é a exuberância de sua biodiversidade, o que significa que o Brasil necessita exercitar opções de novas alternativas associadas à agricultura de energia – selecionando aquelas que lhe forem mais convenientes – ao invés de depender, incondicionalmente, de uma única espécie, como é o caso da Europa ou dos Estados Unidos. Finalmente, o Brasil detém um quarto das reservas superficiais e sub-superficiais de água doce, o que permite o desenvolvimento de culturas irrigadas, na superveniência de condições climáticas desfavoráveis (Plano Nacional de Agroenergia, 2005).

IME: PESQUISAS DE PONTA NA ÁREA DE PRODUÇÃO DE BIOCOMBUSTÍVEIS

O uso de Energias Renováveis para Atendimento de Comunidades Isoladas Não-atendíveis por Rede Elétrica Convencional poderia ser uma solução para a região Amazônica. No entanto, implantar um projeto nesta região é um desafio.

Partindo dessa premissa, em 2004 foi iniciado o projeto “*Geração de energia a partir de oleaginosa da Amazônia para atendimento à comunidade isolada*”, financiado pelo MME/CT-ENERG/CNPq/PNUD/BID, tendo como estratégia:

Utilizar os conhecimentos existentes em fontes renováveis de energia no IME/DCT/EB/MD como base para o desenvolvimento e defesa da Amazônia.

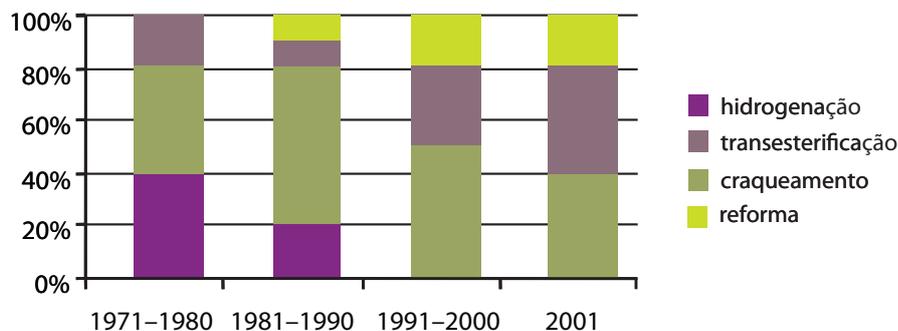


Figura 4.2 – Fontes Renováveis de Energia – IME

Usar a logística do Exército Brasileiro na região Amazônica para implementação do projeto. O acesso à comunidade foi sempre realizado através do Comando Militar da Amazônia – CMA. A equipe contou com apoio do CIGS/CMA, através da disponibilização de embarcações do tipo “voadeira”, além de pessoal para auxiliar nas missões e de equipamento de segurança.

Promover a capacitação de recursos humanos e fomentar a pesquisa de alto nível em áreas de interesse estratégico para a Defesa Nacional, em áreas importantes, principalmente em regiões de fronteira.

Executar este projeto-piloto multidisciplinar através de parcerias entre os cursos de pós-graduação de Química, Mecânica, Elétrica e Cartografia do Instituto, com as instituições da Amazônia CIGS/CMA, EMBRAPA, FUCAPI, FAPEAM, SECT-AM e UFPA.

Este projeto possibilitou o desenvolvimento de inúmeras pesquisas, em escala de bancada, *scale-up* e instalação de uma usina piloto de biodiesel. A metodologia proposta neste projeto-piloto utilizando energia renovável para atendimento a comunidades isoladas considerou:

- i) estudo locacional para definir a matéria-prima e o local onde seria instalada a usina de biodiesel;
- ii) instalação da unidade de produção de biodiesel;
- iii) escolha da comunidade isolada considerando a logística;
- iv) necessidade de localização georreferenciada dos beneficiários;
- v) conhecimento mais apurado da carga dos beneficiários;
- vi) conhecimento da capacidade de pagamento dos beneficiários;
- vii) mapeamento do potencial da comunidade para geração de emprego e renda;
- viii) escolha do local a ser instalado o sistema de geração e a rede elétrica.

Prospecção de Processos

A geração de energia a partir de biomassa pode ser feita por vários processos empregando óleo vegetal, resíduos de biomassa, efluentes, subprodutos e/ou co-produtos de processos, sempre com a intenção de agregar valor à cadeia produtiva (figura 4.3).

A apresentação das pesquisas e produtos desenvolvidos e/ou em desenvolvimento serão apresentados por:

- a. tecnologias de produção do biodiesel;
- b. tecnologias de aproveitamento da glicerina;
- c. tecnologias de aproveitamento do sabão;
- d. tecnologias de aproveitamento da biomassa para produção de biocatalisador;
- e. tecnologias de aproveitamento da biomassa para produção de carvão ativo;

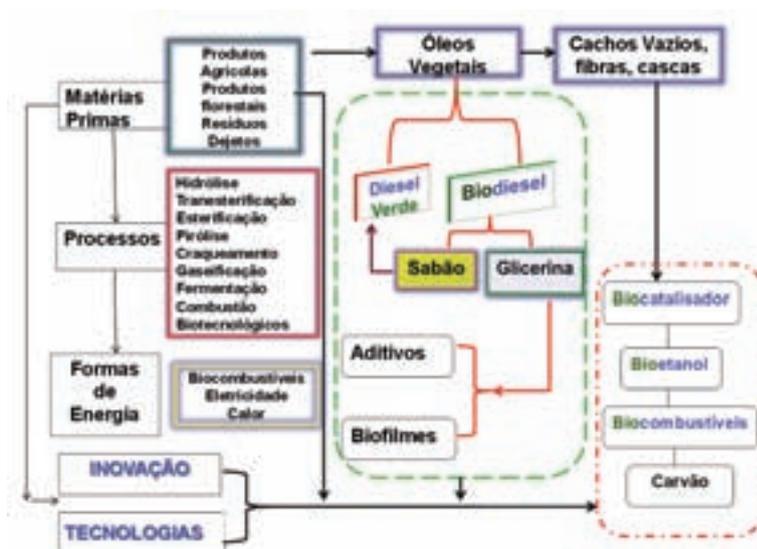


Figura 4.3 – Cadeia Produtiva de aproveitamento de Biomassa

Análise do óleo vegetal

A análise da matéria-prima é fundamental para se definir o procedimento e o processo para produção de um biocombustível. De acordo com a ANP, para que se consiga produzir um biodiesel que atenda às especificações, deve-se utilizar como insumo um óleo vegetal com, no máximo, 1% de acidez. Portanto, a primeira etapa para a produção de biodiesel, independentemente do tipo de óleo vegetal, é analisar a matéria-prima através da determinação da acidez.

Através desta determinação será possível definir o tipo de pré-tratamento desta matéria prima e/ou o processo de produção do biocombustível que poderá ser a transesterificação por catálise básica e/ou ácida (homogênea ou heterogênea) e/ou a esterificação dos ácidos graxos livres, conforme mostra a figura 4.4.

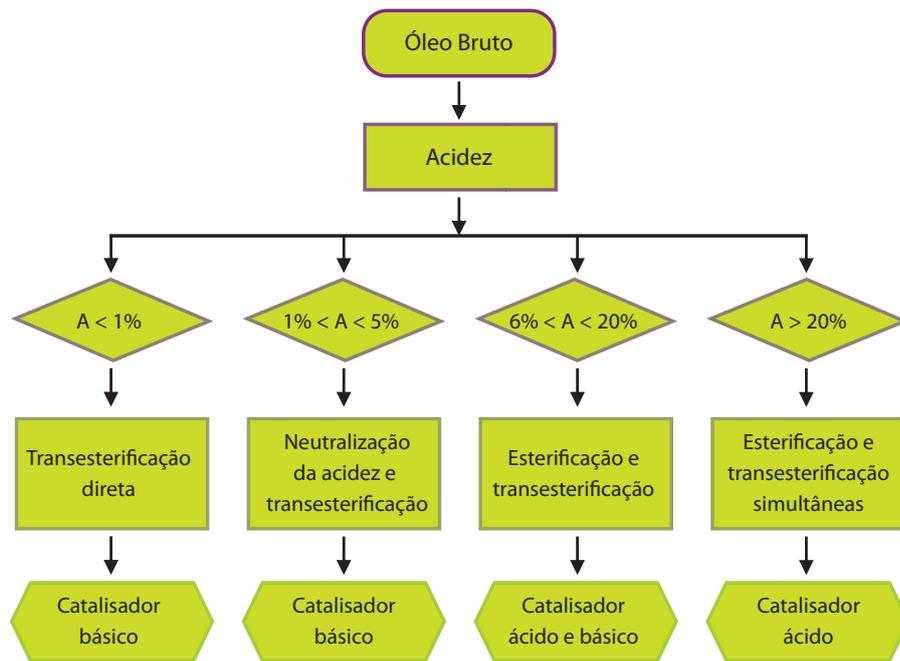


Figura 4.4 – Esquema para definição do processo, A= acidez

Além do tipo de catalisador, se ácido ou básico, ele pode ainda ser homogêneo e heterogêneo. Na catálise homogênea, o catalisador e o substrato estão na mesma fase. Como exemplos de catalisadores ácidos temos HCl, H₂SO₄; e de catalisadores básicos os hidróxidos, carbonatos e alcóxidos de Na ou K. Já na catálise heterogênea, o catalisador e o substrato não estão na mesma fase, o que permite facilmente a separação do catalisador após a reação. Como exemplos de catalisadores heterogêneos podem ser citados os ácidos zircônia-alumina dopada com tungstênio e os básicos CaO, Ca(OMe)₂, Ba(OH)₂, Mg(OH)₂, CaCO₃. Portanto, a comparação entre os catalisadores homogêneos (líquidos) e heterogêneos (sólidos) serve para ajudar na escolha do catalisador mais adequado para o processo a ser estudado. As vantagens e desvantagens de cada tipo de catalisador estão apresentadas na tabela 4.5.

Catalisadores Homogêneos	Catalisadores Heterogêneos
<p>Básicos ou alcalinos facilmente manipuláveis;</p> <p>Menos corrosivos que os catalisadores ácidos homogêneos;</p> <p>Número maior de etapas na produção de biodiesel;</p> <p>Maior produção de resíduos provenientes da neutralização do catalisador, da purificação do produto e recuperação da glicerina.</p>	<p>Podem ser utilizados na transesterificação de óleos vegetais que possuem altos teores de ácidos graxos;</p> <p>Redução significativa do número de etapas de purificação;</p> <p>Possibilita a reutilização do catalisador;</p> <p>Evita a corrosão da planta;</p> <p>Facilita a purificação da glicerina;</p> <p>Requer maior tempo de reação e temperaturas elevadas;</p> <p>Plantas industriais mais sofisticadas.</p>

Tabela 4.5 – Vantagens e desvantagens do uso de catalisadores homogêneos e heterogêneos
Adaptado de Palestra Prof. Dr. Ulf Schuchardt, UNICAMP

Pré-tratamento do óleo

A partir da análise do óleo vegetal descrita acima, o pré-tratamento do óleo bruto pode ser definido. Este pode envolver as etapas de degomagem, neutralização, lavagem, com medidas de acidez antes e depois do processo (figura 4.5).

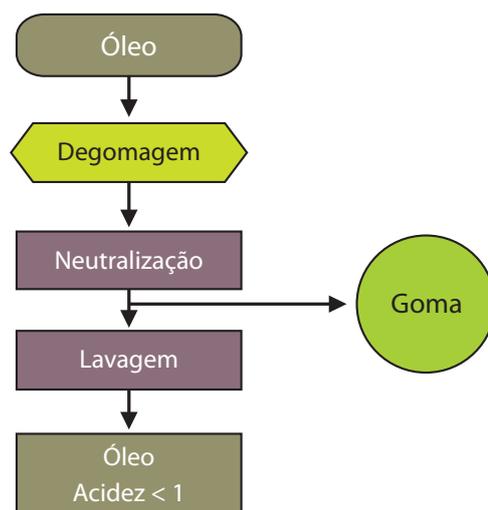


Figura 4.5 – Pré-tratamento do óleo bruto

A etapa de degomagem visa remover do óleo bruto os fosfatídeos, proteínas e substâncias coloidais, que reduzem a quantidade de álcali durante a subsequente neutralização e as perdas nas outras fases do processo.

Alguns processos foram avaliados variando-se as quantidades de óleo e as concentrações das soluções, para otimizar, definir a melhor metodologia e verificar sua viabilidade para implantação industrial. Os processos avaliados foram:

1. Degomagem e neutralização com ácido fosfórico a 85% e solução de hidróxido de sódio 20% a frio.
2. Degomagem e neutralização com ácido fosfórico a 85% e solução de hidróxido de sódio 20% a quente.

3. Neutralização com álcool etílico P.A.
4. Degomagem total.
5. Degomagem e neutralização com fluxo de ar.

Entre estes métodos, o mais promissor foi o de degomagem e neutralização com fluxo de ar, adaptado do processo reportado por Franz Kaltner. Este processo, descrito a seguir, está sendo usado, em rotina, na unidade-piloto de biodiesel, instalada no Campo Experimental da Embrapa de Rio Urubu, CERU (Rio Preto da Eva, AM).

Degomagem e neutralização do óleo vegetal bruto com fluxo de ar

Inicialmente, é determinado o índice de acidez do óleo, usando o método descrito no Manual de Biodiesel (MME). Em seguida, aquecer o óleo até 60°C e adicionar uma solução de NaOH 10% correspondente a quantidade suficiente para neutralizar os ácidos graxos livres presentes no óleo. Aquecer novamente até a temperatura de 75°C e injetar lentamente ar para facilitar a granulação da borra. Desligar então o aquecimento e adicionar lentamente uma solução de NaCl a 10%, em quantidade corresponde a 15% do peso do óleo, sob agitação. Parar a agitação e adicionar em intervalos de 10 minutos uma quantidade de água correspondente a 15% do peso do óleo, a temperatura ambiente. Repetir este procedimento duas vezes. Separar a água / borra por decantação, lavar pelo menos mais três vezes com água aquecida a temperatura de 60°C, separando a água após cada adição. Em seguida secar o óleo por evaporação.

Acidez do óleo de dendê

Os óleos vegetais, especialmente os produzidos a partir de oleaginosas típicas do Norte e Nordeste do País, possuem elevada acidez. No caso específico do dendê, destaca-se como variável importante a acidez do óleo. Esta cultura exige que se disponha de uma indústria de processamento da produção (unidade de extração de óleo) o mais próximo possível da plantação. Tal exigência faz-se devido à necessidade de ordem técnica, uma vez que os frutos devem ser processados até 24 horas, no máximo 48 horas, após a colheita, com riscos acentuados de perda da qualidade do óleo causado por processos enzimáticos de deterioração e aumento da acidez do óleo. Ocorre um processo de hidrólise dos triacilglicerídios (óleo vegetal) que leva ao aumento do teor de ácidos graxos livres (figura 4.6), que são facilmente saponificáveis, devido à reação com uma solução quente de hidróxido de sódio produzindo o correspondente sal sódico do ácido carboxílico, isto é, o sabão.

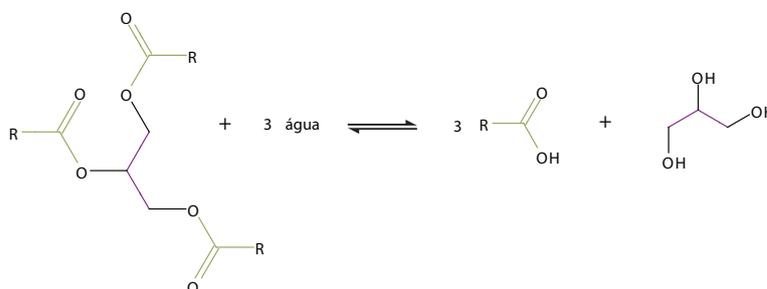


Figura 4.6 – Processo de Hidrólise

Para definição de um local para instalação de uma usina de biocombustível, especificamente na Amazônia, deve-se mapear a região (estudo locacional) e considerar as questões de logística.

Por exemplo, o Campo Experimental da Embrapa em Rio Urubu, município de Rio Preto da Eva, Embrapa Amazônia Ocidental, CPAA, foi a região apontada como aquela que respondia às questões supracitadas para instalação de uma usina-piloto de biodiesel. Esta região possuía uma plantação de 412 ha de palma e uma usina de extração de óleo de palma e palmiste, de modo que o tempo de colheita e de processamento para extração do óleo poderia ser o menor possível. A figura 4.7 mostra a localização da usina de extração de óleo de dendê (Imagem CCD-CIBERS2; cena/ponto 172/103; de composição R3, G4, B2), localizada no Campo Experimental da Embrapa, CERU.

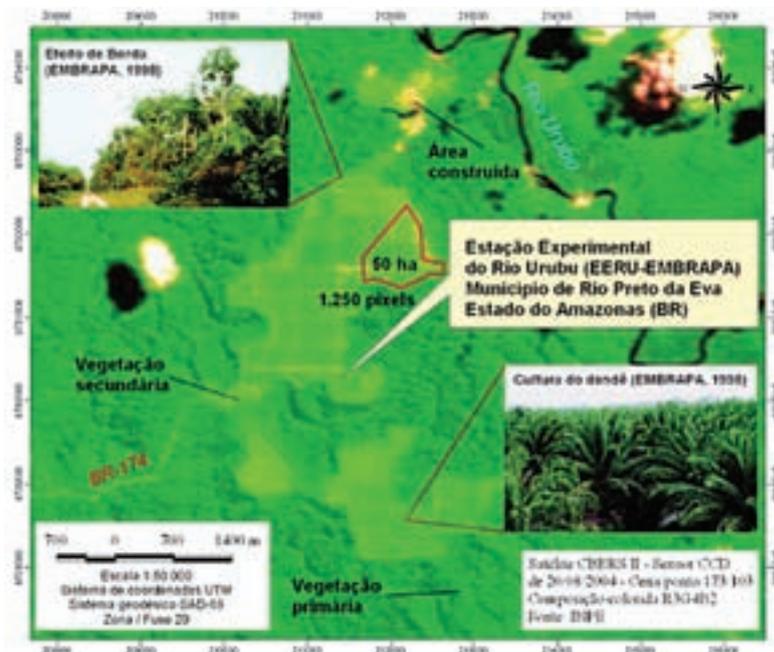


Figura 4.7 – Localização da usina de extração de óleo de dendê em CERU.

Um estudo realizado no IME acompanhou a evolução da acidez do óleo bruto in natura em intervalos tempo pré-fixados, como mostra a figura 4.8. Observa-se que após 60 dias há um aumento progressivo do índice de acidez do óleo de palma, provavelmente devido à sua oxidação e/ou a presença/formação de ácido livre pela presença de umidade. O uso de óleo bruto nestas condições de acidez, se produzido por catalise básica, poderia formar sabão e danificar os motores.

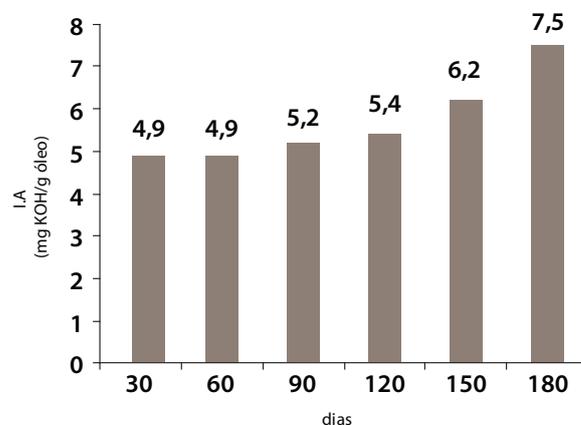


Figura 4.8 – Índice de Acidez do Óleo de Palma Bruto

Produção de biodiesel

A transesterificação alcalina é, de longe, o processo mais usado para a produção de biodiesel. Trata-se de um processo simples e de domínio público. O problema, no entanto, é o custo e a eficiência da etapa de separação das fases após a reação e a purificação dos produtos e co-produtos (principalmente para o caso do etanol) para que se atenda às especificações previstas pela ANP. É importante, portanto, concentrar esforços no desenvolvimento, na melhoria dos processos e dos equipamentos utilizados na separação de fases e purificação.

