

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LIXO E DE BIODIESEL DE
INSUMOS RESIDUAIS NO BRASIL

Luciano Basto Oliveira

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS EM PLANEJAMENTO
ENERGÉTICO.

Aprovada por:

Prof. Luiz Pinguelli Rosa, D.Sc.

Dra. Maria Sílvia Muylaert de Araújo, D.Sc.

Prof. Marcos Sebastião de Paula Gomes, Ph.D.

Prof. Suzana Kahn Ribeiro, D.Sc.

Prof. Sérgio Neves Monteiro, Ph.D.

Dr. Marco Aurélio dos Santos, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

SETEMBRO DE 2004

OLIVEIRA, LUCIANO BASTO

Potencial de aproveitamento energético
de lixo e de biodiesel de insumos residuais
no Brasil [Rio de Janeiro] 2004

X, 237 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,
Planejamento Energético, 2004)

Tese – Universidade Federal do Rio de
Janeiro, COPPE

1. Aproveitamento Energético de Biomassa
Residual;

2. Abatimento de Gases de Efeito Estufa;

3. Desenvolvimento Sustentável

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

DEDICATÓRIA

Àqueles que sonham e
realizam contribuições para
o bem-estar coletivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por sua fundamental participação cotidiana.

Agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro que viabilizou a realização deste trabalho.

Agradeço ao Professor Luiz Pinguelli Rosa pela valiosa orientação.

Agradeço a Maria Sílvia Muylaert de Araújo por sua atenção.

Agradeço a todos os Professores do Programa de Planejamento Energético, pela oportunidade de continuar este trabalho.

Agradeço aos ilustres componentes da Banca de Avaliação, por terem aceito participar desta importante etapa de minha formação.

Agradeço aos demais Professores da COPPE/UFRJ e de outras Instituições, que auxiliaram neste projeto. Em particular, cabe ressaltar a inestimável participação do Prof. Marcos Estellita Lins e da Pesquisadora Angela Cristina Silva, que elaboraram o modelo matemático de Análise Envoltória de Dados utilizado nesta tese, e do Dr. Marco Aurélio dos Santos que, apesar de ter sido convidado às vésperas da defesa, aceitou participar da Banca de Avaliação e contribuiu na elaboração final deste trabalho.

Agradeço aos colegas do Programa de Planejamento Energético e do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, pelas discussões técnicas e filosóficas e pelos momentos de lazer que facilitaram esta caminhada, sobretudo a Andréa Borges de Souza Cruz e a Luciana Rocha da Paz pela revisão do trabalho.

Agradeço aos funcionários da COPPE/UFRJ pela qualidade dos serviços prestados.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D. Sc.)

POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE LIXO E DE BIODIESEL DE INSUMOS RESIDUAIS NO BRASIL

Luciano Basto Oliveira

Setembro/2004

Orientadores: Luiz Pinguelli Rosa

Maria Sílvia Muylaert de Araújo

Programa: Planejamento Energético

Este trabalho mostra que o lixo e o biodiesel de insumos residuais devem ter seu aproveitamento energético priorizado perante as alternativas avaliadas, o que é feito através de dois métodos de análise Multicritério. Apesar das similaridades quanto aos aspectos sociais, ambientais, financeiros e operacionais, o lixo e o biodiesel de insumos residuais dispõem de potenciais de produção e importâncias estratégicas diferentes. Enquanto o aproveitamento energético do lixo justifica-se por poder ofertar até 30% da eletricidade consumida no país, o biodiesel de insumos residuais só pode atender a 1% do consumo nacional de óleo diesel. Entretanto, a comprovação da viabilidade do produto biodiesel possibilita a implantação de um programa agrícola capaz de tornar o Brasil, devido a suas aptidões edafo-climáticas, o principal agente internacional deste mercado, o qual vem dobrando a demanda a cada dois anos. Estes aproveitamentos, além de inverterem o fluxo internacional de capitais, podem ofertar 10 milhões de empregos no Brasil, principalmente para pessoas de baixa qualificação profissional, em poucos anos. Este trabalho também originou uma patente e uma empresa incubada pela COPPE/UFRJ.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D. Sc.)

ENERGETIC POTENTIAL OF WASTE AND OF BIODIESEL FROM RESIDUAL
SOURCES IN BRAZIL

Luciano Basto Oliveira

September/2004

Advisors: Luiz Pinguelli Rosa

Maria Sílvia Muylaert de Araújo

Department: Energetic Plainning

This work shows that the garbage and the biodiesel from residual sources should have an energy use prioritized before the appraised alternatives, what is made through two methods of Multicritério analysis. In spite of the similarities regarding the social, environmental, financial and operational aspects, garbage and biodiesel from residual sources have different production potentials and strategic importances. While garbage energy use is justified for presenting up to 30% of the electricity consumed in the country, the biodiesel from residual sources can only assist with 1% of the national consumption of diesel oil. However, the proof of the viability of the biodiesel makes possible the implantation of an agricultural program capable to transform Brazil, due to their edafo-climatic aptitudes, with the main international agent of this market, which is doubling the demand every two years. These uses, besides the inversion of the international flow of capitals, can create 10 million jobs in Brazil, mainly for people of low professional qualification, in a few years. This work also generate a patent and an associated company in COPPE/UFRJ.

INDICE:

CAPITULO I – INTRODUÇÃO	1
I.1 – APRESENTAÇÃO	1
I.2 – OBJETIVO	3
I.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO	7
CAPÍTULO II – CONTEXTO: QUADRO ENERGÉTICO BRASILEIRO, TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS E EFEITO ESTUFA	9
II.1 - GERAÇÃO ELÉTRICA	9
II.2 – O PAPEL DAS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA NO CONTEXTO BRASILEIRO DO INÍCIO DO SÉCULO XXI	12
II.3 – GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) (LIXO)	14
II.3.1 CONCEITO DE RESÍDUO	15
II.3.2 – COMPOSIÇÃO DO LIXO	16
II.4 - APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)	17
II.4.1 - CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA RECICLAGEM	20
II.4.2 - DESCRIÇÃO DAS TECNOLOGIAS	24
II.4.2.1 – TECNOLOGIA DE GÁS DE LIXO (GDL)	25
II.4.2.2 – TECNOLOGIA DE INCINERAÇÃO CONTROLADA DE LIXO	32
II.4.2.3 – TECNOLOGIA DRANCO	36
II.4.2.1 – TECNOLOGIA BEM	40
II.5 – BIODIESEL	46
II.5.1 – CONCEITO DE BIODIESEL	46

II.5.1.1 – O PROCESSO DE TRANSESTERIFICAÇÃO	47
II.5.1.2 – O PROCESSO DE ESTERIFICAÇÃO	48
II.5.2 – O MERCADO POTENCIAL	48
II.6 – O EFEITO ESTUFA ANTROPOGÊNICO E OS CRÉDITOS DE CARBONO	55
II.6.1 – AS EMISSÕES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	58
II.6.2 – AS EMISSÕES DO BIODIESEL	61
II.6.3 – A CONVENÇÃO DO CLIMA E OS CRÉDITOS DE CARBONO	62
CAPÍTULO III – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS: IMPACTOS AMBIENTAIS, ECONOMICIDADE, POTENCIAL E BARREIRAS	66
III.1 - RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (LIXO)	66
III.1.1 - IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DAS TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	66
III.1.1 – IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA GÁS DE LIXO	67
III.1.2 – IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA INCINERAÇÃO CONTROLADA DE LIXO	67
III.1.3 – IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA DRANCO	68
III.1.4 – IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA BEM	69
III.1.5 – COMENTÁRIOS ACERCA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DAS QUATRO TECNOLOGIAS	69
III.1.2 AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DAS TECNOLOGIAS	69

III.1.3 POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSU NO BRASIL	71
III.1.4 IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS ATUAIS À PENETRAÇÃO DA TECNOLOGIA	74
III.2 – BIODIESEL	76
III.2.1 EVOLUÇÃO DO MERCADO E A TECNOLOGIA DE BIODIESEL NO MUNDO	76
III.2.2 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DO SETOR NO BRASIL	80
III.2.3 POTENCIAL	81
III.2.4 ANÁLISE ECONÔMICA	85
III.2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS	89
III.2.6 IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS ATUAIS À PENETRAÇÃO DA TECNOLOGIA	92
CAPÍTULO IV – EXPERIÊNCIAS EM CURSO	93
IV.1 - LIXO	93
IV.2 - BIODIESEL	99
IV.3 – PROJETOS CANDIDATOS A CRÉDITOS DE CARBONO	106
CAPÍTULO V - METODOLOGIA ANÁLISE MULTICRITÉRIO	108
V.1- INDICADORES	108
V.1.1. DEFINIÇÃO	109
V.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE	110
V.1.3 TIPOS DE INDICADORES	111
V.1.4 CONJUNTOS DE INDICADORES	111

V.2 ANÁLISE MULTICRITÉRIO	112
V.2.1 MÉTODOS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO	113
V.2.2 ESCOLHA DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIO	115
V.3- ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE	115
V.4- ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS	126
V.5 COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS	130
CAPÍTULO VI – ESTUDOS DE CASO	131
VI.1- ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE	131
VI.1.1 – FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	131
VI.1.2 – BIODIESEL	175
VI.2 – ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)	192
VI.2.1 – FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA	193
VI.2.2 – BIODIESEL	198
VI.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS	218
CAPÍTULO VII - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS/CONCLUSÕES	223
CAPITULO VIII – REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	230
ANEXOS	236

CAPITULO I - INTRODUÇÃO

I.1 – APRESENTAÇÃO:

O presente trabalho é fruto de uma experiência prática que está sendo desenvolvida desde 1999, através de uma linha de pesquisa iniciada pelo autor no IVIG/COPPE/UFRJ¹. A pesquisa divide-se em duas partes, que serão detalhadas abaixo.

A primeira parte envolve a construção de plantas piloto e uma série de experimentos laboratoriais com vistas a obtenção de dados sobre fatos reais. Isto se deve à falta de exemplos práticos disponíveis no Brasil que permitissem a comprovação da hipótese do autor: **à luz do conceito de desenvolvimento sustentável² o aproveitamento energético de lixo e de biodiesel proveniente de insumos residuais, deve ser priorizado.**³

Para tanto foram construídos, com sua participação, os seguintes experimentos: planta de biodiesel do IVIG/COPPE, Usina Termelétrica a partir da Incineração de Lixo da USINAVERDE, Sistema de Geração Elétrica Bi-combustível (biogás e biodiesel) de GRAMACHO, e um conjunto arquitetônico utilizando materiais de baixo consumo energético – Centro de Tecnologia e Energia Sustentáveis (CETS). Neste contexto foi desenvolvido o processo de produção de biodiesel a partir de esgoto, aceito como inovação internacional para apresentação no Congresso Internacional de Química Ambiental, na França em 2003. Este processo originou as solicitações de patente nacional (2003) - PI 0301254-9 - e internacional (2004) - PI 0301254-9-, sendo ambas licenciadas com exclusividade para a empresa GERAR Tecnologia Ltda., da qual o

¹ Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais, criado para estudar causas, processos e conseqüências do Efeito Estufa Antropogênico, identificar fontes e propor medidas de mitigação.

² Definição apresentada no capítulo sobre metodologia.

³ Cabe observar que esta hipótese é objeto de interesse e pesquisa do autor desde 1992, quando estruturou uma empresa de coleta seletiva de lixo no Rio de Janeiro.

autor é sócio, e que foi aprovada na seleção pública de 2003 da Incubadora de Empresas de Base Tecnológica da COPPE.

A segunda parte da pesquisa concentra-se no estudo, que está consolidado nesta tese, dos resultados de alguns destes experimentos e a extrapolação para nível nacional, com vistas a identificar se são justificáveis políticas públicas para priorizar o aproveitamento energético de resíduos, tanto do lixo para geração elétrica quanto do biodiesel com resíduos para substituir o óleo diesel.

Esta pesquisa foi desenvolvida pela equipe do IVIG/COPP/UFRJ, a qual o autor integra, com base em experimentos internacionais, principalmente, e originou diversas publicações. As mais recentes são o capítulo intitulado “Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais”, do livro Fontes Alternativas de Energia no Brasil, referenciada por ROSA et al. (2003), e o artigo intitulado “Brazilian Waste Potential: energy, environmental, social and economics benefits”, publicado pela revista internacional “Energy Policy”, referenciado por OLIVEIRA e ROSA (2003), ambos de novembro de 2003.

Este trabalho permitiu não só consolidar a importância e o caráter interdisciplinar do tema, em virtude das parcerias entre diversos grupos acadêmicos (planejamento energético, transportes, química, mecânica, agronomia, dentre outros), mas também comprovar que a integração da academia com a iniciativa privada e o poder público possibilita a aplicação de soluções inovadoras no Brasil. Estas soluções podem ser as já adotadas no exterior, desde que adequadas às nossas características, ou aquelas desenvolvidas aqui e com potencial de aplicação em nível internacional, como a patente originada deste trabalho.

Por uma questão prática, a análise está focada em parte dos resultados disponíveis até o início do ano de 2004, devido à grande quantidade de dados obtidos e à necessidade de estabelecer um limite cronológico para a coleta destes dados. Apesar da grande quantidade atual de informações, ficou clara a necessidade de uma

série histórica mais abrangente, com trabalhos de monitoramento teóricos e práticos, para que seja possível aprimorar os resultados.

Trata-se de um processo que deve ser continuado, cujo maior resultado esperado pelo autor é o estímulo à participação de novos pesquisadores, conforme vem ocorrendo no presente. Para tanto, é preciso deixar o mais transparente possível as metodologias utilizadas e as dificuldades cotidianas encontradas para a construção dessa linha de pesquisa de modo que outros possam usufruir dessas informações.

I.2 - OBJETIVO:

O presente trabalho visa avaliar o potencial de aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos⁴ (lixo) e do biodiesel⁵, com base na análise integrada das viabilidades social, ambiental, técnica, operacional e econômica, conjunto de fatores que caracteriza o Desenvolvimento Sustentável. Esta análise foi realizada através da comparação entre rotas tecnológicas para o uso destes materiais e tecnologias já disponíveis para outros insumos, a fim de responder à questão colocada.

No caso do lixo, cujo aproveitamento mais adequado é a obtenção de energia térmica e, através dela, de eletricidade, a comparação elaborada neste trabalho foi feita entre onze alternativas de aproveitamento elétrico. Nesta avaliação foram consideradas três rotas para o aproveitamento energético do lixo urbano já consolidadas no exterior (recuperação do Gás do Lixo, Incineração, Compostagem Anaeróbica Seca), acrescidas de uma tecnologia desenvolvida no Brasil (Biomassa-Energia-Materiais), às quais foram associadas a conservação de energia obtida com a reciclagem de papéis, plásticos, vidros e metais. Entre as demais alternativas estão duas rotas tecnológicas para aproveitamento do lixo rural (casca de arroz e bagaço,

⁴ Vide item III.1 .

⁵ Combustível líquido obtido a partir de ácidos graxos novos ou usados, vegetais ou animais, capaz de substituir ou ser misturado ao óleo diesel, em quaisquer proporções, sem requerer alterações nos motores. (ROSA et al., 2003).

palha e ponta de cana-de-açúcar), a energia solar, o aproveitamento eólico e as pequenas centrais hidrelétricas (PCH), além das usinas termelétricas movidas a gás natural em ciclo combinado e em ciclo Merchant, totalizando 11.

Para o biodiesel, principalmente usado para propulsão veicular, mas que também serve para geração elétrica, a comparação técnica elaborada neste trabalho foi feita entre os produtos obtidos a partir de doze tipos de insumos. Estes insumos podem ser divididos em residuais (óleo de fritura, sebo bovino, ácidos graxos e esgoto), extraídos de reservas naturais (babaçu, buriti e castanha do Pará) e cultivados (soja, mamona, girassol, dendê e coco⁶). Serão utilizados na comparação dados relativos ao óleo diesel importado para contemplar a demanda no Brasil.

Conforme mostra o trabalho, **as análises realizadas comprovam a hipótese de que o aproveitamento energético de fontes residuais à luz do desenvolvimento sustentável é indispensável**, entretanto, é necessário atentar para a complementaridade entre as alternativas avaliadas na substituição de combustíveis fósseis, visto que a demanda energética brasileira ainda está reprimida.

A atual situação do Brasil, decorrente da existência da Lei 10.438, da necessidade de investimento em usinas capazes de gerar eletricidade em 2007 e do Programa Nacional de Biodiesel, previsto para ser lançado em novembro de 2004, é muito favorável ao aproveitamento energético de Fontes Alternativas de Energia (FAE)⁷.

A Lei 10.438, de abril de 2002, estabelece mercado cativo de 3.300 MW, até o ano de 2006, divididos igualmente entre pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), energia eólica e biomassa, e 10% da matriz energética nos próximos 20 anos para

⁶ O prazo de colheita da soja, mamona e girassol é de 18 meses, enquanto o do dendê e do coco é de 84 meses. Em contrapartida, a produtividade destes é muito superior à das queleles. A sugestão técnica é o consórcio entre os dois grupos.

⁷ Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), Energia Eólica, Energia Solar e da Biomassa para geração elétrica; álcool etílico, biogás tratado e biodiesel para propulsão veicular e, em alguns casos, para geração elétrica.

estas fontes de energia. A utilização destas fontes de energia coíbe a reincidência de uma crise no setor elétrico (ROSA, 2001), cujas previsões apontam para o ano de 2007, caso não sejam construídas novas usinas (FIRJAN, 2004).

O Programa Nacional de Biodiesel, cuja legislação está prevista para novembro de 2004 e início de aplicação em janeiro de 2005, propõe a substituição de aproximadamente 800 milhões de litros de óleo diesel em 2005, com incrementos anuais até atingir 2 bilhões de litros em 2010 (GIT, 2004). Além disto, esta alternativa permite a redução das emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa (MCT, 2002), as quais podem ser convertidas em certificados negociáveis no mercado do carbono, que começa a realizar negociações internacionais.

Dentre estas FAE, destaca-se a importância da biomassa residual. O lixo, para a geração elétrica (OLIVEIRA, 2000) (ROSA et alli, 2003), e o biodiesel, principalmente para propulsão veicular, mas, em alguns casos, também para geração elétrica apresentam qualidades adicionais à biomassa cultivada (idem). Suas principais vantagens são: (i) os equipamentos e insumos necessários para sua produção são de origem nacional e, por isto, são cotados em moeda brasileira; (ii) são intensivos em mão-de-obra, uma vez que requerem triagem – do lixo, para obter biomassa residual e recicláveis, e dos insumos residuais para a produção de biodiesel – e cultivo e extração, para obtenção de insumos novos para biodiesel; (iii) estão disponíveis, normalmente, junto aos consumidores, o que reduz o custo de transporte, seja da energia ou do combustível; e (iv) acarretam a redução da poluição, decorrente da substituição de combustíveis fósseis por FAE e, quando estas são oriundas de resíduos, consequência da coibição de sua decomposição. No caso do biodiesel, é reduzida a importação de óleo diesel e petróleo.

Estas qualidades adicionais podem ser comprovadas através de uma análise integrada (técnica, social, econômica e ambiental) dos diversos efeitos deste aproveitamento. Entre eles está o potencial de aumentar em 30% a oferta de energia

elétrica e substituir 1% do óleo diesel imediatamente, a custos já competitivos (ROSA et alli, 2003); e alavancar a produção agrícola para atender à demanda interna e externa (idem).

O potencial de geração de empregos diretos decorrente do aproveitamento energético de resíduos (lixo e biodiesel), o qual pode demandar 1 milhão de trabalhadores (MDIC, 1998), deve-se à implantação de um programa de coleta seletiva, uma vez que as usinas termelétricas de aproveitamento do lixo e as de processamento de biodiesel são pouco intensivas em mão-de-obra. Mas se os resultados com o biodiesel de resíduos forem capazes de estimular a produção rural, o potencial ultrapassa os 7,5 milhões de empregos, como será constatado neste trabalho, sendo grande parte para profissionais de baixa qualificação⁸ – principal problema atual, uma vez que os postos de trabalho gerados atualmente na economia global normalmente exigem aperfeiçoamento –, além da reversão do fluxo internacional de capitais, como exposto acima.

O presente trabalho enfoca a viabilidade para a utilização imediata das alternativas técnicas existentes para aproveitamento energético de resíduos e, em virtude de um resultado positivo, são propostas adequações nos mecanismos de incentivo existentes, como a Lei 10.438 para o setor elétrico e o relatório do Grupo Interministerial de Trabalho sobre Biodiesel. Ademais, é proposta a elaboração de uma política de compensação de emissão de gases do efeito estufa, com vistas a desenvolver projetos capazes de concorrer aos recursos internacionais⁹ destinados para este fim, os quais podem servir de garantia para os investimentos no setor.

⁸ Deve-se destacar que a presente proposta não visa a perpetuação destes profissionais nas condições de sub-emprego, mas gerar uma oportunidade para adentrarem o mercado de trabalho e aperfeiçoarem-se.

⁹ Trata-se principalmente do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, no âmbito do Protocolo de Kyoto, ainda por ser ratificado.

Como o aproveitamento energético de lixo e de biodiesel envolvem geração e conservação, contemplando tanto o setor elétrico como o de transportes, as justificativas para a análise em questão são focadas em cada caso.

I.3 – ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho divide-se em oito capítulos. No primeiro foi apresentado o objetivo deste trabalho e contextualizada a situação dos combustíveis lixo e biodiesel.

No segundo capítulo são abordados os conceitos utilizados neste trabalho, como o quadro energético brasileiro, a questão dos resíduos e as tecnologias para seu aproveitamento energético, o biodiesel – com reações químicas, insumos possíveis e co-produtos -, além do efeito estufa antropogênico.

No terceiro capítulo são discutidos os efeitos das rotas tecnológicas tratadas no segundo capítulo, como os impactos ambientais, o potencial nacional de oferta de energia, a economicidade e as barreiras para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos e do biodiesel.

No capítulo seguinte são apresentadas as experiências em curso no IVIG/COPPE/UFRJ.

No quinto capítulo são abordadas as Metodologias de Análise Multi-Critério, com seus quatro grupos de métodos e são escolhidos um representante da ponderação aditiva simples, a Análise de Sustentabilidade, e um representante da programação linear, a Análise Envoltória de Dados, por representarem as alternativas mais utilizadas, de mais fácil aplicação e já aplicadas de forma consolidada pela COPPE/UFRJ.

No sexto capítulo são realizados estudos de caso, aplicando os dados apresentados no decorrer do trabalho aos métodos disponibilizados no capítulo anterior. Como são necessários dados sobre as outras Fontes Alternativas de Energia

e o Óleo Diesel, são utilizadas referências bibliográficas recentes e, quando não estiverem disponíveis, realizados estudos específicos.

No penúltimo capítulo é realizada uma discussão de resultados e a conclusão, onde verifica-se que as metodologias convergiram entre si e corroboraram resultados de trabalhos anteriores, que utilizavam métodos menos sofisticados para compatibilizar as diversas dimensões de qualquer empreendimento.

Em seguida são propostas algumas linhas de pesquisa que podem ser desenvolvidas a partir deste trabalho, enquanto o último capítulo apresenta as referências bibliográficas utilizadas para a elaboração do presente trabalho.

CAPÍTULO II – CONTEXTO: QUADRO ENERGÉTICO BRASILEIRO, TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS E EFEITO ESTUFA

II.1 - GERAÇÃO ELÉTRICA

Até a desregulamentação do setor elétrico, em 1995, o atendimento ao aumento da demanda com menor custo marginal norteava os investimentos sendo baseada em um planejamento normativo (MME, 2001), por considerá-lo estratégico para a sociedade, tanto para a atividade econômica quanto para o bem estar social. Esta opção, agregada à disponibilidade de recursos hídricos, levou o sistema brasileiro a ser um dos poucos, junto com Noruega e Islândia (IEA, 2004), no qual a hidroeletricidade respondia por mais de 95% e, ainda hoje, por mais de 85% da oferta (B.E.N, 2003). Isto deveu-se ao fato da água ser gratuita e os investimentos feitos em hidroelétricas serem amortizados, normalmente, em prazos inferiores à metade da vida útil do empreendimento, permitindo que a energia elétrica gerada tenha um custo muito atrativo para a sociedade¹⁰.

As concessões para a construção de novas usinas eram feitas buscando manter limitado o risco de déficit em 5% (MME, 2001), e eram iniciadas as obras daquelas que atendiam aos requisitos estabelecidos pelo governo, fossem hidrelétricas ou não. Quando os investidores privados não demonstravam interesse, as empresas públicas do Grupo ELETROBRAS investiam para que a população não ficasse sem abastecimento de energia.

¹⁰ A falta de interesse nas hidrelétricas, para o investidor privado, decorre do prazo para o início da geração ser longo (mais de cinco anos), e o custo típico de investimento por potência instalada ser superior ao de outras opções de geração. Com isso, ainda que estes custos diluídos durante sua longa vida útil somados ao “combustível” (água), quase gratuito, representem um menor custo da energia a ser vendida, a iniciativa privada tende a preferir os empreendimentos que iniciam o retorno do capital em menor tempo, o que representa preços muito mais elevados para o consumidor, devido à aquisição de combustível, como o gás natural, e de equipamentos estrangeiros.

O modelo instaurado pelo governo federal, de desregulamentação do setor elétrico, no período de 1994 a 2002, previa a saída do poder público dos investimentos, os quais seriam feitos pela iniciativa privada, que estaria motivada pelas históricas taxas de crescimento da demanda.

Enquanto o governo cumpria sua parte do compromisso junto ao Fundo Monetário Internacional (FMI), de produzir superávit primário proibindo investimentos das empresas públicas, ainda que dispusessem de recursos e houvesse boas oportunidades de negócios, os efeitos esperados por esta determinação governamental, calcada na abertura do mercado, não foram materializados. O exemplo mais contundente disto foi o Programa Prioritário de Termelétricas (PPT), lançado pelo governo federal no início do ano 2000, que projetava a construção de 49 usinas termelétricas movidas a gás natural (MME, 2000), das quais só foram construídas as que a PETROBRAS participou, sendo que apenas 3, responsáveis por 6% da potência instalada do PPT (ANEEL, 2003), estão prontas e funcionando.

Ao invés de atrair o capital internacional para a expansão da geração de energia elétrica, as ações do governo favoreceram o ingresso da iniciativa privada na distribuição, por serem ativos com garantia maior que novas usinas para geração, o que não acrescentou oferta para atender à demanda crescente. O Brasil foi punido com o racionamento do ano de 2001, quando a população teve que reduzir o consumo em 20% e conviver com aumento dos preços, chegando, inclusive, a pagar às concessionárias o ressarcimento do lucro perdido com o racionamento.

Um dos motivos desta crise anunciada foi a desvalorização da moeda brasileira face ao dólar americano. Com vistas a abastecer o parque termelétrico pretendido, o governo federal negociou um contrato de compra do gás natural boliviano, cotado em dólares americanos. Isto foi feito quando havia paridade no câmbio, no início do “Plano Real” em meados da década de 1990, em virtude das pressões internacionais, o que

está refletindo-se no custo da energia, atualmente muito superior ao repasse permitido.

Mesmo que o limite deste repasse seja modificado, os equipamentos necessários para aumentar a geração não estão disponíveis, pois são produzidos no exterior e sob encomenda, e não é possível ao governo brasileiro criar qualquer incentivo para incrementar sua produção. Ademais, por serem importados, tendem a piorar o déficit da balança comercial, a médio prazo. Por outro lado, a elevação das tarifas significaria a substituição da penalidade do racionamento pela punição de elevação de preços aos consumidores.

Um outro ponto a ser ressaltado é o tipo do contrato. Com base no argumento de que era necessário garantir este insumo, foi acertado pelos dois países (Brasil e Bolívia) um contrato “take or pay”, em que é feito o pagamento mesmo que não ocorra o consumo do gás natural. Esta cláusula teria sido importante para comprovar o interesse pelo energético e incentivar a construção do gasoduto e, assim, alavancar a construção das usinas termelétricas (UTE). Este argumento foi contestado no ano 2000, com base no quadro 1, que demonstra a existência de excesso de gás natural.

QUADRO 1 - Potencial Adicional Não Usado de Gás Natural Imediatamente Disponível:

Queimado nos poços.....	6 milhões de m3 / dia
Não usado do Gasoduto Bolívia/Brasil hoje:.....	8 milhões de m3 / dia (previsto 15; usado 7; capacidade máxima 17)
Gás Injetado nos poços.....	2 milhões de m3 / dia
Antecipação da produção possível:.....	3 milhões de m3 / dia (ampliar o fluxo de exploração das reservas)
Potencial adicional total.....	~ 20 milhões de m3 / dia

→ Capacidade de Geração Elétrica com 20 milhões de m3 / dia ~ 5 GW

em ciclo combinado na rede ou em geração distribuída.

Fonte: PROGEDIS, 2000.

Como as UTEs não foram todas construídas e houve racionamento entre os anos de 2001 e 2002 de 20% do consumo imediato, que coibiu o crescimento natural do setor de aproximadamente 5% ao ano, os consumidores obrigados a reduzir o consumo aprenderam a evitar o desperdício e, atualmente, há excesso de oferta de eletricidade. Em função da convergência destes fatores, o atual governo brasileiro está renegociando o contrato com o governo boliviano, com vistas a reduzir a obrigação de compra sem consumo. De qualquer forma, a situação atual é considerada temporária, pois se os preceitos da política econômica surtirem efeito, o que é o anseio nacional, a demanda por energia elétrica crescerá rapidamente e, se não forem construídas novas usinas, poderá haver novo racionamento em 2007 (FIRJAN, 2004).

Vale ressaltar que a crise de energia elétrica foi prevista desde a proposta de desregulamentação do setor em 1995, através de diversos artigos publicados em jornais e revistas de grande circulação e cartas encaminhadas aos representantes do governo (ROSA, 2001).

II.2 – O PAPEL DAS FAE NO CONTEXTO BRASILEIRO DO INÍCIO DO SÉCULO XXI:

A situação atual permite sinalizar para a utilização de recursos públicos (ou das empresas públicas do setor) para construir ou incentivar usinas de geração distribuída (para evitar investimentos em transmissão, que geram perdas de energia) (PAULA e SAUER, 1999), que tenham curto prazo de instalação e, se possível, que consumam combustíveis baratos, sobretudo os disponíveis no país e que não tenham perspectivas de exportação, como a maioria das fontes alternativas de energia (FAE).

O potencial brasileiro das FAE é bastante significativo, capaz de atingir 150% da potência instalada atualmente (70 GW), o que pode ser visto no quadro 2:

QUADRO 2 – Estimativas De Fontes Alternativas

Biomassa

Resíduos de cana de açúcar

(ciclo GSTIG III; PNEE- 1993 / 2015) : 11,98 GW

Celulignina Catalítica usando lixo urbano

(Pinatti, et alli, 1999) : 9,65 GW

Pequenas Centrais Hidrelétricas

(PNEE- 1993 / 2015; até 30 MW)) :9,45 GW

Energia Solar

Fotovoltaica:14,30GW

(PNEE- 1993 / 2015 p/ alguns sítios da região Nordeste)

Energia Eólica

PNEE- 1993 / 2015.....57,83GW

Total.....103,20GW

Fonte: PROGEDIS, 2000.

O atual governo federal tem um programa estabelecido para o setor energético, que contempla o aproveitamento das FAE (PT, 2002), a retomada do planejamento determinativo e dos investimentos do poder público, sobretudo quando as licitações de novos empreendimentos não contarem com a participação da iniciativa privada. Esta medida visa evitar restrições no fornecimento futuro de energia.

A isto deve ser acrescentada a Contribuição para o Desenvolvimento Econômico (CDE), instrumento regulamentado pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas (PROINFA) em dezembro de 2002, programa previsto na Lei 10.438¹¹, de abril de 2002. O objetivo da CDE é tornar atrativa a geração de eletricidade com estas fontes, para que sejam disponibilizados, até o ano de 2006, 3.300 MW oriundos de biomassa, energia eólica e pequenas centrais hidrelétricas, sendo um terço (1/3) de cada uma. O PROINFA prevê, também, que a matriz de energia elétrica deva contar, em até 20 anos, com 10% de sua provisão advinda destas fontes. Além disto, a Lei 10.438 em

seu artigo 13 estabelece procedimentos para a universalização da energia, incentivando o atendimento a comunidades isoladas, que pode representar outra oportunidade para as fontes alternativas.

Dentre estas alternativas, a biomassa é a que permite maior flexibilidade ao planejamento. Isto decorre das condições edafo-climáticas (resultante de características de solo, regime hídrico, clima, recursos naturais) brasileiras serem bastante favoráveis ao cultivo de espécies vegetais, cabendo ressaltar a qualidade dos solos, a elevada luminosidade e a abundância de recursos hídricos disponíveis em todas as regiões do país. A estes fatores devem ser acrescentados a reconhecida biodiversidade brasileira, as grandes áreas agricultáveis ociosas e o elevado contingente de mão-de-obra disponível, cuja administração adequada pode assegurar colheitas significativas quando do cultivo de espécies adaptadas às regiões.

A geração de energia em termelétricas movidas a biodiesel produzido a partir de insumos agrícolas e extrativistas compreende uma alternativa atraente tanto no setor energético, por se tratar de um combustível sucedâneo do óleo diesel fóssil, quanto nos setores social e econômico por estar movimentando recursos humanos e financeiros em regiões que hoje encontram-se praticamente estagnadas.

II.3 – GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) (LIXO):

Além destas matérias-primas novas, para as quais os custos de produção são positivos, existe grande quantidade de biomassa residual, tanto nos centros urbanos (resíduos públicos, oriundos das atividades domésticas) quanto no meio rural (resíduos privados, advindos da atividade produtiva). O lixo urbano, as cascas de arroz, o bagaço, as pontas e a palha da cana-de-açúcar, configuram-se como

¹¹ Esta Lei também trata da Universalização da Energia (atendimento a toda a população), o que pode ser consorciado ao uso de FAEs, criando um nicho de mercado.

poluentes e, portanto, representam custos de tratamento que serão convertidos em custo negativo do combustível, se forem aproveitados para geração de energia.

Ainda na esfera residual ocupam lugar de destaque os insumos derivados de processos industriais, principalmente da indústria alimentícia, que apresentam potencial químico para transformação em biocombustível. Os mais representativos são os óleos vegetais utilizados na fritura de alimentos, e os ácidos graxos encontrados tanto na gordura animal quanto no esgoto sanitário (este é um resíduo público, enquanto os demais são resíduos privados).

A isto somam-se os fatos de estarem disponíveis imediatamente, uma vez que não é necessário planejar sua produção, e de sua localização ser a mesma dos consumidores de energia, quer estejam nas cercanias das cidades (uma vez que o lixo é praticamente padronizado em todo o território nacional) ou nas unidades produtivas rurais (onde os insumos são mais específicos), sinalizando para a prioridade de seu aproveitamento.

Assim, ao contrário da energia eólica e das PCHs, cuja exploração depende da disponibilidade do recurso natural e cujas áreas para instalação de empreendimentos normalmente ficam longe dos centros urbanos, a biomassa residual pode ser utilizada em usinas instaladas nas áreas de vazadouro de lixo, o que exige menos investimento em linhas de transmissão, ou nas fazendas de cultivo.

II.3.1 CONCEITO DE RESÍDUO:

O termo resíduo engloba os diversos objetos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente (VOIGT et al., 1999) - diferentemente do significado usual de lixo como sujeira ou “aquilo que se varre para tornar limpa uma casa, rua, jardim, etc; varredura; imundice, sujidade; escória, ralé” (Michaelis, 1998). Entretanto,

a reutilização de resíduos, que se pode efetivar de várias formas (reciclagem, recuperação do biogás, compostagem, reutilização direta), e vem sendo realizado há mais de 20 anos em diversos países, é importante quanto aos aspectos ambientais, sanitários, sociais, energéticos e econômicos, aproximando-se da visão de que resíduo pode significar matéria-prima fora do lugar ou dinheiro jogado fora.

Os resíduos definidos como sólidos pela Norma Brasileira 10.004, são aqueles:

“(…) resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 1987).

Apesar desta definição ser, segundo Teixeira et al. (1997), muito ampla, é a oficial e servirá como base a este estudo.

II.3.2 – COMPOSIÇÃO DO LIXO¹²

A composição típica dos resíduos sólidos urbanos considerados não especiais é de: (grupo 1) papéis, plásticos, vidros e metais, oriundos de embalagens; (grupo 2) material orgânico, oriundo de restos alimentícios (cascas e sobras) e poda de árvores, têxteis, borrachas; e (grupo 3) inertes. As participações destes três grupos são de 35%, 60% e 5% (IPT, 1998), respectivamente, em países ainda em desenvolvimento,

¹² Material retirado de publicação conjunta do autor com os professores Luiz Pinguelli Rosa e Donato Alexandre Gomes Aranda, e com os pesquisadores Rachel Henriques Martins, Angela Oliveira da Costa, Cícero Augusto Prudêncio Pimenteira e Laura Bedeschi Rego de Mattos. (ROSA et al., 2003) .

enquanto os desenvolvidos têm os dois primeiros valores invertidos. Os recicláveis participam da seguinte maneira: 25% papel, 5% plástico, 2% vidro e 3% metais (idem).

A presença de cascas de alimentos no lixo demonstra uma característica cultural, que transita entre a desinformação e o desperdício, pois já foi comprovada a capacidade nutritiva destas partes dos alimentos, muitas vezes superior à parte tradicionalmente consumida, em um planeta no qual existem milhões de pessoas passando fome. Também o encaminhamento de embalagens para o lixo demonstra uma assimetria de informação, uma vez que as indústrias que produzem estas embalagens compram, há mais de cinquenta anos, as embalagens usadas, cuja reciclagem consome menos insumos e energia que a utilização de matéria-prima nova.

O aumento da oferta de alimentos pré-processados amplia a presença de embalagens, ao mesmo tempo em que reduz a parcela de material orgânico, explicando parte da inversão das participações destes itens nos dois grupos de países.

De acordo com Rosa et al (2003), a partir da década de 80, sobretudo nos países integrantes do G7 (grupo dos sete países mais ricos), foi dada grande importância à coleta seletiva e à reciclagem do lixo, em virtude do aumento do custo das ações de tratamento e disposição final dos resíduos, decorrente das normas sanitárias e ambientais mais restritivas, apesar de a ideia não ser nova. Este aumento de custo proporcionou a oportunidade de aplicação de novas rotas tecnológicas, além das que vinham sendo usadas para o aproveitamento energético e a proteção sanitária.

II.4 APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Segundo Serôa da Motta e Chermont (1996) apud Oliveira (2000), as rotas para destinação final dos resíduos sólidos podem ser hierarquizadas e, quando utilizado o

critério de resíduo final mínimo, sua ordenação será: redução da geração na fonte, reutilização do material produzido, reciclagem, recuperação de energia e aterro sanitário.

Ainda de acordo com Oliveira (2000), o fato das duas primeiras rotas requererem mudanças de comportamento da população e dos interesses dos setores econômicos é suficiente para que sejam entendidas como metas futuras. Assim, a reciclagem e a recuperação de energia são as alternativas disponíveis no curto prazo para reduzir a quantidade de resíduos que é encaminhada aos vazadouros de lixo.

Para Oliveira e Rosa (2003), a reciclagem está relacionada ao reaproveitamento dos materiais com finalidades similares àquelas para as quais tinham sido originalmente produzidos. Como exemplo, os resíduos de papéis, plásticos, vidros e metais podem ser usados como matéria-prima reciclável nas próprias indústrias que os fabricaram. Neste caso ocorre a economia de energia que deixa de ser usada para produzir a matéria-prima substituída pelo material reciclado. A tabela 1, a seguir, mostra o potencial de conservação de energia por tonelada de material reciclado. Considerando que cada material tem capacidade técnica de reciclagem mínima de uma vez, e que a incineração de plástico resulta em cerca de 3,3 MWh/t de eletricidade, enquanto a de papel oferece 3,5 MWh/t (Rosa et al., 2003), é possível verificar que a conservação de energia obtida pela reciclagem representa, no mínimo, tanto quanto a incineração, o que justifica sua priorização quanto a fonte energética e como objeto de estudo para identificação do coeficiente de reciclagem de cada material.

TABELA 1 - Potencial de Conservação de Energia por Tonelada Reciclada

Material	MWh/tonelada
Papel	3,5
Plástico	5,3

Fonte: Oliveira, Henriques e Pereira (2002).

O aproveitamento energético amplia a segurança do sistema elétrico nacional, pois oferta eletricidade de maneira descentralizada¹³, em virtude do lixo estar disponível próximo dos centros consumidores. A redução da quantidade de resíduos sólidos urbanos a ser depositada em aterros sanitários amplia suas vidas úteis e soluciona um dos grandes problemas da atualidade, a escassez de áreas para novos depósitos de RSU. Em alguns casos são disponibilizados sub-produtos, como adubo e cinzas, que podem ser utilizados em outras aplicações.

Para Oliveira e Rosa (2003), a definição de reciclagem é o ganho de eficiência, seja pela redução de consumo de recursos naturais pelas indústrias, seja pela otimização das áreas destinadas a depósitos de resíduos ou, ainda, pela conservação de energia. Já o aproveitamento energético do lixo (idem), com seus sub-produtos, visa obter produtos cuja competitividade pode ser alcançada mesmo com custos de processamento mais elevados que os concorrentes naturais, uma vez que seu custo de matéria-prima é negativo. Este custo negativo ocorre porque é evitada a demanda por áreas para destinação final e, conseqüentemente, a proliferação de doenças causadas pelo lixo, assim como os custos de despoluição.

Para complementar, este estudo (idem) mostra que apesar de ser possível contar com estes benefícios ao utilizar o sistema de separação dos RSUs pós-coleta,

¹³ Seja nas UTEs movidas a lixo ou derivados, ou nas indústrias que reduzem consumo mediante a reciclagem. Dentre estas indústrias, as que são auto-produtoras passarão a ter excedente e poderão caracterizar-se como Produtoras Independentes de Energia, enquanto as

os mesmos podem ser otimizados significativamente através da aplicação do sistema de coleta seletiva¹⁴, com o qual os resíduos não chegam a ser misturados nos locais de sua produção. A coleta seletiva para reciclagem favorece, ainda, a transformação da biomassa presente nos restos alimentares, sobretudo em combustíveis, e também fomenta o desenvolvimento comunitário, devido ao exercício de cidadania envolvido em sua manutenção, além de demandar mão-de-obra pouco qualificada (catadores, sucateiros, micro e pequenas empresas beneficiadoras, produtores independentes de energia, etc.).

II.4.1 - CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA RECICLAGEM

O aproveitamento de materiais recicláveis como insumo pelas indústrias representa redução no consumo de energia, denominada conservação de energia, em virtude de evitar a transformação dos recursos naturais em bens intermediários (polpa de celulose, lingotes de metais, resina plástica, insumos do vidro) a serem utilizados na obtenção de produtos. A seleção dos recicláveis pode ser feita depois de coletado o lixo, o que reduz a qualidade e dificulta ampliar a taxa de reciclabilidade atual, como mostra a figura 1, ou após a coleta de resíduos já selecionados (coleta seletiva), como pode ser visto na figura 2.

que adquirem exclusivamente das concessionárias do serviço público demandarão menos do sistema, ampliando a oferta através da figura “usina virtual”.

¹⁴ Sistema de coleta de resíduos não misturados. Este sistema requer a utilização de lixeiras diferenciadas para os restos alimentares e os demais materiais (recicláveis), de modo a evitar que sejam misturados e, com isso, contaminados, perdendo valor. A partir desta seleção na fonte geradora, o transporte dos recicláveis é feito até uma Central de Triagem, de onde é preparado para ser vendido às indústrias .



Fonte: CEMPRE, 2002.

FIGURA 1 – Catação Pós Coleta Nos Vazadouros De Lixo (A Maneira Errada de Fazer)



A. O lixo é removido da "área" de acumulação por uma pá carregadeira entrando no "Abridor de Sacos."



D. Em 2 linhas de catação manual/mecânica, vidros, metais e plásticos clorados são recuperados.



B. Do "Abridor de Sacos", o material é transferido para uma correia inclinada onde há uma plataforma para remoção manual dos não-recicláveis.



E. O material manualmente separado é jogado nos chutes que levam as correias, picando antes os vidros.



C. A "Peneira de Barras", em 2 estágios, separa os finos e orgânicos. O material restante é separado em duas frações, média e grande.



F. Materiais ferrosos são eletro-magneticamente removidos.

Fonte: O.C.A., 2002.

FIGURA 2 – Catação Pós Coleta em Central de Triagem

Quanto à reciclagem proveniente da coleta seletiva, são equivocadas as críticas que focalizam somente seu custo operacional, que será sempre maior do que o da coleta tradicional. Isto decorre da inexistência de um balanço entre receitas e despesas, pois ainda sendo mais onerosa, a coleta seletiva permite a comercialização dos materiais de qualidade superior, a redução do consumo de gás natural na geração de energia, assim como os custos de transporte e de disposição final de lixo, o que a

torna superavitária e empregadora de 1 milhão de pessoas, sobretudo sem requerer qualificação profissional.

O cerne da discussão sobre sua pequena abrangência deveria estar sobre a necessidade de motivar o engajamento da população, no que diz respeito à fundamental implantação de uma política nacional de resíduos sólidos. Esta política nacional precisará, dentre outros requisitos, dispor de espaço gratuito na mídia para veicular campanhas publicitárias, assim como utilizar normas e instrumentos econômicos, para punir e premiar os agentes, o que representa custo de operação maiores que os de investimento.

Com vistas a custear estas ações pode ser utilizada parte dos recursos oriundos da redução de importação de combustíveis e/ou energia, assim como aqueles provenientes dos créditos ambientais internacionais (OLIVEIRA, 2000), além do fundo para conservação de energia do setor elétrico, que conta com 1% da receita operacional líquida das distribuidoras. Quanto a prazo para aproveitamento, a conservação, via coleta seletiva e reciclagem, dispõe de capacidade de aproveitamento energético imediato, graças ao consumo de matéria-prima secundária não requerer nenhuma modificação no parque industrial.

Ao contrário da coleta seletiva, a geração de energia elétrica com resíduos dispensa a pré-seleção e tem no custo de investimento seu principal obstáculo. Entretanto, aliando as duas iniciativas (coleta e geração) este obstáculo é minimizado, porque o sistema de coleta seletiva disponibilizará, simultaneamente aos recicláveis, a matéria-prima necessária para este aproveitamento com alto nível de qualidade e nas cercanias das cidades (que são os grandes centros consumidores de energia), sem obstáculos relacionados a período de fornecimento. Desta forma, estes empreendimentos podem competir diretamente, por investimento, com as usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado (UTE GN CC) , ainda que o custo de investimento seja sempre maior, atingindo até o dobro (ROSA et alli, 2003). Isto torna-

se possível em virtude do prazo típico de instalação, do custo final da energia gerada e da taxa interna de retorno serem similares aos das UTE GN CC, podendo chegar a ser mais atraentes (idem).

II.4.2 DESCRIÇÃO DAS TECNOLOGIAS¹⁵

Serão apresentadas quatro tecnologias para geração de energia com os resíduos sólidos urbanos: a tecnologia de aproveitamento do gás de lixo, a tecnologia da incineração controlada do lixo, a tecnologia DRANCO (*dry anaerobic composting* – compostagem seca anaeróbia) e a tecnologia BEM (processo de pré-hidrólise ácida).

A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo é uma alternativa que pode ser aplicada a curto e médio prazo para os gases gerados nos aterros sanitários já existentes. É utilizada em centenas de aterros de diversos países, e consiste na recuperação do biogás oriundo da decomposição natural dos restos orgânicos para abastecer motores ciclo Otto¹⁶, que impulsionam geradores. Em virtude da composição do biogás (cerca de 50% de metano, 45% de dióxido de carbono e o resto de gás sulfídrico e outros), que caracteriza este combustível como pobre, foram desenvolvidos motores especificamente para melhorar o rendimento ao utilizá-lo.

A tecnologia da incineração controlada do lixo se justifica pela existência de uma indústria consolidada, sobretudo no hemisfério norte, com sistemas de incineração de alta tecnologia e baixas emissões de poluentes, com larga utilização para tratamento do lixo doméstico, hospitalar e mesmo perigoso. Caracteriza-se pela recuperação dos gases de escape do processo, os quais normalmente atingem mais de 1.000 °C, os quais são encaminhados para uma caldeira de recuperação de calor, onde é produzido vapor d'água para mover uma turbina (ciclo Rankine).

A tecnologia DRANCO, apesar de mais recente, já é utilizada em diversos países da Europa, e se mostra como uma alternativa eficaz para a questão dos

resíduos sólidos urbanos. Constitui-se de dois estágios, um de produção de biogás, simultaneamente a adubo orgânico, em silos capazes de reduzir a disposição final, e o aproveitamento deste combustível é feito de acordo com o ciclo Otto, exposto acima no caso da recuperação do gás do lixo.

E, finalmente, a tecnologia BEM que é a única das quatro tecnologias ainda não comercializada, a qual vem sendo desenvolvida por um grupo de pesquisadores brasileiros e está em fase de construção de uma planta piloto, que irá operar no interior de São Paulo. Esta utiliza um processo de pré-hidrólise ácida que separa as frações seca e líquida do lixo, encaminhando aquela para um sistema de queimadores externos de turbinas a gás (ciclo Brayton), em virtude de sua granulometria, cujo calor pode ser recuperado por uma caldeira e atender, assim, a um ciclo combinado. A fração líquida pode originar furfural, insumo da indústria petroquímica atualmente importado.

II.4.2.1 TECNOLOGIA DO GÁS DE LIXO (GDL)

O gás de lixo é usualmente composto por uma mistura de 50% de CH₄, 45% de CO₂ e 5% de H₂S e outros gases, que apresenta um potencial de aproveitamento energético. Um sistema padrão de coleta de GDL tem três componentes centrais: poços de coleta e tubos condutores, um sistema de tratamento, e um compressor. Além disto, a maioria dos aterros sanitários com sistema de recuperação energética terá um *flare* para queima do excesso de gás ou para uso durante os períodos de manutenção dos equipamentos. Figura 3, a seguir, representa um sistema típico de aproveitamento do gás do lixo:

¹⁵ Para maiores detalhes ver Rosa et al., 2003; Oliveira e Rosa, 2003; Henriques, 2004.

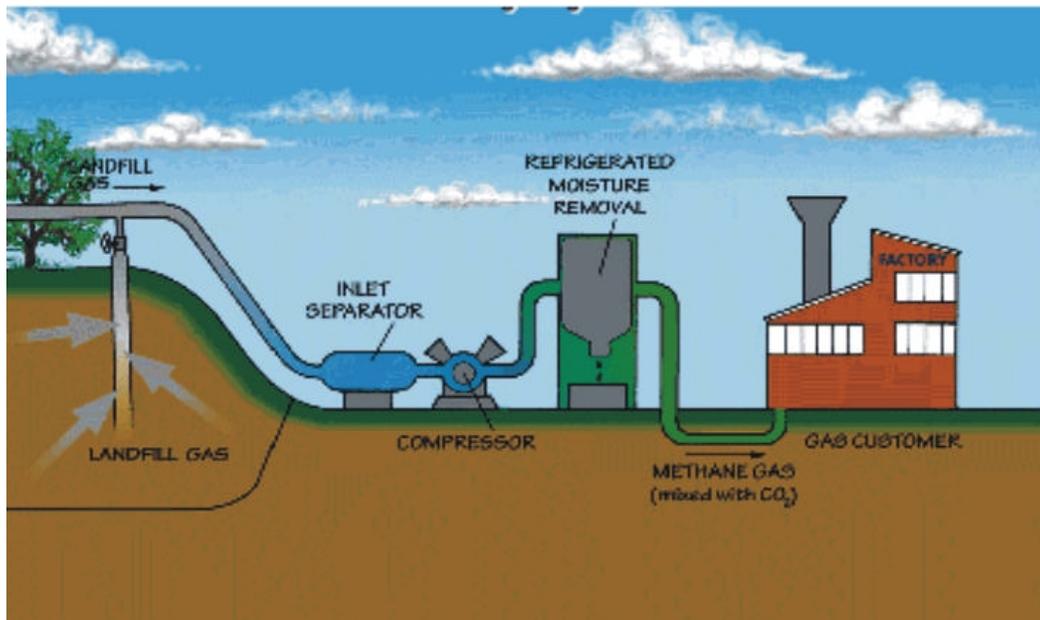


FIGURA 3 DE RECUPERAÇÃO DE GDL

Tubos de Coleta:

A coleta de gás normalmente começa após uma porção do aterro (chamada célula) ser fechada. Existem duas configurações de sistemas de coleta: poços verticais e trincheiras horizontais, sendo que os poços verticais são o tipo mais usado de coleta. As trincheiras podem ser apropriadas para aterros sanitários profundos e podem ser usadas em áreas de aterro ativo. Independente do sistema de coleta usado, cada uma das pontas é conectada a uma tubulação lateral, que transporta o gás para um coletor principal. Preferencialmente, o sistema de coleta deve ser planejado para que o operador possa monitorar e ajustar o fluxo de gás, quando necessário.

Nos aterros onde não houve instalação prévia dos tubos de coleta existe perda de biogás, fenômeno conhecido como emissão fugitiva. Isto ocorre em decorrência da pressão positiva do biogás, que propicia o vazamento através dos caminhos

¹⁶ Esta tese apresenta uma alternativa inovadora já comentada na introdução. Vide pagina 21.

preferenciais formados através da argila utilizada na cobertura. Normalmente esta emissão fugitiva é da ordem de 30% (HENRIQUES, 2004). Mesmo nos aterros projetados para recuperação do biogás existem emissões fugitivas, ainda que inferiores a 5%.

Sistema de Tratamento de Condensado:

Uma importante parte de qualquer sistema de coleta de gás é o sistema de tratamento de condensado. Quando o GDL (quente) produzido pelo aterro sanitário viaja através do sistema de coleta, este se resfria formando um condensado. Caso não seja removido, ele pode bloquear o sistema de coleta e interromper o processo de recuperação de energia. O controle do condensado começa tipicamente no campo do sistema de coleta, onde tubos inclinados e conectores são usados para permitir a drenagem em tanques ou armadilhas de coleta. Estes sistemas são normalmente complementados por uma remoção de condensado pós-coleta. Os métodos para disposição do condensado são: descarga no sistema público de esgoto, um sistema de tratamento local, e uma recirculação para o aterro sanitário. O melhor método para um aterro em particular dependerá das características do condensado (depende dos componentes do lixo local), da legislação e regulação vigentes, e do custo de tratamento e/ou disposição.

Compressor:

Um compressor é necessário para puxar o gás dos poços de coleta, e este também pode ser necessário para comprimir o gás antes deste entrar no sistema de recuperação energética. O tamanho, tipo e número de compressores necessários, dependerão da taxa, do fluxo de gás e do nível desejado de compressão que tipicamente é determinado pelo equipamento de conversão energética.

Flare:

Um *flare* é um dispositivo simples para ignição e queima do GDL. *Flares* são considerados como um componente de cada opção de recuperação de energia porque este pode ser necessário durante as etapas de início e manutenção do sistema. Em adição, este pode ser de maior custo-efetividade para gradualmente aumentar o tamanho do sistema de recuperação de energia e para queimar o excesso de gás entre *up-grades* de sistemas, isto é, antes da adição de um novo motor. Os projetos de *flare* incluem *flares* abertos (ou vela) e enclausurados. Estes são mais caros, mas podem ser preferíveis (ou requeridos) porque proporcionam testes de concentração e podem obter eficiências de combustão ligeiramente altas. Além disto, *flares* enclausurados podem reduzir os incômodos de ruído e iluminação.

Sistema de Tratamento de Gás:

Depois do GDL ser coletado e, antes de ser usado no processo de conversão de energia, é tratado para remover algum condensado que não foi coletado nos tanques de captura, assim como particulados e outras impurezas. As necessidades de tratamento dependem da aplicação de uso final. Um tratamento mínimo é requerido para o uso direto do gás em caldeiras, enquanto um extensivo tratamento é necessário para remover o CO₂ para injeção em um gasoduto. As aplicações de geração de energia incluem uma série de filtros para remover impurezas, as quais podem danificar os componentes do motor ou turbina e, com isso, reduzir a eficiência do sistema. Os custos de tratamento estão incluídos nos custos de recuperação de energia descritos no item de análise de viabilidade econômica.

Sistema de Geração ou Recuperação de Energia:

O objetivo de um projeto de aproveitamento energético do GDL é convertê-lo em alguma forma de energia útil, como a eletricidade, vapor, combustível para caldeiras

ou fogões, combustível veicular, ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade. Existem várias tecnologias que podem ser usadas para maximizar o valor do GDL, produzindo estas formas de energia. As mais importantes são:

- ❑ Uso direto do gás de médio poder calorífico;
- ❑ Produção de energia / cogeração;
- ❑ Venda de gás de qualidade através de gasodutos.

A melhor configuração de um aterro sanitário em particular dependerá de uma variedade de fatores, incluindo a viabilidade de um mercado de energia, os custos de projetos, as fontes potenciais de receita, e várias considerações técnicas.

O uso mais simples e normalmente de maior custo-efetividade do GDL é como um combustível de médio poder calorífico para caldeiras ou para uso em processos industriais (por exemplo: operações de secagem, operações em fornos, produção de cimento e asfalto). Nestes projetos, o gás é transportado por gasoduto diretamente para um consumidor próximo, para ser usado em equipamentos de combustão novos ou já existentes, em substituição ou como suplemento do combustível tradicionalmente usado. Somente baixa remoção de condensado e um tratamento de filtração são requeridos, mas pode ser necessária alguma modificação no equipamento de combustão existente.

Antes de o GDL estar em condições de ser usado por um consumidor, um gasoduto precisa ser construído para acessar a oferta, sendo que os custos deste variam de US\$250.000 a US\$500.000 por milha – ou variam de US\$155.000 a US\$310.000 por quilometro – (*Muylaert et alli*, 2000) em países como EUA e Grã Bretanha. Os custos dependem das diferenças de terreno, dos custos de permissão para passagem e de outras especificidades locais. Assim, a proximidade do centro consumidor é crítica para esta opção. Apesar dos ajustes na caldeira de queima serem tipicamente feitos por encomenda, os custos totais de instalação variam de

US\$120.000 para uma caldeira 10.000 lb/hora a US\$300.000 para uma caldeira 80.000 lb/hora nesses países. Pode-se considerar que os custos de construção do gasoduto respondem por um terço do total (Muylaert *et alli*, 2000). Os custos de operação e manutenção associados ao uso de caldeiras, fornos, secadoras e outros equipamentos industriais são equivalentes aos custos de O & M quando são usados combustíveis convencionais.

O maior uso do GDL é como combustível para a geração de energia elétrica, com a venda da eletricidade para um consumidor próximo. A geração elétrica é vantajosa porque esta produz valor agregado para o GDL. A cogeração de eletricidade e energia térmica (vapor) a partir do GDL pode ser uma alternativa ainda melhor. A eficiência da geração elétrica isolada varia de 20 a 50% e com o uso da cogeração, obtêm-se eficiências mais altas pela disponibilização do vapor resultante do processo de geração. Este pode ser usado localmente para aquecimento, refrigeração, para outras necessidades de processo, ou ainda transportado por tubo para uma indústria ou comércio próximo, obtendo um segundo rendimento para o projeto.

Existem várias tecnologias para a geração de energia elétrica: motores de combustão interna, turbinas de combustão e turbinas a gás com utilização do vapor (ciclo combinado). No futuro, outras tecnologias como células combustíveis tornar-se-ão comercialmente viáveis e poderão utilizar o biogás. A tabela 2, a seguir, apresenta uma comparação entre estas tecnologias de geração de energia.

TABELA 2: Tecnologias de Geração de Energia

	Motores Combustão Interna	Turbinas de Combustão	Turbinas com Utilização do Vapor
Tamanho Típico do Projeto (MW)	> 1	> 3	> 8
Necessidades de GDL (m ³ /dia)	> 17,7	> 56,6	> 141,9
Custos de Capital Típicos (US\$ / kW)	1.000 – 1.300	1.200 – 1.700	2.000 – 2.500
Custos de O & M Típicos (US \$ / kWh)	1.8	1.3 – 1.6	1.0 – 2.0
Eficiência Elétrica (%)	25 - 35	20 – 28 (CT) 26 – 40 (CCCT)	20 – 31
Potencial de Cogeração	Baixo	Médio	Alto
Necessidades de Compressão (Pressão Entrada (atm))	Baixo (0,1 – 2,4)	Alto (> 11,2)	Baixo (0,1 – 0,3)
Vantagens	Baixo Custo; Alta Eficiência; Tecnol. Mais Comum	Resistente; Corrosão; Baixo Custo O&M; Pqno Espaço Físico; Baixa Emissão NO _x	Resistente Corrosão; Pode Controlar Composição e Fluxo de Gás

Fonte: EPA 1996.

Uma terceira opção de projeto é a depuração do GDL para um produto de alto poder calorífico (gás natural) para injeção em um gasoduto. Devido ao alto custo de capital para esta opção, a mesma só terá custo-efetividade para aterros sanitários com substancial recuperação de gás, isto é, pelo menos 4 milhões de pés cúbicos/dia (113 mil m³/dia) (Muylaert *et alli*, 2000). Esta aplicação requer um tratamento de gás para remover CO₂ e impurezas relativamente intensivo. Em adição, as companhias de gás requerem que as injeções de gás em seus sistemas de gasodutos atendam a exigentes padrões de qualidade, o que pode requerer controles de qualidade adicionais. De qualquer forma, esta pode ser uma opção atrativa para proprietários de aterros sanitários, desde que seja possível utilizar todo o gás que é recuperado. A depuração do gás exigirá significante compressão a fim de atender a pressão no gasoduto no ponto de conexão. Gasodutos de alta pressão requerem de 300 a 500 psig, enquanto os de média e baixa podem requerer de 10 a 30 psig.

Outras aplicações do GDL incluem o uso local do gás, principalmente no caso de pequenos aterros sanitários, aquecimento de casas, produção de dióxido de carbono para indústrias locais (usos limitados), ou o uso como combustível veicular, como gás natural ou metanol comprimido. Em países como os Estados Unidos, o uso como combustível veicular está atualmente já em fase inicial de comercialização, com apenas alguns projetos desenvolvidos. O sucesso destes usos também dependerá do tamanho do aterro, da qualidade do gás e de outras especificidades locais.

II.4.2.2 TECNOLOGIA DA INCINERAÇÃO CONTROLADA DO LIXO

Dados recentes falam na incineração de cerca de 100% do lixo municipal do Japão (ARANDA *et alli*, 2001), em torno de 80% do lixo da Suíça e da Alemanha e cerca de 30 milhões de toneladas de lixo por ano incineradas nos EUA. Em Paris, 100% do lixo

é incinerado, dentro da própria cidade, e fornecendo água aquecida para cerca de 70 mil apartamentos. Nos últimos anos, plantas de incineração de lixo vêm sendo maciçamente instaladas em países do leste asiático como Coréia, Taiwan, Filipinas, Índia e China.

No Brasil, atualmente, a incineração é utilizada somente para resolver a questão da disposição final de resíduos perigosos e parte dos resíduos hospitalares. No entanto, essa tecnologia utilizada atualmente no país não se faz o uso do aproveitamento energético. Seriam necessários alguns aprimoramentos tecnológicos para permitir esse aproveitamento de forma economicamente viável e ambientalmente correta. Algumas iniciativas nesse sentido estão sendo implementadas em Campo Grande-MS e Vitória-ES. Em países como Estados Unidos, Japão e a maioria dos países europeus, a incineração já é utilizada para queima controlada do lixo. A concepção moderna de incineração de lixo municipal é uma queima extremamente controlada e envolve tipicamente duas câmaras de combustão.

A câmara primária é a receptora direta do lixo. Nesse dispositivo, a temperatura de operação varia tipicamente entre 500°C e 900°C. Em todas as configurações, a alimentação de oxigênio nessa câmara é sub-estequiométrica, evitando-se assim gradientes elevados de temperatura. Nessas condições controladas, evita-se a volatilização de grandes quantidades de metais presentes no lixo, como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, entre outros. Além disso, minimiza-se a formação de óxidos nitrosos, que surgem apenas sob temperaturas mais elevadas. Ao final da operação, a parte sólida é reduzida a cerca de 4 a 8 % do volume original e tem o aspecto de cinza, sendo um material totalmente esterilizado e apto para ser aterrado ou mesmo aplicado à construção civil (tijolos, capeamento de estradas, etc.). A figura 4, a seguir, representa o sistema de incineração com dupla câmara.

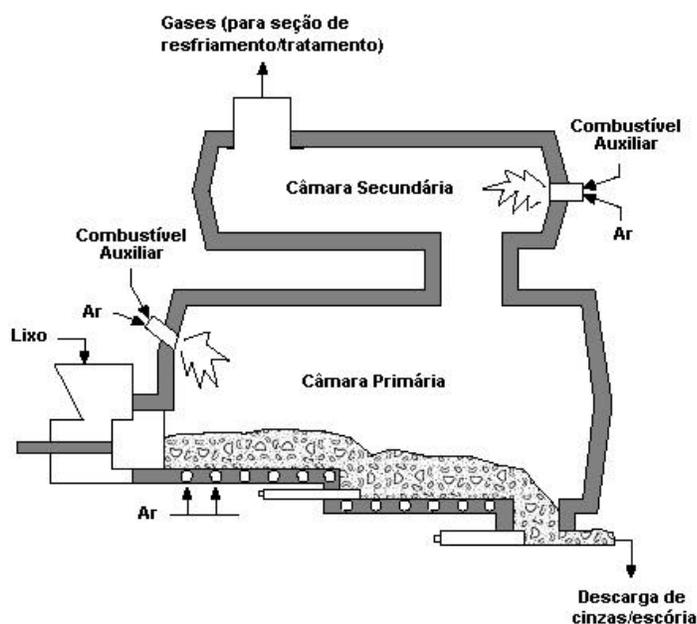


FIGURA 4. ESQUEMA REPRESENTATIVO DE DUPLA CÂMARA DE COMBUSTÃO.

Já a fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para a câmara secundária. Nesse caso, a atmosfera é altamente oxidante (excesso de oxigênio) e a temperatura varia entre 1000°C e 1250°C. Agora, os diversos gases gerados na câmara anterior são oxidados a CO_2 e H_2O . Nessa temperatura, a probabilidade de existência de moléculas com grande número de átomos como dioxinas e furanos, compostos altamente nocivos aos seres humanos, é praticamente zero.

O lixo brasileiro é composto, por estimativa conservadora, em média, por 65% de restos alimentares, 25% papel, 5% plástico, 2% vidro e 3% metais (IPT, 1998). Toda a parte não reciclável, ou seja, os 65% de material orgânico servem como combustível para incineração. No entanto, ambas as câmaras necessitam de injeção de combustível auxiliar, que pode ser gás natural, GLP ou óleo diesel. Vale dizer que os parâmetros de projeto e construção do forno tais como: material refratário, isolante térmico, interface refratário-aço, queimadores, sopradores e a sincronia entre as câmaras são pontos fundamentais para minimizar a quantidade necessária de

combustível auxiliar injetado, muitas vezes utilizado somente para a partida do incinerador. Dependendo do poder calorífico do lixo é possível que nenhum combustível seja adicionado.

Atualmente, existem incineradores no mercado que apresentam grande eficiência de queima com baixo consumo de combustível e baixo teor de emissões. De forma conservadora, os gases que saem da segunda câmara de combustão, apesar da eficiência da queima, carecem ainda de um tratamento adicional, que em muitos casos funciona como uma precaução adicional de segurança.

O tratamento desses gases envolve processos físicos e químicos, havendo uma grande variedade de opções de conformação e equipamentos. A primeira etapa consiste em resfriar os gases que saem a 1000°C a 1200°C da câmara secundária. Nessa etapa, além de resfriarem-se os gases de combustão gera-se vapor d'água que pode ser utilizado na geração de energia elétrica, sistema de aquecimento ou mesmo sistema de refrigeração.

Em seguida, os gases são neutralizados com a injeção de hidróxido de cálcio (*dry scrubber*), altamente eficiente na neutralização e captura de SO_x e HCl. Os gases já resfriados e neutralizados passam então por um sistema de filtros (filtros-manga) que retiram o material particulado (fuligem, sais e hidróxido de cálcio) de dimensão de até 0,3 µm. Em algumas conformações utilizam-se outros sistemas, como precipitadores eletrostáticos, lavadores venturi, ciclones, etc.

Finalmente, os gases passam por um leito adsorvente, à base de carvão ativado (leito fixo ou fluidizado), de alta área superficial que possui tripla ação:

- a) Retenção de óxidos nitrosos: evita-se picos de geração de NO_x, eventualmente formados por distúrbios na câmara secundária, inibindo que sejam emitidos abruptamente para a atmosfera;
- b) Retenção de organoclorados: ação preventiva quanto à emissão de dioxinas por algum problema na câmara secundária;

c) Retenção de metais voláteis: O material adsorvente atua como uma “peneira molecular” retendo metais voláteis. Tanto por injeção, como através de um leito fixo, o material adsorvente possui comprovadamente altíssima eficiência na retenção de metais.

Tanto os filtros mangas como os leitos de carvão funcionam tipicamente entre 150 e 200°C. A perda de calor ao longo do próprio tratamento de purificação de gases faz com que a temperatura na saída da chaminé seja inferior a 120°C.

Com a incineração controlada dos resíduos sólidos urbanos é possível com 500 toneladas diárias, abastecer uma usina termelétrica com potência instalada de 16 MW, o que representa um potencial energético de cerca 0,7 MWh/t.

II.4.2.3 TECNOLOGIA DRANCO

Desenvolvido pelo grupo de pesquisa da Universidade de Gent, na Bélgica, em 1980, e em operação desde 1982, a tecnologia DRANCO (*dry anaerobic composting*) só ficou disponível para licenciamento em 1990, devido às demoradas demandas jurídicas, movidas por empresas europeias que possuíam e operavam processos anaeróbios aquosos e que procuraram impedir a aprovação da patente de processo, requerida pela empresa belga OWS – Organic Waste Systems N.V. Estas demandas só terminaram em março de 1993, com a rejeição pelo Comitê Europeu de Apelações, em última instância, ao recurso impetrado pela empresa francesa VALORGA.

A diferença básica dos demais processos anaeróbios para o DRANCO é que este trabalha com a fração orgânica em estado sólido (65% de umidade) e somente com fermentação termofílica (55°C), enquanto os demais trabalham ambientes aquosos (95% de H₂O) necessitando de agitação interna e com fermentação criofílica e

mesofílica (temperatura máxima de 37°C). Estas fundamentais diferenças tornam os demais processos economicamente inviáveis, pelo grande investimento em reatores, necessidades de grandes áreas e de lagoas de tratamento de efluentes líquidos, além de necessitarem pasteurizar a massa pós-reator anaeróbio.

Após o recolhimento do lixo, que é composto de cerca de 60% de matéria orgânica, é processada uma separação e esta fração segue para um biodigestor com ausência de oxigênio, enquanto o restante (papéis, plásticos, vidros e metais) é encaminhado para outras formas de aproveitamento. Ocorre, então, a decomposição química que gera os seguintes produtos: Adubo (húmus), Metano (gás combustível) e CO₂ (dióxido de carbono).

Da parte que foi separada anteriormente, os vidros, metais e cerâmicas seguem para a reciclagem, enquanto os plásticos, os papéis e papelão são transformados em briquetes. Este produto serve de combustível para fornos, complementando a geração elétrica dos restos alimentares, sem emanar odores e poluentes, já que sua combustão gera energia, CO₂ e H₂O. Devido à alta temperatura do processo, não há efluentes gasosos preocupantes. A figura 5, a seguir, apresenta o esquema utilizado por esta tecnologia.

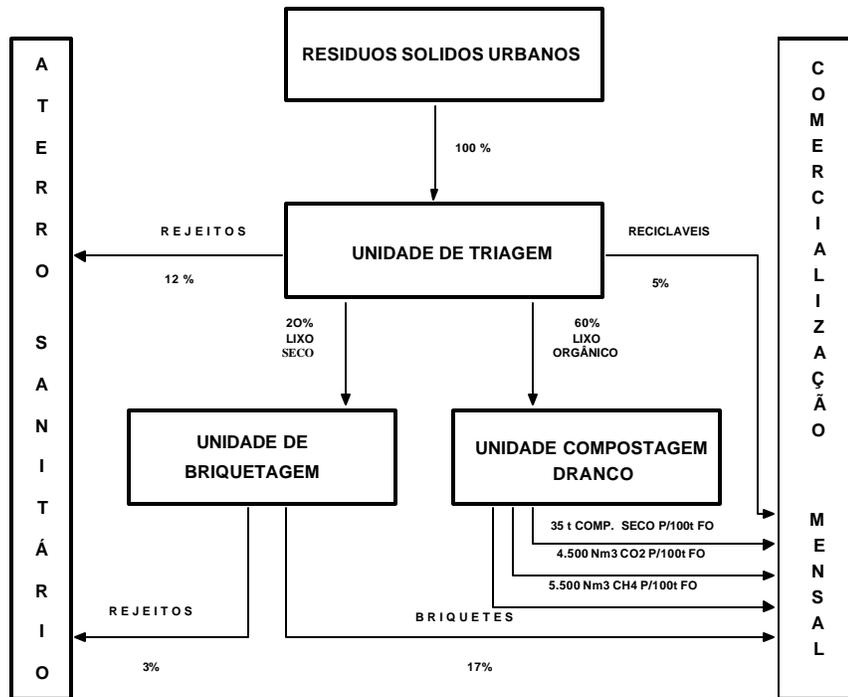


FIGURA 5 - ESQUEMA DA TECNOLOGIA DRANCO

Algumas definições são apresentadas a seguir para facilitar o entendimento da tecnologia:

- Fração Recuperável Triada – vidros, ferrosos, metais e plásticos duros são vendidos para empresas especializadas na sua comercialização e/ou beneficiamento.
- Fração Seca Triada – os resíduos secos segregados na Unidade de Triagem (plásticos não clorados, papéis, trapos, madeiras, etc) irão compor combustível de alto poder calorífico, para ser comercializado como biomassa combustível junto às indústrias que usem caldeiras a lenha, locomóveis, calcinadores rotativos, olarias etc., ou ser incinerado juntamente com o lixo hospitalar séptico, gerando vapor e/ou energia elétrica. Uma empresa brasileira já

dispõe de tecnologia de briquetagem que se constitui como solução ecológica e de maior viabilidade econômico-financeira.