Além das questões relativas ao pré-tratamento, em que a acidez do óleo bruto é um fator importante para a escolha do processo, o tipo de catalisador e as vantagens e desvantagens relativas à escolha do álcool devem ser consideradas.

Na tabela 4.6 são destacadas algumas questões relativas ao álcool.

Etanol	Metanol
Vantagens	Vantagens
Origem renovável	Menor custo
Produção nacional	Separação imediata da glicerina
Não tóxico	Pode ser produzido a partir do gás de síntese
Desvantagens	Desvantagens
Deve ser álcool desidratado	Tóxico
Processo de separação da glicerina mais complexo, o que implica maior investimento para purificação do biodiesel	O Brasil é importador deste álcool
	Por questões de segurança, não deve ser usado em processos de produção de biodiesel em comunidade isolada

Tabela 4.6 – Vantagens e desvantagens relativas ao tipo do álcool. Adaptado de Palestra Prof. Dr. Ulf Schuchardt, UNICAMP

Reação de transesterificação – rota etílica – Catálise Homogênea

Escala Bancada

O procedimento de produção de biodiesel via transesterificação alcalina, rota etílica, é apresentado no fluxograma da figura 4.9.

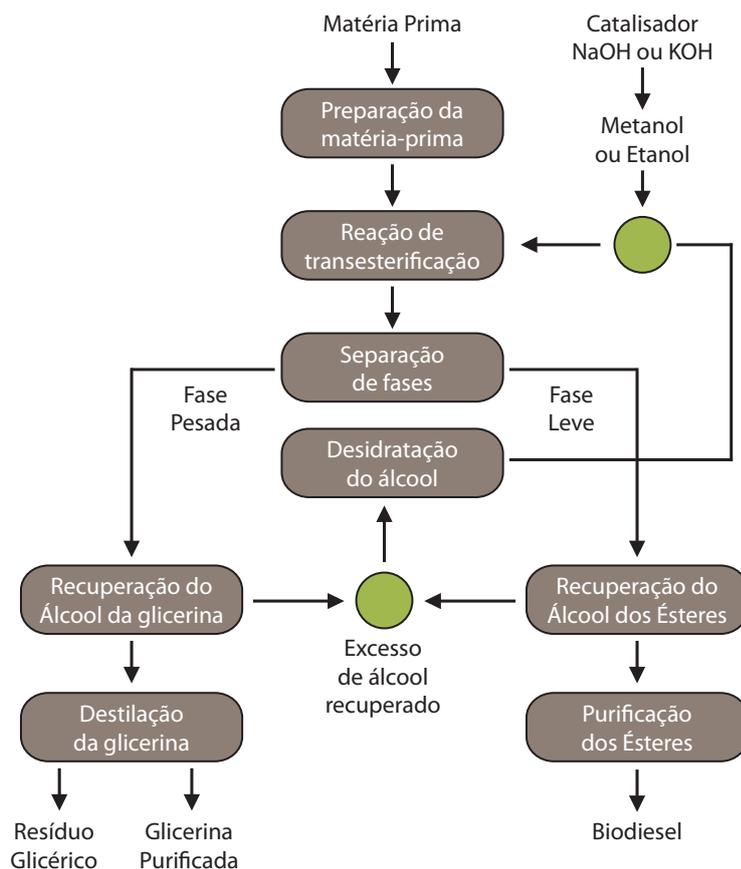


Figura 4.9 – Processo de produção de biodiesel

O teste catalítico para produção de um biocombustível de referência foi realizado em um balão de fundo chato de três bocas com juntas esmerilhadas. Um condensador foi acoplado para manter refluxo constante. O reator foi imerso em um banho de óleo de silicone para uma melhor troca térmica, neste com um termômetro no banho de silicone para acompanhamento da temperatura, como mostrado na figura 4.10.



Figura 4.10 – Aparelhagem de refluxo usada nas reações homogêneas

Após a degomagem e neutralização do óleo vegetal, prepara-se separadamente a solução de catalisador (etóxido de sódio) a quente e só então adiciona-se ao óleo, também quente, contido no balão. A quantidade de catalisador (NaOH) utilizada fica em torno de 1% em relação ao peso do óleo, o teor álcool pode variar com razões molares álcool/óleo entre 9:1 e 5:1; normalmente uma razão molar de 6:1 (equivalente a 100% de excesso de álcool) é usada na reação. O sistema é deixado sob refluxo, em torno de 75°C, durante uma hora. Após esse tempo, transfere-se o efluente reacional para um funil de separação onde se inicia o processo de lavagem, que será detalhado no próximo passo.

Lavagem

A literatura apresenta vários métodos de lavagem. O objetivo é sempre evitar perda de biodiesel para a fase aquosa, o que pode ocorrer devido à formação de emulsões, agravada pela formação de sabões durante a reação ou ainda por excesso de água de lavagem ou de agitação. Um primeiro método que pode ser usado consiste na adição de glicerina seguida de duas lavagens com água a 60°C. Este processo evita a formação de emulsão.

Um segundo método consiste em lavar o produto reacional com água quente a 60°C por duas vezes. Este processo forma emulsão se a mistura for agitada.

Um terceiro método consiste em lavar o produto a temperatura ambiente com uma solução diluída de ácido acético e água na primeira lavagem e duas outras lavagens com água. A separação da primeira lavagem ocorre com formação de três fases distintas, sendo a inferior composta por água contendo acetato de sódio, a intermediária composta majoritariamente por glicerina e a superior por biodiesel. Neste processo não ocorre a formação de emulsão, mas ocorre o arraste de cerca de 10 a 30% de biodiesel na fase rica em glicerina (figura 4.11).



Figura 4.11 – Lavagem do biodiesel.

Secagem do biodiesel

Após a separação da glicerina por decantação, em escala de bancada, o biodiesel pode ser seco com a adição de sulfato de sódio anidro e seco, que por sua vez é separado por centrifugação. Alternativamente, o biodiesel pode ser seco por aquecimento a 130°C (ou a 100°C sob vácuo) por 30 minutos.

Reação de transesterificação – rota etílica – Catálise Heterogênea

Escala Bancada

Para os testes via catálise heterogênea devem ser usados reatores de aço inox tipo autoclave (Parr) com agitação mecânica ou magnética. Reatores tipo Parr de capacidade de 100 mL e 300 mL (figura 4.12) são adequados para este fim.

As reações com catálise heterogênea normalmente são conduzidos a temperatura, pressão e razão álcool:óleo mais elevadas. Valores comuns na literatura são 200°C de temperatura, pressão entre 5 e 10 bar e razão molar álcool:óleo entre 6:1 e 15:1. A quantidade de catalisador varia entre 3 e 20% em relação ao peso de óleo.

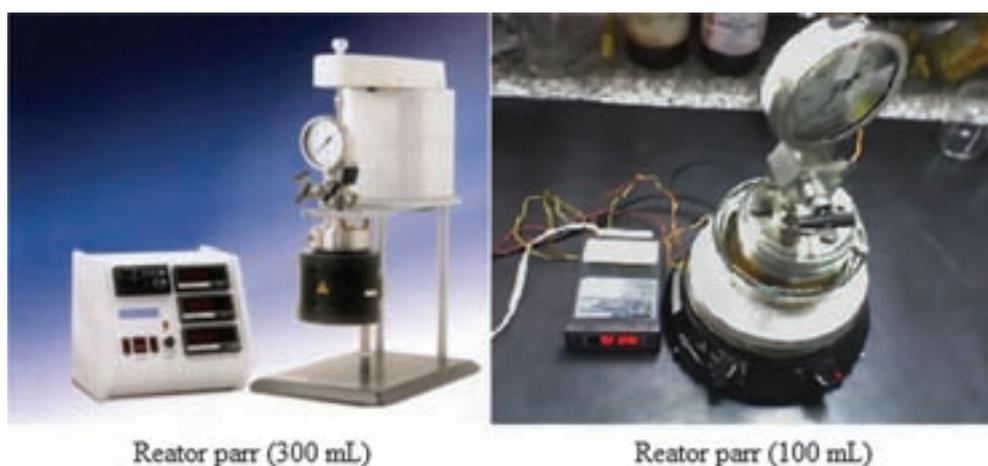


Figura 4.12 – Reatores do tipo Parr utilizados nos testes catalíticos.

Em muitos procedimentos a pressão do sistema corresponde à pressão de vapor do álcool. Alguns resultados obtidos a 200°C e pressão endógena são mostrados na tabela 4.7

Catalisador	Razão álcool/óleo	% Conversão (RMN)	T (h)
zircônia sulfatada dopada (Fe, Mn)	15:1	75	5
zircônia sulfatada	15:1	00	5
zircônia sulfatada	15:1	00	12
36% $H_3PW_{12}O_{40}/SiO_2$	15:1	86	5

Tabela 4.7 – Testes catalíticos realizados a proporções álcool:óleo (15:1)

A influência da pressão pode ser observada ao se comparar o resultado obtido com o catalisador de zircônia sulfatada na reação com óleo de palma que foi realizada a 200° C, sob pressão de 50 bar, com rendimento de 90,3%.

Reação de transesterificação – Aumento de escala

Os sistemas em escala de bancada apresentam várias limitações, principalmente na agitação e no controle de temperatura. O aumento de escala serve a dois propósitos: confirmar os resultados obtidos em escala de banca em condições mais próximas das condições industriais e gerar amostras em maior quantidade para testes e análises mais completos.

O aumento de escala dos processos de produção de biodiesel foi realizado em reatores-piloto multipropósito com capacidades de 20L e 50L do Instituto Nacional de Tecnologia, INT. Estes reatores apresentavam uma série de limitações e inadequações ao processo e foram substituídos por um sistema batelada projetado para permitir a execução de todas as etapas de produção do biodiesel num único equipamento. A tecnologia usada neste reator foi gerada no Instituto Militar de Engenharia, IME, assim como o desenvolvimento do projeto de uma primeira unidade, em aço inox, móvel, de 50L de capacidade (figura 4.13).

O procedimento definido para esta unidade é basicamente o mesmo definido em escala de bancada, sofrendo apenas algumas modificações. A abordagem de projeto privilegiou a simplicidade e o baixo custo, evitando-se o uso de componentes mais caros, como itens de controle

e automação normalmente encontrados em unidades industriais. Em contrapartida, a unidade necessita de um pouco mais de assistência humana para funcionar. Cabe destacar que a unidade pode inclusive ser usada para recuperar e secar o etanol utilizado em excesso.

As maiores vantagens desta unidade são a sua simplicidade, baixo custo e robustez. Estas características fazem com que este tipo de unidade seja ideal para utilização em comunidades isoladas (figura 4.13).

Usina-piloto de biodiesel

A usina de biodiesel foi instalada em CERU, onde existe uma plantação de 412ha de dendê, uma usina de extração de óleo e uma comunidade de funcionários da Embrapa/CPAA, além de uma escola.

O vapor e a bacia de decantação de rejeitos utilizados pela usina-piloto de biodiesel são da unidade de extração de óleo de dendê (figura 4.14). Cabe destacar que a caldeira da unidade é alimentada com os rejeitos da própria unidade.



Figura 4.13 – Unidade móvel de produção de biodiesel



Figura 4.14 – Unidade de extração de óleo de dendê (CERU/Embrapa-CPAA)

A unidade é completa, sendo projetada para executar todas as etapas do processo de produção, do pré-tratamento do óleo bruto até o acabamento do biodiesel, incluindo a recuperação e secagem do álcool.

Apesar de executar todas as etapas descritas acima, a unidade é bem simples e robusta. Em termos de controle, existem apenas indicações básicas de temperatura e pressão, sem nenhuma automação. O controle é todo manual, com o operador tendo que atuar no acionamento de todos os equipamentos (bombas, agitadores, válvulas, trocadores de calor).

Cabe destacar como diferencial o fato de a unidade possuir um sistema completo de recuperação e secagem do etanol utilizado em excesso. A secagem é feita com auxílio de um leito de peneira molecular, material adsorvente com grande capacidade para retenção de água. Este material é regenerado no local e pode ser utilizado por inúmeros ciclos.



Figura 4.15 – Unidade de 1.000 litros por batelada (CERU/Embrapa)

Em condições ideais, esta usina pode produzir até três bateladas por dia, ou seja, até 3.000 litros de biodiesel por dia. Esta produção poderia gerar energia elétrica para suprir as necessidades do CERU, da comunidade local e ainda algumas comunidades de Rio Preto da Eva.

Óleo Vegetal in Natura em Motores de Combustão Interna

INTRODUÇÃO

A possibilidade de utilização de óleos vegetais puros como combustível de motores de ciclo diesel é conhecida desde a fase de desenvolvimento do motor, havendo registros de utilização de óleo de amendoim em experimentos realizados pelo Dr. Rudolf Diesel no ano de 1911. A partir desta época têm sido realizados estudos para viabilizar técnica e economicamente o uso de óleos vegetais como fonte de energia renovável.

Desde a década de 70 experimentos vêm sendo realizados principalmente na Alemanha, demonstrando que é possível obter-se uma operação confiável com óleo vegetal não transformado, mesmo em motores diesel convencionais. Para isto, é necessário que o óleo vegetal seja aquecido para diminuir sua viscosidade e que cada ciclo de funcionamento do motor deve começar com diesel, passar para óleo vegetal após alguns minutos (quando o motor já estiver quente), e operar os minutos finais também com diesel para “lavar” o sistema injetor e impedir que resíduos de óleo vegetal esfriem dentro da bomba injetora e, principalmente, nos bicos injetores.

Motores com injeção indireta (pré-câmara) também são recomendáveis para esta aplicação por serem mais tolerantes ao óleo vegetal.

Em princípio considera-se que a utilização de óleos vegetais em motores estacionários, como nos grupos geradores, é menos problemática do que em motores automotivos, por operarem com rotação constante e baixa e por serem sujeitos a menores variações de carga ao longo da operação. Além disto, nos motores estacionários os inconvenientes relacionados à utilização de dois combustíveis, como mencionado anteriormente, são muito menos significativos do que nos motores automotivos. Portanto, ao contrário dos motores automotivos, a utilização de motores estacionários para suprimento de energia elétrica a comunidades isoladas estaria prevista para locais de difícil acesso ao diesel, e conseqüentemente com maior justificativa econômica para o uso do óleo vegetal como combustível.

Segundo Di Lascio (2004), para adequar o refino do petróleo à realidade nacional, a coluna de destilação das refinarias foi redistribuída para produzir maior quantidade de diesel, com características (mais leve e menos viscoso) para facilitar a combustão nos motores veiculares. Portanto, estes motores diesel passaram a ser produzidos sem pré-câmara, com injeção direta, tornando-se inadequados para uso direto de óleo vegetal *in natura*. Em conseqüência, o uso de óleos vegetais *in natura* diretamente em motores diesel de injeção direta passou a ter os seguintes problemas: i) aparecimento de resíduos de carbono no interior dos cilindros, câmara de combustão, especialmente nas proximidades das válvulas de descarga, comprometendo a normalidade de funcionamento das mesmas e do próprio motor; ii) entupimento dos bicos injetores, sobretudo quando o óleo vegetal tem alto índice de insaturação, o que o predispõe para as reações de polimerizações; iii) diminuição do rendimento do motor e aumento conseqüente

do consumo, resultantes do insuficiente índice de cetano, inerente às características dos óleos vegetais; iv) necessidade de regulação especial no sistema de injeção do motor para cada tipo de óleo vegetal; v) diminuição do tempo de troca do óleo do carter, especialmente quando este for de alta taxa de aditivação; vi) diminuição da vida útil do motor, especialmente quando alimentado com óleo de elevado índice de ácidos graxos livres; e vii) emissões de produtos tóxicos, onde se incluem a acroleína e certas substâncias orgânicas, resultantes de uma combustão incompleta.

Atualmente, o uso de óleo vegetal *in natura* em motor de combustão interna volta a ser firmemente considerado, principalmente devido às emissões de gases de efeito-estufa e à elevação consistente dos preços do petróleo. Alguns fatores relevantes deverão trazer profundas modificações no mercado de energia. Esses fatores são relacionados por Kaltner:

- ♦ A evolução das tecnologias de produção agrícola que permitem a utilização de seus produtos com vantagens econômicas e ambientais como matéria-prima em processos industriais, em substituição a insumos não renováveis.
- ♦ A necessidade de implantação de programas de produção auto-sustentáveis (emissão zero), que satisfaçam as necessidades atuais sem diminuir a oportunidade das gerações futuras, em atendimento ao Protocolo de Kyoto.
- ♦ A previsão de que a produção mundial de petróleo atingirá o pico entre os anos de 2004 e 2008. A partir daí, as reservas mundiais começarão a declinar, conforme estudo publicado no livro *Hubbert's Peak – The Impending World Oil Shortage*, de Kenneth S. Deffeyes, editado pela Princeton University Press/2001. Como o mercado de petróleo tem crescimento de 2% ao ano, a confirmação desta premissa influenciará fortemente o mercado de produtos agrícolas que tenham aplicação como substituto de petróleo.
- ♦ A necessidade de utilização de óleos diesel com baixíssimos teores de enxofre, por questões ambientais, exigem a adição de aditivos para melhorar a qualidade de lubrificação do combustível. Dentre os aditivos pesquisados, os derivados de óleos vegetais são os de mais baixo custo, e já fazem parte da formulação de diversos óleos diesel premium vendidos no mercado.
- ♦ A necessidade de eletrificação de comunidades isoladas, cujo atendimento não tem viabilidade econômica, seja pela distância da rede ou pelo custo de transporte de óleo diesel.

Uso de Óleo Vegetal *in Natura* em Motores

Os principais problemas identificados com o uso de óleo vegetal *in natura* são:

- i) dificuldade de partida a frio devido à viscosidade dos óleos vegetais, que é até 10 (dez) vezes maior que a viscosidade do óleo diesel na temperatura de referência;
- ii) ponto de fusão elevado;
- iii) formação de gomas nos bicos injetores;
- iv) decomposição de componentes da bomba injetora, devido à acidez do óleo;
- v) formação de depósitos de carvão na câmara de combustão, nos cilindros e nas válvulas.

A formação de goma e carbonização é decorrente da existência de ácidos graxos insaturados nos óleos vegetais. Quando esses óleos são submetidos às altas temperaturas da câmara de combustão, há formação de polímeros. Por exemplo, óleos brutos do tipo soja, algodão, canola e girassol não são adequados para uso como combustível em motores diesel, pois possuem na

sua composição alto teor (percentagem) de ácidos graxos insaturados, como oléico, linoléico e linolênico, que possuem, respectivamente, uma ligação dupla, duas duplas e três duplas, conforme apresentado na tabela 4.8.

Existe também a dificuldade de partida a frio devido à viscosidade dos óleos vegetais, que é até 10 vezes maior que a viscosidade do óleo diesel na temperatura de referência. O ponto de fusão do óleo vegetal *in natura* é mais elevado, sendo necessário, portanto, reduzir a formação de gomas nos bicos injetores. Ocorre também a formação de polímeros quando este óleo *in natura* é submetido às altas temperaturas na câmara de combustão. Portanto, óleos brutos com grau de insaturação (soja, algodão, colza, girassol) não são adequados para operação como combustíveis *in natura* em motores diesel.