□ Fração Orgânica Compostável Triada – constituída por resíduos de alimentação, podas e jardins, papéis úmidos, etc., a fração orgânica, é potencialmente poluidora visto que: produz o chorume - líquido escuro, ácido e com alta DBO (demanda bioquímica de oxigênio) - responsável pela poluição dos solos, dos lençóis freáticos e das fontes hídricas; atrai e hospeda os mais diversos tipos de vetores patogênicos (moscas, ratos, urubus, baratas, etc); polui o meio ambiente pela emissão de gases e odores. Quando tratada por processos convencionais, a céu aberto, além de gerar odores, demanda extensas áreas para a sua disposição, via de regra distantes dos centros, elevando os custos de transporte e por ter 65% de umidade e baixo poder calorífico, não é economicamente incinerável.

Numa primeira etapa ocorre a triagem do lixo (seleção manual), a parte orgânica segue por um triturador e depois uma peneira. Após ter sido peneirado vai para a unidade de dosagem. Em seguida, é acrescido vapor e bombeado para dentro do digestor. Passada esta fase do processo a mistura segue até a prensa desaguadora, onde a parte líquida é separada e é encaminhada para a unidade de tratamento de resíduos líquidos. A parte sólida vai para a maturação aeróbica e depois de peneirada segue para a comercialização como composto orgânico (húmus). A fase gasosa deste processo é o biogás que, além de estocado, pode ser usado para alimentar a caldeira, podendo ainda gerar energia em termelétricas e, depois de tratado (tendo como

resultado abatimento de CO₂, H₂S e vapor), pode ser utilizado como combustível em veículos automotores. A queima dos excessos de gás é feita no *flare*¹⁷.

Mesmo sendo uma tecnologia já testada amplamente no mundo (existem, atualmente, cerca de dez plantas funcionando na Europa), a empresa NTA, representante desta tecnologia no Brasil, encontrou dificuldades para difundi-la em âmbito nacional. Hoje esta tecnologia está sendo implementada em duas cidades do Rio Grande do Sul (Farroupilha e Caxias do Sul), mas há negociações em andamento para que haja uma ampliação da sua aplicação. Os grandes entraves encontrados são, em sua maior parte, devidos à falta de informação o que leva aos tomadores de decisão nos municípios não entrarem em acordo sobre qual opção tecnológica deve ser utilizada. Nos municípios até agora beneficiados há um apoio quase unânime da população, visto a melhor gestão atribuída aos resíduos.

II.4.2.4 TECNOLOGIA BEM

A sigla BEM significa Biomassa – Energia – Materiais. A tecnologia está sendo desenvolvida desde o final da década de 80, por um grupo de trabalho no interior de São Paulo, liderado pelo professor Daltro Pinatti e pelo Grupo Peixoto de Castro. Os detentores da patente desta tecnologia são o Grupo Peixoto de Castro, que é brasileiro, e o Professor Pinatti (Pinatti, 1996).

O Programa BEM tem por objetivo desenvolver as tecnologias dos materiais lignocelulósicos (madeira, bagaço de cana, capim, resíduos agrícolas, parte orgânica do lixo, etc.) e de digestão material (monazita, zirconita, etc.). Isto tem sido feito através de reatores de aço carbono revestido com metais refratários e, neste

¹⁷ O “flare”, ou tocha, é um dispositivo de segurança que queima combustível quando ocorre algum problema durante o processo produtivo. Essa tocha fica constantemente acesa e queima certa quantidade de gás.

programa, as biomassas são transformadas em duas commodities: a celulignina utilizada como combustível, ração animal e madeira sintética, entre outros produtos e o pré-hidrolisado (solução de açúcares) usado em produtos químicos tais como furfural, álcool, xilitol.

Nesta tecnologia, a biomassa presente nos resíduos sólidos é picada e compactada no silo. Uma rosca helicoidal comprime a biomassa dentro de um reator piloto (com cerca de 1m^3). Os dois produtos fundamentais desta reação são: uma parte hidrolisada sólida (a celulignina) e uma parte líquida pré-hidrolisada (solução de açúcares que foi digerida no processo).

O processo de fabricação da celulignina em linhas gerais consiste nos seguintes passos abaixo descritos:

- 1) O enchimento do reator é realizado através de um alimentador helicoidal que compacta a biomassa até a densidade de 300 kg/m^3 . Adiciona-se ácido sulfúrico residual industrial diluído ;
- 2) O descarregamento se dá pelo basculamento do reator e a abertura de sua tampa de grande diâmetro. Nesta tecnologia a parede tem 10 mm de espessura, revestida com titânio, e uma casca fina de aço carbono. Há vácuo entre as duas camadas;
- 3) Depois de adicionado o ácido, é feito um aquecimento direto e o reator fica girando para que a mistura aqueça de forma homogênea e melhore o processo. A reação dura cerca de 30 minutos, mas caso o reator fosse estático duraria entre 2,5 a 3 horas. Durante a operação o reator apresenta um movimento rotativo para a esquerda e para a direita num ângulo de 150° com frequência de 20 segundos. Tal oscilação afeta a cinética do processo de pré-hidrólise provocando a substituição das camadas de solução saturada de açúcar, diminuindo o tempo de hidrólise e aumentando o teor de açúcares (xilose e glicose) na solução de água (pré – hidrolisado);

4) O consumo de energia para a produção de celulignina equivale a 6,3% da energia contida na celulignina produzida, indicando um valor 5 vezes menor do que os valores obtidos pelos reatores clássicos utilizados em processos de hidrólise ácida de biomassa.

A celulignina

Comparada ao material orgânico original – resíduos orgânicos do lixo, através deste processo o teor de carbono sobe de cerca de 30%. Há duas características importantes em relação a celulignina. Uma delas é que há uma diminuição nos níveis de potássio e sódio em relação ao material original para a celulignina. Desta forma ela passa a ser um combustível possível de ser queimado em turbinas a gás de ciclo combinado. O outro aspecto é que o processo gera uma porosidade na parede celular do produto, pois o ácido penetra na parede celular e há uma ruptura das n-celuloses constituintes, gerando um gás que desencadeia um processo de erupção na parede celular e deixa o material todo poroso, facilitando, em muito, a difusão gasosa no processo de combustão.

Acompanhando o teor de açúcar pelo tempo de reação, nota-se que este aumenta muito depois do aquecimento da mistura e logo depois se estabiliza. Esse aumento repentino se explica pelo início das erupções nas paredes celulares. A celulignina sai do reator úmida, passa por um secador e é moída. Sua queima ocorre como se fosse gás, pois ela é pulverizada no combustor.

O pré – hidrolisado

A solução segue para um segundo reator onde é aquecida a 220° C e torna-se furfural¹⁸. O furfural possui inúmeras aplicações, dentre elas o PHF, uma mistura combustível utilizada já na Califórnia por se tratar de um combustível limpo, composto por 20% de furfural, 50% de álcool e o restante de gasolina. O furfural segue para uma tancagem e depois de aquecido é feita uma destilação. O vinhoto da planta é transferido para unidade de tratamento de água onde é retirado o lodo. Este lodo depois de seco é tratado por um processo de conversão à baixa temperatura (LTC) que gera carvão e óleo que podem ser queimados. O processo leva de 2 a 2 horas e meia.

O modelo convencional da tecnologia desenvolvido em 1985, possuía reatores e colunas estáticas com muita água de processo para manipular a biomassa. Houve, então, mudanças no decorrer da década de 90 e uma nova patente foi gerada em 1999. O novo processo que começou a vigorar teve a planta piloto construída pelo grupo liderado pelo Prof. Daltro Pinatti, que vem trabalhando há cerca de 15 anos para desenvolver comercialmente a pré-hidrólise ácida de materiais lignocelulósicos usando metais refratários. Esse fato faz com que alguns dados técnicos não estejam detalhados ainda.

A tecnologia BEM enfrentou o desafio de desenvolver uma tecnologia dos reatores revestidos internamente com materiais refratários, tais como: titânio (Ti), nióbio (Nb), tântalo (Ta) e suas ligas (patentes em fase de solicitação). Essa tecnologia consiste em um reator químico para pré-hidrólise de biomassa, bipartido, sendo sua casca confeccionada em aço ARBL (Alta Resistência Mecânica e Baixa Liga) com o objetivo de suportar pressão de 0,6 MPa, temperatura de 160° C e diminuir o peso do reator.

¹⁸ Está sendo considerada a utilização da tecnologia de conversão à baixa temperatura de lodo orgânico, neste caso o pré-hidrolisado, em carvão e diesel. Com isso este insumo terá mais fácil aproveitamento no mercado.

Análises preliminares mostram que o reator em ARBL revestido internamente com titânio é tecnicamente superior aos tradicionalmente confeccionados em aço inox (podendo atingir $\frac{1}{4}$ do preço do fabricado em aço inox), justificando a utilização de tais materiais mais dúcteis que os hoje empregados (reatores vitrificados), introduzindo maior segurança e facilidade de engenharia operacional. A planta piloto do reator de pré-hidrólise ácida com volume de $1,0 \text{ m}^3$ está localizada em Lorena – SP na sede da empresa RM – Materiais Refratários, onde é desenvolvido o Programa BEM. O reator industrial tem 30 m^3 e tem capacidade para 100 toneladas de biomassa seca por dia.

No projeto final o volume do reator será de 15 m^3 , processará biomassa com 300 kg/m^3 de densidade, o que permite processar 4,5 toneladas de biomassa seca (TBS) por reação, alcançando 75 TBS por dia por reator. O reator vazio terá o peso de 8,0 t o que possibilita sua montagem numa carreta padrão podendo ser então transportado para pátios junto das fontes produtoras de biomassa, o que evitará o transporte de biomassa colhida a longas distâncias para processamento nos reatores. A figura 6, a seguir, apresenta um fluxograma do sistema BEM.

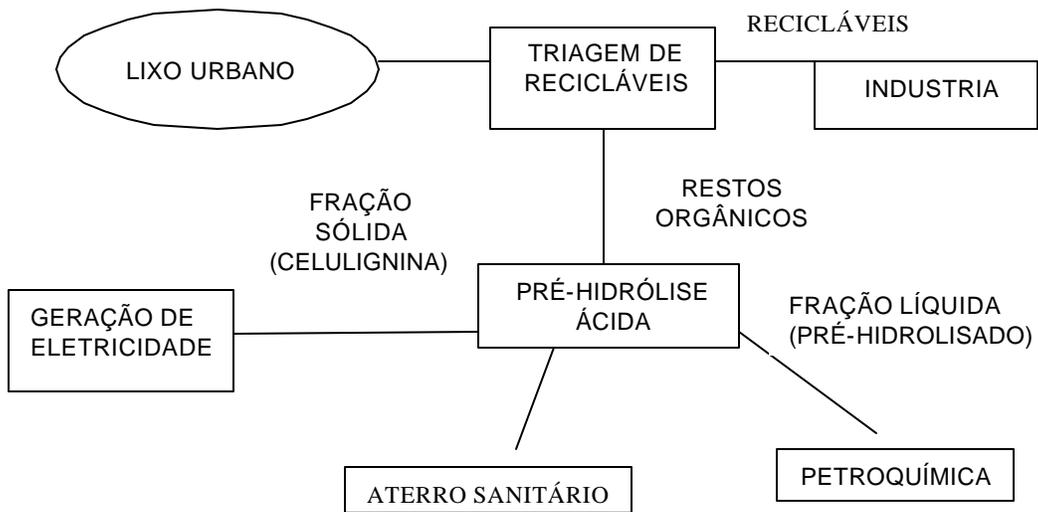


FIGURA 6 - FLUXOGRAMA SOBRE TECNOLOGIA BEM

II.5 - BIODIESEL

De acordo com a lógica de usar fontes alternativas de energia redutoras de poluição, capazes de gerar empregos e com custos competitivos, o biodiesel apresenta-se como candidato natural a um programa nacional de substituição de importações.

II.5.1 CONCEITO DE BIODIESEL

A Agência Nacional do Petróleo do Brasil definiu, através da portaria 225 de setembro de 2003, biodiesel como o conjunto de ésteres de ácidos graxos oriundos de biomassa, que atendam a especificações determinadas para evitar danos aos motores. Estas especificações são similares às adotadas internacionalmente, sobretudo na Europa, e podem ser vistas no anexo.

O biodiesel é uma evolução na tentativa de substituição do óleo diesel por biomassa, iniciada pelo aproveitamento de óleos vegetais "*in natura*". É obtido através da reação de óleos vegetais, novos ou usados, gorduras animais, com um intermediário ativo, formado pela reação de um álcool com um catalisador, processo conhecido como transesterificação. Os produtos da reação química são um éster (o biodiesel) e glicerol. No caso da utilização de insumos ácidos, como esgoto sanitário ou ácidos graxos, a reação é de esterificação e não há formação de glicerol, mas de água simultaneamente ao biodiesel. Os ésteres têm características físico-químicas muito semelhantes às do diesel, conforme demonstram as experiências realizadas em diversos países (Rosa et al., 2003), o que possibilita a utilização destes ésteres em motores de ignição por compressão (motores do ciclo Diesel).

II.5.1.1 O PROCESSO DE TRANSESTERIFICAÇÃO

O biodiesel, como explicado anteriormente, pode ser obtido através da reação de óleos vegetais com um intermediário ativo formado pela reação de um álcool com um catalisador, processo conhecido como transesterificação. Os produtos da reação química são um éster¹⁹ (o biodiesel) e glicerol.

A reação de transesterificação pode empregar diversos tipos de álcoois, preferencialmente os de baixo peso molecular, sendo os mais estudados os álcoois metílico e etílico. Freedman e colaboradores (1986) demonstraram que a reação com o metanol é tecnicamente mais viável do que com etanol. O etanol pode ser utilizado desde que anidro (com teor de água inferior a 2%), visto que a água atuaria como inibidor da reação. A separação da glicerina obtida como subproduto, no caso da síntese do éster metílico é resolvida mediante simples decantação, bem mais facilmente do que com o éster etílico, processo que requer um maior número de etapas.

Quanto ao catalisador, a reação pode utilizar os do tipo ácido ou alcalino ou, ainda, pode ser empregada a catálise enzimática. Entretanto, geralmente a reação empregada na indústria é feita em meio alcalino, uma vez que este apresenta melhor rendimento e menor tempo de reação que o meio ácido, além de apresentar menores problemas relacionados à corrosão dos equipamentos. Por outro lado, os triglicerídeos precisam ter acidez máxima de 3%, o que eleva seus custos e pode inviabilizar o processo em países onde o óleo diesel mineral conta com subsídios cruzados, como no Brasil.

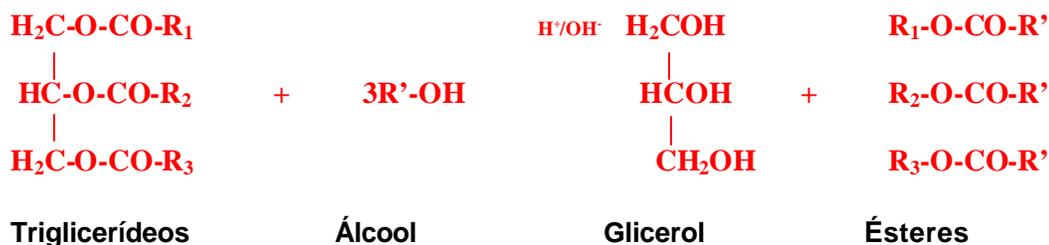
A separação do glicerol pode ser feita mediante decantação, ou aplicada a centrifugação para acelerar o processo. Em seguida faz-se necessário tratar a mistura

¹⁹ Derivado da reação química entre um ácido carboxílico e um álcool, na qual o hidrogênio do grupamento carboxila é substituído pela cadeia carbônica do álcool, formando o éster.

de ésteres com o excedente de álcool e material não convertido, o que vem sendo feito através de destilação com aplicação de vácuo pela experiência do IVIG/COPPE.

Apesar dos excelentes resultados obtidos por diversos autores (Rosa et al., 2003), é inevitável admitir que o óleo de fritura traz consigo muitas impurezas, oriundas do próprio processo de cocção de alimentos. Portanto, para minimizar esse problema, é sempre aconselhável proceder a uma pré-purificação e secagem dos óleos antes da reação de transesterificação.

O esquema a seguir mostra a reação de transesterificação.



Onde R₁, R₂ e R₃ representam as cadeias carbônicas dos ácidos graxos e R' a cadeia carbônica do álcool reagente.

II.5.1.2 O PROCESSO DE ESTERIFICAÇÃO

A reação de esterificação emprega, preferencialmente, álcoois de baixo peso molecular, como o metanol e o etanol. A catálise alcalina não é empregada porque a reação preferencial do catalisador seria a de combinar-se com quaisquer ácidos graxos livres para formar sabão. O sabão formado favorece a ocorrência de emulsões entre o metanol e o ácido graxo, desfavorecendo a reação de esterificação.

No caso da utilização da catálise ácida homogênea, esta apresenta como desvantagem a dificuldade de remoção do resíduo de catalisador do material esterificado. Normalmente, a remoção do catalisador é feita através de lavagem da

mistura com metanol, que é separado da fase óleo por extração com solvente imiscível com o óleo, normalmente glicerina. Com este procedimento, uma parte dos ácidos graxos esterificados é perdida, reduzindo o rendimento do processo. A fim de contornar esse problema, podem-se empregar catalisadores sólidos ácidos ou a catálise enzimática.

A utilização de catalisadores heterogêneos minimiza os custos de separação e purificação, trazendo ainda maior atratividade ao processo de obtenção do éster.

O esquema a seguir mostra a reação de esterificação.



Onde R representa a cadeia carbônica do ácido graxo e R' a cadeia carbônica do álcool reagente.

II.5.2 O MERCADO POTENCIAL

Como o Brasil consome cerca de 40 bilhões de litros anuais de óleo diesel (ANP, 2002), importando 15% em óleo diesel refinado e refinando mais 20% a partir de petróleo importado (idem), tendo passado em 2003 a importar 10% do óleo diesel refinado e refinar 17% de petróleo importado (ANP, 2003), ainda que parte disto seja necessário para diluir a densidade do petróleo nacional, e exportando a maior parte dos demais derivados obtidos deste refino, existe um significativo potencial de substituição de importações. Ademais, desde a quebra do monopólio do petróleo no país, em 1997, os novos investimentos estão concentrados em exploração e produção (E&P), enquanto o parque de refino já atingiu seu limite.

Avaliando os aspectos sociais, os insumos processados nestes testes demandam muita mão-de-obra, podendo ser de baixa qualificação profissional, exatamente a de mais difícil colocação no mercado de trabalho. Esta necessidade por mão-de-obra tem a característica de ser descentralizada, uma vez que atende às peculiaridades das fontes dos insumos e pode suplantar os 5 milhões de postos de trabalho (EMBRAPA, 2002). Sob o aspecto ambiental, o uso de biodiesel reduz significativamente as emissões de poluentes, quando comparado ao óleo diesel, podendo atingir 98% de redução de enxofre, 30% de aromáticos e 50% de material particulado e, no mínimo, 78% de gases do efeito estufa (ROSA et alli, 2003).

Na elaboração do balanço ambiental é preciso considerar, ainda, a fixação de nitrogênio no solo, peculiaridade das oleaginosas, e o aumento da emissão de NO_x em até 13%, a qual pode ser minimizada pelo uso de catalisadores. Cabe ressaltar que, atualmente, os catalisadores estão impossibilitados de serem aproveitados nos motores ciclo diesel no Brasil, em decorrência dos elevados teores de enxofre e de material particulado presentes no óleo diesel comercializado. Assim, o consumo de biodiesel permitirá a utilização destes equipamentos, capazes de reduzir a poluição.

A questão econômica, refletida pela modicidade dos preços, já pode ser atingida com os insumos residuais. A quantidade disponível de insumos residuais, no Brasil, é pequena, quando comparada ao consumo de óleo diesel, é de cerca de 1% do consumo, ou 500 milhões de litros por ano (IBGE, 2000), (HIDROVEG, 2002), o que demonstra que o óleo diesel continuaria majoritariamente no mercado mesmo com o uso de todos os insumos residuais para a produção de biodiesel. Embora pouco representativa em escala global, estes insumos, que envolvem óleo de fritura usado, ácidos graxos, gordura animal e esgoto sanitário, além de terem menores custos, apresentam a vantagem de poderem ser consumidos imediatamente e estarem disponíveis junto aos aglomerados urbanos. Além disto, configuram-se como

poluentes e seu consumo como combustível caracteriza-se, também, como tratamento sanitário.

Vale ressaltar que a produção de biodiesel da espuma de esgoto é uma inovação mundial e que a solicitação de patente foi depositada a 06/05/2003 pela UFRJ, que licenciou a exploração para a empresa GERAR Ltda, selecionada pela instalar-se na Incubadora de Empresas de Base Tecnológica da COPPE/UFRJ, em julho de 2003²⁰. Este tipo de insumo representa um potencial pequeno, 0,25% quando analisado o consumo nacional, por ser de 50 a 100 milhões de litros anuais de biodiesel, mas sua disponibilidade imediata, proximidade aos consumidores, produção continuada (espécie de extrativismo urbano), baixo custo de produção e potencial de redução de poluição configuram uma oportunidade para iniciar o uso deste combustível, além do potencial de exportação da tecnologia. A figura 7 mostra as três etapas entre a disponibilidade da matéria-prima e o biodiesel.



Fonte: IVIG, 2003.

FIGURA 7 – ESCUMA, GORDURA E BIODIESEL

Os insumos oriundos do extrativismo, como babaçu, buriti e castanha do Pará, também estão disponíveis imediatamente e têm potencial para empregar um maior número de mão-de-obra do que os insumos residuais. Ainda que estejam disponíveis

em locais remotos, o que implicará em custos de transporte elevados, seu potencial é de 3 bilhões de litros anuais, cerca de 8% do consumo nacional (LA ROVERE e BRAGA, 1981), (DI LÁSCIO, 2001). Esta característica pode beneficiar a substituição do óleo diesel também para geração elétrica, uma vez que nestas regiões estão os principais sistemas elétricos isolados, aqueles abastecidos por grupo-geradores ciclo diesel, cuja substituição por combustíveis renováveis já conta com incentivo federal, através da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) (ANEEL, 1999). Os custos, ainda que superiores ao preço do óleo diesel, podem ser compensados, tanto pela CCC, quanto pela redução do custo de transporte de derivados das refinarias, muito distantes da região norte, e, muitas vezes obtido via importação.

Os insumos cultivados, soja, mamona, girassol, dendê e coco, não estão disponíveis imediatamente, visto que já têm mercado definido (alimentício e químico) e qualquer demanda reprimida de um mercado competitivo pode aumentar os preços de mercado, baseado no custo de oportunidade. Para este tipo de insumo deve ser aproveitado o potencial agrícola do país, que conta com 90 milhões de hectares agricultáveis ociosos (MA, 2002), e as peculiaridades regionais referentes à sensibilidade das oleaginosas às condições edafo-climáticas. Neste caso o potencial de oferta de insumo, maior que 400 bilhões de litros, é mais de dez vezes superior à demanda interna, permitindo elaborar um programa de exportação, através do qual o Brasil ocupe um papel de destaque no mercado mundial, pois o consumo atual de óleo diesel é de aproximadamente 730 bilhões de litros anuais (IEA, 2003). Caso sejam utilizadas culturas pouco mecanizadas, o potencial de geração de empregos supera os 4 milhões, número possível somente com o plantio de mamona no semi-árido nordestino (EMBRAPA, 2002).

Estes insumos estarão distantes dos centros consumidores, mas o ganho de escala permitirá custos competitivos, sobretudo por conta do consórcio entre tipos de

²⁰ O autor deste trabalho é co-inventor da patente e sócio da empresa.

oleaginosas, com produtividades, tempo de maturação e rotatividade diferentes, e alimentos. É preciso atentar para o fato de que o atendimento ao consumo energético produzirá uma quantidade de insumo que os mercados competidores não têm capacidade de assimilar e, por isto, não podem pressionar os preços.

Com exceção do esgoto e dos ácidos graxos (cujo sub-produto é água), o processamento dos demais insumos gera, como sub-produto, o glicerol, que atualmente é usado na indústria farmacêutica, sobretudo de cosméticos e alimentícia, e só não está sendo utilizado como insumo para fluido de perfuração na indústria de petróleo por ser caro. Nesse momento a PETROBRAS está realizando testes para identificar o nível de beneficiamento necessário, o que pode representar uma receita adicional e facilitar a viabilização do sistema. O IVIG/COPPE está avaliando a possibilidade de uso de glicerol misturado a fibras vegetais para a construção civil, seu uso como combustível em caldeiras, além da premiada alternativa de uso substituindo metanol e etanol na pilha a combustível de oxidação direta (JOVEM CIENTISTA, 2002).

Outro sub-produto decorrente da produção de biodiesel é a fração protéica, quando usados insumos do extrativismo ou cultivados. Este material pode servir como alimento, ração animal, adubo ou como biomassa para geração de energia, representando outra fonte de recursos. Entretanto, algumas oleaginosas contém veneno e, ao extrair o óleo, a fração protéica requer tratamento para ser utilizada, como é o caso da ricina presente na mamona. Este processo encarece o custo deste co-produto podendo inviabilizar sua comercialização, o que tende a prejudicar a economicidade do biodiesel caso os custos de produção das oleaginosas e dos co-produtos sejam arcados exclusivamente pelo biocombustível.

Ademais, é necessário considerar a dinamização da economia decorrente de duas fontes: a redução das importações de combustíveis fósseis e o potencial de receita proveniente da comercialização das emissões evitadas de gases do efeito

estufa. Estas emissões evitadas são oriundas tanto da substituição de combustíveis fósseis, que evita a emissão de dióxido de carbono, quanto da utilização de resíduos para geração de energia, que evita a emissão de metano.

II.6 O EFEITO ESTUFA ANTROPOGÊNICO E OS CRÉDITOS DE CARBONO

A temperatura média próxima à superfície da Terra seria cerca de 17° C abaixo de zero, fruto do processo natural de seu balanço energético com o sol, a atmosfera e o espaço, caso não houvesse na atmosfera certos gases, destacando-se entre eles o CO₂. A presença na atmosfera de gases com características “estufa” – “transparentes” às radiações solares mas absorvedores da radiação térmica emitida pela Terra, re-emitada por eles em todas as direções – aquece o planeta, levando a temperatura média da atmosfera próxima à superfície terrestre a cerca de 15° C, mais favorável a vida como conhecemos.

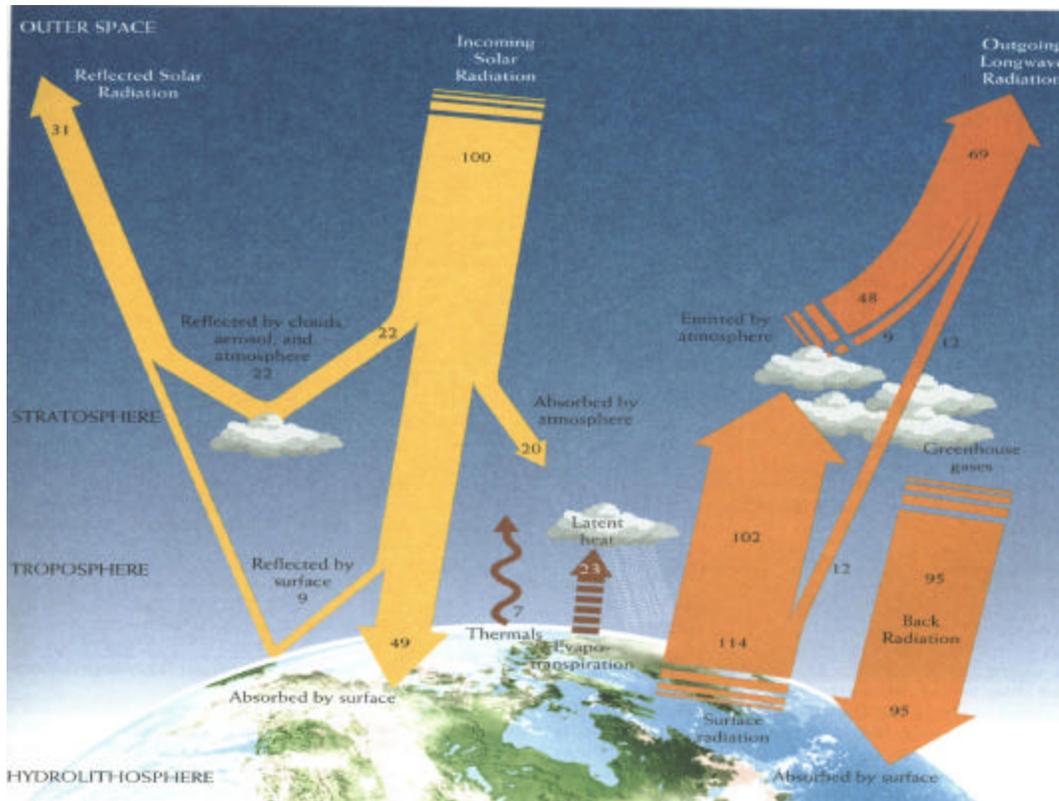
Está comprovado, entretanto, por medições da concentração de dióxido de carbono nas geleiras das calotas polares, que vem aumentando nos últimos dois séculos, na atmosfera, a presença desse gás de uma forma acentuada, capaz de intensificar o efeito estufa e modificar as condições climáticas do planeta. Como este aumento está ocorrendo simultaneamente ao incremento da emissão destes gases provenientes de atividades humanas, como combustão de combustíveis fósseis e fermentação anaeróbica de resíduos, convencionou-se chamar este fenômeno de efeito estufa antropogênico.

Os gases de efeito estufa (GEE)²¹ são caracterizados pelo fato de suas moléculas terem níveis de energia capazes de serem excitados por absorção de fótons de ondas eletromagnéticas da radiação térmica emitida pela Terra. Por outro lado eles não absorvem fótons de ondas com frequências da luz solar. (ROSA, 1997).

A figura 7 mostra que a quantidade de energia que chega à Terra é maior que aquela emitida pelo sol, pois enquanto a maior parte desta é refletida no topo da atmosfera, nas nuvens e na própria superfície, além de uma pequena fração ser

²¹ Os principais gases causadores do efeito estufa antropogênicos são: CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano), N₂O (óxido nitroso), CFC₁₁ e CFC₁₂ (clorofluorcarbonos).

absorvida pela atmosfera, uma parte ainda maior da energia emitida pelo planeta é refletida pelos gases estufa.



Fonte: Gradel e Crutzen, 1997.

FIGURA 8 - O EFEITO ESTUFA:

Além de suas concentrações diferentes, como mostra a tabela 3, os GEE diferem quanto a seus potenciais de aquecimento global (GWP) – capacidade de absorção e redistribuição da energia térmica emitida pela Terra, em função da vida média de cada gás –, tendo sido tomado como unidade o CO₂ e calculada, pelo IPCC²², para conversão, a tabela 4:

²² Intergovernmental Panel on Climate Change – Órgão que assessora as Nações Unidas no estudo sobre o tema, suas causas e seus efeitos, inclusive propondo metodologias para elaboração de inventários e medidas mitigadoras.

TABELA 3 – Concentrações de GEE na Atmosfera

GEE	CO2	CH4	O3 (ao nível do solo)	N2O	CFCs
%	50	11	9	7	13

Fonte: I. Smith, 1988

TABELA 4 – Potencial De Aquecimento Global (GWP):

Espécies	Fórmula química	Tempo de vida (anos)	Potencial de aquecimento global (horizonte de tempo)		
			20 anos	100 anos	500 anos
Dióxido de Carbono	CO ₂	Variável	1	1	1
Metano	CH ₄	12±3	56	21	6.5
Óxido Nitroso	N ₂ O	120	280	310	170
Ozônio	O ₃	0,1 - 0,3	n.d.	n.d.	n.d.
HFC-23	CHF ₃	264	9.100	11.700	9.800
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,6	2.100	650	200
HFC-41	CHF ₃	3,7	490	150	45
HFC-43-10mee	C ₅ H ₂ F ₁₀	17,1	3.000	1.300	400
HFC-125	C ₂ H ₂ F ₅	32,6	4.600	2.800	920
HFC-143	C ₂ H ₃ F ₃	3,8	1.000	300	94
HFC-143a	C ₂ H ₃ F ₃	48,3	5.000	3.800	1.400
HFC-227ea	C ₃ H ₂ F ₇	36,5	4.300	2.900	950
HFC-236fa	C ₃ H ₂ F ₆	209	5.100	6.300	4.700
HFC-145ca	C ₃ H ₃ F ₅	6,6	1.800	560	170
Hexafluorido de Enxofre	SF ₆	3200	16.300	23.900	34.900
Perfluorometano	CF ₄	50.000	4.400	6.500	10.000
Perfluoroetano	C ₂ F ₆	10.000	6.200	9.200	14.000
Perfluoropropano	C ₃ F ₈	2.600	4.800	7.000	10.100
Perfluorociclobutano	c-C ₄ F ₈	3.200	6.000	8.700	12.700
Perfluoropentano	C ₅ F ₁₂	4.100	5.100	7.500	11.000
Perfluorohexano	C ₆ F ₁₄	3.200	5.000	7.400	10.700

Fonte: IPCC, 1996

É importante notar na tabela que o metano (CH₄) emitido pela fermentação dos resíduos sólidos em locais para disposição final tem GWP bastante maior que o do CO₂.

II.6.1 AS EMISSÕES DOS RESÍDUOS SÓLIDOS:

De acordo com USEPA (1998), são quatro as principais formas de relação entre os resíduos sólidos urbanos – lixo – e o efeito estufa: **emissão de dióxido de carbono** decorrente do consumo de energia para extração e produção dos bens (incluindo a extração e processamento dos combustíveis a serem usados); **emissão de dióxido de carbono** oriunda do consumo não-energético de combustíveis no processo de produção dos bens; **emissão de metano** dos aterros sanitários em que os materiais acima e os restos de alimentos são depositados²³ e se decompõem; e **fixação de carbono** das parcelas dos materiais que não se decompõem nos aterros sanitários.

Os aterros sanitários em todo o mundo produzem cerca de 20 a 60 milhões de toneladas de metano por ano, resultado direto da decomposição orgânica dos componentes do lixo (Muylaert *et alli*, 2000), o que pode ser visto na tabela 5, a seguir. Ainda que cerca de dois terços destas emissões sejam de países desenvolvidos, a contribuição relativa dos países em desenvolvimento está mudando rapidamente e, devido às tendências de crescimento populacional e urbanização, bem como às necessidades de crescimento econômico, estes serão responsáveis por uma parcela cada vez maior das emissões de metano. Este trabalho ressalta que mesmo assim não haverá alteração nas emissões per capita, pois as dos países em desenvolvimento permanecerão por muitas décadas menores do que aquelas dos países desenvolvidos (*idem*).

²³ O CO₂ emitido pela fermentação do lixo não é contabilizado como GEE pelo IPCC, pois é oriundo de biomassa cultivada (alimentos e papel).

TABELA 5: Estimativas de Emissão de Metano de Aterros Sanitários.

País	Emissões Estimadas (Tg ²⁴ /ano) ⁽ⁱ⁾
E.U. ⁽ⁱⁱ⁾	8 – 12
U.K.	1 – 3
Brasil	0.7 – 2.2
Índia	0.2 – 0.8
Polônia	0.1 – 0.4
Outros	11 – 39
Total	21 – 57
(i) Baseado no Congresso Global de Emissões Antropogênicas de Metano (Muylaert <i>et alli</i> , 2000);	
(ii) Muylart <i>et alli</i> , 2000	

É importante considerar, ainda, as emissões vinculadas aos transportes dos materiais virgens e dos recicláveis, nas várias etapas do processo, uma vez que o balanço desse fator também deve ser analisado quanto ao potencial de mitigação.

Caso venham a ser aplicadas técnicas de gerenciamento diferentes da disposição integral da fração úmida dos resíduos sólidos urbanos, como as apresentadas nos itens anteriores, não haverá emissão de biogás (metano e dióxido de carbono) de fermentação. Isto se deve ao fato de que ao estar sendo usada como combustível, a combustão da biomassa cultivada emana apenas dióxido de carbono, o qual é totalmente absorvido durante o crescimento da próxima safra de vegetais ou na engorda da pecuária, configurando emissão nula.

Este fato acaba por reduzir, também, as emissões de dióxido de carbono decorrentes da combustão de derivados de fósseis, uma vez que são substituídos para gerar aquela quantidade de energia, cujo benefício depende do tipo de combustível a ser usado, de acordo com o planejamento do setor elétrico. No Brasil, a

expansão está prevista através de usinas termelétricas, a maioria abastecida por gás natural (GN), cuja combustão emitirá para a atmosfera 449 ton CO₂/GWh (LA ROVERE e AMERICANO, 1998), no caso do ciclo combinado, considerado o de melhor rendimento entre as formas de aproveitamento dos combustíveis fósseis. Apesar deste fator ser significativamente grande em relação às emissões da biomassa, quando comparado às emissões decorrentes do uso de óleo diesel em usina térmica a ciclo combinado, 607 t CO₂/GWh (PINGUELLI ROSA e SCHECHTMAN, 1996) e do uso de carvão mineral nacional em usina térmica em ciclo a vapor convencional, cuja emissão pode chegar a 1248 t CO₂/GWh (idem), revela que o gás natural é o mais limpo dos combustíveis não renováveis.