Ácidos (%)	Tipos de Óleos				
	Algodão	Amendoim	Canola	Girassol	Soja
Láurico	<0,1	<0,4	–	<0,4	<0,1
Mirístico	0,4–2,0	<0,6	<0,2	<0,5	<0,5
Palmítico	17,0–31,0	6,0–16,0	2,5–6,5	3,0–10,0	7,0–14,0
Estearico	1,0–4,0	1,3–6,5	0,8–3,0	1,0–10,0	1,4–5,5
Araquídico	<0,7	1,0–3,0	0,1–1,2	<1,5	<1,0
Behênico	<0,5	1,0–5,0	<0,6	<1,0	<0,5
Lignocérico	<0,5	0,5–3,0	<0,2	<0,5	–
Oléico	13,0–44,0	35,0–72,0	53,0–70,0	14,0–35,0	19,0–30,0
Linoléico	–	13,0–45,0	15,0–30,0	55,0–75,0	44,0–62,0
Linolênico	0,1–2,1	<0,3	5,0–13,0	<0,3	4,0–11,0
Erúcido	<0,5	<0,3	<5,0	<0,5	–

Tabela 4.8 – Composição química de alguns óleos vegetais

Uma das soluções encontradas para melhorar a utilização de óleo vegetal *in natura* como combustível é fazer um pré-tratamento e/ou refino dos óleos brutos, de modo que alguns problemas possam ser minimizados. A neutralização, a degomagem e o pré-aquecimento do óleo vegetal bruto podem ser alguns dos procedimentos usados como pré-tratamento para eliminar os problemas na bomba injetora e para reduzir os depósitos de carvão. Outra possibilidade é a injeção do óleo vegetal aquecido, o que eliminaria o problema da viscosidade e do ponto de fusão (FRANZ KALTNER).

Propriedades Físico-Químicas dos Óleos Vegetais que Influenciam o Funcionamento dos Motores Diesel

As propriedades do óleo vegetal, descritas a seguir, influenciam no funcionamento e na durabilidade do motor.

- i) *viscosidade*, medida da resistência interna ao escoamento de um líquido, é fundamental para a qualidade de atomização do óleo no bico injetor;
- ii) *índice de cetano*, que define o poder de auto-inflamação e de combustão do óleo; significa que um número de cetano baixo gera deficiência na lubrificação do motor;

- iii) *ponto de inflamação*, temperatura em que um óleo queima durante um período mínimo de 5 segundos;
- iv) *ponto de ebulição*, temperatura em que o óleo passa do estado líquido para o gasoso;
- v) *ponto de névoa*, temperatura inicial de cristalização do óleo;
- vi) *índice de iodo*, expressa o grau de insaturação do óleo;
- vii) *índice de acidez*, expressa a acidez livre no óleo;
- viii) *índice de peróxido*, expressa o grau de oxidação do óleo;
- ix) *nº Conradson – CCR*, que expressa os resíduos de carbono, depositados durante a queima do combustível;
- x) *filtrabilidade*, que expressa a dificuldade com que o óleo é filtrado antes da injeção no motor;
- xi) *teor de gomas*, que expressa a quantidade de gomas formadas pela polimerização dos componentes insaturados do óleo durante a combustão.

Propriedades que Influenciam a Quantidade de Energia Gerada

- i. Massa específica: A massa específica do óleo diesel é ~ 10% menor que os óleos vegetais, e o poder calorífico do óleo diesel é ~ 12% maior. Isso faz com que, na prática, o número de calorias por unidade de volume seja praticamente igual.
- ii. Poder calorífico: O volume de combustível consumido pelo motor operando com óleo vegetal é aproximadamente 2% maior ao consumido na operação com óleo diesel.

Para operar motores diesel com óleos vegetais *in natura* existe a necessidade da adoção dos seguintes procedimentos: i) reduzir a viscosidade; ii) utilizar óleos com baixo índice de iodo e alto índice de cetano; iii) reduzir o depósito de carbono nos bicos injetores (menor CCR); iv) melhorar a filtrabilidade na bomba padrão de combustível do motor.

Portanto, o óleo vegetal ideal para funcionamento como substituto de óleo diesel deveria ter índice de cetano maior que 40 e índice de iodo menor que 25.

Outra questão importante está relacionada à obtenção do óleo vegetal, isto é ao processo de extração, que pode ser por solvente ou por prensagem. O tipo de prensagem depende da quantidade de matéria-prima a ser processada. Pode ser utilizada prensa do tipo manual, geralmente hidráulica, como a prensa mecânica do tipo “expeller”, de parafuso contínuo.

Recentemente, Almeida verificou o potencial de algumas oleaginosas nativas da Amazônia, incluindo a questão da sazonalidade, quer para uso de óleo *in natura* quer para produção de biodiesel por rota etílica (Almeida, M.D., 2007), de forma a ajudar na escolha da matéria-prima, na definição do processo de geração de biocombustíveis, juntamente com a logística, de modo que possa ser assegurado o suprimento contínuo.

Desta forma, o uso do óleo vegetal *in natura* em motor de combustão interna, ciclo diesel, obedece aos mesmos princípios do uso do diesel para a geração de energia elétrica. Existem diversas tecnologias que adaptam tais motores para a queima de combustíveis renováveis. Atualmente, as tecnologias que utilizam óleo vegetal *in natura* em motor de combustão interna com algum sucesso são: i) motores com pré-câmara de combustão, do Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement – CIRAD; ii) motores com kit de conversão; iii) motor Elsbett, equipamento alemão especialmente desenvolvido para queimar óleo vegetal.

Motores com pré-câmara de combustão

Na Europa são fabricados vários modelos de motores diesel com pré-câmara. O CIRAD desenvolveu um kit para tornar esses motores capazes de funcionar com óleo vegetal *in natura*. A cabeça do pistão é recortada e recebe uma placa refratária para aumentar a temperatura da combustão. São introduzidos mais sensores de temperatura na pré-câmara, melhorando a eficiência da queima. Também são acrescentados no circuito do combustível uma segunda bomba e um segundo filtro para incrementar a pureza do combustível. A existência desta pré-câmara torna mais suportável o uso de óleos vegetais de qualidade inferior, que devem sempre manter um elevado padrão de limpeza com a retirada prévia de sabões e impurezas.

Kit de Conversão

A utilização de óleos vegetais *in natura* como combustível em motor diesel requer uma série de ajustes e modificações no motor. Existem diversos fornecedores no mercado europeu que fornecem kits para adaptação de motores. O kit básico é composto de: i) tanque de óleo vegetal com serpentina p/ aquecimento e sensor /indicador de temperatura; ii) bomba auxiliar de água p/ sistema de refrigeração e tubulação de interligação do radiador com serpentina do tanque; iii) válvula termostática multivia para reversão da operação óleo diesel/óleo vegetal; iv) sensor de temperatura do motor; v) tubulação de óleo vegetal; vi) eliminador de ar; vii) comando computadorizado de controle do funcionamento com óleo diesel/óleo vegetal, que monitora: a temperatura de injeção do óleo vegetal; a temperatura do motor; a viscosidade do óleo vegetal; a reversão do funcionamento para óleo vegetal após motor e combustível atingirem a temperatura especificada; reversão do funcionamento para óleo diesel com programação temporizada no final da operação, para limpeza das tubulações e bomba injetora.

O sistema funciona da seguinte maneira: a energia térmica da água de circulação do motor deve ser reutilizada para pré-aquecer o tanque do óleo vegetal; este será aquecido na admissão do motor, quando sua viscosidade se aproxima ao valor da viscosidade do óleo diesel a temperatura ambiente; a injeção do combustível é ajustada; o óleo vegetal é filtrado para evitar entupimentos; o motor parte e opera com o óleo diesel inicialmente; em seguida há um período de transição em que o óleo vegetal se mistura ao diesel e, posteriormente, somente o óleo vegetal é utilizado como combustível. No Brasil, Cenbio também vem procurando desenvolver este tipo de equipamento.

O uso de óleo *in natura* vem sendo avaliado em diversos motores no Brasil, em diferentes condições de acordo com a matéria-prima utilizada.

Motor Elsbett

Para viabilizar o uso de óleo vegetal em motores diesel de injeção direta, em 1982, o alemão Ludwig Elsbett introduziu algumas modificações no sistema de injeção e, principalmente, na cabeça do cilindro, com a implementação de um recipiente onde a explosão passou a ocorrer. Esses motores de tecnologia Elsbett ainda existem no mercado, com capacidade de até 140 HP. Eles são adequados para tarefas onde a demanda requerida não tenha grande variação e esteja sempre próxima da potência nominal do equipamento. Segundo Kaltner, esses motores têm excelente desempenho operando com óleos vegetais neutralizados.

No início da década de 90, algumas modificações foram implementadas no motor Elsbett, que o tornaram mais robusto, com maior eficiência e maior potência. A DMS manteve a cavidade

no cilindro, acrescentou um segundo bico injetor em cada cilindro, uma segunda bomba de combustível com mais um filtro acoplado e, principalmente, passou a refrigerar o motor com óleo lubrificante, permitindo aumentar a temperatura do refrigerante de 100°C para 120°C, facilitando a combustão e aumentando a eficiência do sistema, que passou a produzir 1 kWh com apenas 0,28 gramas de óleo vegetal.

Mesmo no caso dos motores Elsbett e DMS (hoje AMS), o óleo vegetal deve ser de boa qualidade para não danificar o sistema de injeção e permitir uma queima mais eficiente. Assim, na utilização de óleos vegetais com acidez elevada, o impacto do aumento do custo do combustível vegetal devido ao processo de refino deve ser cuidadosamente avaliado, pois pode inviabilizar economicamente o sistema.

No Brasil, o Programa Trópico Úmido financiou um equipamento Elsbett para o projeto de extração de óleo vegetal na comunidade do Roque, no Alto Juruá; esse motor apresentou problema devido à qualidade do óleo vegetal; ultimamente tem funcionado continuamente com diesel.

DESEMPENHO DO GRUPO GERADOR MWM D225-4 E MULTI FUEL 4RTA-G DA MAS COM ÓLEO DE DENDÊ *IN NATURA*

A Embrapa Amazônia Ocidental desenvolveu pesquisas no sentido de viabilizar motores ciclo diesel utilizando óleo de dendê (conhecido também como óleo de palma) como combustível, com apoio financeiro do CNPq e Sudam. O enfoque foi o desenvolvimento de pesquisas para viabilizar o uso do óleo vegetal nos motores do ciclo diesel. Foram usados três diferentes motores para os testes, sendo o primeiro um motor veicular de uma Kombi, o segundo um grupo gerador MWM D225-4 instalado na comunidade de Boa União (Presidente Figueiredo – AM) e por fim um grupo gerador *Multi Fuel* 4RTA-G da MAS, que serve à usina de extração de óleo da Embrapa. Os grupos geradores MWM não necessitaram de ajuste para a operação com este óleo vegetal. De acordo com o estudo realizado, o óleo de dendê é um excelente substituto para o óleo diesel, basta que se aumente a pressão nos bicos injetores para diminuir o acúmulo de resíduos de carbono na descarga do motor. A comparação de algumas propriedades do óleo diesel e do dendê é apresentada na tabela 4.9.

Óleo	Poder Calorífico Superior (Kcal/ kg)	Ponto de Fulgor (°C)	Índice de Cetano	Densidade 20/4°C	Viscosidade a 37,8°C (cSt)
Diesel	10.700	42 (mínimo para diesel marítimo=60°C)	60 (mínimo especificado = 45)	0,83	3,6 (faixa especificada: 1,6 a 6,0 cSt)
Dendê	9.450	344	42	0,91	38

Tabela 4.9 – Comparação de alguns índices do óleo diesel e do dendê.

Com o funcionamento do motor MWM foi observada a diminuição da carbonização; quando foi aumentada a pressão nos bicos injetores, ocasionando limpeza e troca de filtros conforme manual de manutenção próprio para motor a diesel, o que é observado na figura 4.16.

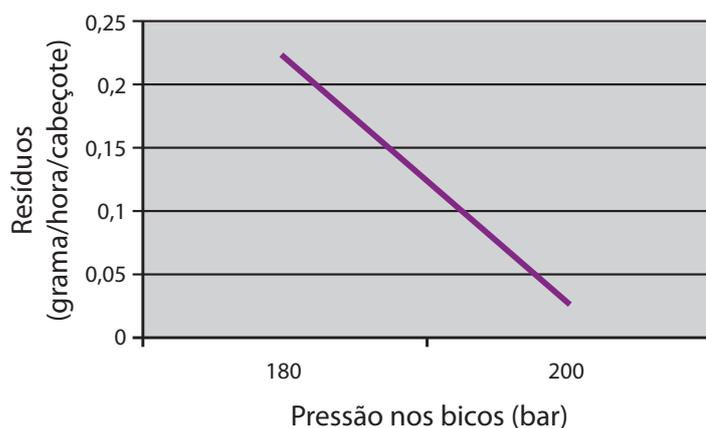


Figura 4.16 – Influência da pressão nos bicos injetores na formação de resíduos

Com o aumento da pressão nos bicos, foi verificada também a ausência de ésteres no óleo lubrificante. Portanto, o aumento da pressão resultou em melhor combustão do óleo de dendê (figura 4.17).

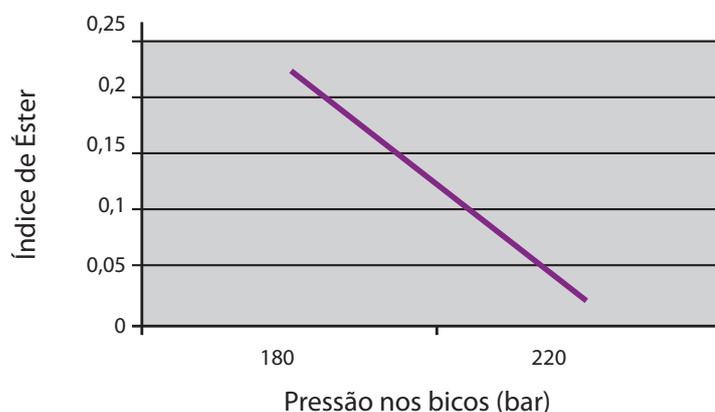


Figura 4.17 – Influência da pressão nos bicos injetores na formação de éster

Dos dois motores utilizados, o de melhor desempenho foi o grupo-gerador MWM. Durante o período de desenvolvimento do projeto, este motor operou 4.000 horas gerando energia elétrica. Foi o mais longo período de funcionamento dentre os motores testados, sendo que este foi o que apresentou melhores resultados. O grupo gerador AMS não apresentou um desempenho adequado com a utilização do óleo bruto de dendê.

Motor Veicular – Cristalização do óleo de dendê *in natura*

O óleo de dendê possui alto teor de estearina, portanto, ocorre normalmente a cristalização do óleo com a variação da temperatura ambiente. Para resolver este problema a Embrapa criou, junto com a Netzsch do Brasil, um protótipo de separador de fases do óleo de dendê, que tem como base de funcionamento a filtragem e prensagem a frio. Este processo se baseia na diferença dos pontos de fusão ácidos graxos palmítico, esteárico, oléico e linoléico, que constituem 98% do óleo de dendê. Os ácidos palmítico e esteárico são saturados, tendo pontos de fusão acima de 62°C. O resfriamento lento do óleo bruto causa a cristalização destes ácidos, que são separados através do filtro-prensa na temperatura de 17°C. A fração de oleína obtida que corresponde aos

ácidos insaturados é então separada por fracionamento natural do óleo de palma, que consiste em operações de resfriamento e filtração sem uso de aditivos químicos. Os ácidos insaturados, oléico e linoléico apresentam pontos de fusão abaixo de 16,3°C. A tabela 4.10 mostra os resultados para o processo de separação da oleína e da estearina (prensagem e filtragem a frio).

Ácido Graxo	Oleína (%)	Estearina(%)	T. fusão (°C)
Palmitico	95,5	59,53	62,90
Esteárico	4,40	5,00	70,10
Oléico	41,9	26,30	16,30
Linoléico	11,8	6,50	5,00

Tabela 4.10 – Processos de separação da oleína e da estearina - Prensagem e filtragem a frio
Adaptado Embrapa CPAA, Embrapa CTAA, Agropalma e (Moretto & FETT, 1989)

Uso do óleo de dendê refinado – oleína

Para evitar o problema de cristalização em motores veiculares, especificamente um motor diesel de uma Kombi, foi usada somente a oleína como combustível. Nas condições em que foi utilizado, este óleo apresentou custo menor quando comparado ao diesel.

Desempenho do Grupo Gerador MWM D229-6 com óleo de dendê *in natura*

O funcionamento de um grupo gerador diesel convencional foi avaliado utilizando-se óleo de palma bruto (óleo de dendê) como combustível. O grupo gerador tinha potência de 76kVA/60kW, com motor MWM D229-6 de injeção direta. Os testes tiveram a duração total de 400 horas. Os problemas encontrados na operação com óleo vegetal foram:

1. Necessidade de troca mais freqüente do óleo lubrificante;
2. Acumulação de partículas na bomba injetora e carbonização das câmaras de combustão e bicos injetores, causando perda gradual de potência ao longo dos ensaios, todavia reversível com limpeza.

Projeções indicaram que, devido aos maiores custos de manutenção, o óleo vegetal seria vantajoso em relação ao diesel apenas em localidades onde este custasse no mínimo 25% a mais que o óleo vegetal. O diferencial requerido pode ser maior do que isto e depende das condições específicas. Uma análise global destes ensaios e de outros similares reportados indica que é possível se operar com óleo vegetal a níveis de manutenção semelhantes ao diesel. Para isto é necessário que alguns parâmetros de qualidade do óleo vegetal sejam mais controlados do que se exige na comercialização normal do óleo bruto. Também, o emprego de motores de injeção indireta seria desejável, na medida de sua disponibilidade.

Experiências de Eletrificação Rural Utilizando Óleo Vegetal como Combustível – Projetos implantados na Amazônia

Alguns projetos-pilotos foram implantados conforme apresentado na tabela 4.11.

Local de Implantação	Óleo vegetal	Produção do óleo	Tipo de motor
Vila Boa Esperança – Moju – PA	Dendê	Comunidade	Elsbett
Vila Soledade – Moju – PA	Dendê	Agropalma	Convencional com kit
Alto Solimões – AM	Andiroba	Comunidade	Elsbett
Com. Boa União, Pres. Fig.– AM	Dendê	Embrapa	Convencional sem kit

Tabela 4.11 – Projetos-pilotos implantados na Amazônia

A produção de 100 kWh de energia representa um consumo médio de 25 kg de óleos vegetais (por hora de funcionamento do sistema). Isto significa que um sistema de 100 kWh operando 6 horas por dia, 365 dias /ano, consumirá aproximadamente 55.000 kg ou 62.000 litros.

Como a maior parte das oleaginosas nativas tem safra definida, em torno de 4 meses, todo este óleo tem de ser produzido neste período, o que aumenta o tamanho da instalação de extração e cria custos adicionais de armazenagem. Este é possivelmente o maior problema da utilização de espécies nativas.

Portanto conclui-se que o óleo de dendê pode ser uma das matérias-primas com potencial para ser substituto do óleo diesel. No entanto, vários fatores contribuem para a sua escolha como fonte de matéria-prima renovável, dentre elas o tipo de motor e a logística. Destaca-se ainda que o acúmulo de resíduos de carbono na descarga do motor MWM utilizando óleo de dendê como combustível foi sensivelmente diminuído com o aumento da pressão dos bicos injetores. No entanto, este óleo bruto no motor DMS, tecnologia ELSBET, apresentou performance inadequada. Já em motores veiculares pode ser usada somente a oleína ou se adicionar aditivos para minimizar a cristalização.