Como o metano (CH₄) tem potencial de aquecimento global²⁵ para 100 anos (GWP), definido pelo IPCC, 21 vezes maior que o dióxido de carbono, a simples queima do metano, mesmo sem o aproveitamento do calor gerado, reduz o seu impacto – em termos de aquecimento global. Se o metano for utilizado para a geração de energia em substituição ao combustível fóssil, esta redução de impacto será mais significativa, sendo possível a cada unidade elétrica gerada com resíduos (dependendo da rota escolhida) compensar a emissão decorrente de três a quinze unidades energéticas geradas com gás natural em ciclo combinado (OLIVEIRA e ROSA, 2003).

²⁴ Teragrama ou milhões de toneladas.

²⁵ Este valor é cientificamente errado, pois no seu cálculo não se leva em conta a resposta da atmosfera. O valor correto é menor mas encontra-se em discussão no IPCC.

II.6.2 EMISSÕES DO BIODIESEL

De acordo com o IPCC (1996), as emissões totais de GEE no ciclo de vida do biodiesel de óleo residual são aquelas geradas na coleta do óleo usado, no consumo de energia elétrica pela planta química, acrescidas das emissões que ocorrem na sua distribuição e na sua combustão.

Já no caso do biodiesel de óleos novos, a emissão será referente à utilização de fertilizantes nitrogenados, quando for o caso, do combustível utilizado para plantio, colheita e extração do óleo vegetal, transporte do mesmo até os pontos de abastecimento, combustão (quando utilizar álcool metílico de origem fóssil) e decomposição dos resíduos que venham a ser produzidos. Os insumos oriundos do extrativismo terão menor impacto no item cultivo mas, provavelmente, maior impacto no item transporte, dado que sua disponibilidade ocorre em áreas remotas.

Como o biodiesel é utilizado em substituição ao óleo diesel, o cenário de referência contemplará as emissões deste combustível fóssil, desde o processo de exploração até a combustão, passando pela energia consumida no refino e pelo transporte e distribuição.

II.6.3 CONVENÇÃO DO CLIMA E OS CRÉDITOS DE CARBONO

As mudanças no padrão de consumo permitidas à sociedade²⁶, desde a Revolução Industrial, levaram ao acúmulo de GEEs na atmosfera e RSU na superfície terrestre em quantidades sem precedentes. As consequências do efeito estufa deveriam levar a humanidade à discussão sobre padrões de consumo, principalmente sobre o modelo que tendem a buscar os países em desenvolvimento, haja vista que o “American way of life” (consumismo americano) não pode ser estendido para todos os seres humanos, pois a natureza não consegue ofertar, com as tecnologias disponíveis, suporte para toda a poluição e extrativismo acelerado oriundos deste “progresso” parcial. Este assunto foi suscitado por Rosa (1996), quando analisou a visão dos países em desenvolvimento quanto ao efeito estufa e a necessidade de crescimento econômico com base em suas potencialidades.

É importante notar a mudança de foco pelo consenso do problema da poluição global, que transforma todos os habitantes do planeta em vítimas potenciais do efeito estufa e, portanto, interessado em sua solução. Segundo o IPCC: “é fundamental que sejam adotadas medidas de âmbito mundial com o objetivo de reversão ou estabilização das taxas de concentração de GEE.”

Neste sentido, em 9 de maio de 1992, foi criada a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, na Organização das Nações Unidas. A UNFCCC²⁷ reconhece a mudança do clima como “uma preocupação comum da humanidade” e propõe uma estratégia global “para proteger o sistema climático para gerações presentes e futuras” e para estabilizar “as concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático.” (PNUMA, 1992).

²⁶ Principalmente a queima de combustíveis fósseis em quantidades crescentes; as queimadas e desmatamentos florestais, que fomentam o incremento de uso do solo para atividades produtivas (do ponto de vista financeiro); e a atual obsolescência planejada.

²⁷ United Nations Framework Convention on Climate Change.

O acordo estabelecido, nesta oportunidade, voltou-se à elaboração de inventários nacionais de emissões de gases do efeito estufa, com base no ano de 1990 e ao compromisso, pelos países desenvolvidos e as chamadas economias em transição (ex-URSS e leste europeu), de redução de 5% destes níveis a partir do ano 2000 (idem).

Em dezembro de 1997 em Kyoto, no Japão, na Terceira Conferência das Partes (COP 3), órgão supremo da Convenção, foi apresentada a proposta brasileira de criação de um Fundo para o Desenvolvimento Limpo. Foram sugeridos critérios para atribuição de responsabilidades históricas pelo aquecimento global e, com isso, mensurar as emissões máximas possíveis, cujo descumprimento seria atrelado a um sistema de multas, que geraria recursos para o Fundo destinar a projetos apresentados pelos países que cumprissem suas metas.

Apesar de não aceita, esta proposta deu origem ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM, da sigla em inglês), um dos quatro instrumentos econômicos de flexibilização criados pelo Protocolo de Kyoto. Os países responsáveis pela maioria das emissões históricas passaram a integrar um documento conhecido por Anexo I do Protocolo, para os quais foi estipulada a meta de redução, entre os anos de 2008 e 2012, 5% em média das emissão de GEE em relação aos níveis de 1990. Desta forma, o Protocolo busca obter uma reversão da tendência histórica de crescimento das emissões antrópicas de GEE na atmosfera, de acordo com o objetivo final da UNFCCC, sendo o CDM o único aplicável entre integrantes do Anexo I e Não-Anexo I (os países em desenvolvimento).

Este Protocolo não foi regulamentado em novembro de 2000, na COP 6, em reunião na Haia, na Holanda, nem mesmo nas COPs 7, em Marrakesch, no Marrocos, 8, em Nova Dehli, na Índia e 9, em Milão, na Itália, em 2003. O governo dos Estados Unidos, após a vitória de George W. Bush, negou-se a ratificar o protocolo alegando que não existe comprovação das causas do fenômeno serem antropogências. De

qualquer forma, atualmente só falta o ingresso de um país para que o protocolo passe a ser aplicável. A previsão é de que entre a COP 10, em Buenos Aires, na Argentina, em 2004 e a COP 11, provavelmente em Moscou, na Rússia, seja obtida a adesão necessária, sendo a Rússia a principal candidata a permitir o início da vigência do compromisso internacional.

Este acordo tem o intuito de que os compromissos firmados possam ser atingidos através dos menores custos marginais de abatimento – fato normal nos países não-anexo I – simultaneamente ao fomento do desenvolvimento sustentável nestas nações. É preciso que seja construído um consenso internacional para que estes recursos não sofram com os desperdícios históricos, ou com as destinações benevolentes de alguns negociadores.

Mas, para as empresas norte-americanas, o interesse do governo em não cumprir metas de redução nas emissões não é incompatível com as oportunidades de negócios que os créditos de carbono representam, o que é demonstrado pela criação da Bolsa de Carbono de Chicago (CCX, 2004). Nesta instituição tem sido comercializados créditos de projetos de redução de emissões em diversos países, tanto com empresas americanas quanto de outras nacionalidades. Os preços pagos pela unidade convencionada (tonelada de dióxido de carbono equivalente) são os menores dentre as negociações divulgadas, cerca de US\$ 0,90 contra US\$ 5 do fundo holandês (CERUPT, 2004) e até US\$ 10 de ONGs internacionais, mas que adquirem apenas pequenas quantidades. Apesar da diferença de preços, a CCX requer menor quantidade de garantias que os outros compradores em exercício.

Por outro lado, a Comunidade Européia estabeleceu um protocolo próprio que começará a vigorar em janeiro de 2005, no qual esta definida uma multa de US\$ 40 por tonelada de dióxido de carbono equivalente para os países que não cumprirem suas metas. Como este protocolo também permite a aquisição de créditos em outros

países, similar ao MDL, o mercado internacional tende a contar com preços mais elevados que os ofertados pela CCX. (DUBEUX, 2004)

Desta forma, percebe-se que a poluição global causada pela emissão de gases de efeito estufa tornou-se uma grande preocupação da humanidade, levando a que todas as políticas para reduzi-las sejam muito bem vindas, como as que enfocam o CO₂ e CH₄ (decorrente da fermentação do lixo) ou N₂O (oriundo da combustão dos combustíveis e do lixo) provenientes do ciclo de vida dos bens encontrados no lixo.

É preciso considerar que as ações pós-consumo, para reduzir os efeitos deletérios dos resíduos, afetam muito pouco aos interesses estabelecidos do sistema econômico (exceto do setor extrativista), sendo possível contar com seu apoio, ao contrário da profunda discussão sobre mudança nos padrões de consumo, a qual provavelmente sofrerá retaliações e terá dificuldades para ser implantada, embora certamente deva ser tida como meta.

Portanto, o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos é capaz de permitir uma significativa redução de emissões sem requerer mudanças estruturais nos padrões de consumo da população, o que pode gerar recursos advindos da Bolsa de carbono.

CAPÍTULO III – APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS: IMPACTOS AMBIENTAIS, ECONOMICIDADE, POTENCIAL E BARREIRAS

III.1. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (LIXO)

III.1.1 IDENTIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DAS TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

A decomposição anaeróbica do lixo produz uma mistura de gases composta basicamente por dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4). Como o metano é de 20 a 50 vezes (depende do período adotado)²⁸ mais impactante do que o CO_2 em termos de aquecimento global, e sua combustão produz este gás, tem sido incentivada em diversos países esta atividade, preferencialmente consorciada ao aproveitamento energético. As demais alternativas apresentadas reduzem a emissão de metano nos aterros em virtude de evitarem o encaminhamento de resíduos para os aterros.

Quando é realizado o aproveitamento energético dos resíduos, está sendo deslocada outra fonte de energia. Como não existe nenhum país independente dos combustíveis fósseis na geração da energia, a parcela deslocada evitará o consumo de combustíveis fósseis e, assim, de emissões de gases do efeito estufa. Esta emissão evitada de dióxido de carbono oriundo da queima de combustíveis fósseis que foram substituídos pelo lixo na geração de energia deve ser somada à mitigação do metano.

III.1.1.1 IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA DO GÁS DE LIXO

Segundo Rosa et al (2003), o GDL contém compostos orgânicos voláteis, principais contribuintes para a depleção da camada de ozônio, e incluem ainda poluentes tóxicos, os quais são lenta e continuamente lançados à atmosfera como produto da decomposição do lixo. Quando o GDL é coletado e queimado em um sistema de geração de energia, estes compostos são destruídos, evitando o conseqüente dano ambiental.

Regulações governamentais existentes em países industrializados, como nos Estados Unidos e no Reino Unido, exigem que os aterros sanitários colem suas emissões de GDL²⁸. A tendência é que estas e novas restrições sejam implantadas, tanto nos países desenvolvidos, quanto nos em desenvolvimento. Uma vez que o GDL seja coletado, o proprietário/operador do GDL tem duas opções de escolha: (1) queimar o gás em *flares*, ou (2) produzir energia para uso próprio ou para venda.

III.1.1.2 IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA DE INCINERAÇÃO CONTROLADA DE LIXO

No processo de incineração os gases e substâncias, formados durante a combustão, são purificados antes de serem lançados na atmosfera, obedecendo a rigorosas normas de proteção ambiental.

Os óxidos nitrogenados (NO_x) e o monóxido de carbono (CO) são produzidos em qualquer combustão. Através de um controle da queima e de um sistema de tratamento dos gases que saem das câmaras de combustão é possível reduzir essas emissões a valores tecnicamente toleráveis (Rosa et al., 2003).

²⁸ Deve-se observar que esta afirmação ainda depende de estudos definitivos do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), órgão de apoio científico às Nações Unidas para o assunto Mudanças Climáticas Globais, sobre o GWP (Global Warming Potential).

²⁹ No Brasil existe esta obrigação legal, mas a mesma não é cumprida e a fiscalização de órgãos ambientais não autua os aterros que não cumprem a Lei.

Deve-se avaliar também a questão de formação de dioxinas e furanos devidos ao processo de incineração. As altas temperaturas de queima quebram as ligações químicas, atomizando macromoléculas e praticamente anulando a possibilidade de formação de dioxinas e furanos. Utiliza-se adicionalmente, carvão ativado em leitos pós-combustão que adsorvem eficientemente qualquer resquício de dioxinas e furanos, bem como de metais voláteis. Com a utilização de duas câmaras de combustão, funcionando adequadamente, e com o rápido resfriamento dos gases de combustão, atingem-se níveis de dioxinas abaixo do mais rígido padrão estabelecido internacionalmente. (idem).

Nos últimos 10 anos, as modernas usinas termelétricas a lixo ampliaram seus índices de eficiência, particularmente na remoção de duas classes de poluentes: os metais e as dioxinas e furanos. Nos EUA, em 1987, os incineradores eram responsáveis pela geração de 82% das dioxinas no país (ARANDA *et alli*, 2001). Em 2002, esse número caiu para apenas 3%, sem que o total de emissões tenha aumentado significativamente. Na Grã-Bretanha, por exemplo, estudos do Departamento de Saúde mostram que, entre 1990 e 2000, as emissões de chumbo caíram 97% e as de dioxinas caíram 99%. Nos últimos 4 anos, diversas usinas de incineração de lixo inglesas, como a de Edmonton (Londres), emitiram, em média, 0,04 nanogramas/m³ de dioxinas (mais de 3 vezes abaixo do que é exigido pelos limites brasileiros). (Ibidem).

III.1.1.3 IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA DRANCO

Esta tecnologia faz a separação da parte orgânica, da inorgânica reciclável e dos plásticos e madeiras para a formação dos briquetes. Nota-se que a queima tanto dos briquetes como de toda a fase orgânica geram praticamente os mesmos efluentes gasosos que uma incineração (CO, CO₂, NO_x, vapor d'água, material particulado, SO_x, HCl, entre outras substâncias em menores proporções como dioxinas e furanos),

diferenciando-se apenas as proporções de cada tipo de substância. Isto demonstra que esta tecnologia necessita cuidados similares aos adotados pela incineração.

III.1.1.4 IMPACTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA BEM

A queima da celulignina (fração seca obtida no processo de pré-hidrólise ácida) ocorre como a queima de qualquer composto de origem carbônica, gera dióxido de carbono, porém ainda não existe um estudo detalhado desta combustão. A produção de furfural, caso não tenha aplicação prevista, passa a ser um inconveniente para esta tecnologia, pois pode causar problemas ambientais quanto à sua disposição. Os danos ambientais que o descarte deste efluente possa vir a causar ainda precisam ser estudados com mais detalhamento. (Rosa et al., 2003).

III.1.1.5 COMENTÁRIOS ACERCA DOS IMPACTOS AMBIENTAIS DAS QUATRO TECNOLOGIAS

Mesmo com os impactos ambientais não inviabilizando a utilização destas tecnologias, uma vez que suas emissões atendem aos padrões estabelecidos, cabe ressaltar que há impacto ambiental e, se a área na qual for instalado um empreendimento não estivesse sendo utilizada para disposição de resíduos (lixão, aterro controlado, etc), haverá redução da qualidade de vida em seu entorno. Entretanto, esta opção mostra-se como a menos prejudicial no aspecto intergeracional, pois não transfere para nossos descendentes as soluções dos diversos problemas atuais causados pelos resíduos.

III.1.2 AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA DAS TECNOLOGIAS

Os parâmetros de aproveitamento energético de cada tecnologia e seus respectivos custos, de acordo com Oliveira e Rosa (2003), estão apresentados na tabela 6, abaixo.

TABELA 6 - Parâmetros das Tecnologias

	GÁS DO LIXO	INCINERAÇÃO	DRANCO	BEM
Toneladas/dia	300	500	200	1.250
Módulo (MW)	3	16	3	25
Vida Útil (anos)	15	30	30	30
Prazo de Instalação (Meses)	12	18	9	18
Investimento (US\$/kW)	1.000	1.563	1.500	840
Custo de Combustível (US\$/MWh)*	0	-8.18	-10.66	-1.30
Custo de Operação e Manutenção (US\$/MWh)	7.13	7.67	10.70	5.99
Custo de Transmissão	0	0	0	0
Índice Custo Benefício (US\$/MWh)**	46.34	43.61	45.70	29.09

FONTES: OLIVEIRA e ROSA, 2003

* Refere-se ao custo evitado de disposição final de lixo.

** Investimento diluído pela vida útil da planta com taxa de desconto de 20%, somado aos Custos de Combustível, de Operação e Manutenção e de Transmissão, sem impostos.

Como os custos destas tecnologias são próximos aos do aproveitamento do gás natural em usinas de ciclo combinado, US\$ 43,32/MWh (La Rovere et al, 2001), deve ser calculado o potencial nacional a partir destes materiais e a existência de outras fontes de receita que permitam reduzir os custos desta eletricidade para os consumidores, com vistas a identificar se deve ser incentivada através de uma política pública exclusiva.

III.1.3 POTENCIAL DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RSU NO BRASIL

Comparando-se os resultados das duas Pesquisas Nacionais de Saneamento Básico (PNSB) realizadas, em 1989 e 2000, é possível verificar que a gestão dos resíduos urbanos no Brasil ainda é ineficaz, apesar de ter melhorado.

A disposição de resíduos sólidos a céu aberto no país chegava a 75% em 1989³⁰ (IBGE, 1989), tendo passado para 21% em 2000 (IBGE, 2000). A produção per capita passou de 1,05 kg/dia para cerca de 2 kg/dia, para os habitantes das grandes cidades, enquanto os habitantes das pequenas cidades tiveram um aumento na faixa de 50% sobre o 0,5 kg/dia de 1989, totalizando 45 milhões de toneladas anuais (IBGE, 2000).

Os parâmetros de aproveitamento energético de cada tecnologia e os custos, vistos nas tabelas anteriores, aplicados ao total nacional de lixo permitem estimar o potencial energético desta fonte, compará-la ao consumo nacional e aos custos das fontes alternativas, dados apresentados na tabela 7, a seguir. É possível consorciar a recuperação de gás do lixo, nos aterros existentes, à reciclagem e a cada uma das outras três tecnologias. Aliás, a reciclagem requer 1 milhão de trabalhadores no sistema de triagem, sobretudo pessoal de baixa qualificação profissional (MDIC, 1998), além de dispor do potencial de ofertar 55 TWh³¹ anuais de eletricidade.

O potencial estimado por OLIVEIRA e ROSA (2003) para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos, no Brasil, foi de 50 TWh, estimando a produção de lixo em 20 milhões de toneladas anuais com base em dados de 1989, da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE. A atualização desta pesquisa, em 2000, quando foi divulgada a produção de 45 milhões de toneladas anuais, elevou este potencial para 120 TWh, cerca de 36% da oferta atual de eletricidade. Este

³⁰ A 1ª Pesquisa Nacional de Saneamento Básico foi realizada pelo IBGE em 1989 e a 2ª em 2000. A última pesquisa foi disponibilizada em maio de 2002.

cálculo considerou 55 TWh referentes à conservação possível com a reciclagem máxima de papéis, plásticos, vidros e metais³², 52 TWh decorrentes da geração termelétrica utilizando, integralmente, a fração “não-reciclável” – restos alimentares, resíduos de poda de árvores e de varrição das vias públicas – através da tecnologia de melhor aproveitamento dentre as disponíveis, além de 13 TWh oriundos do reaproveitamento do biogás presente nos vazadouros de lixo existentes.

TABELA 7 - POTENCIAL DE OFERTA DE ENERGIA DAS TECNOLOGIAS

	GDL	INCINERAÇÃO	DRANCO	BEM
Reciclagem+GDL+ cada alternativa (TWh/a)	68 (55 + 13)	120 (55+13+55)	85 (55+13+17)	92 (55+13+24)
Percentual do Consumo Nacional (%)*	20	36	26	28

Fonte: Elaboração Própria a partir de ROSA et al (2003).

* Consumo Nacional: 330 TWh/ano (BEN, 2003)

A tabela anterior mostra que o potencial de aproveitamento energético do lixo, quando consorciadas as tecnologias, supera 20% do consumo nacional, o que representa 65% da Usina Hidrelétrica de Itaipu, a maior do mundo com cerca de 90TWh anuais de eletricidade fornecida. Quando integrada qualquer das demais tecnologias, praticamente iguala a energia disponibilizada por esta usina.

Este aproveitamento energético evita a decomposição espontânea da matéria orgânica, processo que emite gases responsáveis pelo efeito estufa, na fração de

³¹ Segundo o IPT, 35% do lixo é formado por recicláveis, portanto 15,7 milhões de toneladas. Com a média de conservação de eletricidade de 3,5 MWh/t de reciclável (OLIVEIRA, 2000), o potencial nacional é de 55 TWh/ano.

³² Este cálculo está detalhado no item sobre Potencial de Energia Elétrica a partir de RSU no Brasil, na página 53.

6,5% de metano em peso do lixo disposto³³. Congregando isto ao fato de estar sendo iniciado um mercado internacional para comercializar estas emissões evitadas, é possível obter receitas adicionais, variando entre US\$ 1/t CO₂ equivalente³⁴, de acordo com a Bolsa de Carbono de Chicago (CCX, 2004), e US\$ 5/t CO₂ equivalente, preço máximo proposto por edital do governo holandês (CERUPT, 2002). Os valores adicionais possíveis para as tecnologias de aproveitamento energético de lixo estão mostradas na tabela 8, a seguir:

TABELA 8 – Potencial de Créditos de Carbono e efeito no Índice Custo-Benefício

	GDL	INCINERAÇÃO	DRANCO	BEM
Emissão evitada pelo consumo do lixo (t CO ₂ eq/MWh)	5,41	1,50	3,61	0,55*
Receita Adicional (US\$ 1/t CO ₂ eq)	5,41	1,50	3,61	0,55
INDICE CUSTO BENEFICIO Final com Receita Adicional de US\$ 1/t CO ₂ eq (US\$/MWh)	40,93	42,11	42,09	28,54
Receita Adicional (US\$ 5/ t CO ₂ eq)	27,05	7,50	18,05	2,75
INDICE CUSTO BENEFICIO Final com Receita Adicional de US\$ 5/t CO ₂ eq (US\$/MWh)	19,29	36,11	27,65	26,34

Fonte: Elaboração Própria.

* Considerando somente aproveitamento de 20% da matéria disponível (restrição da tecnologia)

Fica comprovado na tabela anterior que mesmo o menor valor, US\$ 1/t CO₂ eq, já é suficiente para tornar todas as tecnologias mais baratas que a geração elétrica

³³ Aplicação do COD e do fator de disposição ao cálculo do IPCC. O COD (Carbono Organicamente Degradado) foi obtido a partir da composição média do lixo brasileiro (COD = 0,16). O tipo de disposição final (70% aterros e 30% lixões, de acordo com a PNSB de 2000), gerou fator 0,8.

com gás natural em ciclo combinado, mesmo sem considerar a comercialização de outros produtos, como o composto orgânico (adubo) ou os sais minerais.

III.1.4 IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS ATUAIS À PENETRAÇÃO DA TECNOLOGIA

Como estas tecnologias ainda não foram implantadas no Brasil, mesmo face a tantos benefícios comprovados no exterior (BIOCYCLE, 1999), (EPA, 2002), (EUROPE, 2002), (UK, 2002), torna-se inevitável abordar as barreiras à sua penetração. Uma das principais é a falta de uma política para viabilização deste tipo de aproveitamento energético no país, causada, em parte, pela falta de difusão de informações sobre as tecnologias acima descritas.

Nesta política pública é imprescindível que os benefícios sociais e ambientais sejam avaliados, pois os custos do desemprego e da poluição refletem-se nas atratividades dos negócios futuros e no próprio custo Brasil. Assim, faz-se necessária a utilização de uma metodologia de análise mais abrangente que o tradicional Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE).

Cabe ressaltar as usinas termelétricas movidas a resíduos, ainda somente disponíveis no exterior, as quais utilizam três rotas tecnológicas consolidadas (biogás de aterro, digestão acelerada e incineração) e comprovam a viabilidade destes empreendimentos. As diferenças marcantes entre a realidade dos países onde estas usinas estão funcionando e o Brasil são os custos de disposição final de lixo e a inexistência de metas de redução de emissão de gases do efeito estufa ao Brasil. Os custos, que são superiores no exterior, facilitando a viabilidade destes

³⁴ A equivalência entre os gases é calculada com base em seu potencial de aquecimento global, tendo sido adotado o dióxido de carbono (CO₂) como unidade.

empreendimentos, decorrem de uma situação de imperfeição no mercado brasileiro³⁵ que tende a ser resolvida mediante o aumento dos custos. A inexistência de metas de emissões caracteriza-se como outra fonte de receita para estes empreendimentos, capaz de complementar o que for obtido com a comercialização da energia elétrica.

Incorporando-se à solução deste entrave a aplicação das experiências técnicas e operacionais obtidas através do Programa de Priorização de Termelétricas (PPT) e do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), as alternativas de financiamento possibilitadas pelo projeto de Parceria Público-Privada (PPP) e o marco regulatório do setor de saneamento, ambos em votação no Congresso Nacional, torna-se possível viabilizar o aproveitamento energético dos resíduos mesmo sem repetir diretamente os mecanismos de incentivo existentes em diversos países (Rosa et al, 2003).

Numa experiência pioneira no decorrer do ano de 2003, as Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRAS) iniciaram o Programa de BIOELETRICIDADE, o qual visa a utilização de biomassa para geração elétrica, mas também contempla a conservação de energia que esteja, por ventura, associada. Duas linhas de atuação foram identificadas como prioritárias: (i) substituir por biodiesel o óleo diesel utilizado como combustível nos geradores de aproximadamente 300 sistemas isolados na região amazônica e (ii) realizar o aproveitamento energético de resíduos urbanos nas cidades do país, sempre atendendo aos requisitos técnicos.

³⁵ As áreas utilizadas para disposição de lixo deixam de ser úteis para outros fins e, via de regra, os custos de remediação não são cobrados diretamente dos usuários dos vazadouros, mas rateados com toda a população através de taxas.

III.2 – BIODIESEL³⁶

III.2.1 EVOLUÇÃO DO MERCADO E A TECNOLOGIA DE BIODIESEL NO MUNDO

O histórico da busca por sucedâneos oriundos da biomassa aos combustíveis fósseis, para uso em motores de combustão interna sem faísca, inicia-se com o uso de óleos vegetais ainda puros em fins do século XIX, quando o engenheiro Rodolphe Diesel testou seu primeiro motor, com eficiência da ordem de 26%, em 1900, com óleo de amendoim.

A dedicação da indústria do petróleo ao processo de otimização deste motor, para o qual foi criado um derivado específico, o óleo Diesel, até então não existente, que permitiu o aumento de eficiência do motor de combustão interna por compressão e dificultou a utilização dos óleos vegetais, devido principalmente aos depósitos de carbono e resíduos gordurosos, impossibilitou, até o momento, o sonho do inventor expresso em 1911:

“O motor Diesel pode ser alimentado com óleos vegetais e poderá ajudar consideravelmente os desenvolvimento de agricultura nos países onde ele funcionar. Isto parece um sonho do futuro, mas eu posso predizer com inteira convicção que esse modo de emprego do motor Diesel pode, num dado tempo, adquirir uma grande importância.” (ELETROBRAS, 2003).

Apesar das pesquisas que ocorreram durante a primeira metade do século XX, somente com os “Choques do Petróleo”, na década de 1970, foi possível o desenvolvimento de testes químicos e mecânicos profundos, os quais apontaram a viabilidade do aproveitamento de um combustível oriundo da biomassa para utilização

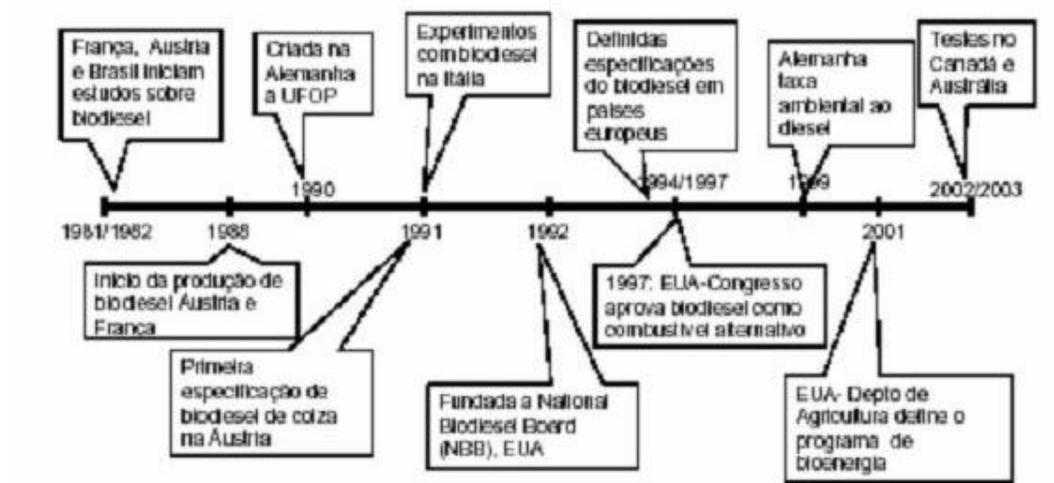
³⁶ Grande parte deste material foi retirado de publicação conjunta do autor com os professores Luiz Pinguelli Rosa e Donato Alexandre Gomes Aranda, e com os pesquisadores Rachel Henriques Martins, Ângela Oliveira da Costa, Cícero Augusto Prudêncio Pimenteira e Laura Bedeschi Rego de Mattos (ROSA et al., 2003).

em motores de combustão interna por compressão (os motores ciclo Diesel), o biodiesel (Rosa et al, 2003).

Mas o “Contra-Choque do Petróleo”, em 1986, conduziu a uma acentuada queda do preço do petróleo no mercado internacional, e à manutenção desse preço em patamares impensáveis no início daquela década, o que inviabilizou a transferência da tecnologia desenvolvida para o setor industrial.

Entretanto, o petróleo passou a ter variações de preços em virtude de questões geopolíticas, como a Guerra do Golfo, em 1991, a alta dos preços no mercado internacional, no início de 2000, e as guerras do Afeganistão e Iraque, em 2002 e 2003, além do atentado a Madri, em 2004. Percebe-se que o tempo entre os eventos vem diminuindo e que as bruscas variações dos preços, decorrentes deste processo, tem afetado a economia internacional a ponto de estimularem pesquisas sobre fontes alternativas, as quais deram origem a experiências exitosas, como a alemã, onde mais de cem mil veículos utilizam biodiesel puro há mais de cinco anos. A figura 8, abaixo, apresenta alguns dos marcos no desenvolvimento internacional do biodiesel.

Marcos no desenvolvimento do Biodiesel



Fonte: Fundação Getúlio Vargas, 2003.

FIGURA 8 – MARCOS POSTERIORES AOS CHOQUES DO PETRÓLEO

Na União Européia utiliza-se principalmente a oleaginosa colza³⁷ para produzir o éster metílico. Em menor grau, utiliza-se também semente de girassol, o que encarece o processo, já que é necessário um processo especial de extração prévia da cera do óleo de semente de girassol. Até agora, nenhuma outra planta oleaginosa alcançou importância na produção de biodiesel na Europa.

Os fabricantes europeus de motores apóiam a mistura de 5% de biodiesel ao diesel mineral. A garantia para o uso da mistura de até 30% é oferecida por muitos fabricantes, sendo que na Alemanha a garantia é oferecida para o uso do biodiesel puro: VW, Audi, Seat, Skoda, PSA, Mercedes, Caterpillar e Man garantem alguns modelos³⁸.

³⁷ Variedade de couve comestível (*Brassica campestris*) que no inverno serve de forragem, e cuja semente fornece óleo.

³⁸ Informação do PROBIODIESEL - Rede Brasileira de Biodiesel - Programa Brasileiro de Biocombustíveis, Secretaria de Política Tecnologia Empresarial. Ministério da Ciência e Tecnologia, 2002.

A figura 9, abaixo, mostra a produção mundial de biodiesel, a qual cresceu 16 vezes em 10 anos, entre 1992 e 2002. Considerando-se que este total representa menos que 1% do consumo mundial de óleo diesel (750 bilhões de litros).

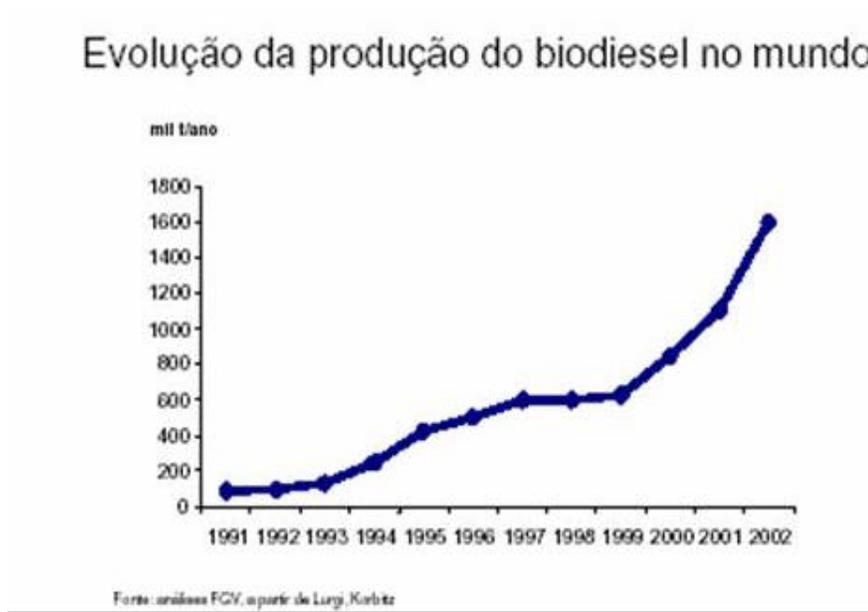


FIGURA 9 – PRODUÇÃO MUNDIAL DE BODIESEL

O Programa Alemão de Biodiesel começou com uma frota de táxis que utilizou o novo combustível produzido de colza, que é plantada no final do inverno e colhida no final da primavera. As terras para o cultivo do trigo são naturalmente nitrogenadas pela colza, havendo a produção concomitante de farelo para ração animal. A meta na Alemanha é substituir até 2010, 5% do diesel mineral por biodiesel.

Na França, metade das refinarias de petróleo em funcionamento misturam 5% de biodiesel ao diesel mineral. Além disso, todos os ônibus urbanos utilizam a mistura diesel/biodiesel em uma faixa de 5 a 30%. Na França e na Suécia, o biodiesel já vem sendo usado há muito tempo para melhorar a baixa capacidade lubrificante do combustível diesel com baixo teor de enxofre.

A figura 10 mostra os principais produtores mundiais de biodiesel, assim como os insumos mais utilizados.

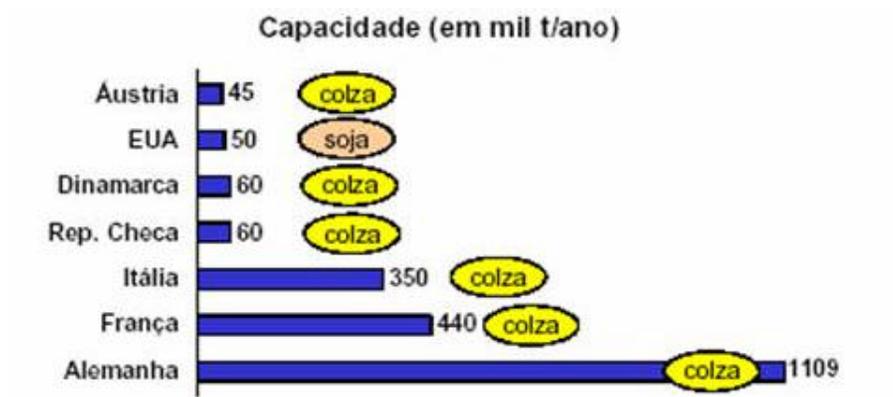


FIGURA 10 - PRINCIPAIS PRODUTORES MUNDIAIS DE BIODIESEL EM 2002 – QUANTIDADE E INSUMO

III.2.2 EVOLUÇÃO TECNOLÓGICA DO SETOR NO BRASIL

Segundo Rosa et al. (2003), a questão do uso energético de óleos vegetais, no Brasil, começou a ser discutida pelo governo federal em 1975, sob a coordenação do Ministério da Agricultura, dando origem ao “Proóleo - Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos”.

O objetivo de gerar um excedente significativo de óleo vegetal capaz de tornar seus custos de produção competitivos com os do óleo mineral, foi impossibilitado pelo “contra-choque” de 1986. Ainda assim, os testes realizados com veículos de diversos fabricantes engajados ao Proóleo, suplantaram um milhão de quilômetros rodados, sendo os resultados plenamente positivos. Para tanto, foram consumidos mais de 300.000 litros de biodiesel, produzidos principalmente com óleo de soja e metanol.

No Brasil há diversas experiências sobre o uso de biodiesel, oriundo de óleos novos e usados, tanto puros quanto misturados ao óleo diesel. Entretanto, só em 2003 o órgão regulador do setor, a Agência Nacional de Petróleo (ANP), publicou a

Resolução n° 255, que versa sobre as especificações para que o biodiesel possa ser utilizado.