CONCLUSÃO

O custo para universalizar a Amazônia em conformidade com o modelo atual - sistemas isolados térmicos a combustível fóssil, sustentado por um forte subsídio – pode ser muito oneroso para o País. O custo de geração de energia dos sistemas de geração existentes é viabilizado pela Conta de Consumo de combustível – CCC, que para 2006 chegou a 4,5 bilhões de reais. Esse valor é aproximadamente 25% superior ao montante de R\$ 3,6 bilhões aprovado para 2005. Atualmente, os sistemas isolados de Manaus (AM) representam em torno de 44% da CCC; os de Porto Velho (RO) e de Rio Branco (AC), 23%. O restante da conta é distribuído nos sistemas isolados de outros Estados¹.

Esse modelo não é sustentável e não deve servir de exemplo para que os serviços de energia elétrica cheguem a toda a Amazônia. Os custos serão cada vez maiores, cristalizando interesses, cada vez mais difíceis de serem demovidos. Ademais, os sistemas de controle e a eficiência de todo o sistema serão ainda mais afetados, dadas a pequena dimensão e a grande quantidade de equipamentos de geração que deverão estar sob a responsabilidade das concessionárias da região.

Dessa forma, faz-se necessário construir um modelo diferente, de menor custo para a sociedade brasileira e mais eficiente. Esse modelo deverá abordar os seguintes aspectos: i) tecnologia; ii) gestão; iii) regulamentação diferenciada; iv) uso produtivo da energia.

¹ Aneel. Boletim Semanal nº 207, 2 a 8 de fevereiro de 2006

Esse trabalho se propôs a abordar apenas o aspecto tecnológico, especificamente relativo a motores de combustão interna para utilização de biocombustíveis. No caso da planície amazônica, rica em oleaginosas, tanto a opção de uso de biodiesel quanto a de óleo vegetal in natura devem ser consideradas.

Contudo, os empecilhos com relação a essa tecnologia devem ser relatados. Primeiro, existem poucos projetos significativos no Brasil para geração de energia elétrica, que dispõem de dados sobre os comportamentos dos motores. Essa insuficiência se deve, sobretudo, à inexistência de um mercado de óleo para essa finalidade. Um dos poucos projetos, o da Embrapa Amazônia, testou três motores diferentes com óleo de dendê, com mais de 4 mil horas. É necessário lembrar que essa instituição possui milhares de hectares plantados com essa oleaginosa.

Apesar da insuficiência de dados sobre o uso de biocombustíveis no Brasil em motores estacionários, sabe-se, a partir de experiências internacionais, quais os aspectos mais relevantes que devem ser considerados para equacionar o problema. A questão se resume, por um lado, a tecnologias confiáveis e que possam ser produzidas com facilidade, e por outro, à garantia da matéria-prima – o combustível primário.

Do ponto de vista da tecnologia, são três as opções a serem consideradas: primeiro, a queima de óleo vegetal in natura; segundo, a produção e queima do biodiesel; e terceiro, a queima do etanol.

Com relação à queima do óleo vegetal in natura, basicamente são três as tecnologias a serem consideradas: kits de conversão, motores com pré-câmara de combustão e motores AMS. Os kits de conversão já são fabricados no Brasil, normalmente por encomenda, por manufaturas não especializadas.

Motores com pré-câmara são fabricados pelo CIRAD, e utilizados em escala nas ilhas francesas do Pacífico. Não existem projetos no Brasil com essa tecnologia.

Motores AMS são fabricados na Alemanha, em uma versão melhorada do motor Eslbett. Um motor AMS foi utilizado numa experiência pela Embrapa Amazônia. Contudo, os resultados obtidos com um motor MWM com kit de conversão foram melhores, utilizando o mesmo tipo de óleo vegetal.

Para a produção de biodiesel, são duas as rotas tecnológicas: a transesterificação, com a variante esterificação, ou o craqueamento. As duas rotas têm relativa complexidade para serem utilizadas em pequena escala em comunidade rural da Amazônia. No Brasil, a Ecirtec e a Tecbio produzem pequenos reatores, que também podem ser manufaturados sob encomenda em fabricantes não especializados. Quanto às torres de craqueamento, não se conhecem fabricantes especializados no Brasil; também essas unidades são fabricadas sob encomenda.

Projetos de queima de biodiesel, além da dificuldade para a produção desse combustível, também esbarram nas mesmas dificuldades apontadas acima para queima de óleo vegetal in natura: inexistência de fornecimento regular da matéria-prima – o óleo vegetal. No Brasil, existe um montador de grupos-geradores a diesel que adapta motores Scania para a utilização de biodiesel – a Maquigeral.

O Brasil tem uma indústria consolidada de fabricantes de usina de etanol. Porém, todos fabricam equipamentos de grandes dimensões, para atender ao mercado de fabricantes de açúcar e álcool. Fabricação de micro-destilaria normalmente é realizada sob encomenda por pequenas indústrias.

Referências Bibliográficas

Sistemas Híbridos

- ABNT (2004). **Norma NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão**, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2006). **Norma NBR 15389 – Bateria Chumbo-ácida Estacionária Regulada por Válvula – Instalação e Montagem**. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- AFFORDABLE SOLAR (2008), home page, disponível em <http://affordable-solar.com>, acessada em 03/04/2008.
- AGBOSSOU, K., CHAHINE, R., HAMELIN, J., LAURENCELLE, F., ANOUAR, A., ST-ARNAUD, J.-M. e BOSE, T. K. (2001), “Renewable Energy Systems Based on Hydrogen for Remote Applications”, **Journal of Power Sources**, pp. 168–172.
- ALMAR (2008), home page, disponível em <http://www.almar.com.br>, acessada em 22/04/2008.
- ALSEMA, E. A. e NIEUWLAAR, E. (2000), “Energy Viability of Photovoltaic Systems”. **Energy Policy**, 28:999–1010.
- AMARANTE, O. A. C., BROWER, M., ZACH, J. e SÁ, A. L. (2001), **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – CD-ROM**, publicação realizada pela CAMARGO SCHUBERT e TRUEWIND SOLUTIONS com suporte técnico e financeiro do MME – ELETROBRÁS – CEPEL – CRESESB.
- AMMONIT (2000). “Wind Measurement for Accurate Energy Predictions”, Ammonit Gesellschaft für Messtechnik mbH, Issue 17.5.200, Berlin.
- ANEEL (2003), **Resolução N° 676**, de 16 de dezembro de 2003, disponível em <http://www.aneel.gov.br/>.
- ARAÚJO, M. R. O. P. (1989). **Estudo Comparativo de Sistemas Eólicos Utilizando Modelos Probabilísticos de Velocidade de Vento**. Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ.
- ARNOLD, R. e STERN, W. (1976). **Máquinas Elétricas**. Vol. 2. São Paulo: Editora Pedagógica Universitária.
- AUTOPEDIA (2008). **Câmara de Combustão**. Disponível em http://www.xl.pt/autopedia/motores/cam_combustao.shtml, acessada em 22/04/2008.

- AWEA (2008). **AWEA Wind Energy Fact Sheets – Comparative Air Emissions of Wind and Other Fuels**. Disponível em <http://www.awea.org/pubs/factsheets.html>, acessada em 17/03/2008.
- AWEA (2008a). **Is Noise a Problem for Wind Turbines?**. American Wind Energy Association homepage, disponível em <http://www.awea.org/faq/noisefaq.html>, acessada em 18/04/2008.
- AWEA (2008b). **AWEA Wind Energy Fact Sheets – The Economics of Wind Energy**. Disponível em <http://www.awea.org/pubs/factsheets.html>, acessada em 17/03/2008.
- BARBOSA, C. F. O. (2004). **Montagem, Comissionamento e Telesupervisão de um Sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade**. Trabalho de Conclusão de Curso, Belém: UFPA.
- BARBOSA, C. F. O. (2006). **Avaliação Tecnológica, Operacional e de Gestão de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade na Região Amazônica**. Dissertação de Mestrado, Belém: UFPA.
- BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., GALHARDO, M. A. B., CRUZ, D. P. e ARAÚJO, R. G. (2004). **Implantation and Operation of the First Electricity Pre-Payment System in Brazil, Installed in an Isolated Community in the Amazon Region**. São Paulo: IEEE/PES T&D 2004 LATIN AMERICA.
- BARBOSA, C. F. O., PINHO, J. T., PEREIRA, E. J. S., GALHARDO, M. A. B., VALE, S. B. e MARANHÃO, W. M. A. (2004a). **Situação da Geração Elétrica Através de Sistemas Híbridos no Estado do Pará e Perspectivas frente à Universalização da Energia Elétrica**. Campinas: AGRENER GD, 2004.
- BARLEY, C. D. e WINN, C. B. (1996). “Optimal Dispatch Strategy in Remote Hybrid Power Systems”, **Solar Energy**, Vol. 58, N^o. 4–6, p. 165–179.
- BEYER, H. G., RÜTHER, R. e OLIVEIRA, S. H. F. (2003), “Adding PV-Generators without Storage to Medium Size Stand Alone Diesel Generators Sets to Support Rural Electrification in Brazil”, **ISES Solar World Congress**, Göteborg.
- BILLINTON, R. e KARKI, R. (2001), “Capacity Expansion of Small Isolated Power Systems Using PV and Wind Energy”, **IEEE Trans. Power Systems**, vol. 16, N^o 4, pp. 892–897.
- BITTENCOURT, R. M., AMARANTE, O. A. C., SCHULTZ, D. J. e ROCHA, N. A. (2000), “Sistemas Complementares de Energia Eólica e Hidráulica no Brasil”, **Congresso CIER 2000**, Buenos Aires.
- BLASQUES, L. C. M. (2003). **Análise de Características Técnicas e Viabilidade Econômica de Sistemas Solares Fotovoltaicos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: UFPA.
- BLASQUES, L. C. M. (2005). **Estudo da Viabilidade Técnico-Econômica de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade**. Dissertação de Mestrado. Belém: UFPA.

- BLASQUES, L. C. M. (2007). **Configurações Ótimas de Sistemas Híbridos para Geração de Eletricidade Utilizando Fontes Renováveis: Contribuições ao Processo de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica**. Proposta de Qualificação ao Doutorado. Belém: UFPA.
- BLASQUES, L. C. M., TUPIASSÚ, A. F. e PINHO, J. T. (2005). “Análise Econômica de Tecnologias para Eletrificação de uma Pequena Comunidade Isolada da Amazônia”, **XVIII SNPTEE**, Curitiba.
- BLEIJS, J. A. M., NIGHTINGALE, C. J. E. e INFIELD, D. G. (1993), “Wear Implications of Intermittent Diesel Operation in Wind/Diesel Systems”, **Wind Engineering**, vol. 17, Nº 4, pp. 206–219.
- BOROWY, B. S. e SALAMEH, Z. M. (1994), “Optimum Photovoltaic Array Size for a Hybrid Wind/PV System”, **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 9, Nº 3, pp. 482–488.
- BOROWY, B. S. e SALAMEH, Z. M. (1996), “Methodology for Optimally Sizing the Combination of a Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System”, **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 11, Nº 2, pp. 367–375.
- BRASIL HOBBY (2008), home page <http://brasilhobby.com.br>, acessada em 03/04/2008.
- BURTON, T., SHARPE, D., JENKINS, N. e BOSSANYI, E. (2001). **Wind Energy Handbook**. John Wiley & Sons.
- CALVERT, N. G. (1981). **Wind Power Principles: Their Application on the Small Scale**. Charles Griffing.
- CARLIN, P. W., LAXSON, A. S. e MULJADI, E. B. (2001). **The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology**. Technical Report prepared under Task No. WER13010, Contract No. DE-AC36-99-GO10337, U.S. National Renewable Energy Laboratory.
- CARTAXO, E. F. (2000). **Fornecimento de Serviço de Energia Elétrica para Comunidades Isoladas da Amazônia: Reflexões a partir de um Estudo de Caso**. Tese de Doutorado. Campinas: UNICAMP.
- CARTAXO, E. F. (2001), “Fornecimento de Serviço de Energia Elétrica para Comunidades Isoladas da Amazônia: Um Estudo de Caso”, **XVI SNPTEE**, Campinas.
- CHANDLER, H. (2003). **Wind Energy – The Facts: An Analysis of Wind Energy in the EU-25**. European Wind Energy Association (EWEA).
- CHEREMISINOFF, N. P. (1979). **Fundamentals of Wind Energy**. Ann Arbor Science.
- CONAE (2008), “Comisión Nacional para El Ahorro de Energía”, disponível em http://www.conae.gob.mx/wb/CONAE/CONA_2369_teoría_básica_del_mo, acessada em 22/04/2008.
- CONAMA (1999). **Resolução CONAMA Nº 257, de 30 de junho de 1999**. Conselho Nacional do Meio Ambiente, Ministério do Meio Ambiente.

- CRESESB (1999). **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**, diversos autores, Grupo de Trabalho de Energia Solar Fotovoltaica – GTEF – CRESESB/CEPEL, 2ª Edição.
- DALBON, W., LEVA, S., ROSCIA, M. e ZANINELLI, D. (2002), “Hybrid Photovoltaic System Control for Enhancing Sustainable Energy”, **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, pp. 134–139.
- DIAZ, P. e EGIDO, M. (2003), “Experimental Analysis of Battery Charge Regulation in Photovoltaics Systems”, **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**, vol.11, p. 481–493.
- DUFFIE, J. A. e BECKMAN, W. A. (1991). **Solar Engineering of Thermal Processes**. 2ª Ed. John Wiley & Sons.
- ELETRICIDADE MODERNA (2007), “Painel NR-10 – Riscos de Choques Elétricos”, **Revista Eletricidade Moderna**, Nº 405, pp. 200–203, Editora Aranda.
- ELETRICIDADE MODERNA (2008), “Painel NR-10 – Riscos de Choques Elétricos (II)”, **Revista Eletricidade Moderna**, Nº 406, pp. 178–179, Editora Aranda.
- ELETROBRÁS (2006). **Manual de Recebimento, Armazenagem, Manuseio e Qualidade de Produtos Derivados de Petróleo em Usinas Térmicas**. Eletrobrás/GTON/Petrobras.
- ELETROBRÁS (2008). “Procel – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica”, disponível em <http://www.eletrabras.com/procel>, acessada em 10/04/2008.
- ELHADIDY, M. A. e SHAAHID, S. M. (2000). “Parametric Study of Hybrid (Wind + Solar + Diesel) Power Generating Systems”, **Renewable Energy**, vol. 21, pp. 129–139.
- ERICKSON, W. P., JOHNSON, G. D. e Young, D. P. (2002). “Summary of Anthropogenic Causes of Bird Mortality”, Proceedings of the 2002 **International Partner’s in Flight Conference**, Monterrey.
- EUROPEAN COMMISSION (2006), **RENEWS – Renewable Energy Newsletter**, May 2006, Issue 5, ISSN 1725-8057.
- FEITOSA, E., PEREIRA, A. e ROSAS, P. (2002). “Increasing Wind Penetration on Fernando de Noronha Wind/Diesel System”, **World Wind Energy Conference**, Berlin.
- FRAIDENRAICH, N. e LYRA, F. (1995). **Energia Solar: Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoelétrica e Fotovoltaica**. Ed. Universitária da UFPE.
- FRÖHLICH, K. e LONDON, J. (1986). “Revised Instruction Manuals on Radiation Instruments and Measurements”, **WMO/TD** – Nº 149.
- FROTA, B. A. (2004). **Geometria da Insolação**. Geros.
- FTHENAKIS, V. M. (2000). “End-of-life Management and Recycling of PV Modules”, **Energy Policy**, 28: 1051–1058.
- GAMESA (2007), “Gamesa G58-850 kW, Características Generales”, disponível em <http://www.gamesa.es/>, acessada em 26/09/2007.

- GASCH, R. e TWELE, J. (2002). **Wind Power Plants**. Solarpraxis AG and James & James Ltd.
- GASQUET, H. L. (2007), “Conversión de la Luz Solar en Energia Eléctrica – Manual Teórico e Práctico Sobre Los Sistemas Fotovoltaicos”, El Paso Solar Energy Association, disponível em <http://www.epsea.org/esp/energiaelectrica.html>, acessada em 26/11/2007.
- GEDAE (2008), Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Alternativas Energéticas, informações fornecidas, UFPA.
- GIPE, P. (1995), “Wind Energy Comes of Age”, John Wiley & Sons.
- GIPE, P. (2004), “Wind Power”, James & James.
- GREEN, M. A., LORENZO, E., POST, H. N., SCHOCK, H. W., ZWEIBEL, K. e LYNN, P. A. (1997). **Progress in Photovoltaics: Research and Applications**. J. Wiley.
- GRENT, E. L. I., GELEAREN, W. e WORTH, R. S. (1990). **Principles of Engineering Economy**. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- HANSEN, L. H., HELLE, L., BLAABJERG, F., RITCHIE, E., MUNK-NIELSEN, S., BINDNER, H., SØRENSEN, P. e BAK-JENSEN, B. (2001). **Conceptual Survey of Generators and Power Electronics for Wind Turbines**. Risø National Laboratory.
- HAUSCHILD, L. (2006). **Avaliação de Estratégias de Operação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: USP.
- HICKOK, F. (1975). **Handbook of Solar and Wind Energy**. Cahners Publishing Company, Fourth Printing.
- IEC (2005). **IEC 60479-1 – Effects of Current on Human Beings and Livestock – Part 1: General Aspects**.
- ILHA DE NORONHA (2008), home page <http://ilhadenoronha.com.br>, acessada em 01/02/2008.
- INDUCOTEC (2008), “Equipamentos de Energia”, disponível em <http://www.inducotec.com.br/USCA.htm>, acessada em 22/08/2008.
- JARASS, L., HOFFMANN, L., JARASS, A. e OBERMAIR, G. (1981). **Wind Energy: An Assessment of the Technical and Economic Potential**. Springer-Verlag.
- KELLOGG, W. D., NEHRIR, M. H., VENKATARAMANAN, G. e GEREZ, V. (1998). “Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind/PV Systems”, **IEEE Trans. Energy Conversion**, vol. 13, N° 1, pp. 70–75.
- KHAN, M. J. e IQBAL, M. T. (2005), “Pre-Feasibility Study of Stand-Alone Hybrid Energy Systems for Applications in Newfoundland”, **Renewable Energy**, N° 30, pp. 835–854.
- KINDERMANN, G. (2005). **Choque Elétrico**. 3ª edição. Florianópolis: Edição do Autor.
- KOSOW, I. L. (1986) **Máquinas Elétricas e Transformadores**. 6ª edição. Rio de Janeiro: Editora Globo.