III.2.3 POTENCIAL

O potencial de oferta das matérias-primas novas depende da área plantada e da produtividade típica de cada oleaginosa. Considerando o extremo de utilizar todos os 90 milhões de hectares agricultáveis ociosos e os 50 milhões de hectares desmatados na “borda” da floresta amazônica (EMBRAPA, 2002), plantando somente dendê, o Brasil teria condição de produzir 840 bilhões de litros anuais de biodiesel, suficientes para substituir todo o óleo diesel atualmente consumido no planeta, 730 bilhões de litros anuais (IEA, 2004).

Ainda que não seja viável, tanto pela irracionalidade da monocultura, quanto pela dependência de um único mercado de escoamento, apenas o aproveitamento da área desmatada com dendê representa 30% do mercado mundial de diesel e demanda cerca de 7,5 milhões de trabalhadores, a maioria com baixa qualificação profissional. Entretanto, este insumo demora 4 anos para disponibilizar a primeira colheita, enquanto as oleaginosas que disponibilizam insumo em menos tempo, cerca de seis meses, produzem apenas 20% do que produz o dendê. Ademais, os custos de produção ainda precisam ser otimizados para reproduzir os ganhos do setor energético e o atual de óleos vegetais.

De qualquer maneira, este potencial exige que o Brasil defina qual papel quer desempenhar neste mercado internacional em criação.

Para disponibilidade imediata e a custos competitivos existe a opção dos resíduos, os quais não contam com escala de produção tão significativa. A soma entre os óleos de fritura disponíveis nas cozinhas industriais, os ácidos graxos encontrados nas indústrias químicas e as gorduras animais encontra-se na faixa de 300 milhões de litros anuais, conjuntamente.

A partir do domínio da reação de esterificação foi possível utilizar insumos mais baratos, como a gordura presente no esgoto sanitário, cuja média de produção diária por pessoa é de 200 litros de esgoto, onde há 160 gramas de sólidos flutuantes (escuma), dos quais 10% é gordura. Assim, nos 200 L, há 16 g de gordura (JORDÃO, 1999) e cerca de 150 g de material sólido (PDBG, 2003). Assim, a aplicação desta tecnologia³⁹ pode disponibilizar imediatamente 200 milhões de litros de biodiesel por ano, ainda que o potencial nacional desta fonte atinja 2.700 toneladas diárias, ou cerca de 1 bilhão de litros por ano, para 170 milhões de habitantes, uma vez que somente 20% das pessoas tem coleta de esgoto sanitário (PNSB, 2000).

A figura 11, a seguir, mostra o processo de obtenção da escuma, da qual será extraída a gordura, nas ETEs com tratamento primário, as etapas de processamento do biodiesel com este insumo.

³⁹ Patente da COPPE.



FIGURA 17 – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

A figura 18, a seguir, mostra a repercussão desta tecnologia perante alguns importantes órgãos de pesquisa do Brasil.

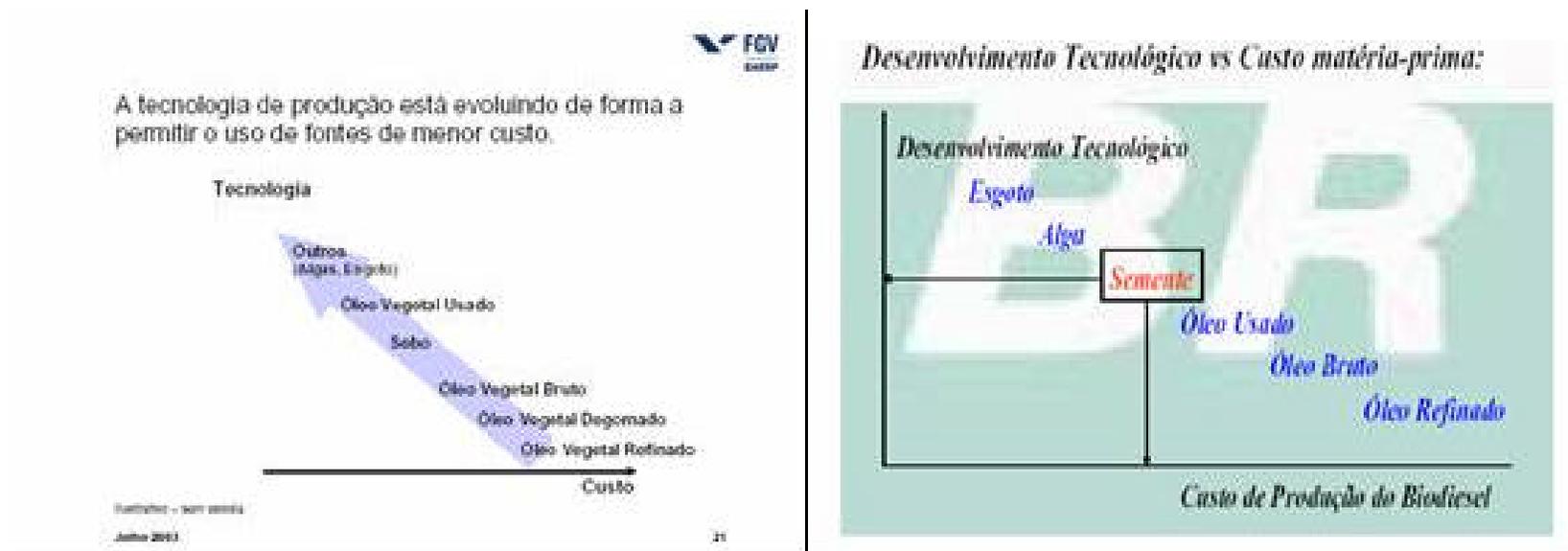


FIGURA 11 - DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO EM BODIESEL PARA FGV e CENPES

III.2.4 ANALISE ECONÔMICA

Rosa et al. (2003) aplicaram os custos dos insumos e o investimento na transesterificação, disponíveis na tabela 9 abaixo, a metodologia de Índice Custo Benefício, também aplicada no caso dos resíduos sólidos urbanos, e obtiveram os resultados apresentados na tabela 9. Como não haviam dados sobre o processo de esterificação, estes foram identificados e apresentados na tabela 10, para serem aplicados a mesma metodologia e os resultados constarem da tabela 11.

TABELA 9: Custos de Produção

PLANTA DE TRANSESTERIFICAÇÃO DE 40.000 t/ano

Investimento Inicial	US\$ 2.000.000,00
Hidróxido de Potássio	R\$18.700,00/ton
Metanol ⁴⁰	US\$175,00/m ³
Óleo de Soja degomado	R\$ 950,00/ton
Óleo de Babaçu	R\$1.200,00/ton
Óleo de Fritura	R\$ 380,00/ton
Óleo de Mamona	R\$ 2.075,00/ton
Sebo Bovino	R\$ 520,00/ton

Fonte: Elaboração própria a partir de preços no mercado nacional (2003).

⁴⁰ Foi utilizado o metanol fóssil como referência por ser a rota desenvolvida internacionalmente, por ser mais barato e mais reativo que o etanol, ainda que a capacidade de oferta do setor seja cerca de 30 vezes menor que a do etanol, o que demandaria importações ou ampliação de produção com gás natural importado, ou uso de biogás, como faz a Alcohol Solutions, nos Estados Unidos.

TABELA 10: Custos de Produção

PLANTA DE ESTERIFICAÇÃO DE 40.000 t/ano

Investimento Inicial	US\$ 3.000.000,00
Ácido Sulfúrico	R\$ 24.000,00/t
Solvente	R\$ 7.000,00/m ³
Metanol	US\$ 175,00/m ³
Escuma	- R\$ 5,00/t
Ácidos Graxos	R\$ 240,00/ton

Fonte: Elaboração própria a partir de preços de mercado (2003)

Nota: A produção com ácidos graxos dispensa o solvente.

A aplicação dos dados da tabela acima, à metodologia ⁴¹ permite obter os custos do biodiesel gerado por cada insumo, que estão apresentados na tabela 9.

⁴¹ O trabalho realizado por Rosa et al (2003) apresenta a metodologia de ICB e aplica os dados de transesterificação. Os dados de esterificação foram aplicados para este trabalho.

TABELA 11: Índice Custo-Benefício do Biodiesel com os Insumos Escolhidos.

	Índice Custo Benefício (R\$/Litro), com taxa de desconto de 20% ao ano, sem impostos.
Óleo de Soja	1,137
Óleo de Mamona	2,414
Óleo de Fritura	0,486
Sebo Bovino	0,646
Óleo de Babaçu	1,401
Ácidos Graxos	0,341
Escuma	0,216

Fonte: Elaboração Própria.

Comparando com o custo de realização do óleo diesel (preço de venda das refinarias), de R\$ 0,75/L, só os biodieseis de insumos residuais são viáveis.

Repetindo a análise realizada no caso dos resíduos sobre a comercialização de créditos de carbono, Rosa et al. (2003) calcularam a emissão evitada pela utilização do biodiesel em substituição ao óleo diesel, e aplicaram estes montantes aos valores monetários pelos quais os créditos de carbono estão sendo cotados no mercado internacional.

Emissões evitadas pelo biodiesel de insumos novos: 2600 gCO₂/L

Emissões evitadas pelo biodiesel de insumos usados: 4232 gCO₂/L

Considerando-se que cada tonelada de dióxido de carbono negociada no mercado internacional esteja variando entre US\$ 1 (CCX, 2004) e US\$ 5 (CERUPT,

2002), pode-se acrescentar uma redução no custo de cada unidade energética gerada, por cada rota tecnológica, como mostra a tabela 12.

TABELA 12: Receita Potencial com o Carbono Evitado (R\$/L) por Insumo:

	Novo	Residual
Considerando US\$ 1/ t CO ₂	0,0081	0,0126
Considerando US\$ 5/ t CO ₂	0,0308	0,0636

A tabela 13, a seguir, mostra o efeito dos recursos provenientes da comercialização das emissões evitadas de carbono no custo do biodiesel.

TABELA 13: Custos do Biodiesel considerando R eceita do Carbono

	Índice Custo Benefício (R\$/L), com taxa de desconto de 20% ao ano, sem impostos, descontada a receita com créditos de carbono.	
	US\$ 1/t CO ₂	US\$ 5/t CO ₂
Óleo de Soja	1,1289	1,1062
Óleo de Mamona	2,4059	2,3832
Óleo de Fritura	0,4734	0,4224
Sebo Bovino	0,6334	0,5824
Óleo de Babaçu	1,3929	1,3702
Ácidos Graxos	0,3284	0,2774
Escuma	0,2034	0,1524

Convém comparar estes valores com os custos da venda do óleo diesel mineral nas refinarias, os quais apresentam-se na faixa de R\$ 0,75/L. Isto permite comprovar

que mesmo com a comercialização da tonelada do carbono equivalente a US\$ 5, o biodiesel produzido com óleos novos é mais caro que o óleo diesel mineral.

Sobre os insumos residuais, apesar da oferta ser pequena, quando comparada ao mercado de combustíveis, estes geram biodiesel com custos competitivos mesmo sem considerar os créditos de carbono. Isto deve ficar mais explícito com o passar do tempo, pois a tendência dos custos de tratamento de resíduos é que estes sejam ampliados, devido aos baixos custos atuais de utilização dos vazadouros de lixo⁴².

Em ambos os casos, pode ser considerada a manutenção da tendência de aumento dos preços dos combustíveis fósseis.

III.2.5 IMPACTOS AMBIENTAIS

Além da redução de emissões de CO₂, decorrente da utilização de biomassa cultivada, o biodiesel contribui para a qualidade ambiental local pois também permite a redução das emissões de enxofre, monóxido de carbono, material particulado e aromáticos. Quando utilizado puro, os benefícios são verificados nas faixas de 98% (enxofre), 50% (CO e particulado) e 30% (aromáticos), quando comparadas às do óleo diesel, respectivamente (USEPA, 2002). Todavia, a poluição local também é afetada, pois há aumento de 13% nas emissões de NO_x, gás precursor do ozônio e que causa o “smog” fotoquímico e ainda contribui para o surgimento e agravamento de doenças nas vias respiratórias. A tabela 14 mostra as alterações nas emissões de poluentes quando é utilizado o biodiesel puro em substituição ao óleo diesel mineral.

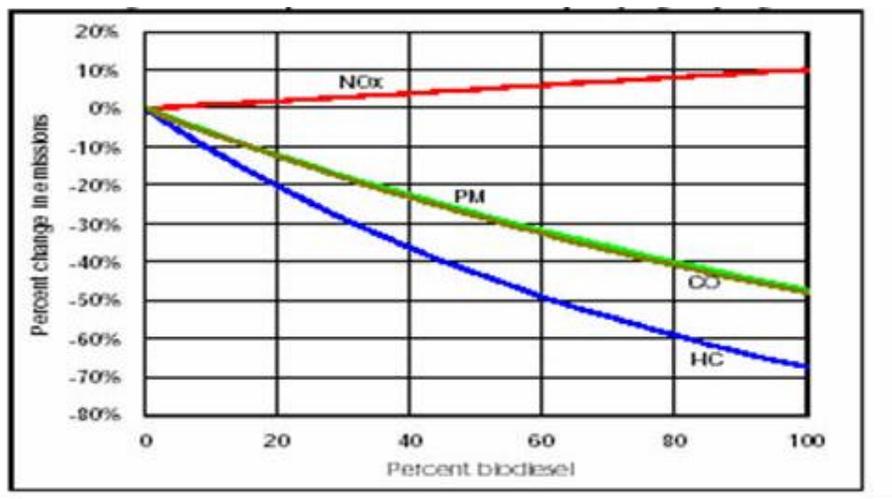
⁴² Os baixos custos devem-se ao fato de que, no início de sua operação, existiam menos exigências ambientais (e, portanto, menos custos), bem como suas distâncias dos centros urbanos serem menores que quaisquer das áreas atualmente disponíveis.

TABELA 14: Emissões do Biodiesel em comparação com o Óleo Diesel.

Poluente	Aumento/Redução	Percentual (%)
Gases de efeito estufa	Redução	78 a 100
Óxidos de enxofre	Redução	98
Monóxido de Carbono	Redução	50
Material Particulado	Redução	50
Aromáticos	Redução	30
NO _x (USEPA, 1998)	Aumento	13

Fonte: Elaboração própria, a partir de dados T.I.E.P.

A figura 12 abaixo mostra o comportamento das emissões mediante as misturas elaboradas entre óleo diesel e biodiesel, sendo a maioria linear.



Fonte: USEPA (2002).

FIGURA 12 – EMISSOES DECORRENTES DAS MISTURAS

As emissões de NO_x são sabidamente maiores quando utilizados combustíveis oxigenados. Esse resultado tem se confirmado na maioria dos estudos de emissões

de biodiesel, embora existam trabalhos que mostrem o contrário. De qualquer forma, os ensaios comparam gases de exaustão que saem do motor sem passar por qualquer tipo de catalisador antipolvente, como os existentes nos veículos que utilizam gasolina. Nos veículos movidos a diesel, não se utilizam catalisadores de pós-combustão devido ao elevado teor de enxofre e particulados que, respectivamente, envenenam e entopem o catalisador. Como o biodiesel é praticamente isento de enxofre e diminui drasticamente as emissões de particulados, é possível a viabilização de um catalisador para veículos a biodiesel. Desse modo, certamente, as emissões de NO_x seriam menores que as do sistema diesel convencional.

Apesar deste aumento comprovado nos testes de emissão de NO_x , a diferença entre a emissão do motor homologados pelo Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE) que mais emite NO_x e o limite superior (IBAMA, 2001) demonstra existir espaço técnico para utilização imediata de uma mistura de até 9% de biodiesel em todo o óleo diesel (Rosa et al., 2003) consumido no país. Caso o motor de maior índice de emissão de NO_x fosse excluído do sistema, seria possível a utilização da mistura B28 (mistura de 28% de biodiesel e 72% de diesel mineral).

Segundo Rosa et al (2003), o óleo diesel mineral possui quantidades significativas de enxofre sob a forma de mercaptanas, poluente de alto impacto na saúde, e a queima do biodiesel juntamente com o diesel mineral favorece a oxidação das mercaptanas, transformando-as em dióxido de enxofre, um produto mais volátil e menos danoso aos seres vivos que habitam especialmente nas áreas urbanas.

Os subprodutos do processo de obtenção de biodiesel, como glicerina⁴³ e sabões de sódio ou de potássio, precisam ter novas aplicações desenvolvidas, enquanto a fração protéica, obtida simultaneamente ao óleo vegetal, requer a

⁴³ Apesar deste produto dispor de aplicações no mercado de cosméticos, o aumento de sua oferta precisa ser precedido de análise sobre aplicação em outros segmentos, o que pode configurar uma área específica de pesquisa, a gliceroquímica.

definição de novo mercado, para coibir o futuro aviltamento dos preços e manter a atratividade para todos os integrantes da cadeia produtiva. Os benefícios da nitrogeneração do solo, a partir do cultivo de espécies oleaginosas, permite a recuperação de solos improdutivos e será apropriada diretamente pelo setor agrícola.

III.2.6 IDENTIFICAÇÃO DAS BARREIRAS ATUAIS À PENETRAÇÃO DA TECNOLOGIA

A principal barreira a ser enfrentada diz respeito a matéria-prima com preços competitivos, o que somente pode ser resolvido com uma política pública que estabeleça o consumo (preços mínimos e quantidades estabelecidas) de biodiesel nos próximos anos, de forma que os investimentos tenham um horizonte de retorno. Com isso, as variações de preço dos insumos, que ocorrerão no início do programa em virtude dos rendimentos das safras, deverão ser absorvidas pela indústria dos combustíveis, como garantia do financiamento para empreendimentos neste setor.

As barreiras estão sendo resolvidas pelo Grupo Interministerial de Trabalho criado especificamente para viabilizar o biodiesel no Brasil. Neste fórum estão reunidas as questões relacionadas ao percentual da mistura, desde a viabilidade técnica até a estrutura de financiamento dos empreendimentos descentralizados, passando pela questão social e ambiental. Para tanto estão sendo utilizados o respaldo técnico oferecido pela resolução da Agência Nacional do Petróleo, de setembro de 2003, criada a partir da experiência internacional, assim como os resultados dos mecanismos de incentivos para este tipo de combustível existentes em diversos países (Rosa et al., 2003).

Ainda assim, é necessário atentar para as questões sociais e ambientais na análise de viabilidade, alterando o tradicional EVTE.

CAPÍTULO IV- EXPERIÊNCIAS EM CURSO

No Brasil, estão sendo analisadas as mesmas rotas tecnológicas de aproveitamento energético de insumos residuais.

IV.1 - LIXO

No decorrer do ano de 2002, foram iniciadas as obras para construção de três delas, uma de incineração, na Ilha do Fundão, e duas de recuperação de biogás de aterro sanitário, uma no Aterro Bandeirantes em São Paulo e outra no Aterro de Gramacho, na região metropolitana do Rio de Janeiro, as quais foram inauguradas no ano de 2003 e estão permitindo o monitoramento das emissões e aprimorar os custos reais da operação.

No campus da Ilha do Fundão da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), está implantada uma usina de incineração de lixo acoplada a sistema de recuperação de calor para geração de energia elétrica. O projeto consome 30 toneladas diárias de lixo (toda a produção do campus), sem que haja qualquer custo pelo tratamento do lixo para a UFRJ, e abastecerá, a partir do segundo semestre de 2004, uma central termelétrica de 1 MW, que fornecerá energia para a UFRJ, também sem custo para a instituição, que pode ser vista nas figuras 13 e 14 abaixo.



Fonte: USINAVERDE

FIGURA 13 – MAQUETE ELETRONICA DA USINAVERDE.



Fonte: USINAVERDE

FIGURA 14 – Aspectos internos da USINAVERDE

O sistema de recuperação de biogás de aterro, ou gás de lixo, inaugurado em São Paulo, no final de 2003, é um empreendimento comercial, que utiliza o biogás em motores ciclo OTTO, reproduzindo técnica consolidada internacionalmente. A potência prevista é de 20 MW, capaz de atender a todas as agências brasileiras do banco responsável pelo investimento, caracterizando-a como a maior do mundo utilizando esta tecnologia.

Já o projeto instalado no Centro de Tratamento de Resíduos de Jardim Gramacho, o vazadouro metropolitano do Rio de Janeiro, é uma inovação, como mostra a figura 15 abaixo. Este sistema consorcia o aproveitamento de biodiesel oriundo de óleos vegetais usados, cedidos pela Rede McDONALDs de restaurantes, ao biogás recuperado no aterro, para abastecer um grupo-gerador ciclo DIESEL de 200 kVa (180 kW), responsável pela oferta de energia de todo o aterro, incluindo a estação de tratamento de chorume, a central de triagem de recicláveis e a iluminação, além de doar eletricidade para uma escola e um posto-de-saúde na vizinhança do aterro. O objetivo é verificar o rendimento elétrico desta alternativa face ao sistema tradicional, pois é sabido que a eficiência do motor ciclo DIESEL é cerca de 40% maior que a do ciclo OTTO, 35% contra 25%, respectivamente. As poucas referências na literatura internacional de consorcio de combustíveis (alta cetanagem e alta octanagem) em motor ciclo DIESEL tratam de gás natural com óleo diesel, nenhuma delas trata da mistura entre biogás e biodiesel.



Fonte: IVIG, 2004.

FIGURA 15 – SISTEMA DE GRAMACHO – FOTOS

A - Sistema de coleta de gases, B - Abastecimento da Central de Gás, C - Grupo- Gerador Ciclo Diesel abastecido com Biogás e Biodiesel, D - Torneiras de Controle de combustíveis.

A terceira rota tecnológica, a digestão acelerada, está em fase de negociação com duas prefeituras, uma vez que seu módulo de operação já é dimensionado em escala industrial, como mostra a figura 16, a seguir.



Fonte: OWS, 2002.

FIGURA 16 – DRANCO NA BÉLGICA

Um outro produto considerado como resíduo sólido urbano é o esgoto sanitário. Nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) o processo mais simples é a decantação, na qual são separados os sólidos flutuantes (escuma, de onde pode ser extraída a gordura) da parcela depositada (lodo) e da água. Em média, existem 800 gramas de escuma (totais) por metro cúbico de esgoto, sendo 10% de gordura (JORDÃO, 1999). A produção típica de esgoto é de 200 litros por pessoa, por dia, sendo 99% água.

O lodo, após secagem, pode ser associado aos restos alimentares do lixo e utilizado na produção de calor através da incineração. O biogás, decorrente da decomposição anaeróbica nos biodigestores atuais, pode ser aproveitado mediante instalação de sistema de separação de gases e grupo-gerador em substituição à tocha

(ou queimadores – flare), mostrada na figura 17, que passaria a representar apenas um dispositivo de segurança quando o gerador não estivesse funcionando.



Fonte: Elaboração Própria.

**FIGURA 17 - ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA ALEGRIA –
BIODIGESTOR E TOCHAS**

A água pode ser reciclada e consumida em processos industriais, visto que vários consumidores apenas requerem que este insumo esteja neutralizado, sem necessitar de potabilidade, o que reduz o custo. A espuma pode servir como insumo para produção de biodiesel, combustível líquido capaz de substituir o óleo diesel sem requerer alterações nos motores e reduzindo a poluição, que será tratado em outro capítulo deste trabalho.

IV.2 BIODIESEL

Quanto à questão técnica, a COPPE, através do Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais (IVIG), vem pesquisando desde setembro de 1999, em parceria com a Escola de Química (EQ), o Laboratório de Máquinas Térmicas (LMT), o Programa de Engenharia de Transporte (PET), o Programa de Engenharia Mecânica (PEM) e a PETROBRAS, entre outras instituições, a viabilidade deste combustível.

Neste período foram instalados, nas dependências da UFRJ, uma planta de beneficiamento de ácidos graxos, mostrada na figura 18, e um laboratório de análises físico-químicas, mostrado na figura 19 abaixo, para produção e caracterização do combustível.



Fonte: IVIG, 2003.

FIGURA 18 - PLANTA DE BIODIESEL DA COPPE



Fonte: IVIG, 2003.

FIGURA 19 - LABORATÓRIO DE ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS DA COPPE

Nestes equipamentos, com capacidade de processar 1000 litros de insumos por batelada, cuja conversão varia de 92% em 15 minutos a 80% em 2 horas, em virtude da matéria-prima, foram produzidas e testadas amostras de biodiesel de aproximadamente 20 insumos⁴⁴, representando as principais fontes nacionais. Estes insumos foram processados com álcoois metílico e etílico, em presença de catalisador alcalino ou ácido, dependendo do insumo utilizado, sempre atendendo às especificações em vigor. Devem ser ressaltados os procedimentos de análise e preparação dos insumos, de forma a que o produto atendesse às especificações, as quais passaram da ASTM Norte-Americana, única existente no início do projeto, para a europeia prEN, até a publicação da Resolução 255 da Agência Nacional do Petróleo, em setembro de 2003. A tabela 15, abaixo, mostra os resultados obtidos pela UFRJ.

⁴⁴ Residuais: óleo de fritura, sebo bovino, óleo de peixe, gordura de frango, graxa suína, ácidos graxos e esgoto sanitário. Extrativismo: babaçu, buriti, castanha-do-Pará. Cultivo: soja, algodão, dendê, palmiste, mamona, milho, arroz, canola, uva, girassol, nabo-forrageiro, amendoim e coco.

TABELA 15 - Sumário das Reações de Síntese de Biodiesel com Diferentes Substratos Graxos

Substrato	Processo	Temperatura (°C)	Razão Molar (Metanol/ Substrato)	Catalisador	X (%)**
Óleo de Soja	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Girassol	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Canola	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Milho	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Arroz	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Nabo Forrageiro	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Amendoim	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Palma Bruto	T	30	6	KOH	> 97
Óleo de Soja Degomado	T	30	6	KOH	> 97
Óleo de Mamona	T	40	6	KOH	> 94
Óleo de Buriti	T	30	6	KOH	> 97
Óleo de Babaçú	T	30	5	KOH	> 97
Óleo de Castanha	E/T	65/30	8	CH ₃ SO ₃ H/ KOH	> 97***
Óleo de Fritura	E/T	65/25	6-8	CH ₃ SO ₃ H/ KOH	> 97***
Sebo	T*	40	6	KOH	> 97
Banha de Porco	T*	40	6	KOH	> 97
Gordura de Galinha	T	40	6	KOH	> 97
Óleo de Peixe	E/T	65/30	8	CH ₃ SO ₃ H/ KOH	> 84
Ácido Graxo	E	65	9	CH ₃ SO ₃ H	> 84
Escuma	E	65	9	CH ₃ SO ₃ H	> 84

Fonte: ARANDA, 2003.

Notas:

T = Transesterificação, condições cinéticas básicas: teor de catalisador - 1% , tempo de reação: 60 min.

E = Esterificação, condições cinéticas básicas: - teor de catalisador - 0,75 % , tempo de reação: 120 min.

* Necessário a utilização de um co-solvente.

** Conversão obtida em uma única batelada

***Conversão após uma etapa de esterificação mais uma etapa de transesterificação

Como pode ser visto na tabela acima, a conversão de insumos em biodiesel tem sido superior a 92% nas reações de transesterificação e de 85% nas reações de esterificação, sempre atendendo às especificações europeias (exceto o índice de iodo e a viscosidade para o biodiesel de mamona), norte-americana e brasileira (viscosidade do biodiesel de mamona).⁴⁵

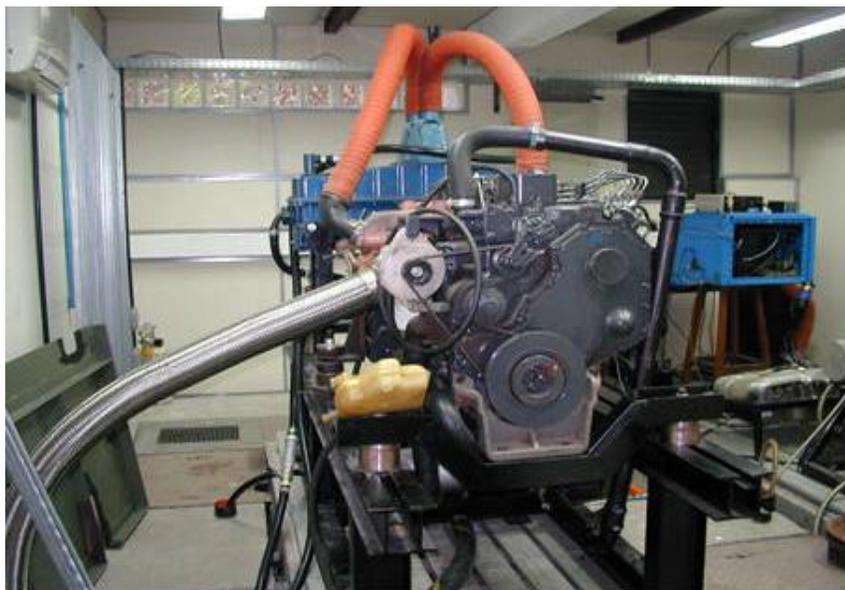
A figura 20 mostra o prédio que está sendo construído para abrigar a planta de biodiesel e o laboratório de análises físico-químicas, enquanto na figura 21 pode ser visto o motor no qual são realizados testes de emissões.



Fonte: IVIG, 2004 (março)

FIGURA 20– CETS

⁴⁵ Os laudos da Escola de Química da UFRJ e do laboratório contratado pela Robert Bosch S.A. na Alemanha encontram-se em anexo.



Fonte: IVIG, 2003.

FIGURA 21 - LABORATÓRIO DE MÁQUINAS TÉRMICAS

O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), está realizando testes utilizando biodiesel genuinamente nacional, em motores de combustão interna. A figura 22 abaixo mostra as instalações de tanques de biodiesel na garagem da COML URB, do abastecimento e dos veículos que utilizam biodiesel.



FIGURA 22 – POSTO DE ABASTECIMENTO DE BIODIESEL NA COMLURB, VEICULOS EM TESTE

Este projeto estuda aspectos técnicos, econômicos, sociais, climáticos e ambientais do processo de transesterificação. A análise verifica a adequação dos processos e dos produtos obtidos, sobretudo o biodiesel e o glicerol, frente às peculiaridades do óleo vegetal nacional que será utilizado na substituição, total ou parcial, de combustíveis para transportes e para geração de energia elétrica.

Já foram produzidas centenas de litros de biodiesel de óleo usado, este doado pela rede de restaurantes McDonalds Comércio de Alimentos Ltda, decorrente de uma parceria institucional, e de óleo de soja virgem (degomado). Para tanto, a COPPE/UFRJ tem usado suas instalações para analisar as características dos insumos e monitorar as reações, assim como avaliar os produtos obtidos, de forma a otimizar o processo.

IV.3 – PROJETOS CANDIDATOS A CRÉDITOS DE CARBONO

A equipe do IVIG está trabalhando junto a uma ONG internacional (SSN) para elaborar um Guia Internacional sobre identificação e implantação de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Este conceito, conforme explicado no capítulo II, envolve a redução de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e o comércio destas reduções através de RCEs (Reduções Certificadas de Emissões), para o que é preciso preparar documentos (Project Design Documents – PDD) explicando e comprovando a racionalidade do empreendimento para a obtenção dos créditos, e o atendimento aos requisitos do desenvolvimento sustentável previstos na Resolução n.1 da Comissão Interministerial do Clima (CIMA, 2003).

As diversas etapas para elaboração deste Guia vêm sendo realizadas desde o ano 2001, em uma parceria entre o governo holandês e instituições do Brasil, Indonésia, África do Sul e Bangladesh, através de uma organização não governamental denominada “South South North” (SSN). Os projetos práticos brasileiros (plantas piloto de biodiesel, de incineração na USINAVERDE e de utilização consorciada de biogás e biodiesel em Gramacho), únicos a obter avaliação máxima da SSN em abril de 2004, que estão sob coordenação técnica do autor do presente trabalho, terão seus documentos analisados pelo Painel Metodológico do IPCC e pela Autoridade Nacional Designada brasileira a partir de outubro de 2004, cujas aprovações permitirão a comercialização dos créditos, para o que já existem confirmações de interesse de fundos de investimento internacionais. Há, inclusive, o intuito dos investidores de divulgar estas comercializações ainda no decorrer de 2004.

Este interesse pode ser estendido para programas nacionais, no recém criado mercado internacional de CERs (exemplificado pela Bolsa de Chicago, Natsource, etc), sendo que no caso do lixo esta receita (utilizando o menor valor praticado atualmente) é capaz de tornar a eletricidade obtida a partir desta fonte mais barata que aquela proveniente do gás natural. Já no caso do biodiesel, esta receita será

importante para viabilizar parte dos investimentos, mesmo não sendo decisiva na competitividade face ao óleo diesel.

CAPÍTULO V - METODOLOGIAS ANÁLISE MULTICRITÉRIO

É sabido que a energia elétrica gerada pelas FAE é mais cara que aquela obtida com as fontes tradicionais, e quando a avaliação é totalmente vinculada a este critério as FAE só conseguem viabilidade onde não existe oferta das fontes tradicionais. Isto se repete com os insumos cultivados e oriundos do extrativismo, no caso do biodiesel. Entretanto, existem aspectos sociais, ambientais e tecnológicos capazes de justificar outro sistema de avaliação, como o conceito de Desenvolvimento Sustentável⁴⁶.

Com vistas a analisar dois conjuntos de dados, um sobre FAE e outro sobre insumos para a produção de biodiesel, para responder à pergunta deste trabalho: **À LUZ DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, OS RESÍDUOS DEVEM TER SEU APROVEITAMENTO ENERGÉTICO PRIORIZADO?**, serão aplicadas duas metodologias: análise multicritério e análise envoltória de dados. As duas serão definidas adiante, mas cabe ressaltar que a primeira é quali-quantitativa, ficando sujeita a julgamentos de valor dos analistas, enquanto a segunda é totalmente quantitativa, reduzindo esta imprecisão.

Como ambas requerem o estabelecimento de indicadores, a seguir será abordada a evolução do conceito de indicador, para em seguida serem apresentadas as metodologias.

V.1- INDICADORES

Com vistas a auxiliar a formulação de políticas e a tomada de decisões teve início, na década de 1990, a elaboração de indicadores de sustentabilidade, nas mais diversas áreas relacionadas ao desenvolvimento das sociedades.

A construção destes indicadores foi facilitada pelo aprimoramento de indicadores ambientais, que vinha ocorrendo desde o fim da década de 80 pelos

governos do Canadá e Holanda, os quais visavam complementar os indicadores socioeconômicos já existentes. Em 1989, a Conferência Econômica dos sete países mais ricos do planeta, o G7, pede à OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) que estabeleça indicadores para nortear os processos internacionais neste sentido (Hammond et al., 1995).

A partir da publicação do relatório da II Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNUMAD) (Agenda 21), de 1992, o desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade atinge um novo patamar. Passam a ser realizados eventos internacionais para discutir quais os conceitos e as metodologias que devem ser utilizados de forma consensual para medir a adequação das atividades à responsabilidade inter-geracional.

Simultaneamente a este movimento há uma revisão nos indicadores econômicos, inclusive no PIB, com vistas a incorporar aspectos ambientais. Um dos casos exemplares é a disseminação do “*green national accounting*” (“economia verde”), onde o PIB é ajustado para refletir os custos da poluição gerada e da diminuição dos recursos naturais.

Em seguida, para refletir o quanto as necessidades humanas são satisfeitas (Hammond et al., 1995), o capital humano é contemplado com a elaboração do IDH (Índice de Desenvolvimento Humano), pelo Programa de Desenvolvimento das Nações Unidas (PNUD).

V.1.1. DEFINIÇÃO

Um indicador é uma ferramenta que permite a obtenção de informações sobre uma dada realidade (Mitchell, 1997). Sua principal característica é a de síntese, pois retém o significado essencial dos aspectos analisados de um conjunto complexo de

⁴⁶ Análise integrada das viabilidades social, ambiental, técnica, operacional e econômica, com vistas a garantir o desenvolvimento das populações atuais sem comprometer as condições de

informações, (Hatchuel & Poquet, 1992; Bouni, 1996; Mitchell, 1997). Pode ser considerado como um sintoma das atividades exercidas pelo ser humano em um determinado sistema (DPIE, 1995).

Hammond et al.(1995) definem indicadores como um modelo, no sentido de uma medida, uma indicação da realidade, não de um objetivo a ser alcançado ou imitado. Sua interpretação é que baliza seu significado e, portanto, a significância de cada indicador depende do contexto no qual esses indicadores são analisados.

Os indicadores podem ser considerados como medidas da condição, processos, reação ou comportamento que fornecem confiável resumo de sistemas complexos. Quando as relações entre os indicadores e o padrão de respostas dos sistemas são conhecidas, é possível estimar as condições futuras.

No presente estudo o indicador é entendido como um instrumento que evidencia mudanças que ocorrem em um dado sistema, em função da ação humana; padrão, como o ideal a ser alcançado — no caso, a sustentabilidade.

V.1.2 CARACTERÍSTICAS DOS INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE

Indicadores de sustentabilidade devem apresentar algumas características quanto ao significado, a aplicabilidade e a interpretação.