- KRUANGPRADIT, P. e TAYATI, W. (1996). “Hybrid Renewable Energy System Development in Thailand”, **WREC IV**, Denver.
- KUROKAWA, K. (2003). **Energy From the Desert – Feasibility of Very Large Scale Photovoltaic Power Generation (VLS-PV) Systems**. James & James.
- LABORATÓRIO DE ENERGIA SOLAR, Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.
- LORENZO, E., ARAUJO, G. L., CUEVAS, A., EGIDO, M. A., MINÃÑO, J. C. e ZILLES, R. (1994). **Electricidad Solar: Ingeniería de los Sistemas Fotovoltaicos**. PROGENSA (Promotora General de Estudios, S.A.).
- LUQUE, A. e HEGEDUS, S. (2003). **Handbook of Photovoltaic Science and Engineering**. John Wiley & Sons.
- MACÊDO, W. N. (1999). **Montagem, Comissionamento e Monitoração de um Sistema Híbrido Solar-Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade**. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: UFPA.
- MACÊDO, W. N. (2002). **Estudo de Sistemas de Geração de Eletricidade Utilizando as Energias Solar Fotovoltaica e Eólica**. Dissertação de Mestrado. Belém: UFPA.
- MACÊDO, W. N. e PINHO, J. T. (2003). “Complementariedades entre as Energias Eólica e Solar em Sistemas Híbridos Isolados – Um Estudo de Caso Usando o Programa ASES”, **V CLAGTEE – Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica**, São Pedro.
- MANWELL, J. F., MCGOWAN, J. G. e ROGERS, A. L. (2002). **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. John Wiley & Sons.
- MARKVART, T., (1994). **Solar Electricity**. John Wiley & Sons.
- MARTIGNONI, A. (1987). **Máquinas de Corrente Alternada**. 5ª edição. Rio de Janeiro: Editora Globo.
- MENSSENGER, R. e VENTRE, J. (2000). **Photovoltaic Systems Engineering**. CRC Press.
- METEONORM (1999). “Global Meteorological Database for Solar Energy and Applied Climatology”, **V. 4.0, Swiss Federal Office of Energy**.
- MONTENEGRO, J. L. A. (1983). **Engenharia Econômica**. 2ª ed. Petrópolis: Editora Vozes.
- MTE (2008), “Norma Regulamentadora NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade”. Ministério do Trabalho e Emprego, disponível em http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_10.pdf, acessada em 31/03/2008.
- MTE (2008a). “Norma Regulamentadora NR 26 – Sinalização de Segurança”, Ministério do Trabalho e Emprego, disponível em: http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_26.pdf. Acessado em 15/04/2008.

- MUHIDA, R., MOSTAVAN, A., SUJATMIKO, W., PARK, M. e MATSUURA, K. (2001). “The 10 Years Operation of a PV-Micro-Hydro Hybrid System in Taratak, Indonesia”, **Solar Energy Materials & Solar Cells**, N^o. 67, pp. 621–627.
- NELSON, V. (1996), “Wind Energy and Wind Turbines”, Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- NELSON, V. C., FOSTER, R. E., CLARK, R. N. e RAUBENHEIMER, D. (2002). **Wind Hybrid Systems Technology Characterization**. Technical Report, Southwest Technology Development Institute, New Mexico State University.
- NORDISK FOLKECENTER (2008), home page <http://www.folkecenter.net>, acessada em 01/02/2008.
- NREL (2005). **HOMER – Hybrid Optimization Model for Electric Renewables**. Version 2.19, National Renewable Energy Laboratory.
- OBERT, E. F. (1971). **Motores de Combustão Interna**. Porto Alegre: Editora Globo.
- OLIVEIRA, L. G. M. (2005). **Estratégias de Controle de Carga e Descarga em Sistemas Fotovoltaicos Domiciliares**. Dissertação de Mestrado. São Paulo USP.
- OMARI, O., ORTJOHANN, E., SAIJU, R., HAMSICH, N. e MORTON, D. (2003). “A Simulation Model for Expandable Hybrid Power Systems”, **2nd European PV-Hybrid and Mini-Grid Conference**, Kassel.
- OTECHWIND (2008), home page <http://www.otechwind.com>, acessada em 22/04/2008.
- PEREIRA, E. J. S., PINHO, J. T. e VALE, S. B. (2007). “Revitalização do Sistema Híbrido Eólico-Fotovoltaico-Diesel de Tamaruteua, Município de Marapanim, Pará”, **I CBENS – I Congresso Brasileiro de Energia Solar**, Fortaleza.
- PEREIRA, E. J. S., VALE, S. B., GALHARDO, M. A. B. e PINHO, J. T. (2007), “Monitoração e Análise de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel”, **Revista Eletricidade Moderna**.
- PERFECTUM (2008). “Motores e geradores”, disponível em <http://www.perfectum.eng.br/>, acessada em 22/04/2008.
- PHOTON INTERNATIONAL (2007). **US Reaches For Sun**, Vol. 11, pp. 58–69.
- PINHO, J. T., BLASQUES, L. C. M., GALHARDO, M. A. B. e VALE, S. B. (2004). “Operation Strategies of Wind-Diesel Systems for Electricity Generation Using Intelligent Systems”, **Global WindPower 2004 Conference and Exhibition**, Chicago.
- QUINLAN, P. J. A. (1996). **Times Series of Modeling Hybrid Wind Photovoltaic Diesel Power Systems**. Master’s Degree Thesis. Madison: University of Wisconsin.
- RÊGO, J. L. C. (1999). **Definição, Montagem, Comissionamento e Monitoração de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade**. Trabalho de Conclusão de Curso. Belém: UFPA.
- RENEWABLE ENERGY WORLD (2006), **PV in the US Photovoltaic**, N. 5, vol. 9.

- REVISTA VIRTUAL TUDO SOBRE (2008), “Máquinas a Vapor e Motores a Explosão”, disponível em <http://www.adorofisica.com.br>, acessada em 22/04/2008.
- RIBEIRO, C. M., ARAÚJO, M. R. P., CUNHA, A. Z. e RIBEIRO, A. H. C. (2003). “Implantação de Sistema Híbrido para Eletrificação da Vila de Joanes (Pará)”, Coletânea de Artigos – **Energias Solar e Eólica**, Volume 1, CRESESB/CEPEL.
- ROHATGI, J. S. e NELSON, V. (1994). **Wind Characteristics – An Analysis for the Generation of Wind Power**. Alternative Energy Institute, West Texas A&M University.
- ROHATGI, J. S., MEDEIROS, A. L. R., SOARES, A. M. C. e NOÉ, A. O. F. (1987). “Describing Wind Speed Variations by Weibull Distribution for Energy Estimation”, **Anais do IV Congresso Brasileiro de Energia**, p.p. 237–247, Rio de Janeiro.
- ROSAS, P. A. C. e ESTANQUEIRO, A. I. (2003), “Guia de Projeto Elétrico de Centrais Eólicas – Projeto Elétrico e Impacto de Centrais Eólicas na Rede Elétrica”, **Centro Brasileiro de Energia Eólica**, Vol. I. Recife.
- RÜTHER, R. (2004). **Edifícios Solares Fotovoltaicos: O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública no Brasil**. Editora UFSC/LABSOLAR.
- RÜTHER, R. (2005). **Sistemas Híbridos Fotovoltaico/Diesel sem Acumulação em Mini-Redes na Região Norte do Brasil**. LABSOLAR/UFSC. Apresentação feita em um encontro de especialistas patrocinado pelo MME.
- RÜTHER, R., SCHMID, A. L., BEYER, H., MONTENEGRO, A. A. e OLIVEIRA, S. H. F. (2003). “Cutting on Diesel, Boosting: The Potential of Hybrid Diesel/PV Systems in Existing Mini-Grids in the Brazilian Amazon”, **3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion**, Osaka.
- SENTELHAS, R. (2004). **Instrumento de Software para Apoio à Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado. São Paulo USP.
- SERRASOLLES, J., DE CASTELLET, L., ANCOECHEA, M. e ROMEU, J. (2004). **Tejados Fotovoltaicos: Energía Solar Conectada a la Red Eléctrica**. PROGNSA (Promotora General de Estudios, S.A.).
- SILVA, A. N. e VIEIRA, M. J. M. (2004). **Autogeração com Grupo Motor Gerador Diesel**. Projeto Final de Curso. Goiânia: UFG.
- SKARSTEIN, O. e UHLEN, K. (1989). “Design Considerations with Respect to Long-term Diesel Saving in Wind/Diesel Plants”, **Wind Engineering**, vol. 13, N° 2, pp. 72–87.
- SODA-IS (2008), “SoDa: Services for Professionals in Solar Energy and Radiation”, informações/contato: <http://www.soda-is.com>.
- SODRÉ, J. R. (2008), “Notas de Aula da Disciplina Motores de Combustão Interna”, disponível em http://mea.pucminas.br/ricardo/pos/Aula_01.pdf, acessada em 22/04/2008.

- SOLARBUZZ (2008), “Solar Electricity Prices”, disponível em <http://www.solarbuzz.com/>, acessada em 10/03/2008.
- SPERA, D. A. (1994), “Wind Turbine Technology – Fundamental Concepts of Wind Turbine Engineering”, ASME Press.
- TAYLOR, C. F. (1988). **Análise dos Motores de Combustão Interna**. Vol. 2, São Paulo: Editora Edgar Blücher.
- TAYLOR, R. W., LEBOEUF, C., MOSZKOWICZ, M. e VALENTE, L. G. (1994), “Joint U.S./ Brazilian Renewable Energy Rural Electrification Project”, **WCPEC**, Hawaii.
- TIBA, C., FRAIDENRAICH, N., GALLEGOS, H. G. e LYRA, F. J. M. (2002), “Solar Energy Resource Assessment – Brazil”, **Renewable Energy**, Vol. 27, p.p. 383–400.
- TOMIYOSHI, L. K. (2004), “Proteção Contra Queimaduras Por Arcos Elétricos – Nova Metodologia Para Cálculo De Energia”, disponível em <http://www.centralmat.com.br/ArcFlash/ArtigoArcoEletricoLuizTomioshi.pdf>, acessada em 08/04/2008.
- USHER, E. P. e ROSS, M. M. D. (1998). **Recommended Practice for Charge Controllers**. International Energy Agency, Report IEA PVPS T3-05.
- VALE, S. B. (2000). **Monitoração e Análise de um Sistema Híbrido Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade**. Dissertação de Mestrado. Belém: UFPA.
- VALE, S. B., BEZERRA, U. H., PINHO, J. T. e PEREIRA, E. J. S. (2004), “Estudo da Inserção de Célula a Combustível Integrada a Sistema Híbrido de Geração de Eletricidade Isolado”, **2º Workshop Internacional sobre Célula a Combustível**, Campinas.
- WALKER, J. F. e JENKINS, N. (1997). **Wind Energy Technology**. John Wiley & Sons.
- WARNER, C. L., TAYLOR, R. W., RIBEIRO, C. M., MOSZKOWICZ, M. e BORBA, A. J. V. (1996), “PV-Hybrid Village Power Systems in Amazonia”, **25th PVSC**, Washington D.C.
- WINDPOWER (2007), Danish Wind Industry Association homepage, disponível em <http://www.windpower.org>, acessada em 25/09/2007.
- XPS (2008), home page <http://www.xps.com.br>, acessada em 03/04/2008.
- ZENTGRAF, R. (1997). **Matemática Financeira Objetiva**. P. Artes Gráficas.
- ZILLES, R., MACÊDO, W. N. e OLIVEIRA, S. H. F. (2008), “Geração Distribuída de Eletricidade com Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica (SFCEs): Aspectos Econômicos, Barreiras para sua Inserção na Matriz Elétrica e Ponto de Conexão”, Artigo aceito para publicação, **XII Congresso Brasileiro de Energia – CBE**.

Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos

ANEEL – Atlas de Energia Elétrica do Brasil

BARROSO, S. S.; MARTINS, P. M.; TORRES, M. E. L et al. “Avaliação Econômica Comparativa entre Sistemas Solar Fotovoltaico, Conjunto Moto-Gerador e Rede de Distribuição Rural para Suprimento a Pequenas Propriedades e Escolas Rurais”. In: **VII Congresso Brasileiro de Energia** (1996: Rio de Janeiro). Anais... Rio de Janeiro: UFRJ, Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, 1996. p. 509–518.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL – Resultados Preliminares 2007.

BUSTAMANTE ALSINA, Jorge. **La calidad de vida y el desarrollo sustentable em la reciente reforma Constitucional**. LA Ley, 17 de janeiro de 1995.

COLACCHI, F. **Suprimento Energético: Instrumento de Apoio ao Desenvolvimento Rural Sustentado**. Tese de Mestrado do Programa de Planejamento Energético PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 1996.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução. 23 de Janeiro de 1986**. Estabelece as definições, as responsabilidades, os critérios básicos e as diretrizes gerais para uso e implementação da Avaliação de Impacto Ambiental como um dos instrumentos da Política Nacional do Meio Ambiente.

CORREIA, J. de C. **Atendimento Energético a Pequenas Comunidades Isoladas: Barreiras e Possibilidades**. T&C Amazônia, Ano III, Número 6, Janeiro de 2005.

COSTA CAMPOS, José Evaristo da, (2005). Scam Engenharia, 20 de junho de 2005. Entrevista com o autor.

DAKER, A. **Captação, Elevação e Melhoramento da Água**. A Água na Agricultura, Volume 2, Rio de Janeiro: Livraria Freitas Barros, 1987.

DARZÉ, A.S.S.P. **A questão ambiental como um fator de desestímulo ao investimento no setor privado de geração de energia hidrelétrica no Brasil**. 2002. 117f. Dissertação (Mestrado em Administração). Salvador: Escola de Administração da Universidade Federal da Bahia, 2002.

DECRETO Nº. 4.873, DE 11 DE NOVEMBRO DE 2003. Institui o Programa Nacional de Universalização do Acesso e Uso da Energia Elétrica – “LUZ PARA TODOS” e dá outras providências.

DI LASCIO, M.A. **Panorama e alternativas para o atendimento energético de pequenos vilarejos isolados da Amazônia rural brasileira**, 2006.

DNAEE – Eletrobrás – *Manual de Microcentral Hidrelétrica* – Ed. Eletrobrás, 1985

DUBASH, Navroz K; BRADLEY, Rob. “Pathways to rural electrification in India: are national goals also an international opportunity?” In: BRADLEY, Rob; BAUMERT, Kevin A. (Eds.). *Growing the greenhouse: protecting the climate by putting development first*. Washington, D.C.: World Resources Institute, 2005. p. 68–93.

- ELS, R. H.; CAMPOS, C.O.; DIAS HENRIQUES, A.M.; BALDUINO, L.F. **Hydrokinetic turbine for isolated villages**. Itajubá-MG Brasil: Pch Notícias Shp News, v. 19, p.24–25. 2003
- ELS, R. H.; CAMPOS, C; SALOMON, L. R. B. “Turbinas hidrocínéticas no Brasil”. In: **Primeiro seminário sobre atendimento energético de comunidades extrativistas** – SAEEX 2004, Brasília: Ministério de Minas e Energia e Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento, 2004. mimeografado.
- Emissions from Brazilian Hydroelectric Reservoirs. Project BRA/95/G31, UNDP/ELETRORÁS, MCT. Reference Report, 2002.
- ESTUDO de Impacto Ambiental – EIA PCH Penedo. SETE – Soluções e Tecnologia Ambiental. Volume I. Belo Horizonte, MG. 2005.
- FEARNSIDE, P. M. A **Hidrelétrica de Samuel: Lições para as Políticas de Desenvolvimento Energético e Ambiental na Amazônia**. Manaus-Amazonas: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), maio/2004.
- FEARNSIDE, P. M. “Gases de Efeito Estufa em Hidrelétricas da Amazônia”. **Revista Ciência Hoje**, vol. 36, nº 211, dezembro/2004.
- FEARNSIDE, P. M. **Impactos Ambientais da Barragem de Tucuruí: Lições Ainda não Aprendidas para o Desenvolvimento Hidrelétrico na Amazônia**. Manaus-Amazonas: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), agosto/2002.
- FEARNSIDE, P. M.; BARBOSA, R. I. **A Hidrelétrica de Cottingo como um Teste do Sistema Brasileiro para Avaliação de Propostas de Desenvolvimento na Amazônia**. Manaus-Amazonas: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), agosto/2002.
- FELIZOLA, E.R.; MAROCCOLO, J. F.; FONSECA, M. R. “Identificação de áreas potenciais para implantação de turbina hidrocínética através da utilização de técnicas de geoprocessamento”. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Florianópolis, Brasil: Anais INPE, 21–26 abril 2007, p. 2549–2556.
- FERRARI, J. T. **Análise do panorama regulatório nacional visando à inserção das mini e microcentrais hidrelétricas no mercado de energia**. Itajubá (MG): 2006.
- FIGUEIREDO, C. A.; CARTAXO, E. F. **Indicadores do mercado de energia elétrica no estado do Amazonas**. Universidade Federal do Amazonas.
- GORBAN, A. N, Gorlov, A. M., Silantyev, V. M., “Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow”. **ASME J. of Energy Resources Technology**, Vol. 123, p. 311–317. 2001
- HARWOOD, J. H. “Protótipo de um cata-água que gera 1KW de eletricidade” **Acta Amazônica**, vol. 15, nº. 3–4, pp. 403–412, 1985
- HARWOOD, J. H.; MORAES-DUZAT, R. **Testes de um Gerador Hidrocínético Flutuante (Cata-água) em Rios da Amazônia Central: A Evolução Técnica do Protótipo e as Perspectivas para Instalações Futuras**. 2004
- JUCÁ, Augusto, (2005). PNUD reportagem.

JUNK, W. J.; de MELO, J. A. S. N. **Impactos ecológicos das represas hidrelétricas na bacia amazônica brasileira.**

JORNAL DO COMÉRCIO – Amazonas 13/12/2004.

KINPARA IOSHITERU, Daniel, (2003). **Energia e Desenvolvimento Rural.** Brasil Energia. On Line.

KHAN, M.J., et al. “River current energy conversion systems: Progress, prospects and challenges”. **Renew Sustain Energy Rev** (2007), oi:10.1016/j.rser.2007.04.016

LEI Nº. 10.438, DE 26 DE ABRIL DE 2002. Dispõe sobre a expansão da oferta de energia elétrica emergencial, recomposição tarifária extraordinária, cria o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (Proinfa), a Conta de Desenvolvimento Energético (CDE), dispõe sobre a universalização do serviço público de energia elétrica, dá nova redação às Leis nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, nº 9.648, de 27 de maio de 1998, nº 3.890-A, de 25 de abril de 1961, nº 5.655, de 20 de maio de 1971, nº 5.899, de 5 de julho de 1973, nº 9.991, de 24 de julho de 2000, e dá outras providências.

MANUAL de diretrizes para projeto de PCH's, Rio de Janeiro: Eletrobras, DNAEE, 1999.

MIGUEZ, J. D. G. **Sustentabilidade na Geração e Uso de Energia no Brasil: os Próximos Vinte Anos.** UNICAMP, 2002.

MUYLAERT, M. S. **Análise dos Acordos Internacionais sobre Mudanças Climáticas sob o Ponto de Vista do Uso do Conceito de Ética.** Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE, 2000.

NAE – Núcleo de Assuntos Estratégicos. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/secom/nae/climaz.htm>.

NETO, C. J. M. **Turbina hidrocínética para comunidades isoladas na Amazônia: Aperfeiçoamento e adequação do uso de produto.**

NUNES, C. F. **A Aplicação dos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL em Projetos de Implantação de Pequenas Centrais Hidrelétricas – PCHs em Sistemas Isolados no Brasil.** Trabalho de Diploma. Itajubá/MG: Universidade Federal de Itajubá, 2006.

OLIVEIRA, L. **Perspectivas para a Eletrificação Rural no Novo Cenário Econômico Institucional do setor Elétrico Brasileiro.** Tese de Mestrado do Programa de Planejamento Energético PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro: fevereiro, 2001.

OLIVER, André, (2005). Projeto: PRISMA Cachoeira do Aruã – Um Modelo Energético Sustentável. Winrock International Brasil. Mar 2005.

ORTIZ, L. S. **Energias Renováveis Sustentáveis: Uso e Gestão Participativa no Meio Rural.** Núcleo Amigos da Terra. Porto Alegre, 2005

REIS, T.V.M. (2002). **Emissões de Gases de Efeito Estufa no Sistema Interligado Nacional: Metodologia para Definição de Linha de Base e Avaliação do Potencial de Redução das Emissões do PROINFA.** Tese – Salvador: Universidade Salvador, 2002.