Quanto ao seu significado deve representar a sustentabilidade do sistema (Camino & Müller, 1993), atendendo aos requisitos políticos (Hammond et al., 1995). Já quanto à sua aplicabilidade, dentre diversos requisitos, é necessário que seja prático e permita repetir as medições no tempo (Camino & Müller, 1993), possibilitando um enfoque integrado (Camino & Müller, 1993; Lighthfoot, 1994; IISD, 1997a).

Quanto à sua interpretação, é fundamental que seus princípios sejam claros, tendo uma metodologia de medida bem determinada e transparente (Hammond et al.,

vida das gerações futuras, atitude embasada na responsabilidade inter-geracional.

1995; IISD, 1997a), tornando viável sua análise (DPIE, 1995), dentre outras características importantes.

V.1.3 TIPOS DE INDICADORES

Hatchuel e Poquet (1992) denominaram de indicadores de resultados àqueles que relatam a situação e de indicadores de meios aos que representam os procedimentos econômicos e administrativos adotados. Para representar os dados físicos foi criado o tipo “indicadores objetivos”, enquanto a percepção dos indivíduos, que pode ser diferente de um para outro, mas é importante que seja considerada, conta com o tipo “indicadores subjetivos”.

Kuman, de acordo com Eswaran et al. (1994), chama aos parâmetros de fácil medida de parâmetros *proxies*. Por estarem correlacionados ao aspecto que se quer conhecer, mas que por alguma razão não pode ser avaliado, ou é de avaliação difícil, ou ainda cuja avaliação tem um custo muito elevado, estes parâmetros são utilizados por serem medidas que permitem aproximações, em função das correlações existentes (Benbrook & Groth III, 1996). Esse autor menciona também os cripto-indicadores, que seriam indicadores inconscientes que existem no entendimento popular, normalmente parte do cabedal de anciãos em alguns povos.

V.1.4 CONJUNTOS DE INDICADORES

A sustentabilidade está fundamentada no aspecto multidimensional da realidade, o qual demanda atenção detalhada no procedimento de análise (Heeney, 1995; Cavalcanti, 1998). Neste sentido, a relação ente os diferentes fatores precisa ser conhecida, pois da mesma forma que a atividade humana pode incentivar, ou prejudicar, a evolução espontânea de um ambiente natural, este também pode estabelecer facilidades, ou dificuldades, à sociedade (Cavalcanti, 1998). Segundo Bouni (1996), é necessário que seja aplicada uma visão integrada do sistema, para o

que deve-se construir conjuntos de indicadores, a partir de alguns atributos chave que se acredita influenciar na sustentabilidade (Hansen, 1996). Cabe atentar para o fato de que não é qualquer parâmetro que impacte a sustentabilidade que serve como bom indicador, sendo necessário apresentar as características mencionadas acima.

Outro aspecto importante é o fato de que um sistema não se constitui apenas de elementos, mas das interações entre os elementos. Essas interações precisam ser identificadas, para permitir a medição dos efeitos diretos de cada ação sobre cada elemento, assim como dos efeitos indiretos e dos sinergismos (Heeney, 1995).

V.2 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

A definição mais abrangente de Análise Multicritério (AMC) é a apresentada por GOMES (1999): “conjunto de técnicas para apoiar a tomada de decisão, com a finalidade de investigar um número de alternativas, considerando múltiplos critérios e objetivos em conflito”. Esta avaliação de desempenho tem sido uma ferramenta importante para a tomada de decisão quanto à implantação de sistemas produtivos, tanto em setores públicos como privados.

Entretanto, o procedimento habitual de priorizar as variáveis econômicas nestas avaliações, decorrente da vasta e histórica disponibilidade de técnicas para monitorá-las, mostrou-se insuficiente. Isto pode ser comprovado por vários resultados negativos obtidos nos últimos anos, como os que ocorreram na concentração de renda, na parcela da população abaixo da linha de pobreza, nos recorrentes desastres ambientais e nos níveis da violência urbana.

A proposta de análise através de uma visão sistêmica, da sustentabilidade⁴⁷, altera o procedimento atual, integrando as variáveis sociais, ambientais, tecnológicas e

⁴⁷ A definição de sustentabilidade do Ministério do Meio Ambiente, divulgada em maio de 2003, atende a cinco dimensões: social, ambiental, econômica, cultural e ética. Como não foram definidas as maneiras de medir estas dimensões, o presente trabalho utiliza uma metodologia

operacionais às econômicas, passando (este conjunto) a delinear o espectro interdisciplinar da avaliação de desempenho e, conseqüentemente, da tomada de decisão.

V.2.1 MÉTODOS DE ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Apesar de existirem diversos métodos de análise multicritério, eles podem ser divididos segundo algumas características, como quanto a sua utilidade e quanto a sua semelhança de processamento.

Segundo sua utilidade quanto aos problemas, os métodos podem ser descritivos ou prescritivos. Os métodos descritivos visam melhorar a compreensão sobre o processo através do qual as decisões são tomadas, para poder prever as ações e escolhas dos agentes reais. Os métodos prescritivos, ao contrário, estabelecem a racionalidade dos agentes e, a partir disto, visam prover o tomador de decisão de técnicas que podem ser utilizadas no aperfeiçoamento da decisão. Também existem métodos intermediários, que são modelos descritivos utilizados na escolha do tomador de decisão, mas que podem ser usados de modo prescritivo na melhoria das decisões. (GOMES, 1999).

Já quanto a sua semelhança de processamento, MACCRIMMON (1973) agrupou os métodos multicritério em quatro grandes categorias: métodos de ponderação (*weighting methods*), métodos de eliminação sequencial (*sequential elimination methods*), métodos de programação matemática (*mathematical programming methods*), e métodos de proximidade espacial (*spatial proximity methods*), que podem ser vistas na Figura 23 com suas subcategorias.

já existente, que também contempla cinco dimensões, sendo as três primeiras iguais (social, ambiental, econômica), e as outras (tecnológica e operacional) não desprezíveis.

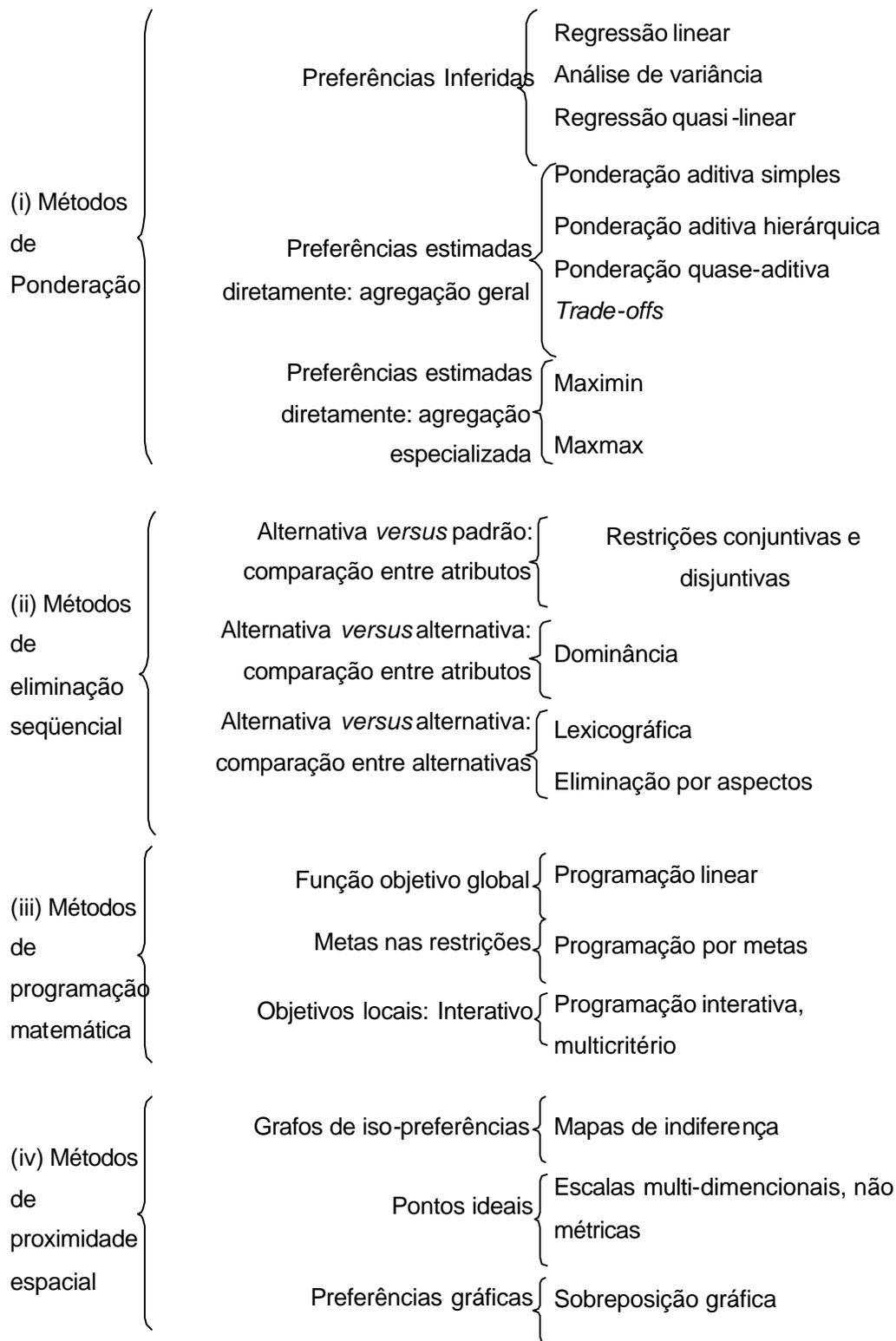


FIGURA 23: MÉTODOS DE DECISÃO MULTIOBJETIVO/MULTIATRIBUTO (MACCRIMMON, 1973).

V.2.2 ESCOLHA DOS MÉTODOS MULTICRITÉRIO

Os métodos escolhidos para serem utilizados são a ponderação aditiva simples, quali-quantitativo, e a programação linear, quantitativo. A escolha decorre destes métodos serem os mais simples e de mais ampla aplicação, além de já estarem sendo utilizados pelos grupos de pesquisa da COPPE/UFRJ, o que facilitou o acesso. Ambos caracterizam-se pela compensação entre os indicadores, apesar do primeiro método ser menos objetivo que o segundo, fator fundamental para que os empreendimentos em fontes alternativas de energia, cuja vertente econômica mostra-se menos atrativa que o cenário de referência, não sejam inviabilizados exclusivamente por este indicador, uma vez que os demais são indicadores são muito competitivos.

Para representar os métodos de ponderação aditiva simples será utilizado o conjunto de indicadores desenvolvido pela COPPE denominado Análise de Sustentabilidade (LA ROVERE et al, 2001), o qual foi proposto à Comissão Interministerial de Mudanças Globais do Clima (CIMA), do governo brasileiro, para servir na avaliação de projetos candidatos ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Kyoto, e vem sendo utilizado para hierarquizar projetos de energia alternativa e auxiliar na tomada de decisão pela PETROBRAS. Para representar a programação linear será utilizada a Análise Envoltória de Dados (DEA), método que permite a hierarquização das eficiências de unidades de produção mediante a avaliação simultânea dos diversos insumos utilizados e os produtos gerados por cada uma delas.

V.3- ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE

Segundo as Nações Unidas (1992), o uso de indicadores permite transformar dados físicos e sociais em informações gerenciais, capazes de facilitar a tomada de decisão, medindo e calibrando os avanços rumo ao Desenvolvimento Sustentável.

Este documento da ONU propõe dezenas de indicadores, agrupados em dimensões sociais, ambientais, econômicas e institucionais.

Parafraseando Pinheiro e Seroa da Motta (1991), para quem a inexistência de procedimentos ótimos para a estimação de indicadores contribui para que a escolha esteja dependente da experiência do analista, temos que:

“É importante deixar claro que os autores estão conscientes da impossibilidade de saber com certeza se os indicadores escolhidos são de fato melhores que os deixados de fora. A conclusão de que não existe um melhor indicador familiar a todos que já trabalharam com o tema decorre de ser impossível saber onde está o verdadeiro indicador.”

No intuito de desenvolver uma lista com pequeno número de indicadores que atenda às dimensões da sustentabilidade, o Centro de Estudos sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas (CENTROCLIMA), ligado a COPPE, desenvolveu e apresentou ao Ministério do Meio Ambiente, em 2001, uma proposta e, de acordo com as sugestões reunidas em três eventos que contaram com a presença de diversas entidades nacionais que atuam no setor, estabeleceu um conjunto de dez indicadores, descritos no item IV.2.2.3, divididos, em pares, por cinco dimensões: ambiental, social, econômica, tecnológica e operacional.

A avaliação da sustentabilidade de cada empreendimento analisado identificará o grau da alteração causada sobre o Cenário de Referência (situação que existiria na ausência do empreendimento). Este grau de alteração será expresso, para cada indicador, por valores inteiros contidos no intervalo fechado entre -3 e +3, que estão relacionados a faixas percentuais de variação, de acordo com a tabela 16 a seguir:

TABELA 16 – Pontuação de Acordo com Variação no Cenário de Referência após Implantação do Empreendimento

PONTUAÇÃO	VARIAÇÃO NO CENÁRIO DE REFERÊNCIA APÓS IMPLANTAÇÃO DO EMPREENDIMENTO
+3	100% a mais
+2	+61% a +99%
+1	+21% a +60%
0	-20% a +20%
-1	-21% a -60%
-2	-61% a -100%
-3	Abaixo de -100%

Os critérios e indicadores propostos para refletirem a sustentabilidade através dos aspectos de desenvolvimento ambiental, social, econômico, tecnológico e de operacionalização dos empreendimentos podem ser utilizados no processo de tomada de decisão de acordo com as restrições abaixo, utilizadas isoladamente ou em conjunto, conforme os princípios de análise multicritério:

a) quanto aos pesos:

- i) igual importância aos cinco grupos, neste caso será atribuído peso um aos cinco grupos determinantes da sustentabilidade do empreendimento: ambiental, social, econômico, tecnológico e de operacionalização;
- ii) atribuição de peso diferenciado aos grupos, dando maior importância a um ou mais grupos em relação aos demais;

b) utilização de filtro de significância, através da atribuição de limite mínimo para os indicadores, ou seja, independentemente do peso que for atribuído a cada um dos cinco grupos determinantes da sustentabilidade do empreendimento, poderá ser determinado, pelo critério de sustentabilidade do analista, que não serão aceitos empreendimentos que apresentem indicador nulo ou negativo para qualquer um dos cinco grupos.

V.3.1 ANÁLISE DE RESULTADOS

O empreendimento será dito sustentável quando o somatório das pontuações de seus indicadores for não-negativo.

Esta ferramenta permite, também, a hierarquização entre empreendimentos, desde que todos utilizem o mesmo Cenário de Referência. Será considerado mais sustentável o empreendimento que somar mais pontos.

Devido a seu caráter compensatório, inerente aos métodos de ponderação aditiva, quando esta metodologia for usada para hierarquizar empreendimentos pode aplicar métodos lexicográficos de eliminação seqüencial para desempate de alternativas.

V.3.2 APLICAÇÃO DOS INDICADORES

Resumindo, para cada um dos empreendimentos a análise requer:

- disponibilidade de informações relacionadas a cada um dos indicadores, para o cenário de referência e para o cenário alternativo;
- realização da avaliação das alterações propiciadas pelo empreendimento tendo como base o cenário de referência (situação sem o empreendimento),
- atribuição da pontuação para cada indicador, de acordo com a sua avaliação, do efeito combinado de todas as alterações promovidas pelo empreendimento na dimensão da sustentabilidade representada pelo indicador,
- definição dos pesos a serem utilizados para cada grupo de indicadores.

Seguem os indicadores e as questões a serem aplicadas, distribuídos em 5 dimensões, cada uma com dois indicadores:

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

Este indicador mede a mudança no nível de emissões de gases que contribuem para mudanças climáticas, em relação ao cenário de referência.

Para sua aplicação é necessário dispor de:

- a redução (aumento) líquida(o) de gases que contribuem para as mudanças climáticas propiciadas pelo empreendimento em relação ao cenário de referência;
- os dados de entrada para o cálculo das emissões evitadas/seqüestradas (aumentadas) em carbono equivalente e a descrição da metodologia utilizada;
- elementos considerados para a definição do cenário de referência.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

Indica os impactos ambientais locais associados ao empreendimento em relação ao cenário de referência.

Requer dispor de:

- apresentação qualitativa e quantitativa das emissões locais de poluentes sólidos, líquidos e/ou gasosos associadas ao empreendimento e ao cenário de referência;
- apresentação do plano de monitoramento e controle destas emissões;
- apresentação de características de ocupação antrópica (residencial, comercial, industrial e agrícola) e de localização ambiental (proximidade de recursos hídricos e de florestas nativas) na área de influência do empreendimento;
- apresentação de outros impactos ambientais associados ao empreendimento, tais como:
 - poluição sonora;
 - poluição visual;
 - erosão do solo;

- perda da biodiversidade;
- áreas inutilizadas.

Estabelecer análise de variação dos indicadores apresentados em relação ao cenário base.

Este indicador deve ser avaliado em função da escala do empreendimento.

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Requer:

- número de empregos, diretos e indiretos, local, regional e nacional, gerados pelo empreendimento, em relação ao cenário de referência.
- tipo de qualificação, duração (efetivo e temporário), nível de insalubridade e periculosidade, e nível de salários dos empregos.

Obs: a apropriação do número de empregos associado ao projeto leva em consideração as atividades indiretas (local, regional e nacional), como por exemplo, a geração de empregos promovida pelo fornecedor de insumos ao projeto.

Esta avaliação deve considerar o volume de emprego gerado por capital investido.

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

Indica os efeitos diretos e indiretos do empreendimento sobre a qualidade de vida da população abarcada pelo empreendimento, ou seja, na área de influência deste. Esta avaliação considera a influência do empreendimento sobre o IDH de população de baixa renda.

Necessita que seja apresentado:

- peso relativo da população beneficiada direta e indiretamente em relação à população total do país.
- características socioeconômicas da população beneficiada pelo empreendimento.
- impactos distributivos do projeto para a população beneficiada direta e indiretamente pelo empreendimento, em comparação com o cenário de referência.
- impactos do empreendimento sobre a expectativa de vida da população beneficiada direta e indiretamente pelo empreendimento;
- impactos do empreendimento no acesso ao conhecimento pela população beneficiada pelo empreendimento.

A avaliação deste indicador deve ser feita em relação ao capital investido.

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

Este indicador mede a contribuição para a sustentabilidade microeconômica.

Para a análise deste indicador, são necessárias as seguintes informações:

- Investimento inicial;
- Vida útil;
- Prazo de construção;
- Custo de operação e manutenção;
- Receita (com o fornecimento de dados que a fundamentem).

Para projetos no setor energético, além das informações acima, é necessário dispor de:

- Custo de combustível;
- Capacidade instalada;

- Fator de capacidade;
- Rendimento.

Indicador 6 Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

Este indicador requer informações sobre:

- gastos contingentes associados ao empreendimento (ex: indenização a atingidos por acidente, custo de abatimento de gases de efeito estufa, custo com saúde pública);
- benefícios contingentes associados ao empreendimento (ex: contribuição para maior taxa de abatimento ou menores gastos com pagamento de indenizações e/ou compensações a terceiros pela empresa).

A avaliação deste indicador deve ser em relação ao capital investido.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Devem ser analisados:

- os gastos em bens e serviços importados a serem utilizados no cenário do empreendimento e no cenário base, assim como se os bens e serviços importados são adquiridos diretamente no exterior ou são adquiridos por meio de intermediários nacionais;
- valor a ser dispendido em royalties e em licenças tecnológicas, caso existam, e a frequência e os gastos com assistência técnica internacional, caso exista.

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

Procura avaliar o grau de inovação tecnológica do projeto em relação ao cenário de referência e às tecnologias empregadas pelas atividades passíveis de comparação.

Requer analisar:

- a evidência de que a tecnologia utilizada no empreendimento é pioneira no país;
- o potencial de replicabilidade da tecnologia empregada no empreendimento;
- a capacidade de adaptação e o grau de domínio do uso da tecnologia adquirida por parte do receptor.

Para análise do potencial de inovação tecnológica foi considerada a escala alternativa a seguir:

- se o empreendimento foi projetado e executado de forma completamente inovadora, com equipamentos e/ou rotas tecnológicas que não existiam até o momento e foram criados para tornar viável a produção a partir desta planta; +3
- se os equipamentos utilizados já eram existentes, sendo feitas pequenas alterações que deram origem à tecnologia; +2
- se foram utilizados equipamentos já existentes e apenas reordenados para desenvolver um novo produto +1
- se nada foi realizado: zero

Considerou-se também, que nunca haverá valor negativo neste indicador, uma vez que não é possível reduzir a inovação tecnológica.

DIMENSÃO OPERACIONAL/CULTURAL

Indicador 9: Possibilidade de Implantação e Operação do Empreendimento

Apresentar potencial de dificuldades (sociais, ambientais, políticas, econômicas e técnicas) à implantação e operação do empreendimento. Para tanto, é necessário dispor de informações sobre:

- grau de aceitação do empreendimento pela comunidade em sua área de influência;
- as dificuldades de operação e manutenção dos equipamentos;

Sugere-se ponderar a superação dos obstáculos e expressá-los em função do tempo necessário para implantação, de acordo com a escala abaixo.

Obs: dividir esta escala em prazo de viabilidade e nível de pesquisa

Curtíssimo prazo: +3

Curto prazo: +2

Médio prazo: +1

Longo prazo: zero

Sem planta piloto: -1

Sem domínio de todas as etapas: -2

Início do investimento em tecnologia: -3

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

Necessita que sejam disponibilizados dados sobre:

- a possibilidade de associações com Ecopolos regionais e com programas socioambientais regionais, como reciclagem e aproveitamento de resíduos;

- grau de articulação entre o projeto e setores de pesquisa e desenvolvimento, associações, fabricantes de equipamentos, fornecedores de insumos e outros setores que possuam alguma possibilidade de integração;
- âmbito (nacional, estadual e regional) da referida articulação;
- atividades e vocações da região em que o projeto será instalado.

Componentes-Síntese

Para representação da sustentabilidade do empreendimento, adota-se uma estrutura analítica composta pelos dez indicadores, que pode ser expressa através da soma e da média dos indicadores de cada uma das cinco dimensões de sustentabilidade.

V.3.3 DEFINIÇÕES OFICIAIS NO BRASIL

Cabe ressaltar o fato de a CIMA ter aprovado, em setembro de 2003, sua definição de Desenvolvimento Sustentável. Nesta resolução (01/2003) foram aceitos os conteúdos dos indicadores propostos pela COPPE, mas dispensada a metodologia de pontuação, sob o argumento de que o governo brasileiro não será responsável por hierarquizar os projetos candidatos ao MDL, o que deve ser feito pelos interessados em adquirir os certificados de emissões reduzidas.

Também é relevante a divulgação pelo Ministério do Meio Ambiente, em maio de 2003, do documento sobre a “ Amazônia Sustentável – Contribuição para a Elaboração de um Programa de Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia e Subsídios para o Plano Plurianual”. Neste documento são estabelecidas as dimensões da sustentabilidade, quais sejam: social, ambiental, econômica, cultural e ética. Como não foram definidas suas abrangências ou como mensurá-las e estas dimensões são similares àquelas propostas pela COPPE à CIMA, pois as três primeiras dimensões

são iguais e a dimensão cultural pode ser entendida como a viabilidade operacional, uma vez que devem ser atendidos requisitos de implantação e integração regional, e a questão ética permeia todos os empreendimentos, apesar de sua avaliação não ser simples, considerou-se que este documento corrobora a utilização daquela metodologia.

V.4- ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS

O cálculo da eficiência das unidades organizacionais tem sido um tema importante na administração, porém, difícil de resolver, especialmente quando são considerados múltiplos inputs (recursos) e múltiplos outputs (serviços, produtos, entre outros) associados a estas unidades. Entre as propostas para abordar este problema se encontra o trabalho de FARRELL (1957), onde foi derivada uma fronteira empírica da eficiência relativa em lugar de uma função de produção teórica, sendo usada como base para medir a eficiência relativa das unidades.

CHARNES *et al.* (1978) criaram uma técnica baseada em programação linear para calcular a eficiência relativa das unidades de acordo com a proposta de FARRELL (1957) e determinaram um ponto de referência na fronteira para cada unidade ineficiente. CHARNES *et al.* (1978) denominaram sua nova abordagem para medir eficiência de Análise Envoltória de Dados (do inglês *Data Envelopment Analysis* – DEA) e as unidades avaliadas foram denominadas de DMUs (do inglês *Decision Making Units*).

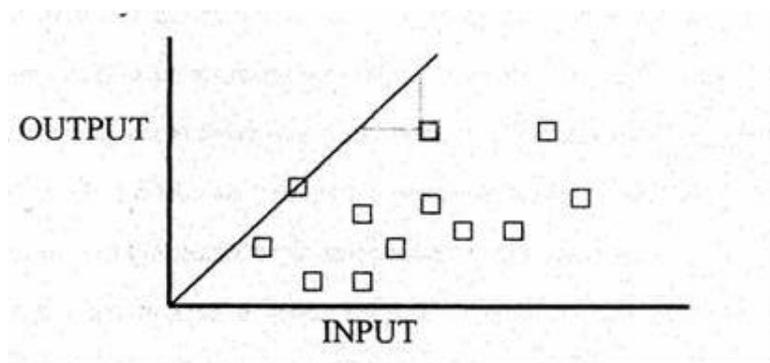
Segundo SANT'ANNA (1999) a Análise Envoltória de Dados (DEA) é uma metodologia de comparação de desempenhos de unidades de produção (DMU) operando em contextos semelhantes, utilizando os mesmos recursos e gerando os mesmos produtos⁴⁸. A partir do conjunto de unidades é identificado o melhor

⁴⁸ DEA pode ser aplicada ainda que as DMU utilizem múltiplos recursos para gerar diversos produtos, podendo variar a produtividade relativa a cada produto e cada insumo.

desempenho possível, o qual permite medir a eficiência relativa de cada uma das outras unidades de produção, o que pode se dar mediante diferentes critérios.

O termo Data Envelopment Analysis remonta a 1978, na tese de doutorado de Rhodes, simultaneamente a trabalho publicado por Charnes e Cooper. Desde então vem sendo aprimorado, passando a contar com orientação a excessos de produção e reduções nos gastos, além das tradicionais orientações a recursos e a produtos, ou com rendimentos de escala crescentes ou decrescentes, além dos constantes.

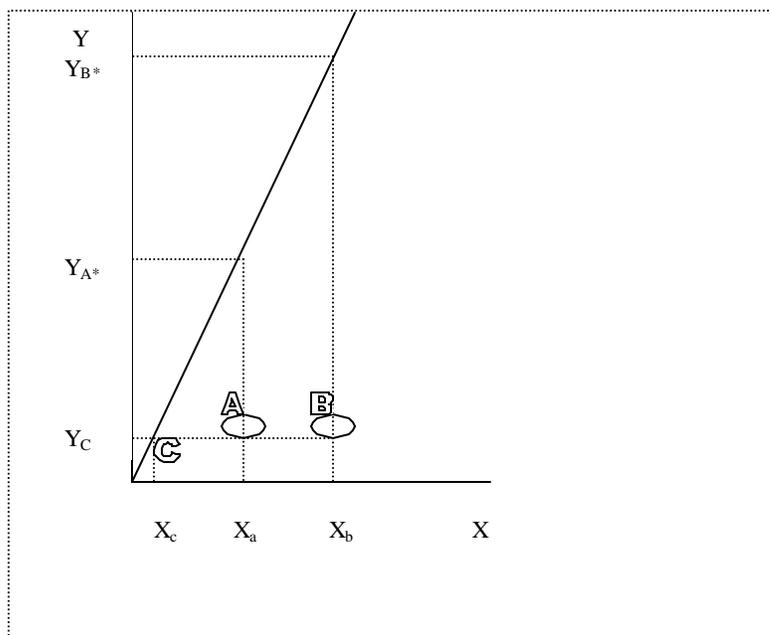
Para ilustrar estas orientações, aproveitou-se a figura apresentada por SANT'ANNA (1999), a qual pode ser vista na figura 24, que mostra doze unidades produzindo um único produto e utilizando um único insumo. O volume de insumo é medido no eixo horizontal e o volume de produto no eixo vertical. A razão produto/insumo é a inclinação da reta que passa pela origem e pelo ponto representativo da unidade. Deste modo, a unidade mais eficiente é aquela para qual essa reta é mais próxima da vertical. A fronteira de eficiência é representada na figura pela semi-reta passando pela origem e pela unidade mais eficiente.



Fonte: SANT'ANNA, 1999.

FIGURA 24 - GRÁFICO INSUMO-PRODUTO (INPUT-OUTPUT)

Com vistas a facilitar o entendimento quanto à diferença entre as orientações a insumo e a produto, a figura 25, a seguir, mostra apenas duas unidades produtoras (A e B) com mesma projeção no eixo das ordenadas, a fronteira de eficiência e a projeção horizontal das DMUs na fronteira de eficiência (C). Neste gráfico o eixo horizontal, das abscissas, representa os insumos enquanto o eixo vertical, das ordenadas, representa os produtos. Y_{b^*} e Y_{a^*} representam as ordenadas das projeções verticais das DMUs na fronteira de eficiência, enquanto Y_c representa a ordenada da projeção C. X_a , X_b e X_c representam as abscissas das duas DMUs e da projeção C.



Elaboração Própria

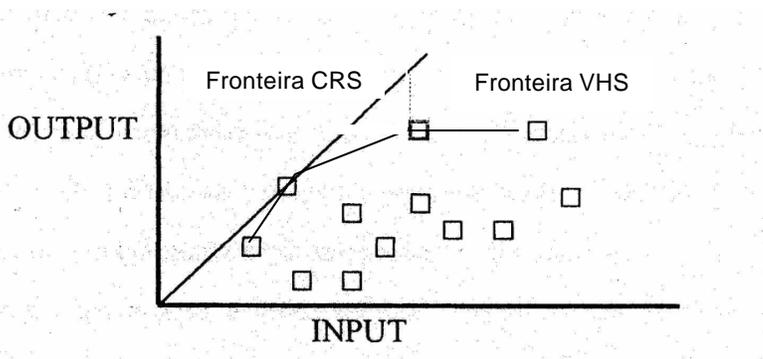
FIGURA 25 – GRÁFICO INSUMO-PRODUTO COM PROJEÇÕES

Na orientação a insumo, será mais eficiente a unidade de produção que consumir menos. A comparação é feita por proporcionalidade, para o que é necessário estabelecer um padrão. Tomando por base a unidade virtual projetada sobre a fronteira de eficiência, representada por C, visualiza-se que a relação X_a/X_c é menor que a relação X_b/X_c . Já no caso da orientação ao produto, será mais eficiente a DMU

que produzir mais. Neste caso a comparação será feita com as ordenadas das projeções das DMUs e da unidade virtual C, cuja visualização mostra que a relação Y_C/Y_A é maior que a relação Y_C/Y_B . Fica claro que a DMU que estiver mais à esquerda será mais eficiente, mas a medida poderá ser diferente em virtude da orientação escolhida.

Deve ser ressaltado que se o problema for de um único insumo e diversos produtos, a orientação será a insumo, assim como se o problema contiver apenas um produto e diversos recursos, sua orientação será ao produto. Se for de diversos insumos e diversos produtos, a comparação será feita mediante uma combinação de produtos utilizando uma combinação de recursos. Os pesos escolhidos para maximizar a eficiência, seja minimizando a utilização de recursos ou maximizando a oferta de produtos, devem ser avaliados pelo analista.

A representação gráfica das fronteiras de eficiência pode ser contínua, quando o retorno de escala é constante (CRS), ou descontínua, quando o retorno de escala é variável (VRS), conforme mostra a figura 26 a seguir.



Fonte: SANT'ANNA, 1999.

FIGURA 26 - GRÁFICO INSUMO-PRODUTO COM FRONTEIRAS

Com vistas a que os resultados representem o Desenvolvimento Sustentável, foram escolhidos insumos e produtos que estivessem relacionados às cinco dimensões deste conceito, mas que atendessem à premissa de serem expressos

numericamente em valores absolutos. Para tanto, optou-se por considerar como insumos, para os quais deseja-se menor consumo, Custo de Investimento (dimensão econômica), Custo de Operação e Manutenção (dimensão tecnológica) e Emissão de Gases do Efeito Estufa (dimensão ambiental) – na verdade um produto negativo, do qual deseja-se pouca oferta –, enquanto os produtos esperados escolhidos, para os quais buscam-se os maiores resultados, foram Potencial de Criação de Empregos por atividade (dimensão social) e Potencial de Produção (dimensão operacional). As dimensões ambiental, social e econômica estão representadas diretamente, enquanto as dimensões tecnológica e operacional são representadas indiretamente pela inexistência de royalties no custo de O&M e pela disponibilidade dos insumos, respectivamente.

V.5 COMPATIBILIZAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS:

Uma vez que as quantidades de indicadores e as lógicas da metodologias escolhidas não são iguais, seus resultados para cada conjunto de dados, expressos através da hierarquização dos elementos, podem ser diferentes. Nestes casos, tem-se um problema de compatibilização de duas classificações para cada conjunto de dados.

Para compatibilizar os resultados será aplicada a convergência entre os resultados, mediante a aplicação de conceitos. Receberão conceito “A” as alternativas que tiverem sido classificadas entre as 30% melhores nas duas metodologias simultaneamente. O conceito “C” será atribuído às alternativas que obtiverem resultados entre as 40% piores, também simultaneamente. As demais receberão conceito “B”. Serão consideradas prioritárias as alternativas que obtiverem conceito “A”.

Nos casos em que uma (ou mais) alternativa(s) não dispuser(em) de uma (ou de ambas) classificação(ões), o(s) resultado(s) de sua(s) compatibilização(ões) será(ão) representado(s) por traço (-), sendo considerada(s) como última(s) colocada(s).

CAPÍTULO VI - ESTUDOS DE CASO

VI.1- ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE:

A aplicação da Análise de Sustentabilidade será baseada na igual importância entre as cinco dimensões de sustentabilidade, para o que será atribuído peso igual aos cinco grupos de indicadores.

VI.1.1 – FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA⁴⁹

A partir da contextualização elaborada no capítulo III, sobre as rotas tecnológicas, e da consolidação dos critérios para análise de sustentabilidade e da disponibilidade da maioria dos dados, será iniciada, separadamente, a análise quanto à Conservação e à Geração de Energia com Resíduos.

Para a Conservação será analisada a rota da coleta seletiva. Apesar desta já ser utilizada no Brasil, existem discrepâncias significativas quanto aos dados disponíveis para elaborar uma análise minuciosa.

Já para a Geração, como pode ser executada através de várias rotas tecnológicas, foram escolhidos empreendimentos de cada uma delas. A primeira é aplicável ao lixo já disposto, enquanto as outras são capazes de reduzir o envio deste para os vazadouros. As rotas tecnológicas têm em comum o fato de serem independentes do preço do gás natural para a geração de energia – que hoje em dia é pago em dólar – e das condições climáticas.

A conclusão passará pela ponderação entre os resultados, de forma a compatibilizar o resultado da conservação ao das possibilidades de geração com lixo novo, além do uso de lixo já disposto, de acordo com as proporções de energia disponibilizada por cada uma destas alternativas.

⁴⁹ As avaliações apresentadas foram elaboradas pelo autor e acataram sugestões da equipe técnica do IVIG/COPPE/UFRJ.

A) CONSERVAÇÃO

A reciclagem dos materiais contidos nos resíduos sólidos urbanos reduz o consumo de energia, como apresentado no capítulo II. Seu potencial atinge cerca de 10% do consumo de energia do país. Atualmente, a reciclagem de cerca de 2,5 milhões de toneladas da produção nacional de papéis, plásticos, vidros e metais (cerca de 26% da produção destes materiais, ou 9% dos resíduos sólidos totais), que reduz o consumo energético em aproximadamente 8 TWh/ano, deve-se à cultura de reaproveitamento de aparas (restos da produção) pelas indústrias e pela ação de catadores em vazadouros de lixo, visto que são poucos os sistemas de coleta seletiva em funcionamento no Brasil.

Apesar de serem muitas as barreiras para a difusão desta prática, como a cobrança do Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) incidente após a reciclagem reprocessar material que já pagara IPI, evitando que o mesmo torne-se poluente, já existe a proposta de um incentivo real para o incremento desta atividade econômica. Na Política Nacional de Resíduos Sólidos, que tramitava no Congresso Nacional em 2002 e que foi arquivada, constava a criação da figura jurídica das Empresas Recicladoras, as quais receberão isenção fiscal, o que poderá ampliar o índice atual de reciclagem.

Neste trabalho foi avaliada a implantação de uma Cooperativa de catadores, com capacidade de processar 100 toneladas mensais de recicláveis, empregando 21 pessoas, identificada como módulo mínimo pelo CEMPRE (2003).

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

Uma cooperativa para processar 100 toneladas mensais de recicláveis, com a composição típica dos projetos de coleta seletiva brasileiros, têm 39 toneladas de papéis, 15 toneladas de plásticos, 15 toneladas de vidros e 15 toneladas de metais.

Para a emissão de gases de efeito estufa, somente o papel é considerado no cálculo de produção de metano, pela metodologia do IPCC (1996). As 468 toneladas anuais deste material, quando dispostas em vazadouros de lixo, emitem 76,8 t CH₄/ano decorrente de sua decomposição, o que corresponde a 1600 t CO₂/ano.

Caso o potencial de reciclagem destes resíduos seja atingido, que correspondem a 3,6 GWh/ano, e seja considerado como cenário de referência da expansão do setor elétrico o incremento da geração termelétrica com combustíveis fósseis, alteração decorrente da maior atratividade para os investidores desta alternativa, a emissão evitada será a seguinte:

Considerando que as emissões da queima do gás natural em usinas termelétricas em ciclo combinado tenham o fator de 449 t CO₂/GWh (La Rovere e Americano, 1999), as emissões evitadas pela reciclagem decorrem do adiamento da instalação destas usinas. Portanto, ao atingir o potencial de 3,6 GWh/ano de conservação de energia, estarão sendo evitadas cerca de 1800 t CO₂/ano.

Desta forma, somando a emissão evitada pela decomposição do papel nos vazadouros ao consumo evitado de combustíveis fósseis, o potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa atinge 3,4 kt CO₂/ano, o que elimina a emissão e tem avaliação +3.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

A reciclagem de resíduos evita a disposição em vazadouros onde podem se tornar apropriados para a proliferação de vetores, evita a produção e a contaminação do solo, água e ar com poluentes, além de reduzir os impactos decorrentes da geração de energia que foi adiada, independente da fonte que usar.

Este processo também evita que os resíduos sejam jogados nos logradouros públicos, onde acabam por entupir o sistema de escoamento de águas pluviais, causando enchentes.

Ainda não há um plano de monitoramento a ser implantado de imediato, porém medidas de controle deverão ser aplicadas.

A avaliação destes benefícios soma +2.

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Potencial de gerar 21 empregos diretos, número mínimo exigido pela Legislação sobre Cooperativas, sobretudo para população de baixa qualificação profissional.

A amplitude da geração de empregos decorrente desta atividade está diretamente ligada às áreas em que ela será aplicada, visto que a maioria dos empregos é gerada regionalmente. Os empregos são de caráter permanente e não são seriamente nocivos à saúde e de baixa periculosidade.

O número de empregos indiretos também pode ser significativo, uma vez que o material recolhido poderá ser reciclado, fomentando este mercado e gerando mais renda e empregos.

Indicador muito importante, atingindo o valor máximo: +3.

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

A população circundante ao empreendimento não será diretamente beneficiada pelo fornecimento de energia, uma vez que a conservação evitará os gastos extras, e este sim poderá ser melhor utilizado por toda a população do país. Desta forma, haverá uma quantidade de energia maior a ser distribuída que poderá então chegar de forma indireta a populações menos favorecidas economicamente - sendo essa a que trabalhará diretamente na coleta seletiva.

O tipo de emprego gerado foca diretamente a população de baixa renda e baixa qualificação profissional, elevando a qualidade e a expectativa de vida dessas pessoas. Os efeitos benéficos para a saúde pública, como o combate à proliferação de

epidemias (como a Dengue), e retirada das pessoas dos lixões – onde ficam em intenso contato com os resíduos, bichos e doenças – e o não depósito de várias toneladas de resíduos nesses lixões, seriam os principais motivos para que este indicador receba a máxima pontuação.

Avaliação: +3.

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

Investimento típico das Cooperativas implantadas pela COMLURB, no município do Rio de Janeiro: R\$100.000,00, para processar 100 t/mês, com custo de operação e manutenção de US\$108/tonelada, sendo o custo atual da coleta tradicional de US\$20/tonelada, o qual pode ser deduzido deste valor.

Como a receita possível é de US\$43/tonelada, podem ser apropriadas outras fontes de recursos que atualmente ão são contadas com os benefícios desta atividade sem precisar participar de seus custos.

Comercialização de materiais recicláveis aos valores de mercado, de acordo com a tabela 17 abaixo:

TABELA 17 – Potencial de Receita Oriunda da Venda de Recicláveis

Material	%	ton/mês	R\$/ton	R\$ total
papel e papelão	39	39	120	4680
Metais	15	15	100	1500
Plásticos	15	15	250	3750
Vidro	15	15	60	900
Total	84	84	-	10830

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados do mercado de recicláveis

Cada tonelada reciclada, significa 3 MWh de energia conservada. Por este cálculo, o custo desta energia conservada passa a ser de US\$20/MWh, quando os custos médios de conservação dos programas da ELETROBRAS aproximam-se de US\$40/MWh.

A taxa interna de retorno deste tipo de empreendimento é baixa, quando à receita da matéria-prima reciclável só for acrescido valor de US\$16/MWh pela energia conservada, atingindo 6%. Mas este valor pode atingir mais de 40% ao ano, se a energia conservada for remunerada a US\$20/MWh, a metade do valor médio dos projetos do PROCEL.

Portanto, a coleta seletiva transformada em energia conservada custa cerca de 62% a menos que a média dos sistemas de conservação de energia do PROCEL, o que pode motivar a ELETROBRAS a investir em projetos deste tipo e, com isto, motivar o aumento do interesse da população em participar.

Desta forma, a avaliação deste indicador é de +2.

Indicador 6: Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

Como são 3,4 kt CO₂ evitadas, para a conservação de 3,6 GWh, a emissão evitada é de 0,95 t CO₂/MWh.

O custo incremental é de US\$ 20/MWh negativos, decorrente da diferença entre o custo médio dos projetos de conservação do PROCEL e o custo operacional incremental da coleta seletiva (US\$ 40/MWh menos US\$ 20/MWh). Com isto, o custo de abatimento é de US\$ 21/ tCO₂ negativos.

Um fator importante para avaliação de custo contingente é que a população envolvida no projeto tende a ter menos doenças, pois estarão trabalhando em um ambiente menos nocivo à saúde e em melhores condições de trabalho, e com maiores noções de cidadania.

Avaliação do indicador: +3, em função do custo de abatimento negativo.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Esse procedimento não precisa adquirir tecnologia importada, visto que se trata de um processo de oferta de matéria-prima que depende da motivação da comunidade para que haja controle de qualidade dos consumidores no momento de produção de seus resíduos, separando-os para que a coleta os encaminhe para as indústrias.

As indústrias não precisam adaptar seus processos para assimilar toda a matéria-prima que venha a ser ofertada e até podem se sentir incentivadas a evoluir tecnologicamente para aumentar o aproveitamento do material reciclado, mantendo a mesma qualidade que o produto gerado com material virgem e diminuindo os gastos.

Não há royalties, pagamento de patentes ou qualquer forma de licença tecnológica, como também não há necessidade de assistência técnica internacional para a execução da coleta seletiva.

Avaliação máxima: +3.

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

Apesar de já não ser uma novidade no Brasil, a coleta seletiva ainda não atingiu o ponto de ser considerada uma ação incorporada aos hábitos da população. Atualmente existem cerca de 100 municípios desenvolvendo projetos de coleta seletiva, o que já seria suficiente para garantir sua replicabilidade. Entretanto, como os dados sobre engajamento popular e custos são muito discrepantes, variando entre 10 e 95% da população e entre US\$ 40 e US\$ 340 por tonelada coletada, o potencial para reduzir estes custos e aumentar a participação ainda é muito grande.

O ganho tecnológico é pouco significativo ao ser comparado ao ganho social que este empreendimento pode gerar, uma vez que a maior parte da população envolvida é de mão de obra não especializada.

Avaliação: +1.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Possibilidade de implantação e operação do Empreendimento

O sistema de coleta seletiva tem dificuldades de engajamento popular, pois altera os hábitos da população, requerendo o uso de um segundo recipiente para a disposição dos resíduos recicláveis, o que demanda, também, espaço físico.

Mesmo assim, se houver capital de giro suficiente para manter o sistema por um determinado período é possível viabilizá-los, como demonstram os mais de 100 projetos em funcionamento no país.

É muito importante ressaltar que vários destes sistemas são operados por cooperativas populares, viabilizando a inserção social de pessoas de baixa qualificação profissional.

O apoio do setor elétrico com recursos para a conservação de energia permitirá um grande avanço no número de comunidades atendidas, pois ampliará o universo de interessados ao elevar o preço dos recicláveis, assumindo que eles integram matéria-prima e energia.

O sistema tem condições de ter autonomia, pois é viável economicamente e caso consiga alguns apoios e incentivos, fica ainda mais fácil a sua auto-sustentação.

Avaliação: +2

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

Uma vez obtido o apoio do setor elétrico, não haverá risco de que praticamente todos os municípios apliquem este sistema, sendo o obstáculo final a questão da

escala de produção somada à distância do parque reciclador, cuja solução pode criar pequenos parques recicladores regionais.

Este sistema é articulado diretamente com a Educação e o Saneamento Básico, o que cria um vínculo direto com a Saúde Pública.

É perfeitamente viável a integração deste projeto com outras atividades socioeconômicas, contribuindo para a melhoria da sustentabilidade da região onde ele será implantado e há interesse das partes envolvidas para que isso aconteça.

Dentro deste contexto, a ligação deste empreendimento com Ecopolos e a articulação com possíveis programas regionais, como a reciclagem e o aproveitamento de resíduos só reforçaria a necessidade de sua implementação. Mas para isso, exige-se um reconhecimento das atividades e vocações da região em que o projeto será instalado.

Além disso, é importante que o projeto esteja articulado com os seguintes setores: centros de pesquisa e desenvolvimento, associações, fabricantes de equipamentos, fornecedores de insumos e outros setores com atividades diferentes das do projeto, mas que possuam algum tipo de semelhança em alguma fase do seu processo para que sua aplicação obtenha sucesso.

Avaliação do indicador: +2.

B) GERAÇÃO ELÉTRICA:

Serão avaliadas quatro das tecnologias descritas acima, em seus módulos mínimos de viabilidade.

B.1) RECUPERAÇÃO DE GÁS DE LIXO:

Será considerada a instalação de uma usina termelétrica movida a biogás recuperado de um aterro sanitário, com potência instalada de 3 MW, potência mínima para comercialização independente (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, 2001). Neste

local não há a recuperação de biogás para queima em flare, ainda que obrigatória pela legislação.

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

O aproveitamento energético do biogás produzido em aterros sanitários recupera 85% do biogás disponível. Para a usina de 3 MW de potência, será utilizado o gás proveniente da decomposição de 200 toneladas diárias de restos alimentares, com emissão evitada de 6,28 t CO₂/MWh. Como o fator de capacidade da usina é de 80%, serão gerados 21 GWh/ano e a emissão evitada será de 132 kt CO₂/ano.

Com esta geração de energia utilizando biogás, e se considerado como cenário de referência da expansão do setor elétrico o incremento da geração termelétrica com combustíveis fósseis, fruto da maior atratividade para os investidores, a emissão evitada pela substituição de combustível será a seguinte:

Considerando que as emissões da queima do gás natural em usinas termelétricas em ciclo combinado tenham o fator de 449 tCO₂/GWh (La Rovere e Americano, 1999), as emissões evitadas pela reciclagem decorrem do adiamento da instalação destas usinas. Portanto, ao atingir o potencial de 21 GWh/ano de conservação de energia, estarão sendo evitadas cerca de 10 kt CO₂/ano.

Desta forma, somando a emissão evitada pela decomposição dos restos alimentares nos vazadouros ao consumo evitado de combustíveis fósseis, o potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa atinge 142 kt CO₂/ano, o que reduz a emissão em 85% e tem avaliação +2.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

A recuperação do biogás evita explosão em vazadouros, que normalmente atingem pessoas oriundas de comunidades carentes, além de ampliar a vida útil do mesmo, em virtude de permitir o melhor assentamento dos resíduos.

Esta alternativa reduz a produção de chorume e, portanto, a contaminação decorrente deste poluente. Como este empreendimento pode ser empregado em todo o território nacional, o volume de gás e chorume coletado podem ser extremamente relevantes.

A avaliação destes benefícios soma +2

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Potencial de gerar poucos empregos, sobretudo por apenas estar retirando o biogás, o que requer pessoal mais especializado.

Esta alternativa poderia diminuir radicalmente o número de catadores, e dependendo do investimento feito, haveria a erradicação desta “profissão”. Isso é potencialmente possível e depende do engajamento das autoridades e do apoio da população.

Avaliação do Indicador: +1.

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

Em virtude da oferta de energia descentralizada e com combustível nacional, pode em pouco tempo transformar-se em significativa contribuição para a melhoria do IDH, por permitir o acesso à energia mais barata.

O número de empregos gerados é pequeno, porém a mudança social pela qual passam essas pessoas é radical, e isso é de suma importância no contexto nacional, onde a população em sua grande maioria, (incluindo as que participarão desta rota tecnológica) vive à margem da sociedade.

Avaliação do Indicador: +1.

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

A expectativa dos custos de investimento e de operação e manutenção são de US\$1000/kW e US\$7/MWh, com combustível a preço nulo.

Isto leva ao índice custo-benefício de US\$ 44.69/MWh. Como a receita possível é de R\$ 89,86/MWh, se for vendido para as concessionárias, a rentabilidade do empreendimento fica na ordem de 19%, sem considerar impostos.

As usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado têm custo de investimento de US\$625/kW, custo de operação e manutenção de US\$7/MWh e de combustível de US\$19/MWh, seu índice custo-benefício fica em US\$43,32/MWh. Como o valor normativo delas passou para R\$91,06/MWh, a taxa interna de retorno destes empreendimentos é de 20%, sem considerar os impostos.

Entretanto, é preciso considerar que o gás natural ficará mais caro, por conta das oscilações do petróleo ou do dólar, às quais o biogás não acompanhará.

Desta forma, a avaliação deste indicador é de +1.

Indicador 6: Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

Como são 142 ktCO₂ evitadas, para a geração de 21 GWh e ao custo incremental de US\$1,37/MWh, decorrente da diferença entre custo incremental da geração com biogás e o custo médio dos projetos de geração em usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado (US\$44,69 dos US\$43,32/MWh), o custo de abatimento é de US\$0,20 /tCO₂.

O custo contingente inclui também análise dos gastos com danos à saúde dos trabalhadores envolvidos na atividade e os possíveis acidentes de trabalho. Sob esta

ótica temos que a planta em questão é de simples operação para um profissional qualificado e os que se encontram em posições menos especializadas não estão expostos a grandes riscos.

Avaliação do indicador: +1, em função do custo de abatimento praticamente nulo, e da diminuição de risco de acidentes de trabalho.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Precisa adquirir tecnologia importada, visto que não existe sistema em funcionamento, além de pagamento de royalties.

Os equipamentos podem ser adquiridos no país, mas a mão de obra especializada para consulta deve ser totalmente importada.

Avaliação: -1.

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

A utilização do gás de lixo para a geração de energia não é uma prática totalmente inovadora no país, mas atualmente não há nenhuma atividade sendo realizada. Sendo assim, a implantação desta rota passa a ser uma excelente oportunidade de retomar esta prática e viabilizar este tipo de sistema.

É possível sua replicabilidade em diversos aterros brasileiros, uma vez que se trata de uma tecnologia simples, que pode ser repetida sem dificuldades, quando dominada.

Avaliação: +1.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Possibilidade de implantação e operação do Empreendimento

O sistema é de fácil implantação e operação, sendo possível a curto prazo desde que a viabilidade financeira seja confirmada.

A comunidade deverá apoiar a implantação da tecnologia, que a ela só traz vantagens - como a geração de empregos e extração de metano, gás explosivo. A manutenção e operação dos equipamentos não deverá ser considerada um obstáculo, pois é feita sem complicações.

Avaliação: +2

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

O potencial de articulação com outros setores decorre do desenvolvimento de uma indústria de equipamentos para a recuperação do biogás e para a geração de energia com este combustível, capaz de atingir várias regiões.

A integração com programas socioeconômicos regionais é possível em termos de fornecimento de energia. Contribui para a melhoria da sustentabilidade regional uma vez que vai gerar empregos e renda para a localidade, mas de certa forma isto é decorrência do grau de envolvimento e aceitação das partes interessadas pelo projeto.

Avaliação do indicador: +2.

B.2) DIGESTÃO ACELERADA

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

As 200 toneladas diárias destes resíduos, de acordo com o cálculo de produção de metano, pela metodologia do IPCC (1996), quando dispostas em vazadouros de lixo, emitem 1 Mt CH₄/ano decorrente de sua decomposição, o que corresponde a 21 Mt CO₂/ano. Mas é importante dizer que, caso este material orgânico estivesse em

aterros, só 85% deste biogás poderia ser recuperado, já que estes não foram construídos para este fim.

Como já foi dito, considerando que as emissões da queima do gás natural em usinas termelétricas em ciclo combinado tenham o fator de 449 tCO₂/GWh (La Rovere e Americano, 1999), as emissões evitadas pela reciclagem decorrem do adiamento da instalação destas usinas. Portanto, ao atingir o potencial de 3 TWh de conservação de energia, estarão sendo evitadas cerca de 1,5 MtCO₂/ano.

Em uma usina com 3MW de potência e fator de capacidade de 80%, as 200 toneladas de lixo podem evitar a emissão de até 160,4 ktCO₂/ano. Somando-se a este valor 449 toneladas CO₂/GWh devido à substituição de combustível fóssil, tem-se emissão evitada de 170 ktCO₂/ano.

A fixação deste dióxido de carbono na forma de carbonato de cálcio, retirando o carbono do ciclo, representa uma outra parcela de dióxido de carbono evitado quando da substituição do combustível fóssil por renovável, ou seja, 13,2 ktCO₂/ano.

Desta forma, somando-se a emissão evitada pela decomposição dos restos alimentares nos vazadouros ao consumo evitado de combustíveis fósseis e ao seqüestro da produção de carbonato de cálcio, o potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa atinge 180 ktCO₂/ano, o que é maior que a eliminação da emissão e tem avaliação +3.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

A utilização desta tecnologia diminui sensivelmente a necessidades de aterros sanitários, pois grande parte do material coletado vai para reciclagem, e a parte restante é direcionada para a geração de energia, via fabricação de briquetes. Apenas uma pequena parte residual é destinada a aterros. Pode-se dizer, então, que comparado à utilização do gás do lixo, o impacto sobre o meio ambiente é menor, visto a menor necessidade de espaço.

Dentro deste contexto, a recuperação do biogás evita a ocorrência de explosão em vazadouros, que normalmente atingem pessoas oriundas de comunidades carentes, além de ampliar a vida útil destes, em virtude de permitir o melhor assentamento dos resíduos.

Reduz, ainda, os impactos decorrentes da geração de energia substituída, independente da fonte utilizada, mesmo que seja em outra localidade.

A avaliação destes benefícios soma +2.

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Haveria somente necessidade de mão de obra não especializada para efetuar a seleção do lixo, e alguns cargos mais especializados para implementação e controle da tecnologia. Desta forma, apesar de não haver erradicação dos catadores – atividade sem qualquer respaldo de saúde pública – o que seria a solução final para este problema, efetiva-se a transferência de postos de trabalho para outra etapa menos degradante, em ponto anterior da cadeia de disposição final de resíduos.

Avaliação do Indicador: +2

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

Em virtude da oferta de energia descentralizada e com combustível nacional, pode em pouco tempo transformar-se em significativa contribuição para a melhoria do IDH, por permitir o acesso à energia mais barata.

A população que será beneficiada diretamente constitui-se, em maior quantidade, de mão de obra sem especialização, à margem do conceito de cidadania. Assim sendo, a aplicação desta tecnologia melhora substancialmente a qualidade de vida destas pessoas, bem como contribui para toda a sociedade quando oferece uma

fonte de energia alternativa renovável e mais barata que a energia originária do gás natural.

Avaliação do Indicador: +2

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

A expectativa dos custos de investimento e de operação e manutenção são de 1500US\$/kW e 10,70US\$/MWh, com combustível a custo negativo de US\$10,66/MWh.

Isto leva ao índice custo-benefício de 43,03US\$/MWh. Como a receita possível é de R\$89,86/MWh, caso seja vendido para as concessionárias, a rentabilidade do empreendimento fica na ordem de 19%.

As usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado têm custo de investimento de US\$625/kW, custo de operação e manutenção de US\$7/MWh e de combustível de US\$19/MWh, seu índice custo-benefício fica em US\$43,32/MWh. Como o valor normativo delas passou para R\$91,06/MWh, a taxa interna de retorno destes empreendimentos é de 20%.

Entretanto, é preciso considerar que o gás natural ficará mais caro, por conta das oscilações do petróleo ou do dólar, às quais esta tecnologia não acompanhará.

Desta forma, a avaliação deste indicador é de +1.

Indicador 6: Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

Como são 18,5 MtCO₂ evitadas, para a geração de 3 TWh e ao custo incremental de US\$0.29/MWh negativos, decorrente da diferença entre custo incremental da geração com a tecnologia DRANCO e o custo médio dos projetos de

geração em usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado (US\$ 43,03 menos US\$ 43,32/MWh), o custo de abatimento é de US\$0.05/tCO₂ negativos.

Como um dos benefícios contingentes deste empreendimento, soma-se a não emissão de algumas toneladas de CO₂ na atmosfera e a possível baixa taxa de acidentes de trabalhos, ou indivíduos acidentados, visto que os trabalhadores já têm experiência com seleção de lixo e passarão a trabalhar em um ambiente menos hostil à saúde.

Avaliação do indicador: +1, em função do custo de abatimento praticamente nulo e da geração de empregos com risco de doença inferior ao vigente.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Para a implementação desta rota, será necessário adquirir tecnologia importada, visto que não existe sistema em funcionamento em território nacional.

Neste caso, há uma parceria entre os detentores da tecnologia e os responsáveis pela sua aplicação em âmbito nacional (NTA), fazendo com que a receita proveniente deste empreendimento não seja integralmente destinada ao pagamento de patentes ou royalties, configurando-se em um cenário favorável.

Avaliação: +2

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

Esta tecnologia já é utilizada, com grande aceitação, em outros países na Europa. A planta mais antiga em operação encontra-se na Bélgica, possuindo cerca de 10 anos de funcionamento. Para o Brasil, no entanto, é uma tecnologia pioneira que está sendo implementada em alguns municípios do sul.

É uma excelente oportunidade de introduzir novas maneiras de viabilizar este tipo de sistema, além de ter considerável ganho social.

Avaliação: +3.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Possibilidade de implantação e operação do Empreendimento

O sistema é de fácil implantação e operação a curto prazo, considerando que a equação financeira já esteja solucionada. São necessários técnicos responsáveis e operadores para o andamento das mesmas.

Como a concessão da coleta seletiva fica a cargo do município, haverá a necessidade de contratos de longo prazo com prefeituras para evitar a vulnerabilidade a mudanças de governo e políticas públicas. Ressalta-se a necessidade da figura do empreendedor, a fim de permitir a continuidade deste processo.

A comunidade que habita as redondezas dos lixões será beneficiada diretamente pela implantação desta alternativa pois deverá ser notada a diminuição de insetos e animais que se alimentam e vivem nos lixões e transmitem doenças. Desta forma é possível que haja o apoio e engajamento da comunidade para por esta tecnologia em prática.

Avaliação: +2

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

O potencial de articulação é grande devido tanto à gama de atividades correlatas (coleta seletiva, geração de briquetes e geração de energia), como à possibilidade de implementação em vários logradouros, além da viabilidade econômica.

Seu principal subproduto é a fabricação de briquetes que poderão ser queimados em caldeiras para geração de energia devido ao seu alto poder calorífico, sem que para tanto sejam necessárias quaisquer alterações nos equipamentos já existentes. Por esse motivo, torna-se perfeitamente possível a adoção desta fonte de

energia pelo mercado, visto que assim poderá haver um preço mais atrativo do que as outras fontes difundidas comercialmente, sendo capaz de atingir várias regiões.

Haverá um adicional de renda para grande parte das regiões vizinhas, pois agregou-se valor ao que anteriormente era rejeitado, tornando-se uma moeda nova.

Avaliação do indicador: +2.

B.3) A TECNOLOGIA BIOMASSA-ENERGIA-MATERIAIS

Este empreendimento tem viabilidade econômica a partir da utilização de 225 toneladas diárias de celulignina, produto obtido a partir de processamento químico dos restos alimentares contidos nos resíduos sólidos urbanos (RSU), para abastecer uma usina termelétrica com potência instalada de 25 MW. Esta quantidade de celulignina é obtida simultaneamente a 75 toneladas de caldo pré-hidrolisado, matéria-prima para obtenção de insumos petroquímicos ou combustíveis, o que corresponde a evitar que 300 toneladas diárias de lixo sejam dispostas em aterro.

A obtenção desta quantidade de combustível requer 1.250 toneladas diárias de RSU, das quais é possível a retirada 35% de recicláveis (papéis, plásticos, vidros e metais), percentual típico na composição média do RSU brasileiro. Isto representa o resultado da coleta de uma população entre 1 e 2 milhões de pessoas, quando considerada a média entre 600 e 1000 gramas diários por habitante.

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

Para a tecnologia B.E.M., de acordo com o cálculo de produção de metano contido no biogás oriundo da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, pela metodologia do IPCC (1996), 300 toneladas de resíduos dispostas em vazadouros de lixo emitem cerca de 8,57% (p/p) em metano, o que corresponde a 9,5 ktCH₄/ano decorrente de sua decomposição. A conversão de metano em dióxido de carbono

equivalente atinge o valor de 195 ktCO₂/ano, caso seja aplicado como potencial de aquecimento global o fator 21, para 100 anos. A recomendação mais recente do IPCC é de que seja utilizado o fator 23 para esta conversão, o que levará o total a 214 ktCO₂/ano.

O aproveitamento energético deste combustível gasoso não será integral, mas cerca de 90% seria consumido como combustível da usina termelétrica, evitando, assim, de 176 a 193 ktCO₂/ano, ao gerar 197 GWh anuais de energia elétrica.

Para calcular a emissão evitada pela utilização de combustível oriundo de resíduos é preciso considerar o cenário de referência da expansão do setor elétrico. Neste caso, com base nas tendências da política que o governo adotou para o setor nos últimos anos, balizada pela maior atratividade desta alternativa para os investidores, o incremento da geração será através de usinas termelétricas, que utilizarão combustíveis fósseis.

O caso de menor emissão, em relação aos gases do efeito estufa, são as decorrentes da queima do gás natural nas usinas termelétricas em ciclo combinado, responsáveis pela emissão de 449 tCO₂/GWh (La Rovere e Americano, 1999). Portanto, ao atingir o potencial de 197 MWh de geração de energia, estarão sendo evitadas cerca de 88 ktCO₂/ano.

Desta forma, somando-se a emissão evitada pela decomposição dos restos alimentares nos vazadouros ao consumo evitado de combustíveis fósseis, o potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa atinge a faixa entre 264 a 281 ktCO₂/ano, dependendo do fator usado para o GWP.

Como o cenário de referência contempla a emissão de metano das 1250 toneladas diárias de resíduos dispostos em vazadouros, o que representa uma fonte antropogênica de gases do efeito estufa com potencial na ordem de 814 a 892 ktCO₂/ano, acrescida da geração de energia com combustível fóssil supra-citada, seu potencial atinge 902 a 980 ktCO₂/ano.

A redução de emissões que o projeto pode representar cerca de 30%, o que corresponde à avaliação +1.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

A tecnologia B.E.M., por diminuir a quantidade de lixo disposta em vazadouros, reduz a produção de chorume, efluente que contamina os lençóis freáticos, assim como reduz a demanda por áreas para os aterros crescerem ou serem instalados, recuperando a flora original e possibilitando o retorno da fauna, além de outros usos. Também os gases poluentes emanados pelos vazadouros são reduzidos. Como esta tecnologia permite que seja evitada a destinação final de lixo para os vazadouros na faixa de 24%, os impactos evitados podem ser considerados iguais a este valor, se os efeitos forem diretamente proporcionais à disposição de lixo, ou mais que proporcionais à quantidade disposta, se considerada a iminência de ruptura da capacidade de suporte dos ecossistemas onde os vazadouros de lixo estão situados no Brasil.

Estes benefícios locais superam o cenário de referência na faixa entre 21% e 60% sendo, portanto, a avaliação representada pelo valor +1.

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Potencial de gerar poucos empregos diretos, alguns com mão-de-obra não especializada para seleção do material coletado, além de pessoal mais especializado para implementação da tecnologia.

Como este valor não supera o cenário de referência em 20%, a avaliação do Indicador é zero.

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

Esta rota tecnológica é uma alternativa para a geração de energia mais barata que o gás natural e, caso esta vantagem seja repassada ao consumidor final, poderá contribuir para aumentar o acesso das classes menos favorecidas, o que repercute na melhoria do IDH. Sua replicabilidade é de suma importância, por ser uma forma de energia descentralizada e que utiliza como combustível nacional.

Como o cenário de referência inclui uma usina termelétrica a gás natural em ciclo combinado e a disposição final dos resíduos no vazadouro, cada unidade terá interferência direta na redução do vazadouro e de seus impactos, alterando o cálculo do IDH.

Sendo a redução do lixo de 24%, como visto no indicador 2, e o custo da energia reduzindo-se em cerca de 30%, este indicador demonstra uma melhoria superior a 20%.

Avaliação do Indicador: +1

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

A expectativa dos custos de investimento, bem como os de operação e manutenção são de US\$840/kW e 5,99/MWh, respectivamente. Como a utilização de RSU como combustível é uma forma de tratamento sanitário, este combustível deve ser cotado a custo negativo de US\$ 1,30 US\$/MWh. Isto leva ao índice custo-benefício de US\$ 28,77/MWh. Como a receita possível é de R\$89,86/MWh, caso seja vendido para as concessionárias pelo Valor Normativo existente antes da sanção da Lei 10.438, a rentabilidade do empreendimento fica na ordem de 34%.

Com a potência de 25 MW, pode-se conseguir uma receita de US\$ 317.550 por ano em virtude da comercialização de certificados de emissões evitadas de CO₂, valor que certamente modificará a rentabilidade de forma positiva

As usinas termelétricas (UTES) a gás natural em ciclo combinado têm custo de investimento de US\$ 625/kW, custo de operação e manutenção de US\$7/MWh e de combustível de US\$19/MWh, fatores que levam seu índice custo-benefício para o patamar de US\$ 43,32/MWh. Como o valor normativo das UTES com potência instalada superior a 350 MW passou para R\$91,06/MWh, cuja taxa interna de retorno destes empreendimentos é de 20%. As UTES com potência de até 350 MW tiveram seus valores normativos confirmados em R\$ 106,40/MWh, o que representa uma taxa interna de retorno de 25%, se mantidos os mesmos custos da usina de grande escala, os quais devem aumentar. Seu índice custo-benefício atinge valores mais elevados que o da UTE de maior escala, mas uma leitura mais conservadora os torna iguais.

Assim, o benefício relacionado a taxa interna de retorno melhora em cerca de 35%, quando comparada com a usina de mesma escala. Sobre o índice custo-benefício haverá uma melhoria de até 34%. Quaisquer que sejam as ponderações, a média deste indicador ficara na faixa de 21% a 60% de redução face ao cenário de referência, o que corresponde à avaliação +1.

Como não existe nenhuma planta termelétrica deste tipo funcionando em escala industrial, o risco do empreendimento é considerado elevado, o que repercute negativamente na avaliação do indicador, levando-o para o nível imediatamente inferior.

Avaliação do indicador: zero.

Indicador 6: Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

O custo de abatimento é calculado através da razão entre a diferença nas emissões do cenário de referência face ao cenário alternativo e a diferença de custos entre o cenário alternativo e o cenário de referência.

Como a emissão evitada por ano é de 264 a 280 ktCO₂, para a geração de 197 GWh anuais, o que pode ser representado pelo intervalo entre 1,34 e 1,42 tCO₂/MWh, e o custo incremental é negativo, na faixa de US\$14/MWh, decorrente da diferença entre custo incremental da geração com sistema B.E.M. e o custo médio dos projetos de geração em usinas termelétricas a gás natural em ciclo combinado (US\$ 28,77 os US\$ 43,32/MWh), o custo de abatimento ficará na faixa entre US\$ 9,86/tCO₂ negativos e US\$10,44/tCO₂ negativos.

Para esta tecnologia, os benefícios contingentes são, além da não emissão de algumas toneladas de CO₂ na atmosfera, o menor risco de acidentes para trabalhadores, uma vez que o local de trabalho será mais seguro e menos nocivo ao indivíduo do que os lixões ou outro local sem condições de segurança no trabalho.

Como o único valor divulgado como limite para compra de certificados no mercado internacional de carbono é o fornecido pelo CERUPT, órgão do governo holandês, o qual encontra-se na faixa de US\$ 5/t CO₂, pode ser considerado como cenário de referência. A partir desta premissa, o valor encontrado para esta tecnologia tem benefício superior a 100%.

No aspecto ambiental local, os benefícios serão, no mínimo, proporcionais à redução de material a ser disposto nos vazadouros, o que corresponde a 24%. Quanto aos benefícios relacionados à saúde pública, existe uma dificuldade em valorar os atuais danos, uma vez que a situação encontra-se abaixo do padrão mínimo de controle, o que representa ausência de dados para estabelecimento de qualquer análise. Por isto, a oferta de postos-de-trabalho desvinculados da insalubridade atual terá repercussão superior à proporção matemática direta, que se encontra na mesma faixa de 24%.

Considerando que as duas variáveis tenham o mesmo peso, a média entre os graus +3 e +1 aponta para que a avaliação deste indicador seja +2.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

O reator que realiza o processo de pré-hidrólise ácida dos resíduos para obtenção do combustível (celulignina) e do subproduto (caldo pré-hidrolisado) pode ser construído no Brasil, como foi o reator do equipamento piloto. A planta de processamento do caldo pré-hidrolisado para produção de furfural também pode ser produzida no país.

Dessa forma, o aumento do investimento necessário a este tipo de sistema em comparação ao de uma usina termelétrica a gás natural em ciclo combinado, passando de US\$ 625/kW para US\$ 840/kW, o que representa 34%, pode ser totalmente realizado em moeda nacional.

Qualquer que seja o índice de nacionalização de uma usina termelétrica a gás natural em ciclo combinado, o mesmo índice para uma usina da tecnologia BEM será incrementado na mesma proporção do incremento de custo, totalmente realizado em moeda nacional.

Como a mão-de-obra que dará suporte para a operação também tem formação nacional e não há pagamento de royalties, a média aritmética entre os dois valores acima fica na faixa de melhoria entre 21% e 60%, o que constitui o nível de avaliação: +1.

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

A tecnologia B.E.M. foi desenvolvida pelo Prof. Daltro Pinatti em parceria com o Grupo Peixoto de Castro, através da empresa RM Materiais Refratários, em Lorena (SP), onde há uma planta piloto já testada com êxito.

O desenvolvimento desta rota tecnológica vem sendo realizado há dez anos, o que permitiu a solicitação de três patentes, sendo que o pedido de domínio sobre o

reator já obteve a concessão nacional e, agora, está sendo solicitada patente internacional.

Como um reator exclusivo foi construído para tornar possível este processo, e não tem aplicabilidade em nenhum outro sistema, a princípio, esta tecnologia se configura como fortemente inovadora.

O cenário de referência utiliza equipamentos já existentes e não apresenta inovação tecnológica para a geração de energia.

Desta forma, a tecnologia BEM, por ser completamente inovadora na execução do seu processo, obtém avaliação +3.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Possibilidade de implantação e operação do Empreendimento

Em virtude dos custos incorridos por todas as municipalidades para o tratamento adequado de resíduos e, mais recentemente, pela oportunidade decorrente do aproveitamento energético viável economicamente e capaz de atrair recursos relacionados ao efeito estufa, a possibilidade de implantação pode considerar como única barreira o estágio de desenvolvimento da tecnologia.

Como esta rota tecnológica ainda requer equacionamento econômico para implantação e operação da planta pioneira, sua aplicabilidade distancia-se do custo prazo e aproxima-se do médio prazo.

Avaliação: +1.

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

O potencial de articulação com outros setores decorre do desenvolvimento de uma indústria de equipamentos para a produção do combustível e para a geração de energia com o mesmo, capaz de atingir várias regiões.

O potencial de integração é alto, possibilitando a utilização desta tecnologia por outras cidades no país, assim como em consórcios municipais, visto que sua aplicação traz inúmeros benefícios para os mesmos.

Em virtude de requerer o mínimo de 1250 toneladas diárias de lixo, o que demanda uma população entre 1 e 2 milhões de habitantes, a implantação de plantas industriais desta tecnologia no interior do país necessitará do estabelecimento de consórcios entre diversos municípios, assim como do desenvolvimento de uma indústria de equipamentos e serviços para assistir o empreendimento.

Avaliação do indicador: +2.

B.4) A TECNOLOGIA DA INCINERAÇÃO

A Análise de Sustentabilidade desta tecnologia será da implantação de um Centro Tecnológico, o que impede analisar a viabilidade econômica.

O empreendimento visa utilizar os resíduos sólidos urbanos, produzidos no campus da Ilha do Fundão, da Universidade do Brasil (antiga UFRJ) gerando energia para este campus e, com isso, reduzir a quantidade de lixo que esta Universidade mandava para aterros controlados.

Neste caso serão utilizadas cerca de 30 toneladas diárias de lixo, todo ele gerado no campus universitário da Ilha do Fundão, para abastecer uma usina termelétrica com potência nominal de 1 MW e potência efetiva de 700 kW.