- RELATÓRIO de apoio à iniciativa brasileira de energia, cúpula mundial sobre desenvolvimento sustentável, Joanesburgo, África do Sul: 26 de agosto a 4 de setembro de 2002.
- RELATÓRIO de Impacto Ambiental – RIMA PCH Malagone. Uberlândia, MG: LIMIAR – Engenharia Ambiental, outubro/2005.
- Renewables in Power Generation: Towards a Better Environment – Small-Scale Hydro.
- RODRIGUES, A. de F. **Análise da viabilidade de alternativas de suprimento descentralizado de energia elétrica a comunidades rurais de baixa renda com base em seu perfil de demanda.** Dissertação de mestrado- Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: COPPE, 2006 X, 146 p.
- ROSA, L. P.; Mativienko, B.; SANTOS, M.; A., SISAR, E. **Carbon Dioxide and Methane.**
- ROSA, V. H. da S. **Energia elétrica renovável em pequenas comunidades no Brasil: em busca de um modelo sustentável.** Tese de doutorado, Universidade de Brasília, Centro de Desenvolvimento Sustentável 440 p.
- SANTOS, E. O. **Contabilização das Emissões Líquidas de Gases de Efeito Estufa de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa entre Ambientes Naturais e Reservatórios Hidrelétricos.** Tese. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- SANTOS, M. A. **Inventário das Emissões de Gases de Efeito Estufa Derivadas de Hidrelétricas.** Tese. Rio de Janeiro: 2000.
- SOUZA, R. C. R. **Energias alternativas: Desafios e possibilidades para a Amazônia.** 2003.
- SOUZA, Z. de. SANTOS, A. H. M. BORTONI, E. C. – Centrais Hidrelétricas – **Estudos para Implantação.** Rio de Janeiro: ELETROBRÁS,1999.
- STEMAC Geradores. **Catálogo de Grupos Geradores Diesel.** Porto Alegre: fevereiro de 2002.
- TIAGO FILHO, G. L. **The of free-flow hydro turbines in Brazil.** Itajubá – MG Brasil: Pch Notícias Shp News, ano 7, v. 26, p.9–10. 2005
- TIAGO FILHO, G. L. NOGUEIRA, F. J. H. MARCUCCI, F. R. “A Micro-turbina hidráulica Indalma: análise de suas características operacionais”. Artigo do **V Simpósio Brasileiro sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas.** Florianópolis – SC, abril de 2006.
- TUNDISI, J.G, Rosa, L.P.; Santos, M.A. **Greenhouse Gás Emissions from Hidropower Reservoirs and Water Quality.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ 200 –.
- World Energy Council, WEC. **The challenge for rural energy poverty in developing countries,** WEC/FAO, October 1999.

Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida

Agência de Desenvolvimento da Amazônia – ADA. www.ada.gov.br

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. www.aneel.gov.br

Bridgwater, A. V. *et al.* (eds), (1999) **Fast Pyrolysis of Biomass: A Handbook**, CPL Press, London.

Bridgwater, A.V., Toft, A.J., Brammer, J.G., 2002. A Techno-Economic Comparison of Power Production by Biomass Fast Pyrolysis with Gasification and Combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Vol. 6, pp. 181–248.

Campbell, G. S. & Hartley, J. Drying and dried wood. In: HILLIS, W. E. & BROWN. AG. – **Eucalypts for wood production**. Academic Press, 1984. p. 322–7.

Centrais Elétricas Brasileiras S/A – ELETROBRÁS. www.eletronorte.gov.br

Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A – ELETRONORTE. www.eln.gov.br

Companhia de Eletricidade do Acre – Eletroacre. www.eletoacre.com.br

Durand, P. Y. **Contribution a l'etude de la determination des tables des séchage à partir des caractères physiques du bois**. Bois et Forêts des Tropiques, Nogent-sur-Marne, (207): 63–81. 1985.

Electrical Power Plant Design. Department of the Army, U.S.A, Technical Manual TM 5-811-6, Washington, 1984.

Higman, C. e Van der Burgt, M. **Gasification**. Elsevier, 2003.

<http://www.biomachine.com.br>. Acesso em 05/05/2008.

<http://www.biomax.com.br>. Acesso em 04/05/2008.

<http://www.lippel.com.br>. Acesso em 05/05/2008.

Knoef, H.A.M. Handbook: **Biomass Gasification**. Biomass Technology Group, The Netherlands, 2005.

Kwant, K.W. **Status of Gasification in Countries Participating in the IEA Bioenergy Gasification Activity**. Report 2EWAB01.26, EWAB/Novem, The Netherlands, 2001.

Lora, E. E. S. Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energéticos, Industrial e de Transporte. **Interciência**, Rio de Janeiro, 2002.

Macedo, W. N. *et al.* **Metodologia de Avaliação do Problema de Suprimento de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas não Atendidas: O caso da comunidade de Maruja**. CBE, Rio de Janeiro, 2004.

Marques, M., Haddad, J. e Silva, A. R. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**. Editora da EFEI, Itajubá-MG, 2001.

Ministério de Minas e Energia – MME. www.mme.gov.br

- Moran, M. J. e H. N. Shapiro. **Fundamentals of engineering thermodynamics**. Hoboken, N.J.: Wiley. 2008. xv, 928 p. p.
- Peterson, D.R. e Tudan, J. **Modular Biomass Power Plant Feasibility Study**. Lumberjack Resource Conservation and development Council, Inc., 2005.
- Phillips, P. J. **Coal preparation for combustion and conversion**: Gibbs and Hill, Inc., New York (USA). 2003 (EPRI-AF-791).
- Reed, T.B. **Encyclopedia of Biomass Thermal Conversion**. The Biomass Energy Foundation Press.
- Reed, T. B. e S. Gauer. **A survey of biomass gasification**. The National Renewable Laboratory and The Biomass Energy Foundation. 2001.
- Rezaiyan, J. e Cheremisinoff, N. **Gasification Technologies: A Primer for Engineers and Scientists**. Taylor & Francis Group, 2005.
- Rosillo-Calle, F., Bajay, Rothman, H. **Uso da Biomassa para Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Editora da Unicamp, Campinas – SP, 2005.
- Rosillo-Calle, F., Bajay, S.V., Hothman, H. (eds) (2000) **Industrial Uses of Biomass Energy, The Example of Brazil**. Taylor & Francis, London.
- Santos, M. L. D. S. **Solid fuels combustion and gasification : modeling, simulation, and equipment operation**. New York: Marcel Dekker. 2004. xxv, 439 p. p.
- Serpa, P. **Eletrificação Fotovoltaica em Comunidades Caiçaras e seus Impactos Socioculturais**. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, 2001. Tese de Doutorado.
- Severns, W.H., Degler, H.E., Miles, J.C. **Energía Mediante Vapor, Aire o Gas**. Editora. Reverté S.A., Espanha, 1975.
- Stahl, K. **Värnamo Demonstration Plant**. Sydkraft Energy Group, Sweden, 2001.
- Tillman, D. A. **The combustion of solid fuels and wastes**. San Diego: Academic Press. 1991. xi, 378 p. p.
- Turns, S. R. **An introduction to combustion : concepts and applications**. Boston: McGraw-Hill. 2000. xxiii, 676 p. p. (McGraw-Hill series in mechanical engineering).
- 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., R. E. Sonntag, *et al.* **Fundamentals of classical thermodynamics**. New York: Wiley. 1994. xii, 852 p. p.

Biodiesel e Óleo Vegetal in Natura

- ABRAMOWICZ, D.A.; KEESE, C.R. Enzymatic Transesterification of Carbonates in Water Restrictes Environments. **Biotechnology and Bioengineering**, v.33, p. 149–156, 1989.
- AGARWAL, G.P. **Glycerol**. In: Advances in Biochemistry. Eng. Biotechnol v.41, pp. 95–128, 1990.
- AKIN, H.; HASIRCI, N. Preparation and characterization of crosslinked gelatin microspheres. **Journal of Applied Polymer Science**. New York, v.58, n.1, p. 95–100, 1995.
- ALCANTARA, R., Amores, J., Canoira, L., Fidalgo, E., Franco, M.J., Navarro, A.; ‘Catalytic production of biodiesel from soy-bean oil, used frying oil and tallow’; (2000); **Biomass & Bioenergy**; 18; 515–527 .
- ALLINGER, N. L.; CAVA, M. P.; JONGH, D. C. de; JOHNSON, C. R.; LEBEL, N. A.; STEVENS, C. L.; **Química orgânica**. 2ª edição; Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1978; 23–174 p.
- ALMEIDA, A.P., CORRÊA, B., MALLOZI, M.A.B., SAWACAKI, E., SOARES, L.M. Mycoflora and aflatoxin/Fumonisin production by fungal isolates from freshly harvested corn hybrids. **Brazilian Journal of Microbiology**, v. 31, n. 4, p. 321–326, Oct., 2000.
- ANADA-PALMU, P. S.; FAKHOURI, F. M.; GROSSO, C. R. F. Filmes biodegradáveis. **Biociência**. Brasília, n.26, p.12–17, 2002.
- ANCILLOTTI, F., FATTORE, V.; ‘Oxygenate fuels: Market expansion and catalytic aspect of synthesis’; (1998); **Fuel Processing Technology**, 57, 163–194.
- ANP; **Anuário Estatístico da Agência Nacional do Petróleo: 1990–1998**; Rio de Janeiro; 1999.
- AYRANCI, E.; TUNC, S. The effect of fatty acid content on water vapour and carbon dioxide transmissions of cellulose-based edible films. **Food Chemistry**. Oxford, v.72, n.2, p. 231–236, 2001.
- BANDEL, W.; HEINRICH, W. Les carburants dérivés des huiles végétales et les difficultés relatives à leur utilisation dans les moteurs diesel. **Oléagineux**; Vol. 38; Num. 07; Applied Science Publishers Ltd.; England; Juillet; 1983.
- BARCELOS, E. **Dendeicultura no Brasil: diagnóstico**. Trabalho apresentado na X CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE PALMA ECEITEIRA, 24–29 maio, Santa Marta, Colômbia, 18 p., 1993.
- BARCELOS, E., CHAILLARD, H., NUNES, C. D. M., MACÊDO, J. L. V., RODRIGUES, M. do R. L., CUNHA, R. N. V. da, TAVARES, A. M., DANTAS, J. C. R., BORGES, R. de S., SANTOS, W. C. dos, **A cultura do dendê**. Coleção Plantar, 32, Brasília, DF: Embrapa – CPAA; Embrapa – SPI, 68 p., 1995.
- BARCELOS, E. Dendeicultura no Brasil – Diagnóstico In: **X Conferência Internacional de Palma Eceiteira, 24–29 maio**; Santa Marta; Colômbia; 1993.
- BARCELOS, E.; AMBLARD, P. **Oil palm breeding program at Embrapa / Brasil**. Manaus: Embrapa – CPAA, 1992.

- BARRE, P.; BLONDIN, B.; DEQUIN, S.; FEUILLAT, M.; SABLAYROLLES, J.M.; SALMON, J. M. La levadura de fermentación alcohólica. In: FLANZY, C. **Enología: fundamentos científicos e tecnológicos**. Madrid: Mundi-Prensa e AMV, p. 274–315, 2000.
- BARZANA, E.; KAREL, M. E KLIBANOV, A.M. Enzymatic Oxidation of Ethanol in the Gaseous Phase. **Biotechnology Bioengineering**, v. 34, p. 1178–1185, 1989
- BASIRON, Y.; DARUS, A. The oil palm industry – from pollution to zero waste. In: 1st **Global 500 Forum International Conference**, 17–20 October, Kuala Lumpur; Malaysia; 1995; Kuala Lumpur; 1996; 141–165 p.
- BASRI, M.; YUNUS, W.Z.W.; YOONG, W.S.; AMPON, K., RAZAK, C.N.A. E SALLEH, A.B. Immobilization of Lipase from *Candida rugosa* on Synthetic Polymer Beads for use in the Synthesis of Fatty Esters. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v.66, p. 169–173, 1996.
- BATT, C.A. and SINSKEY, A. J. Use of biotechnology in the production of single cell protein. **Food Technology**, 38 (2): 108–111, 1984.
- BERGER, M. and SCHNEIDER, M.P. Enzymatic Esterification of Glycerol II. Lipase.Catalyzed Synthesis of Regioisomerically Pure I(3). rac.Monoacylglycerols. **JAACS**, Vol. 69, n. 10, October 1992.
- BIEBL, H. Fermentation of Glycerol by *Clostridium pasteurianum* – Batch and Continuous Culture Studies. In: **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, v. 27, pp. 18–26, 2001.
- BODMEIER, R.; PAERATAKUL, O. Plasticizer uptake by aqueous colloidal polymer dispersions used for the coating of solid dosage forms. **International Journal of Pharmaceutics**. Amsterdam, v. 152, p. 17–26, 1997.
- BORGES, S.M.S; SANTANA, A.P.; ALMEIDA, P.M.M.; LIMA, A.M.V.; QUINTELLA, C.M.A.L.T.M.H. Recuperação Secundária de Óleo Pesado e Completação de Reservatórios de Campos Maduros Utilizando o Subproduto (Glicerina bruta) da Produção do Biodiesel. **Tecnologia de Recuperação de Petróleo**, 3^o Lugar Prêmio PETROBRAS de Tecnologia, 2005.
- BORMAN, A. M., SZEKELY, A., CAMPBELL, C. K.; JOHNSON, E. M. Evaluation of the viability of pathogenic filamentous fungi after prolonged storage in sterile water and review of recent published studies on storage methods. **Mycopathologia**, 161: 361–368, 2006.
- BRASIL. Lei 11.097, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. **Diário Oficial [da Republica Federativa do Brasil]**. Brasília, v.142, n. 10, p. 52, 14 jan 2005. Seção 1.
- BRISSON, D; VOHL, MC; ST-PIERRE, J; HUDSON, TJ; GAUDET, D. Glycerol: a neglected variable in metabolic process? In: **BioEssays**, v. 23, pp. 534–542, 2001.
- Cadernos NAE / Núcleo de Assunto Estratégicas da Presidência da República nº 2, Brasília, **Biocombustíveis**, 2005.

- Cadernos NAE / Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, nº 3, Brasília, **Mudança do Clima**, vol. I., 2005.
- Cadernos NAE / Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, nº 4, Brasília: **Mudança do Clima**, vol. II. , 2005
- CADWALLADER, K. R.; BRADDOCK, R. J.; PARISH, M. E.; HIGGINS, D. P. Bioconversion of (+)-Limonene by *Pseudomonas gladioli*. *Journal of Food Science*, 54(5), 1241–1245, 1989.
- CALDEIRA, ALEXANDRE.; MOTA, CLÁUDIO. Reações de Conversão de Glicerina a Intermediários Petroquímicos. 2006. Workshop MCT. Disponível: http://www.biodiesel.gov.br/docs/11_alexandre caldeira_glicerina.ppt
- CALLEGARIN, F.; GALLO, J. Q.; DEBEAUFORT, F.; VOILLEY, A. Lipids and biopackaging. **Journal of the American Oil Chemists Society**. Chicago, v. 74, n. 10, p. 1183–1192, 1997.
- CÂNDIDO, E.J; CARVALHO, G.B.M; FELIPE, M.G.A; ALMEIDA e SILVA, J.B. Aproveitamento da palha de cevada para obtenção biotecnológica de xilitol. In: ICTR 2004 – **Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável**, Florianópolis, 2004.
- CANHOS, V. P. Estratégia Nacional de Diversidade Biológica – Microrganismos e Biodiversidade de Solos. <http://www.bdt.fat.org.br/publicações/politica/gtt/gtt10>, acessado em 26/01/2006
- CARTA, G., GAINER, J.L. E ZAIDI, A. Fatty Acid Esterification using Nylon Immobilized Lipase. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 48, p. 601–605, 1995.
- CARVALHO, Ernani P, GONZALEZ, Wilma A. Reaproveitamento do Rejeito de Transesterificação de óleo Vegetal: Glicerina. **Iniciação à Pesquisa.**, Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro, 2006
- CARVALHO, Ernani P., Rodrigues, Juliana, GONZALEZ, Wilma A. Reaproveitamento do Rejeito de Transesterificação de óleo Vegetal: Glicerina, **Projeto de Final de Curso de Engenharia Química, PFC**, Instituto Militar de Engenharia, IME, Rio de Janeiro, 2007
- CARVALHO, R. A. de. Elaboração e caracterização de filmes à base de gelatina modificada enzimática e quimicamente. **Tese de Doutorado**. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. 2002.
- CARVALHO, C.E.G.; FARIAS, A.M.D; PASTURA, N.M.R.; BORGES, L.E.P; GONZALEZ, W.A. Avaliação do Sistema Na/Nb₂O₅ na Transesterificação do Óleo de Soja para Produção de Biodiesel In *Anais do 13º Congresso Brasileiro de Catálise – 3º Congresso de Catálise do Mercosul*, Foz do Iguaçu, 2005.
- CARVALHO, P. de O.; OLIVEIRA, J. G. de and PASTORE, G. M. Enhancement of gamma-linolenic acid production by the fungus *Mucor sp* LB-54 by growth temperature . **Rev. Microbiol.**, vol. 30, nº 2, p. 170–176, Apr./Jun. 1999.

- CHA, D. S.; CHOI, J. H.; CHINNAN, M. S.; PARK, H. J. Antimicrobial films based on Naalginate and κ -carrageenan. **Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie**, London, v. 35, n. 8, p. 715–719, 2002.
- CHARNEY, J. & HERZOG, H.L. **Microbial transformations of steroids-A. HANDBOOK**. New York, 171: 501–505, 1967.
- CHEETHAM, P. S. J. Combining the Technical push and the business pull for natural products. In: BERGER, R. G. **Biotechnology of Aroma Compounds**. Berlim: Springer-Verlag, 1: 1–49, 1997.
- CHERIAN, G.; GENNADIOS, A.; WELLER, C.; CHINACHOTI, P. Thermomechanical behavior of wheat gluten films: Effect of sucrose, glycerin and sorbitol. **Cereal Chemistry**, v. 72, p. 1–6, 1995
- CHICK, J.; HERNANDEZ, R. J. Physical, thermal and barrier characterization of caseinwax-based edible films. **Journal of Food Science**. Chicago: v. 67, n. 3, 1073–1079, 2002.
- COUTO, L. C.; COUTO, L.; WATZLAWICK, L. F.; CÂMARA, D. Vias de valorização energética da biomassa. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 1, p. 71–92, 2004.
- CRABBE, E.; HIPOLITO, C.N.; KOBAYASHI, G.; SONOMOTO, K. e ISHIZAKI, A. Biodiesel Production From Crude Palm Oil and Evaluation of Butanol Extraction and Fuel Properties. *Process*. **Biochemistry**, 2001; 37: 65–71
- CUQ, B.; GONTARD, N.; CUQ, J.L.; GUILBERT, S. Selected functional properties of fish myofibrillar protein-based films as affected by hydrophilic plasticizers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, Washington, v.45, p. 622–26, 1997.
- DABBAH, R. Protein from microorganisms. **Food Technology**, 24: 659–666, 1970.
- DEHORITY, B.A. **Rumen Microbiology**. The Ohio State University, 125 p., 1987.
- DHAVALIKAR, R. S.; BHATTACHARYYA, P. K.; **Indian J. Biochem.** 3(3): 144–157, 1966.
- DHAVALIKAR, R. S.; RANGACHARI, P. N.; BHATTACHARYYA, P. K.; Microbiological transformations of terpenes. IX. Pathways of degradation of limonene in a soil pseudomonad. **Indian J. Biochem.** 3 (3): 158–164, 1966.
- DIAS, A.L.M. Influência de diferentes cepas de levedura e mostos na formação de compostos voláteis majoritários em vinho de caju (*Anacardium occidentale*). **Dissertação de Mestrado em Tecnologia de Alimentos**, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, p. 94, 1996.
- DIAS, B.F.S. Biodiversidade: Perspectivas e Oportunidades Tecnológicas – Disponível em: <http://www.planeta.coppe.ufrj.br/noticias/noticia000074.html>.
- DI LASCIO, MARCO A. Tecnologias para a Geração de Energia Elétrica a partir da Utilização de Biomassa Líquida ou Sólida: Vantagens e Desvantagens. **Primeiro Seminário Atendimento Energético de Comunidades Extrativistas – SAECX'2004**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Junho, 2004

- DINIZ, G. **Glicerina bruta obtida na produção de biodiesel pode ter muitas aplicações.** Entrevista a Luiz Pereira Ramos (CEPESQ-UFPR). *Ciência Hoje Online*, 19 out. 2005. Disponível em: <http://cienciahoje.uol.com.br/controlPanel/materia/view/3973>. Acesso em: 19 fev. 2007.
- DIPROD/CENPES/PETROBRÁS. **Estudo sobre o uso de óleos vegetais como combustível para motores diesel** – Relatórios nºs: 1 (jullho/80), 2 (fev./81) e 3 (julho/83).
- DOELLE, H. W. Preparation of extracts of culture liquids for gas-chromatographic determination of non-acidic fermentation products. **Antonie van Leeuwenhoek**. Volume 32(1), 373–380, 1966.
- DOMSCHKE, A. G.; GARCIA, O. **Motores de combustão interna**; Vol. 1. São Paulo: Editora da Escola Politécnica da USP 1968. 42–231 p.
- DORDICK, J.S. Enzymatic Catalysis in Monophasic Organic Solvents. **Enzyme Microbiology Technology**, v. 11, p. 194–211, 1989.
- DREW, S.W.; DEMAIN, A.L. Effect of primary metabolites on secondary metabolism. **Annual Review Microbiology**, v. 31, p. 343–356, 1977.
- DUBOIS, P. Les arômes des vins et leur défauts. **Revue Française du OEnologie**, v. 145, p. 27–40, 1994.
- EGGERT T.; VAN POUDEROYEN, G.; DIJKSTRA, B.W.; JAEGER, K.E. Lipolytic enzymes LipA and LipB from *Bacillus subtilis* differ in regulation of gene expression, biochemical properties and three-dimensional structure. **FEBS Lett.**, v. 502, p. 89–92, 2001.
- EGLOFF, M. P.; RANSAC, S.; MARGUET, F.; ROGALSKA, E.; VAN TILBEURGH, H.; BUONO, G.; CABBILLAU, C.; VERGER, R. **Les lipases: cinétiques, spécificités et aspects structuraux.** In: Malcata, F.X. (Ed.). *Engineering of/with lipases*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1995.
- ELETROBRÁS. Informe de Mercado–Sistemas isolados Norte, 2005, http://www.eletronbras.com.br/EM_Atuacao_SistIsolados/default.asp
- ELIBOL, M.; ÓZER, D. “Lipase production by immobilised *Rhizopus arrhizus*”. **Process Biochemistry** 36, 219–223, 2000.
- EMBRAPA – Seminário “**A cultura do Dendê: aspectos gerais e importância para o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel**”. Embrapa Amazônia Ocidental – CPAA, Escritório de Negócios da Amazônia – ENA/ETT e Ministério da Integração Social, 2005.
- ENCINAR, J. M.; GONZÁLEZ-MARTÍN M. L.; GONZÁLEZ-GARCÍA, C. M.; GONZÁLEZ, J. F.; RAMIRO, A.; SABIO, E.; BRUQUE, J. M. Thermodynamic characterization of a regenerated activated carbon surface. **Applied Surface Science**, 2002; 191: 166–170.
- ELECTRAL DATABASE FOR ORGANIC COMPOUNDS SDBS. National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST). Japão. Disponível: http://www.aist.go.jp/RIODB/SDBS/cgi-bin/cre_index.cgi

- FABER, K. **Biotransformation in Organic Chemistry: a Textbook**, 4^a ed., Berlin, Germany: Springer-Verlag, p.19, 2000.
- FARINAS, E.T.; BULTER, T.; ARNOLD, F.H. Directed enzyme evolution. **Current Opinion in Biotechnology**. v. 12, n. 6, p. 545–551, 2001.
- FELIZARDO, P.; CORREIA, M.J.N; RAPOSO, I; MENDES, J.F; BERKEMEIER, R; BORDADO, J.M. Production of Biodiesel from Waste Frying Oils. **Waste Management** (2006), v. 26, p. 487–494.
- FERNANDES, M. A. G., PASTURA, N. M. R., TIMM, P. e NUNES, P. P., Influência da temperatura nas transformações dos produtos do craqueamento térmico do óleo de soja Hidrogenado em Hidrocarbonetos – apresentado no **1º Encontro Regional de catálise**. Salvador (1986).
- FERREIRA, W.A; BOTELHO, S.M.; VILAR, R.R.L. *Resíduos da agroindústria do dendê: caracterização e equivalência em fertilizantes*. Belém: CPATU. 1998. 22 p (Embrapa-CPATU. Boletim de Pesquisa, 198).
- FLORES, CL; RODRÍGUEZ, C; PETIT, T; GANCEDO, C. Carbohydrate and energy-yielding metabolism in non-conventional yeasts. In: **FEMS Microbiology Reviews**, v. 24, pp. 507–529, 2000.
- FRAZIER, W. C.; WESTHOFF, D.C. **Microbiologia de los Alimentos**. Editora Acribia S.A, 1978.
- FREIRE, D.M.G., CASTILHO, L.R. 2000. Lipases produzidas por fermentação submersa e em meio sólido. **Rev. Bras. Farm.** 81(1/2), 48–56, 2000.
- GARCIA-SILVA M. *Penicillium corylophilum* Dierckx: atividades antimicrobiana e antichagásica de extratos brutos e metabólitos secundários isolados. **Dissertação de Mestrado**. Fac. Ciências Farmacêuticas de Ribeirão Preto, USP, Ribeirão Preto, 132pp. , 2002.
- GLYCERINE. Disponível em: www.the-innovation-group.com/ChemProfiles/Glycerine.htm. Acessado em: 18 de agosto de 2006.
- GOLDEMBERG, J. VILLANUEVA D. **Luz Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. 2^a edição revista. São Paulo, EDUSP, 2003
- GOMES, J.G.C., BUENO NETTO, C.L., Produção de plásticos biodegradáveis por bactérias, **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 17, 0.24–29,1997
- GONÇALVES, V. L. C. ; PINTO, B.P. ; MUSGUEIRA, L.C. ; SILVA, J.C.; MOTA, C.J. A. **Biogolina: Produção de Éteres e Ésteres da Glicerina** Artigo apresentado no II Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia do Biodiesel, Brasília – Distrito Federal, Brasil, 2007
- GONTARD, N.; GUILBERT, S. Bio-packaging: technology and properties of edible and/or biodegradable material of agricultural origin. **Ciência e Tecnologia de Alimentos SBCTA**, Campinas, v. 30, n. 1, p. 3–15, 1996.

- GONZALEZ, W. A., et al. **Biodiesel de dendê: Desenvolvimento sustentável em defesa da Amazônia**. Artigo apresentado no I Congresso da Rede Brasileira de Tecnologia do Biodiesel, 31 de agosto e 1 de setembro, Brasília – Distrito Federal, Brasil, 2006.
- GONZALEZ, W.A.; BORGES, L.E.P.; PASTURA, N.M.R. **Biodiesel de Dendê**. Manaus, 2005. Ministério da Defesa.
- GUIMARÃES, D. H.; BRIOUDE, M. M.; FIÚZA, R. P.; PRADO, L. A. S. A.; BOAVENTURA, J. S.; JOSÉ, N. M. **Preparação e caracterização de poliésteres aromáticos a partir do glicerol, co-produto da produção de biodiesel e ácido ftálico**. 17^o CBECIMat – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 15 a 19 de Novembro de 2006.
- GUIMARÃES, J. L.; SATYANARAYANA, K.G.; WYPYCH, F.; RAMOS, L.P. **Preparo de Compósitos Biodegradáveis a Partir de Fibras de Bananeira Plásticas com Amido e Glicerina Bruta Derivada da Alcoólise de Óleos Vegetais**. Disponível em: [www.biodiesel.gov.br/docs/congresso 2006/Co-Produtos/PreparoCompositos6.pdf](http://www.biodiesel.gov.br/docs/congresso%202006/Co-Produtos/PreparoCompositos6.pdf)
- GUTBERLET, J. “Zoneamento da Amazônia: uma visão crítica”. **Estudos Avançados**. v. 16, nº 46, São Paulo, dez 2002.
- HAHN-HÄGERDAL, B; JEPSSON, H; SKOOG, K; PRIOR, BA. Biochemistry and physiology of xylose fermentation by yeasts. In: **Enzyme and Microbial Technology**, v. 16, pp. 933–943, 1994.
- HAK-JOO KIM, BO-SEUNG KANG, MIN-JU KIM, YOUNG MOO PARK, DEOG-KEUN KIM, JIN-SUK LEE, KWAN-YOUNG LEE, “Transesterification of vegetable oil to biodiesel using heterogeneous base catalyst” **Catalysis Today** 93–95 (2004) 315–320
- HARTMAN, L; ESTEVES, W. Tecnologia de óleos e gorduras vegetais. **Série Tecnologia Industrial**. v. 13. São Paulo: Comercio, Ciência e Tecnologia, 1982. 169 p. (Secretaria de Estado da Indústria).
- HARTLEY, C. W. S.; **The oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.)**; 2nd edition; Tropical Agriculture Series. New York: Longman Group UK, 1988; 692–780 p.
- HAUMANN, B.F., BARRERA-ARELLANO, D. E WAGNER, W. Brazil; a giant in the Soybean industry. **Inform, Campaign**. 1995; 6: 900-909.
- HEIKKILÄ, H., HYÖVY, G., RAHKILA, L., SARKKI, M.L., VILJAVA, T.A. Process for the Simultaneous Production of Xylitol and Ethanol. WO patent 91/10740, publ.25/07/1991.
- HERNANI DE SÁ FILHO ET ALLII. Diagnóstico da Viabilidade Técnica de Utilização dos Óleos Vegetais Brasileiros como Combustível / Lubrificante. **Informativo do INT**, 12(22), maio/agosto de 1979, pgs. 29–39
- HESTER, A. Microbial glycerol. In: **Industrial Bioprocess** v.22 (4), pp. 3–5, 2000.
- HOBSON, P.N.; STEWART, C.S. **The Rumen Microbial Ecosystem**. 2.ed. London: Blackie Academic & Professional, 719 p., 1997.
- HOLLAND, H. L. **Organic Synthesis With Oxidative Enzymes**. Weinheim: VCH, 1992.

- HORTA Jr, C. L., “*Transformação de Ácidos Graxos em Hidrocarbonetos*” **Tese de Mestrado**, Instituto Militar de Engenharia – defendida em 1994.
- IBP; **Curso de informação sobre combustíveis e combustão**. Rio de Janeiro: IBP, 1982; 442 p.
- IEA, Biofuels for transport: an international perspective, IEA/EET, Paris, maio 2004; comunicação ao CGEE.
- Industrial Oil Products Program: IOP 3.1 – New Uses of Glycerol. Disponível em: www.aocs.org/archives/am2006/techprog.asp. Acesso em 12 de setembro de 2006.
- INOUE, O.O. **Estudo da influência da concentração e dos componentes do óleo de soja sobre a produção de salinomicina**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – Brasil, 152 p., 2001.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2004. **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. Projeto Prodes. Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>>.
- IRISSIN-MANGATA, J.; BAUDUIN, G.; BOUTEVIN, B.; GONTARD, N. New plasticizers for wheat gluten films. **European Polymer Journal**. v. 37, p. 1533–1541, 2001.
- ITOH, N.; ASAKO, H.; BANNO, K.; MAKINO, Y.; SHINOHARA, M.; DAIRI, T.; WAKITA, R.; SHIMIZU, M. Purification and characterization of NADPH-dependent aldo–keto reductase specific for β -keto esters from *Penicillium citrinum*, and production of methyl (S)-4-bromo-3-hydroxybutyrate. **Appl Microbiol Biotechnol**, 66: 53–62, 2004.
- JACKOBSON, G.; KATHAGEN, FW; KLATT, M. **Glycerol**. In: Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry. Weinheim: VCH, pp. 477–489, 1989.
- JAEGER, K. E.; RANSACK, S.; KOCH, H. B.; FERRATO, F.; DIJKSTRA, B. W. Bacterial lipases. **FEMS Microbiol. Rev.**, v.15, p. 29–63, 1994.
- JAEGER, K. E., REETZ, M. T. Microbial lipases form versatile tools for biotechnology. **Trends Biotechnol.**, v. 16, p. 396–403, 1998.
- JEON, Y.; KAMIL, J. Y. V. A.; SHAHIDI, F. Chitosan as an edible invisible film for quality preservation of herring and atlantic cod. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Washington, v. 50, n. 18, p. 5167–5178, 2002.
- JIN, H; FANG, H; ZHUGE, J. By-product formation by a novel glycerol-producing yeast, *Candida glycerinogenes*, with different O₂ supplies. In: **Biotechnology Letters** v. 25, pp. 311–314, 2003.
- JITPUTTI, J.; KITIYANAN, B; RANGSUNVIGIT, P; BUNYAKIAT, K; ATTANATHO, L; JENVANITPANJAKUL, P. Transesterification of Crude Palm Kernel Oil and Crude Coconut Oil by Different Solid Catalysts, **Chemical Engineering Journal** (2006), v. 116. p. 61–66.
- JOHNSTON-BANKS, F. A. Gelatin. In: **Food Gels**. London, Peter Harris. Elsevier Applied Science. Ch. 7, p. 233–289, 1990.

- JONES, J. B.; WONG, C-H. Biocatalysis and Biotransformation. Exploiting Nature's Magic, **Curr. Op. Chem. Biol.**, v. 2, p.67–89, 1998.
- JOSHUA & KAIA TICKELL. **From the Fryer to the Fuel Tank**. 2nd. Edition. Sarasota, Fla., USA: GreenTech Publishing, 1999.
- KALTNER, FRANZ JOSEF. Geração de Energia Elétrica em pequenas comunidades da Amazônia, utilizando Óleo Vegetal “in natura” de espécies nativas como combustível em motores diesel. **Primeiro Seminário Atendimento Energético de Comunidades Extrativistas – SAEEX'2004**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Junho, 2004.
- KARINEN R. S., Krause, A. O. I.; 'New biocomponents from glycerol', (2006), *Applied Catalysis A: General*, 306; 128–133
- KARMEE, S. K. e CHADHA, A. Preparation of biodiesel from crude oil of *Pongamia pinnata*. **Bioresource Technology**, 2005; 96: 1425–1429.
- KIESLICH, K.. Terpenoids In: **Biotechnology: A Comprehensive Treatise** in 8 volumes. Introduction. Verlag Chemie. K. Kieslich Ed., Capítulo 4, p.97–125, 1984b.
- KLEPACOVA, K., MRAVEC, D., BAJUS, M.; 'Etherification of Glycerol with tert-butyl alcohol Catalysed by ion-exchange Resins'; (2006); **Versita – Chemical Papers**; 60 (3); 224–230.
- KLEPACOVA, K., MRAVEC, D., BAJUS, M.; 'Tert-butylation of Glycerol Catalysed by ion-exchange Resins'; (2005); **Applied Catalysis A**; 294; 141–147.
- KLIBANOV, A.M. Improving enzymes by using them in organic chemistry. **Nature**. v. 409, n. 6817, p. 241–246, 2001.
- LEITE, L. C. B., “*Estudo da Descarboxilação Catalítica de Ácidos Carboxílicos*” **Tese de Mestrado**, Instituto Militar de Engenharia – defendida em 1996
- LIMA, P. C. R. “Biodiesel e a inclusão Social”. In: **Consultoria Legislativa**. Câmara dos Deputados, Brasília: 2004. 33 p.
- LIU, Z. L.; SLININGER, P. J.; DIEN, B. S.; BERHOW, M. A.; KURTZMAN, C. P.; GORSICH, S. W. Adaptive response of yeasts to furfural and 5-hydroxymethylfurfural and new chemical evidence for HMF conversion to 2,5-bis-hydroxymethylfuran . **J Ind Microbiol Biotechnol**, 31: 345–352, 2004.
- LOMBORG, B. **Global crises, global solutions**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004.
- LÓPES, FD; REVILLA, JLG; MUNILLA, MH. Glicerol. In: **Manual dos Derivados da Cana-de-Açúcar: diversificação, matérias-primas, derivados do bagaço do melaço, outros derivados, resíduos, energia**. Brasília: ABIPTI, cap. 5.4, pp. 393–397,1999.
- LUYTEN, K.; ALBERTYN, J.; SKIBBE, W.F.; PRIOR, B.A.; RAMOS, J.; THEVELEIN, J.M. and HOHMANN, S. Fps1, a yeast member of the MIP family of channel proteins, is a facilitator for glycerol uptake and efflux and is inactive under osmotic stress. **The EMBO Journal**, 14, pp. 1360–1371, 1995.

- MALI, S.; OLIVATO, J. B.; GROSSMANN, M. V. E. Efeito de embalagem biodegradável de amido no armazenamento de queijo processado. *Seminário Ciências Agrárias, Londrina*, v. 27, n. 1, p. 81–88, jan./mar, 2006.
- MALI, S.; SAKANAKA, L. S.; YAMASHITA, F.; GROSSMANN, M. V. E. Water sorption and mechanical properties of cassava starch films and their relation to plasticizing effect. *Carbohydrate Polymers*, Barking, v. 60, p. 283–289, 2005.
- MARTINEZ, M.; TORRANO, E.; ARACIL, J. n Analogue of Jojoba Oil. A Statistical approach. *Industrial Engineering Chemistry Research*, v. 27, p. 2179–2182, 1988.
- MCCABE, E.R. Disorders of glycerol metabolism. In: **The metabolic bases of inherited disease**, 7^aed. New York: McGraw-Hill Book Co. pp. 1631–1652, 1995.
- MENEZES, J. A. de S.; **Terceiro ciclo industrial no Amazonas: contribuições do óleo de dendê como insumo energético (biodiesel e oleoquímico)**. Manaus: Governo do Estado do Amazonas, 1995. 226 p.
- MINATO, Max Yukio. **Aproveitamento da Glicerina**, 2004. PIBIC/CNPq/IME
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resolução ANP nº 42, de 24 de novembro de 2004**. Estabelece a especificação de biodiesel. Agência Nacional de Petróleo, Brasília. Disponível em: http://www.biodiesel.gov.br/docs/Resolucao_42.pdf. Acesso em: 01 dez 2006.
- MIZRAHI, M. A. “*Reação de Descarboxilação de ácidos Graxos sobre zeólitas modificadas ou não por Lantânio*”. **Tese de Mestrado**, Instituto Militar de Engenharia – defendida em 2000
- MORETTO, E.; FETT, R.; **Óleos e gorduras vegetais – processamento e análises**. 2^a edição. Florianópolis: Editora da UFSC, 1989. 179p
- MORETTO, E.; FETT, R. **Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos**. São Paulo Varela 153 p., 1998.
- MORIMOTO S, HIRASHIMA T, OHASHI M. Studies on fermentation products from aldehyde by microorganisms: the fermentative production of furfural alcohol from furfural by yeasts (part II). *J Ferment Technol*, 46: 276–287, 1968.
- MORIMOTO S, MURAKAMI M. Studies on fermentation products from aldehyde by microorganisms: the fermentative production of furfural alcohol from furfural by yeasts (part I). *J. Ferment Technol*, 45: 442–446, 1967.
- MORRISON, LR. Glycerol. In: **Encyclopedia of Chemical Technology**. New York: Wiley, pp. 921–932, 1994.
- MULTON, J. L. **L'EMBALLAGE des denrées alimentaires de grande consommation**. Technique et documentation. France, Lavoisier, Apria, p. 320, 1989.
- NAM, J., KIM, H., KWON, J., HAN, M.Y., SON, K., LEE, U.C., CHOI, J. and KNOW, B. 8-O-Methylsclerotioramine, antagonist of the Grb2-Sh2 domain, isolated from *Penicillium multicolor*. *J. Nat. Prod.*, v. 63, p. 1303–1305, 2000.

- NASCIMENTO, Ademar Nogueira do & NOGUEIRA, Jurandyr Santos. **Avaliação técnica e econômica do óleo de dendê para a geração de eletricidade no interior da Bahia.** Relatório de Projeto CEPEL/ELETROBRÁS / UFBA. Universidade Federal da Bahia (UFBA), maio/2000.
- NASCIMENTO, M. da G.; ZANOTTO, S. P.; MELEGARI, S. P.; MORAN, P. J. S. Estudos de proteção da célula de *Saccharomyces cerevisiae* para utilização em reações de redução em meio orgânico. **Quim. Nova**, Vol. 25, No. 4, 567–571, 2002.
- NETO, P.R.C., ROSSI, L.F.S., ZAGONEL, G.F., e RAMOS, L.P.. Produção de Biocombustíveis Alternativo ao Óleo Diesel Através da Transesterificação de Óleo de Soja Usado em Frituras. **Química Nova**. 2002; 23: 1–15.
- NEVOIGT, E; STAHL, U. Osmoregulation and glycerol metabolism in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. **FEMS Microbiology Reviews**, v. 21, p. 231–241, 1997.
- NOMA, Y.; YAMASAKI, S.; ASAKAWA, Y.; Biotransformation of limonene and related compounds by *Aspergillus cellulosa*. **Phytochemistry**, 31(8), 2725–2727. 1992.
- NOIRET, M.; WUIDART, W. Possibilities for improving the fatty acid composition of palm oil – results and prospects. In: **International Developments in Palm Oil, 14–17 June**. Kuala Lumpur; Malaysia: 1976; Kuala Lumpur: 1977; 39–57 p.
- OLIVEIRA, D.; ALVES, T.L.M. A Kinetic Study of Lipase Catalyzed Alcoholysis of Palm Kernel Oil. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 84–86, p. 59–68, 2000.
- OLIVEIRA, L. B.; COSTA, A. O. **Biodiesel: uma experiência de desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: IVIG/COPPE/UFRJ. [2004]. Disponível em: <http://www.ivig.coppe.ufrj.br/doc/biodiesel.pdf>. Acesso em: 26 fev 2005.
- ONISHI, H. Osmophilic yeast. In: **Advances in Food and Nutrition Research** v.12, pp. 53–94, 1963.
- OUGH, C.S. **Tratado básico de enologia**. Zaragoza: Acribia, p. 294, 1996.
- PAVIA, D.L.; LAMPMAN, G. M.; KRIZ, G.S. **Introduction to spectroscopy a guide for students of organic chemistry**. 2nd Ed. , 1996.
- PELCZAR, M., REID, R e CHAN, E. C. S. **Microbiologia**. Ed. McGraw-Hill, São Paulo, vol 1, 1980.
- PEREIRA, R. S. Projeto e Construção de um Bioreator para Síntese Orgânica Assimétrica Catalisada por *Saccharomyces cerevisiae* (Fermento Biológico de Padaria). **Química Nova**, v. 20, n. 5, p. 551–554, 1997.
- PÉROVAL, C.; DEBEAUFORT, F.; DESPRÉ, D.; VOILLEY, A. Edible Arabinoxylanbased films. 1. Effects of lipid type on water vapor permeability, film structure and other physical characteristics. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Washington, v. 50, n. 14, p. 3977–3983, 2002.
- POPPE, J. Gelatin. In: **Thickening and gelling agents for food**. New York: Ed. Alan Imenson, Blackie Academic & Professional, Ch. 7, p. 144–168, 1997.

- PRADELLA, José Geraldo da Cruz. **Biopolímeros e Intermediários Químicos**. São Paulo, 2006. CGEE.
- Programas Nacionais de Produção e Uso de Biodiesel, 2005. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/programa.html#seccaobjetivos>>. Capturado em 26 de setembro de 2005.
- RAMADHAS, A .S.; JAYARAJ,S. e MURALEEDHARAN,C. *Biodiesel Production Form High FFA Rubber Seed Oil. Fuel*; 1–6, 2004.
- REETZ, M.T. (2002), Lipases as practical biocatalysts, **Curr Opin Chem Biol**, v. 6, n. 2, p. 145–150.
- REHM, H. Microbial production of glycerol and other polyols. In: **Biotechnology** vol. 6B. Special microbial process. Weinheim: VCH, pp. 52–64, 1988.
- REGUERA, F. M., MARTINS, E. P., FERREIRA, M. S., NUNES, P. P., GONZALEZ, W. A, "Avaliação de catalisadores a Base de Nb₂O₅ na Descarboxilação de Ácido Esteárico", *Anais do XVII Simpósio Ibero-Americano de Catálise*, Porto – Portugal, (2000).
- REINHOLD METZLER. **Small Lister Type Diesel Engines of Indian Origin – Their long term performance on plant oil as fuel and ways to improve their reliability**. Report for Project Purgère, October 1995. (Ver <http://www.jatropha.com>, item "Literature").
- REP, M; ALBERTYN, J; THEVELEIN, JM; PRIOR, BA; HOHMANN, S. Different signaling pathways contribute to the control of GPD1 gene expression by osmotic in *Saccharomyces cerevisiae*. In: **Microbiology**, v. 145, pp. 715–727, 1999.
- Resolução nº 386 de 5 de Agosto de 1999. Disponível em: www.anvisa.gov.br/alimentos/aditivos_alimentares.htm. Acessado em 20 de julho de 2006.
- RHIM, J. W.; WU, Y.; WELLER, C. L.; SCHNEPE, M. Physical characteristics of emulsified soy protein-fatty acid composite films. **Sciences des aliments**. Paris, v. 19, nº 1, p. 57–71, 1999.
- RIBEIRO, F. H. L. A, VALENÇA, G. P., SILVA, J. G., SILVA, M. E. F. *Fontes Alternativas de Energia – Óleos Vegetais – Hidrogenação. Projeto de fim de Curso de Engenharia Química – Instituto Militar de Engenharia* (1982)
- ROBRA, S.; SANTOS, J.V.S.; OLIVEIRA,A.M.; da CRUZ, R.S. Usos alternativos para a glicerina proveniente da produção de biodiesel: Parte 2 – Geração de biogás. Disponível em: www.biodiesel.gov.br/docs/congresso2006/Co-Produtos/ UsosAlternativos12.pdf . Acessado em 10/12/2007.
- ROCHA, B.R.P.; SILVA, I. M. O. **Energia para o Desenvolvimento Sustentável da Amazônia**. Belém: 2000. Disponível em: www.desenvolvimento.gov.br/arquivo/sti/publicacoes/futAmaDilOportunidades/futAmazonia_05.pdf
- RODRIGUES, J.A.R. ; MORAN, P.J. S. **Reduções enantiosseletivas de cetonas utilizando-se fermento de pão**. Quím. Nova, vol. 24, nº 6, p. 893–897, Nov./Dez. 2001.
- RODRIGUES, R.C.L.B; FELIPE, M.G.A; ROBERTO, I.C; VITOLLO, M. Batch xylitol production by *Candida guilliermondii* FTI 20037 from sugarcane bagasse hemicellulosic hydrolysate at controlled pH values. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 26, pp. 103–107, 2003.

- SAMAD, M.Y.A., SALLEH, A.B., RAZAK, C.N.A., AMPOU, K., YUNUS, W.M.Z., BASRI, M. A lipase from a newly isolated thermophilic *Rhizopus rhizopodiformis*. **Word J Microbiol Biotechnol**, 6, 390–394, 1990
- SAN JOSÉ, C; MONGE, RA; PEREZ-DIAS, R; PLA, J; NOMBELA, C. The mitogen-activated protein kinase homolog HOG1 gene controls glycerol accumulation in the *Candida albicans*. In: *Journal Bacteriology*, v.178, pp. 2850–2852, 1996.
- SANTOS, C. M. C., et al. **Processo para a Produção de um Derivado de Ácido Linoléico por Biotransformação de Co-Produtos de Biodiesel**. Depósito de patente INPI sob nº P10604222-8, em setembro de 2006.
- SANTOS, C.M. C. Metabólitos Secundários de *Penicillium corylophilum* Dierckx: Isolamento, Elucidação Estrutural e Verificação da atividade Biológica. **Dissertação de Mestrado**. Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 101 pp., 2004.
- SARMENTO, A L.S.C. Elaboração e caracterização de biofilmes a partir de gelatina reticulada. **Dissertação de Mestrado**, Faculdade de Engenharia de alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 149p., 1999.
- SCHMID, A.; DORDICK, J.S.; HAUER, B.; KIENER, A.; WUBBOLTS, M.; WITHOLT, B. Industrial biocatalysis today and tomorrow. **Nature**. v. 409, n. 6817, p. 258–268, 2001.
- SCHOEMAKER, H.E.; MINK, D.; WUBBOLTS, M.G. Dispelling the Myths **Biocatalysis in Industrial Synthesis**. *Science*. v. 299, n. 5613, p. 1694–1697. 2003.
- SCHRAG, J.D.; CYGLER, M. Lipases and alpha/beta hydrolase fold. **Methods Enzymol.**, v. 284, p. 85–107, 1997.
- SCHRAMM, Fermin R. **Paradigma biotecnocientífico e paradigma bioético**. In: ODA, Leila M. (ed.) *Biosafety of transgenic organisms in human health products*. Rio de Janeiro: FIOCRUZ, 1996.
- SCHWARTZ, M. The life and works of Louis Pasteur. **Journal of Applied Microbiology**, 91, 597–601, 2001.
- SHIH, F. F. Edible films from rice protein concentrate and pullulan. **Cereal Chemistry**. St. Paul, v. 73, nº 3, p. 406–409. 1996.
- SHARMA, R., CHISTI, Y., BANERJEE, U.C. roduction, purification, characterization, and applications of lipases. **Biotechnol Adv**, 19, 627–662, 2001
- SHIRAI, K. Physical properties of shark gelatin compared with pig gelatin. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Washington, v. 48, n. 6, p. 2023–2027, 2000.
- SILVA, D.D.V. *Efeito da relação glicose*: xilose na bioconversão de xilose em xilitol por *Candida guilliermondii* em hidrolisado de bagaço de cana-de-açúcar. **Tese de Doutorado**. Faculdade de Engenharia Química de Lorena. Dept. de Biotecnologia. Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial. Lorena. São Paulo, 2004.

- SILVA, DDV; FELIPE, MGA. *Effect of glucose:xylose ratio on xylose reductase and xylitol dehydrogenase activities from Candida guilliermondii in sugarcane bagasse hydrolysate*. In: **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 81, pp. 1294–1300, 2006.
- SILVEIRA, J.M.F.J. **Biotecnologia na agricultura e inovação tecnológica: novas questões, novos desafios**. Programa de Seminários Acadêmicos, IE-UNICAMP, São Paulo, nº 19, 2005.
- SILVERSTEIN, R.M.; BASSLER, G.C.; MORNILL, T.C. **Spectrometric Identification of Organic Compounds**, 5th, John Wiley & Sons, 1994.
- SIMOPOULOS, A. P. **Fatty Acids**. In: *Functional Foods*, Goldberg, I. (Ed.), cap. 16, pp. 355–392, 1994.
- STANBURY; WHITAKER & HALL. **Principles of Fermentation Technology**, 1995.
- SUFRAMA – **Potencialidades Regionais Estudos de Viabilidade Econômica Sumários Executivos, vol. 5, Dendê**. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, 2003.
- SUNAO, S. Produção de esteróides. In: LIMA, U. A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W.; SCHMIDELL, W. **Biotecnologia Industrial Processos Fermentativos Enzimáticos**. v.3, São Paulo, Edgard Blücher Ed., p. 179–196, 2001.
- TAHERZADEH, J.M; ADLER, L; LIDÉN, G. Strategies for enhancing fermentative production of glycerol – a review. In: **Enzyme and Microbial Technology** v. 31, pp. 53–66, 2002.
- TAMANINI, C; OLIVEIRA, AS; FELIPE, MGA; CANETTIERI, EV; CÂNDIDO, EJ; HAULY, MCO. Avaliação da casca de aveia para produção biotecnológica de xilitol. In: **Acta Scientiarum**, v. 26, nº 1, pp. 117–125, 2004.
- TAN Q.; DAY D.F. Bioconversion of limonene to α -terpineol by immobilized *Penicillium digitatum*. **Appl Microbiol Biotechnol**, 49: 96–101, 1998.
- TANAKA, M.; IWATA, K.; SANGUANDEEKUL, R.; HANDA, A.; ISHIZAKI, S. Influence of plasticizers on the properties of edible films prepared from fish water-soluble proteins. **Fisheries Science**, Tóquio, v. 67, p. 346–51, 2001.
- TAPIA-BLACIDO, D., SOBRAL, P. J. and MENEGALLI, F. C. Effects of drying temperature and relative humidity on the mechanical properties of amaranth flour films plasticized with glycerol. **Braz. J. Chem. Eng.** , vol. 22, n. 2, p. 249–256 ,2005
- THARANATHAN, R. N. Biodegradable films and composite coatings: past, present and future. **Trends in Food Science & Technology**. Boca Raton, v. 14, p. 71–78, 2003.
- THOMAZINE, M.T.; SOBRAL, P.J.A. **Desenvolvimento e Caracterização de Filmes a Base de Gelatina de Pele de Peixe**, Pirassununga, p. 7, 2005. PIBIC/CNPq
- TOMASEVIC, A. V. e SILER-MARINKOVIC, S. S. Methanolysis of used frying oil. **Fuel Processing Technology**. 2003; 81: 1–6.

- TOMICH, T.R., GONCALVES, L.C., MAURICIO, R.M. *et al.* Bromatological composition and rumen fermentation kinetics of hybrids from crosses of sorghum and sudangrass. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**. v.55, n.6, p.747-755, 2003.
- TOSETTO, MG; ANDRIETTA S.R. **Cinética de produção de glicerol em processo de fermentação alcoólica utilizando diferentes matérias primas industriais**. In: Simpósio Nacional de Fermentações, Florianópolis. Anais do 14º SINAFERM, Florianópolis, 2003.
- VANDESKA, E; AMARTEY, S; KUZMANOVA, S; JEFFRIES, T. Effects of environmental conditions on production of xylitol by *Candida boidinii*. In: **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 11, pp. 213-218, 1995.
- VANIN, F.M.; SOBRAL, P.J.A.; MENEGALLI, F.C.; CARVALHO, R.A.; HABITANTE, A.M.Q.B. Effects of plasticizers and their concentrations on thermal and functional properties of gelatin-based films. **Food Hydrocolloids**, Volume 19, Issue 5, Pages 899-907, September 2005.
- VASIC-RACKI, D. History of industrial Biotransformations – Dreams and Realities, In: **Industrial Biotransformations**, Ed. LIESE, A.; SEELBACH, K. & WANDREY, C.; WILEY-VCH, cap. 2, pp. 3-29, 2000.
- VELAZQUEZ-CEDEÑO, M.A.; MATA, G.; SAVOIE, J.M. Waste reducing cultivation of *Pleurotus ostreatus* and *Pleurotus pulmonarius* on coffee pulpe changes in the production of some lignocellulolytic enzymes. **Word Journal of Microbiology and Biotechnology** 18 (3): 201-207, 2002.
- VICENTE, G.; MARTÍNEZ M.; ARACI J. Integrated biodiesel production: a comparison of different homogeneous catalysts systems. **Bioresource Technology**, 2004; 92: 297-305.
- VIÉGAS, I. DE J; MÜLLER, M. A. A. **A Cultura do dendzeiro na Amazônia brasileira**. 1ª ed. Belém: EMBRAPA, 374 p, 2000.
- VILLAREAL, M.L.M. Avaliação do tratamento do hidrolisado hemicelulósico de resíduos de eucalipto, com carvão ativo e resinas de troca iônica, para produção de xilitol. **Tese de Doutorado**. Faculdade de Engenharia Química de Lorena. Dept. de Biotecnologia. Pós-Graduação em Biotecnologia Industrial. Lorena/São Paulo, 2005.
- VINING, L.C. Secondary metabolism. In: REHN, H. J.; REED, G.; eds. **Biotechnology**. Weinheim, VCH, v. 4, p. 19-38, 1986.
- VISENTAINER, J. V; FRANCO, M. R. B. **Ácidos graxos em óleos e gorduras: identificação e quantificação** – São Paulo: Varela, 2006. 120 p.
- WALSH, C. Enabling the chemistry of life. **Nature**. v. 409, n. 6839, p. 226-231. 2001.
- WANG, Y.; OU, S; LIU, P.; XUE, F; TANG, S. Comparison of Two Different Processes to Synthesize Biodiesel by Waste Cooking Oil, **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** (2006), v. 252. p. 107-112.
- WANG, Z.X; ZHUGE, J; FANG, H; PRIOR, BA. Glycerol production by microbial fermentation: A review. In: **Biotechnology Advances** v. 19, pp. 201-223, 2001.

- WILKIE, A., SMITH, P.H., BORDEAUX, F.M. An economical bioreactor for evaluating biogas potential of particulate biomass. **Bioresource Technology**, 92, 103–109, 2004 .
- WITHOLT, B. Industrial biocatalysis today and tomorrow, **Nature**, v.109, p. 258–268, 2001.
- XIE, W.; PENG, H; LIGONG, C. Calcined Mg-Al Hydrotalcites as Solid Base Catalysts for Methanolysis of Soybean Oil, **Journal of Molecular Catalysis A: Chemical** (2006), v. 246. p. 24–32.
- YANG, L.; PAULSON, A. T. Mechanical and water vapour barrier properties of edible gellan films. **Food Research International**. Inglaterra, v. 33, n. 7, p. 563–570, 2000b.
- YAHASHI, Y; HORITSU, H; KAWAI, K; SUZUKI, T; TAKAMIZAWA, K. Production of xylitol from D-xylose by *Candida tropicalis*: the effect of D-glucose feeding. In: **Journal of Fermentation and Bioengineering**, v. 81, n. 2, pp. 148–152, 1996.
- ZAIZ, C. – Fungos oportunistas. In: ZAIZ, C., CAMPBELL, I., MARQUES, S. A., RUIZ, L. R. B., SOUZA, V. M. **Compêndio de Micologia Médica**, 1.ed. Rio de Janeiro: Medsi, 1998.
- ZAUSA, E; 'Synthese de Mercaptans sur catalyseurs acides'; (2002) ; **These de Doctorat**, L'Universite Claude Bernard – Lyon I ; 86
- ZHANG, J.; DEMAINE, A.L.Regulation of ACV synthetase activity in the beta-lactam biosynthetic pathway by carbon source and their metabolites, **Archives of Microbiology**, v. 158, p. 364, 1992.
- ZYLBERSTAJN, D.; COELHO, S. T.; IENO, G. O. **Potencial de geração de eletricidade na Amazônia a partir de resíduos agrícolas**. São Paulo: Instituto de Eletrotécnica e Energia; Universidade de São Paulo.



Brasil

Projeto BRA 99/011



Banco Interamericano
de Desenvolvimento

**Ministério de
Minas e Energia**

ISBN 978-85-98341-06-4