A USINAVERDE, empresa responsável pelo sistema, em uma primeira fase de seis meses de duração, realizará apenas a queima de resíduos, e na fase seguinte será adicionada a geração de energia. O grande avanço tecnológico desta tecnologia reside no tratamento de gases posterior à queima dos resíduos. Assim, mesmo sem o aproveitamento energético haverá um ganho ambiental, pois os resíduos sólidos não estarão sendo destinados ao aterro controlado.

Durante os primeiros 6 meses, enquanto não estiver sendo feita a geração de energia, o consumo de energia será proveniente da concessionária que faz a distribuição de energia na rede. Desta forma o consumo de energia será distribuído da seguinte forma:

Quadro 3 : Fases do Projeto – Usinaverde

		Fornecedor de Energia
Fase 1	mês 01 ao mês 06	Concessionária de Serviço Público (Light)
Fase 2	mês 07 ao final do projeto	USINAVERDE

Fonte: PDD USINAVERDE, 2004.

Como se trata de um projeto piloto dentro de um centro de pesquisa, como é a Universidade, haverá um sistema de acompanhamento da temperatura, do produto que está sendo incinerado, bem como o monitoramento contínuo das emissões, para que estas fiquem abaixo dos padrões estipulados pelos órgãos de controle ambiental do Estado e para que possam servir de insumo para novos estudos neste projeto.

Também se constitui um objetivo do projeto o monitoramento das emissões evitadas decorrentes do consumo dos resíduos sólidos pelo grupo-gerador, bem como a comprovação dos benefícios ambientais destas, comparativamente às emissões dos combustíveis fósseis que seriam utilizados na ausência do projeto.

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

Para a tecnologia de Incineração, de acordo com o cálculo de produção de metano contido no biogás oriundo da decomposição anaeróbica da matéria orgânica, pela metodologia do IPCC (1996), 30 toneladas de resíduos dispostas em vazadouros

de lixo emitem cerca de 8,57% (p/p) em metano, o que corresponde a 950 tCH₄/ano decorrente de sua decomposição. A conversão de metano em dióxido de carbono equivalente atinge o valor de 19,5 ktCO₂/ano, caso seja aplicado como potencial de aquecimento global o fator 21, para 100 anos. A recomendação mais recente do IPCC é de que seja utilizado o fator 23 para esta conversão, o que levará o total a 21,4 ktCO₂/ano.

Para calcular a emissão evitada pela utilização de combustível oriundo de resíduos é preciso considerar o cenário de referência da expansão do setor elétrico. Neste caso, com base nas tendências da política que o governo adotou para o setor nos últimos anos, balizada pela maior atratividade desta alternativa para os investidores, o cenário de referência usado até então foi o incremento da geração através de usinas termelétricas, que utilizarão combustíveis fósseis.

O caso de menor emissão, em relação aos gases do efeito estufa, são as decorrentes da queima do gás natural nas usinas termelétricas em ciclo combinado, responsáveis pela emissão de 449 tCO₂/GWh (La Rovere e Americano, 1999). Portanto, ao atingir o potencial de 4,9 GWh de geração de energia (700kW funcionando 80% do tempo), estarão sendo evitadas cerca de 1,2 ktCO₂/ano.

Desta forma, somando-se a emissão evitada pela decomposição dos restos alimentares nos vazadouros ao consumo evitado de combustíveis fósseis, o potencial de redução de emissões de gases do efeito estufa atinge a faixa entre 21,7 a 23,6 ktCO₂/ano, dependendo do fator usado para o GWP.

Como o cenário de referência contempla a emissão de metano das 30 toneladas diárias de resíduos dispostos em vazadouros, o que representa uma fonte antropogênica de gases do efeito estufa com potencial na ordem de 19,5 a 21,4 ktCO₂/ano, acrescida da geração de energia com combustível fóssil supra-citada, seu potencial atinge 21,7 a 23,6 ktCO₂/ano.

Como as cinzas geradas pelo processo são inertes, a redução nas emissões de gases de efeito estufa (100% do metano da decomposição orgânica em aterros, 100% do dióxido de carbono da rede) do projeto representam 100%, o que corresponde à avaliação +3.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

A tecnologia de incineração, por diminuir a quantidade de lixo disposta em vazadouros, reduz a produção de chorume, efluente que contamina os lençóis freáticos, assim como reduz a demanda por áreas para os aterros crescerem ou serem instalados, recuperando a flora original e possibilitando o retorno da fauna, além de outros usos. Também os gases poluentes emanados pelos vazadouros são reduzidos. Como esta tecnologia permite que seja evitada a destinação final de lixo para os vazadouros na faixa de 96%, os impactos evitados podem ser considerados iguais a este valor, se os efeitos forem diretamente proporcionais à disposição de lixo, ou mais que proporcionais à quantidade disposta, se considerada a iminência de ruptura da capacidade de suporte dos ecossistemas onde os vazadouros de lixo estão situados no Brasil.

Como haverá aumento nas emissões atmosféricas locais, ainda que dentro dos limites legais, será reduzida a sustentabilidade local. O valor absoluto deste impacto será conhecido ao fim da elaboração do Estudo de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), previsto para abril, quando será possível concluir esta avaliação.

Avaliação: Não definido.

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Potencial de gerar poucos empregos diretos, alguns com mão-de-obra não especializada para seleção do material coletado, além de pessoal mais especializado para implementação da tecnologia.

Como este valor não supera o cenário de referência em 20%, a avaliação do Indicador é zero.

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

Esta rota tecnológica é uma alternativa para a geração de energia mais barata que o gás natural e, caso esta vantagem seja repassada ao consumidor final, poderá contribuir para aumentar o acesso das classes menos favorecidas, o que repercute na melhoria do IDH. Sua replicabilidade é de suma importância, por ser uma forma de energia descentralizada e que utiliza como combustível nacional.

Como o cenário de referência inclui uma usina termelétrica a gás natural em ciclo combinado e a disposição final dos resíduos no vazadouro, cada unidade terá interferência direta na redução do vazadouro e de seus impactos, alterando o cálculo do IDH.

Sendo a redução do lixo de 96%, como visto no indicador 2, e o custo da energia contar apenas com estimativas, face ao caráter de pesquisa do Centro Tecnológico, **ainda que este custo seja duplicado**, não haverá impacto negativo para a população, pois a média entre -96% e +100% estará na faixa de variação que compreende o intervalo entre -20% e +20%.

Avaliação do Indicador: 0

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

Apesar dos custos disponíveis ainda estarem relacionados ao Centro Tecnológico (que, por sua natureza de desenvolvimento, serão mais caros do que o

das unidades operacionais), o empreendimento contar com recursos advindos integralmente da iniciativa privada sinaliza para a sua viabilidade econômica potencial.

Avaliação do indicador: não definida.

Indicador 6: Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

O custo de abatimento é calculado através da razão entre a diferença nas emissões do cenário de referência face ao cenário alternativo e a diferença de custos entre o cenário alternativo e o cenário de referência.

Como ainda não é possível dispor dos dados financeiros de unidades operacionais, este indicador também terá a sua avaliação adiada.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Todos os equipamentos que realizam o processo foram construídos no Brasil.

Como a mão-de-obra que dará suporte para a operação também tem formação nacional e não há pagamento de royalties, a avaliação é positiva ao máximo.

Avaliação: +3

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

A tecnologia de lavagem de gases pós-queima foi desenvolvida pela empresa USINAVERDE, em parceria com o Grupo ARBI.

O desenvolvimento desta rota tecnológica vem sendo realizado há três anos, o que permitiu a solicitação de patente.

Como o sistema de lavagem é exclusivo e foi construído para tornar possível este processo, não tendo aplicabilidade em nenhum outro sistema, a princípio, esta tecnologia se configura como inovadora.

O cenário de referência utiliza equipamentos já existentes para a geração de energia e não apresenta inovação tecnológica.

Desta forma, a tecnologia da Incineração com lavagem de gases da USINAVERDE, por ser inovadora na execução do seu processo, obtém avaliação +2.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Possibilidade de implantação e operação do Empreendimento

Em virtude dos custos incorridos por todas as municipalidades para o tratamento adequado de resíduos e, mais recentemente, pela oportunidade decorrente do aproveitamento energético viável economicamente e capaz de atrair recursos relacionados ao efeito estufa, a possibilidade de implantação pode considerar como única barreira o estágio de desenvolvimento da tecnologia.

Como esta rota tecnológica ainda requer a comprovação técnica da operação da planta pioneira, sua aplicabilidade distancia-se do curto prazo e aproxima-se do médio prazo.

Avaliação: +1.

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

O potencial de articulação com outros setores decorre do desenvolvimento de uma indústria de equipamentos para a produção do combustível e para a geração de energia com o mesmo, capaz de atingir várias regiões.

O potencial de integração é alto, possibilitando a utilização desta tecnologia por outras cidades no país, assim como em consórcios municipais, visto que sua aplicação traz inúmeros benefícios para os mesmos.

Em virtude de requerer o mínimo de 30 toneladas diárias de lixo, o que demanda uma população entre 30 e 50 mil habitantes, a implantação de plantas industriais desta tecnologia no interior do país poderá atender a centenas de municípios, o que

permitirá o desenvolvimento de uma indústria de equipamentos e serviços para assistir o empreendimento.

Avaliação do indicador: +3.

Avaliação: O projeto será sustentável, ainda que os três indicadores não definidos sejam avaliados como sendo grau -3.

As tabelas a seguir mostram a síntese das avaliações feitas para a conservação e para as quatro tecnologias de geração, sendo a primeira por dimensão de sustentabilidade, tabela 18, e a segunda, tabela 19, totalizando estes valores.

TABELA 18 - Aproveitamento Energético de Resíduos agrupados por Dimensão de Sustentabilidade

	AMBIENTAL		SOCIAL		ECONÔMICO		TECNOLÓGICO		IMPL.& OP.	
	â	MÉDIA	â	MÉDIA	â	MÉDIA	â	MÉDIA	â	MÉDIA
TECNOLOGIA										
CONSERVAÇÃO VIA RECICLAGEM	5	2,5	6	3	5	2,5	4	2	4	2
RECUPERAÇÃO DE GÁS DE LIXO	4	2	2	1	2	1	0	0	4	2
DIGESTÃO ACELERADA	5	2,5	4	2	2	1	5	2,5	4	2
B.E.M.	2	1	1	0,5	2	1	4	2	3	1,5
INCINERAÇÃO	3	1,5	1	0,5	Nd	nd	5	2,5	4	2

Fonte: Elaboração Própria

TABELA 19 – Total de Soma e Média dos Indicadores para cada Rota Tecnológica

ROTA TECNOLÓGICA	TOTAL	
	â	MÉDIA
CONSERVAÇÃO VIA RECICLAGEM	24	2,4
RECUPERAÇÃO DE GÁS DE LIXO (GDL)	12	1,2
DIGESTÃO ACELERADA	20	2,0
B.E.M.	12	1,2
INCINERAÇÃO	13	1,3

Fonte: Elaboração Própria

A otimização do aproveitamento energético de lixo requer a compatibilização entre a conservação de energia através da reciclagem às rotas de geração de energia e, quando a rota escolhida para o lixo novo for DRANCO, INCINERAÇÃO ou B.E.M., deve ser acrescentada a geração através do GDL do lixo já disposto. Isto foi feito na tabela 20 mediante uma ponderação vinculada ao potencial de energia que cada alternativa pode vir a disponibilizar. Aplicando os percentuais da tabela 20 aos valores da tabela 19 obteve-se a tabela 21, a seguir.

TABELA 20 – Fatores de compatibilização entre as Rotas Tecnológicas (pela energia disponibilizada)

ENERGIA TWh/ano	PERCENTUAL DE PARTICIPAÇÃO DE CADA ROTA				
	GDL	CONSERVAÇÃO	INCINERAÇÃO	DRANCO	BEM
68	19	81	0	0	0
120	11	46	43	0	0
85	15	65	0	20	0
92	14	60	0	0	26

Fonte: Elaboração Própria

TABELA 21 – Compatibilização das Rotas Tecnológicas (Soma ponderada)

ROTA TECNOLÓGICA	â
GÁS DE LIXO + CONSERVAÇÃO	22
DIGESTÃO ACELERADA + GDL + CONSERVAÇÃO	21
B.E.M. + GDL + CONSERVAÇÃO	19
INCINERAÇÃO + GDL + CONSERVAÇÃO	19

Fonte: Elaboração Própria

Antes de reproduzir os resultados da análise elaborada para o CENTROCLIMA (2000) sobre outras FAEs (eólica, solar e PCH), é necessário realizar a análise de

sustentabilidade para o aproveitamento energético de bagaço, palha e pontas de cana-de-açúcar.

C) GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Será considerado o aprimoramento dos sistemas já existentes, havendo aumento na pressão das caldeiras e colheita mecanizada para que seja desnecessária a queima da palha e, com isso, este insumo passe a servir para a geração de energia. As pontas desperdiçadas atualmente também serão utilizadas para geração de energia.

Foi tomado um empreendimento qualquer, sem escala pré-determinada, uma vez que existem, na literatura, fatores sobre as emissões de poluentes, os níveis de empregos e os custos, por unidade de energia ou de matéria-prima.

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

A colheita mecanizada evitará a queimada da palha da cana-de-açúcar que, segundo a metodologia do IPCC (1996), produz metano na proporção de 1,5%, em peso, da fitomassa queimada. O aproveitamento das pontas, ora encaminhadas aos vazadouros de lixo, também evitará metano decorrente da decomposição da biomassa, neste caso na proporção de 3,9% em peso, segundo metodologia do IPCC (1996).

Além disto, o aproveitamento de energia gerada a partir de biomassa cultivada substitui o consumo de energia oriunda de outras fontes, sobretudo fósseis. Neste aspecto, são evitadas emissões de dióxido de carbono.

Assim, as emissões evitadas por esta alternativa são iguais a 100% do que seria emitido caso estes insumos fossem desperdiçados e a avaliação é +3.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

Ao eliminar a queima de palha, o material particulado será evitado. Este poluente é muito significativo nas regiões canavieiras, e sua eliminação representa um ganho substancial na sustentabilidade local.

O aproveitamento das pontas reduzirá a demanda por áreas para disposição final de resíduos, as quais são normalmente, no caso brasileiro, operadas abaixo das condições sanitárias. A eliminação deste “motivo” para a poluição representa outro benefício significativo para a comunidade.

Avaliação deste indicador: +3

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

A colheita mecanizada, necessária para evitar a queima da palha e permitir seu aproveitamento energético, é responsável pelo desemprego de aproximadamente 70% da mão-de-obra utilizada na colheita (GÓES, 2001).

Assim, a avaliação do Indicador é -2.

Indicador 4: Contribuição para melhoria do IDH

Como o IDH é composto por renda, saúde e escolaridade, a redução no número de empregos reflete de forma negativa no cálculo do IDH, enquanto a redução dos poluentes locais reflete de forma positiva.

A perda de emprego e, por conseguinte, de renda para os cortadores de cana-de-açúcar é mais impactante que a redução da poluição, pois reflete-se na escolaridade de seus dependentes, que precisarão ajudar na renda doméstica.

Assim, é possível extrapolar a avaliação do indicador acima para renda e repeti-la para escolaridade, passando a ter duas componentes do IDH valendo -2.

Considerando os benefícios da redução da poluição local como diretamente ligados à saúde, esta componente vale +3.

Se os pesos forem iguais, teremos a soma valendo -1.

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

Como o cenário de referência é a UTE GN CC, cujo custo de geração de energia está na faixa de US\$ 43,32/MWh, haverá aumento de custo para este tipo de aproveitamento.

Segundo os dados obtidos, o custo de geração das usinas movidas a bagaço, palha e pontas atinge US\$ 77,49/MWh, cerca de 78% acima do custo das UTEs GN CC.

Avaliação do indicador: -2

Indicador 6: Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

O custo de abatimento é calculado através da razão entre a diferença nas emissões do cenário de referência face ao cenário alternativo e a diferença de custos entre o cenário alternativo e o cenário de referência.

O valor tomado para referência é o ofertado pelo CERUPT, órgão ligado ao governo holandês que lançou um edital internacional solicitando créditos de carbono pelos quais pagaria até US\$ 5 por tonelada de dióxido de carbono equivalente.

Como o valor aqui obtido é de US\$ 67,99/t CO₂ Eq **negativos**, o cenário de referência foi suplantado em mais de 100%.

Avaliação: +3.

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Os equipamentos que realizam o processo podem ser construídos no Brasil.

Dessa forma, o aumento do investimento necessário a este tipo de sistema, em comparação ao de uma usina termelétrica a gás natural em ciclo combinado, de 78% como mostrado acima, será totalmente realizado em moeda nacional.

Como a mão-de-obra que dará suporte para a operação também tem formação nacional e não há pagamento de royalties, a média aritmética entre os dois valores acima estará em uma faixa de melhoria entre 78% e 100%. A avaliação deve ser + 2.

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

A tecnologia de aproveitamento energético de bagaço, palha e pontas é completamente dominada.

Como não representa qualquer inovação, obtém avaliação zero.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Possibilidade de implantação e operação do Empreendimento

Em virtude dos custos incorridos por vários empreendedores para o tratamento adequado de resíduos e, mais recentemente, pela oportunidade decorrente do aproveitamento energético viável economicamente e capaz de atrair recursos relacionados ao efeito estufa, a possibilidade de implantação pode considerar como única barreira o custo da energia.

Como esta rota tecnológica pode ter sua aplicabilidade no curto prazo, sua avaliação é +2.

Indicador 10: Possibilidades de integração regional e articulação com outros setores

O potencial de articulação com outros setores decorre do desenvolvimento de uma indústria de equipamentos para a produção do combustível e para a geração de energia com o mesmo, capaz de atingir várias regiões.

O potencial de integração é alto, possibilitando a utilização desta tecnologia por outras cidades no país, assim como em consórcios municipais, visto que sua aplicação traz inúmeros benefícios para os mesmos.

Avaliação do indicador: +2.

A tabela 22, a seguir, sintetiza os resultados da análise:

TABELA 22 – Síntese do Projeto de aproveitamento de Bagaço, Palha e Pontas

PROJETO/INDICADORES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
Bagaço com Palha e Pontas	3	3	-2	-1	-2	3	2	0	2	2	10

Fonte: Elaboração Própria

O projeto mostra-se como sustentável, pois somou resultado não-negativo.

D) GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM DEMAIS FONTES RENOVÁVEIS

Conforme citado anteriormente, o presente trabalho visa a análise do aproveitamento energético de lixo em comparação com outras fontes renováveis. Assim, sempre que existirem dados sistematizados sobre estas fontes, serão utilizados, como os disponíveis na tabela 23 a seguir, em que outras quatro fontes alternativas sustentáveis são adicionadas à análise.

TABELA 23 - Resultado da Análise de Sustentabilidade das demais FAES

PROJETO/INDICADORES	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	â
Geração Termelétrica c/ Casca de Arroz - Urbano Agroindustrial	1	3	0	0	3	1	3	0	3	3	17
Sistemas Fotovoltaicos -IDER, APAEB, Mamirauá, PSA, PESACRE	3	2	1	1	-3	3	-2	0	3	2	10
Pequenas Centrais Hidrelétricas – ELETROSOL	2	2	1	1	0	2	1	0	3	2	14
Usina Eólica – COELCE, CBEE/UFPE	3	1	1	1	-2	3	-1	0	3	2	11

Fonte: Relatório CENTROCLIMA, 2001.

Nota: Os indicadores 4, 6 e 8 não estavam contemplados no trabalho original. Os valores atribuídos para o indicador 4, que trata de IDH, foram os mesmos anteriormente atribuídos ao indicador 3, que trata da geração líquida de empregos. No indicador 6 foram atribuídos os mesmos valores do indicador 1, em virtude destes benefícios estarem relacionados, principalmente, às receitas possíveis decorrentes da comercialização de créditos de carbono, quantificados no indicador 1. Já no indicador 8 foi considerado que não está sendo incentivada nenhuma inovação.

Considerando que as Usinas Termelétricas movidas a gás natural em ciclo combinado foram tomadas como cenário de referência, estas têm todos os valores nulos. As UTEs Merchant são mais poluentes, menos intensivas em mão-de-obra e de menor inovação tecnológica que as de ciclo combinado, configurando sua pontuação como negativa.

Assim, a classificação das alternativas acima ficará conforme a tabela 24 a seguir:

TABELA 24 – Classificação das FAEs

ROTA TECNOLÓGICA	SOMA	CLASSIFICAÇÃO
GÁS DE LIXO + CONSERVAÇÃO	22	1
DIGESTÃO ACELERADA + GDL + CONSERVAÇÃO	21	2
B.E.M. + GDL + CONSERVAÇÃO	19	3
INCINERAÇÃO + GDL + CONSERVAÇÃO	19	3
CASCA DE ARROZ	17	5
SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	10	8
PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	14	6
USINA EÓLICA	11	7
BAGAÇO COM PALHA E PONTAS	10	8
UTE GN CC	0	10
UTE GN MERCHANT	negativa	11

Fonte: Elaboração Própria.

A tabela acima mostra que as quatro rotas tecnológicas para aproveitamento energético do lixo apresentam-se nas primeiras colocações.

VI.1.2 - BIODIESEL

Como os preços atuais dos insumos permitem que apenas os resíduos sejam competitivos com o óleo diesel, caso a análise aplicada seja estritamente financeira, a tabela 25, a seguir, apresenta dados sobre as matérias-primas (divididas em cinco grupos) quanto à sustentabilidade. Para tanto, são considerados o prazo mínimo para utilização de cada insumo, os custos agregados de investimento e dos reagentes utilizados com os óleos vegetais ou seus sucedâneos, o impacto ambiental relacionado ao efeito estufa, o potencial de empregos e o potencial de produção de biodiesel, todos os dados já convertidos pelo conteúdo energético em relação ao óleo diesel.

Deve-se ressaltar que o preço considerado para os óleos vegetais novos levou em conta o aumento de produção necessário para atender à escala energética, para o que foram utilizados dados sobre a área de cultivo disponível (MMA, 2003), que provocaria uma redução nos preços atualmente praticados, levando-os a ficarem próximos aos custos. O caso da mamona é exemplar, pois nesta tabela atinge apenas cerca de 30% do preço atualmente praticado. Por outro lado, a soja não conta com alterações devido ao nível de competitividade que o plantio desta oleaginosa já atingiu. Os resíduos, cujos custos deverão ser reduzidos em virtude do aumento da oferta de insumos novos mais baratos, foram analisados de maneira conservadora, mantendo os mesmo preços praticados atualmente no mercado.

Os custos de investimento das plantas industriais para utilização do etanol é superior ao custo para utilização do metanol, devido a necessidade de equipamento para reciclar o azeótropo formado, inevitavelmente, pela combinação entre álcool etílico e água, mas a indisponibilidade deste valor tornou a análise mais favorável à utilização do etanol.

Neste caso, será analisada a sustentabilidade de cinco grupos de insumos para a produção de biodiesel (resíduos, extrativismo, cultivo anual mecanizado, cultivo

anual manual e cultivo perene), combinados com metanol ou etanol, totalizando dez alternativas.

Os mesmos aspectos tratados para as FAEs serão abordados, mas a escala será diferente, uma vez que todo o potencial nacional de produção de cada grupo de insumos e seus impactos serão avaliados.

TABELA 25 - Dados sobre os Insumos para Biodiesel

		CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	NÚMERO DE EMPREGOS	QUANTIDADE (MILHÕES DE LITROS POR ANO)
RESIDUAIS	O. USADO + METANOL	0,076	0,410	-1,294	1.000	10
	ESCUMA + METANOL	0,106	0,120	-1,294	100	50
	SEBO + METANOL	0,076	0,570	-1,294	500	250
	GRAXOS + METANOL	0,091	0,250	-1,294	700	150
	O. USADO + ETANOL	0,076	0,420	-1,380	1.130	10
	ESCUMA + ETANOL	0,106	0,130	-1,380	752	50
	SEBO + ETANOL	0,076	0,580	-1,380	3.761	250
	GRAXOS + ETANOL	0,091	0,260	-1,380	2.657	150
MAMONA	MAMONA + METANOL	0,076	0,750	0,636	3.000.000	5.584
	MAMONA + ETANOL	0,076	0,760	0,550	3.072.838	5.584
ANUAL MECANIZADO	SOJA + METANOL	0,076	1,061	0,636	1.250.000	12.500
	GIRASSOL + METANOL	0,076	1,052	0,636	1.250.000	59.375
	SOJA + ETANOL	0,076	1,071	0,550	1.413.043	12.500
	GIRASSOL + ETANOL	0,076	1,062	0,550	2.024.457	59.375
EXTRATIVISMO	CASTANHA + METANOL	0,091	2,090	0,586	50.000	250
	BABAÇU + METANOL	0,076	1,325	0,586	1.000.000	1.700
	BURITI + METANOL	0,751	1,290	0,586	240.000	1.200
	CASTANHA + ETANOL	0,091	2,100	0,500	53.261	250
	BABAÇU + ETANOL	0,076	1,335	0,500	1.022.174	1.700
	BURITI + ETANOL	0,751	1,300	0,500	255.652	1.200
PERENE	DENDÊ + METANOL	0,090	0,65	0,636	1.500.000	50.000
	COCO + METANOL	0,075	0,65	0,636	200.000	4.750
	DENDÊ + ETANOL	0,090	0,66	0,550	2.152.173	50.000
	COCO + ETANOL	0,075	0,66	0,550	261.956	4.750

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados da EMBRAPA e pesquisa de preços no mercado nacional.

OBS.: Os potenciais de produção com o coco foram calculados com base em 20% da área disponível (10.000 hectares, com produtividade anual de 2.375 L/ha). No caso do dendê, somente foram utilizados 13,5% da área desmatada na Floresta Amazônica, o chamado "Arco do Desmatamento", composto por 50 milhões de hectares, cuja produtividade anual é de 7.200 L/ha. O plantio de dendê em parte dos 90 milhões de hectares agricultáveis disponíveis no país possibilitaria a produção de até 560 bilhões de litros anuais, permitindo ao Brasil tornar-se grande exportador de combustível e gerar até **10 milhões de empregos**, sendo 25% na produção do álcool etílico. Para soja e girassol foram considerados 25 milhões de hectares, sendo a produtividade anual de 500 L/ha para a soja e 2.375 L/ha para o girassol. No caso da mamona foram considerados 6.000 hectares, com produtividade de 1.125 L/ha, dados fornecidos pela EMBRAPA (2003). O babaçu teve área considerada de 17 milhões de hectares e produtividade anual de 100L/ha (PARENTE, 1993), enquanto o buriti conta com 160 mil hectares capazes de produzir anualmente 7.200 L/ha (DI LASCIO, 2001).

O autor estabeleceu que a emissão da produção de óleos vegetais é de 0,5 kg CO2/L, para insumos cultivados e de 0,45 kg CO2/L para insumos oriundos do extrativismo.

DIMENSÃO AMBIENTAL

Indicador 1: Contribuição para a mitigação das mudanças climáticas globais

Cada litro de biodiesel substitui 900 ml de óleo diesel. Sabendo-se que a emissão de dióxido de carbono da combustão de óleo diesel é de 2,949 kg por litro, cada litro de biodiesel estará evitando a emissão de 2,655 kg de dióxido de carbono.

De acordo com a tabela acima, as emissões do biodiesel pertencem ao intervalo [-1,38; 0,636]. Assim, a emissão evitada por cada litro de biodiesel será de 90% da emissão da combustão do óleo diesel menos sua própria emissão. A faixa de benefício será a razão entre esta soma e a emissão do óleo diesel evitada.

O cálculo para as dez categorias apresentou os seguintes resultados, conforme a tabela 26:

TABELA 26 – Avaliação do Biodiesel de Diversos Insumos quanto a Poluição Global

INSUMOS	VARIAÇÃO (%)	NOTA
RESÍDUOS + METANOL	149	3
RESÍDUOS + ETANOL	152	3
EXTRATIVISMO + METANOL	78	2
EXTRATIVISMO + ETANOL	81	2
CULTIVOS ANUAIS MECANIZADOS + METANOL	76	2
CULTIVOS ANUAIS MECANIZADOS + ETANOL	79	2
CULTIVOS ANUAIS + METANOL	76	2
CULTIVOS ANUAIS + ETANOL	79	2
PERENE + METANOL	76	2
PERENE + ETANOL	79	2

Fonte: Elaboração Própria

Cabe ressaltar que não está sendo considerada a fixação de carbono decorrente da fotossíntese, sobretudo em áreas desmatadas.

Indicador 2: Contribuição para a sustentabilidade ambiental local

Podem ser consideradas os impactos locais na produção e no uso de biodiesel.

Na produção, os insumos residuais eliminarão problemas de disposição final, o que representa benefício máximo (+3). Já os insumos oriundos do extrativismo terão um pequeno impacto negativo, pois estas áreas serão mais freqüentadas por veículos, mas disporão de melhorias de infra-estrutura, mantendo estável o nível (0). Os insumos provenientes de cultivo, ainda que considerando uso racional das terras, representarão impactos maiores na área de plantio, cuja avaliação atinge (-1) Nos casos em que áreas desmatadas forem utilizadas para plantio, estes impactos serão positivos, (+1) para monoculturas, (+2) para culturas consorciadas e (+3) para reflorestamento voltado ao extrativismo.

No uso do combustível, a significância para a sustentabilidade local refere-se à redução de CO, enxofre e material particulado. Em contrapartida, há aumento nas emissões de NO_x (gás precursor do ozônio e que causa o “smog” fotoquímico). Na possibilidade de vazamento, devido à sua biodegradabilidade, o impacto é menor quando comparado ao óleo diesel. No caso da utilização de óleo usado há, ainda, a redução de resíduos encaminhados para estações de tratamento de esgotos e, destas, para aterros sanitários.

Apesar da ocorrência dos inúmeros benefícios ambientais mencionados, devido às incertezas existentes sobre o valor dos mesmos, optou-se por apresentar o cálculo deste indicador para uma hipótese conservadora: considerando tão somente os valores de emissão já consensualizados, facilmente disponíveis na literatura.

A significância para a sustentabilidade local refere-se à redução de 98% de SO_x e 50% de material particulado. Em contra-partida, há aumento de 13% na emissão de

NO_x, gás precursor do ozônio que causa o “smog” fotoquímico. Desta forma, a média destes 3 parâmetros definiu a este indicador a pontuação **+1**.

Considerando estas duas componentes com pesos iguais, teremos as seguintes avaliações, conforme a tabela 27:

TABELA 27 – Avaliação do Biodiesel de Diversos Insumos quanto a Poluição Local

INSUMOS	NOTA
RESÍDUOS + METANOL	2
RESÍDUOS + ETANOL	2
EXTRATIVISMO + METANOL	1
EXTRATIVISMO + ETANOL	1
CULTIVOS ANUAIS MECANIZADOS + METANOL	0
CULTIVOS ANUAIS MECANIZADOS + ETANOL	0
CULTIVOS ANUAIS + METANOL	0
CULTIVOS ANUAIS + ETANOL	0
PERENE + METANOL	0
PERENE + ETANOL	0

Fonte: Elaboração Própria

DIMENSÃO SOCIAL

Indicador 3: Contribuição para a geração líquida de empregos

Tomando como cenário de referência o número de empregos gerados na área de Exploração e Produção da PETROBRAS, nas quais são utilizados 15.000 empregos para produzir 33,5 bilhões de litros anuais de óleo diesel (desprezando os demais derivados), ou 0,45 emprego por milhão de litros, temos a seguinte avaliação, conforme a tabela 28:

TABELA 28 - Avaliação do Biodiesel de Diversos Insumos quanto a Geração de Emprego

INSUMOS	Emprego/ML	VARIAÇÃO (%)	AVALIAÇÃO
ÓLEO USADO + METANOL	100	>100	+3
ESCUMA + METANOL	2	>100	+3
SEBO + METANOL	2	>100	+3
GRAXOS + METANOL	5	>100	+3
MAMONA + METANOL	537	>100	+3
SOJA + METANOL	100	>100	+3
GIRASSOL + METANOL	21	>100	+3
CASTANHA + METANOL	200	>100	+3
BABAÇU + METANOL	588	>100	+3
BURITI + METANOL	200	>100	+3
DENDÊ + METANOL	30	>100	+3
COCO + METANOL	42	>100	+3
ÓLEO USADO + ETANOL	113	>100	+3
ESCUMA + ETANOL	15	>100	+3
SEBO + ETANOL	15	>100	+3
GRAXOS + ETANOL	17	>100	+3
MAMONA + ETANOL	550	>100	+3
SOJA + ETANOL	113	>100	+3
GIRASSOL + ETANOL	34	>100	+3
CASTANHA + ETANOL	213	>100	+3
BABAÇU + ETANOL	601	>100	+3
BURITI + ETANOL	213	>100	+3
DENDÊ + ETANOL	43	>100	+3
COCO + ETANOL	55	>100	+3

Fonte: Elaboração Própria

Indicador 4: Contribuição para a melhoria do IDH

O cálculo deste indicador deve considerar os possíveis benefícios nos aspectos de longevidade, educação e distribuição de renda sobre comunidades específicas localizadas na área de influência do projeto.

Considerando que os postos de trabalho gerados por um Programa Nacional de Biodiesel sejam ocupados por populações de baixa renda ou por desempregados, os *benefícios sócio-econômicos* agregados serão extremamente relevantes. Considerando, ainda, que a redução da poluição local e a melhoria de renda irão interferir positivamente sobre a *saúde* e a expectativa de vida, assim como a melhoria de renda também deve contribuir para fomentar benefícios sobre a *educação*, o **indicador** foi avaliado como sendo positivo, situado em uma faixa de +2 a +3. Em uma análise conservadora, atribuiu-se o valor **+2** ao **indicador**.

DIMENSÃO ECONÔMICA

Indicador 5: Custo-efetividade

Será considerado o custo de realização do óleo diesel nas refinarias, R\$ 0,75 por litro, como cenário de referência para venda do combustível.

A tabela 29 a seguir contém os valores típicos que podem ser alcançados para diversas fontes de matéria-prima em caso de aumento da produção.

TABELA 29 - Custos para Diferentes Insumos

	CUSTO INSUMOS (R\$/L)	VARIAÇÃO SOBRE O ÓLEO DIESEL (%)	AVALIAÇÃO
			1
ÓLEO USADO + METANOL	0,486	35	
ESCUMA + METANOL	0,226	70	2
SEBO + METANOL	0,646	14	0
GRAXOS + METANOL	0,341	55	1
ÓLEO USADO + ETANOL	0,496	34	1
ESCUMA + ETANOL	0,236	69	2
SEBO + ETANOL	0,656	13	0
GRAXOS + ETANOL	0,351	53	1
MAMONA + METANOL	0,826	-10	0
MAMONA + ETANOL	0,836	-11	0
SOJA + METANOL	1,137	-52	-1
GIRASSOL + METANOL	1,128	-50	-1
SOJA + ETANOL	1,147	-53	-1
GIRASSOL + ETANOL	1,138	-52	-1
CASTANHA + METANOL	2,181	-191	-3
BABAÇU + METANOL	1,401	-87	-2
BURITI + METANOL	2,041	-172	-3
CASTANHA + ETANOL	2,191	-192	-3
BABAÇU + ETANOL	1,411	-88	-2
BURITI + ETANOL	2,051	-173	-3
DENDÊ + METANOL	0,740	1	0
COCO + METANOL	0,725	3	0
DENDÊ + ETANOL	0,750	0	0
COCO + ETANOL	0,735	2	0

Fonte: Elaboração Própria

Os custos mostram que apenas os insumos residuais e os oriundos de culturas perenes são mais baratos, ou estão muito próximos, do óleo diesel.

Os cultivos anuais manuais (mamona) têm custo de produção cerca de 12% superiores ao do óleo diesel, enquanto os óleos provenientes de culturas anuais mecanizadas superam a referência em cerca de 53%. Já a matéria-prima advinda do extrativismo é mais de 100% mais cara que o derivado de petróleo.

Indicador 6 Contribuição para redução de custos contingentes e para obtenção de potenciais benefícios contingentes

Os custos de abatimento serão a diferença entre os custos de produção do biodiesel de cada origem e o óleo diesel, dividida pela quantidade evitada de poluentes. O cenário de referência tomou o valor ofertado pelo edital internacional do governo holandês (CERUPT, 2002), que oferece até US\$ 5 por tonelada de dióxido de carbono equivalente., o que mostra a tabela 30, a seguir:

TABELA 30 – Avaliação do Biodiesel de Diversos Insumos quanto aos Custos Contingentes

	CUSTO DE ABATIMENTO (US\$/t CO ₂)	VARIAÇÃO (%)	AVALIAÇÃO
ÓLEO USADO + METANOL	-21	-515	+3
ESCUMA + METANOL	-41	-923	+3
SEBO + METANOL	-8	-263	+3
GRAXOS + METANOL	-32	-743	+3
ÓLEO USADO + ETANOL	-20	-491	+3
ESCUMA + ETANOL	-40	-892	+3
SEBO + ETANOL	-7	-245	+3
GRAXOS + ETANOL	-31	-714	+3
MAMONA + METANOL	11	119	-3
MAMONA + ETANOL	12	139	-3
SOJA + METANOL	56	1015	-3
GIRASSOL + METANOL	54	989	-3
SOJA + ETANOL	55	1003	-3
GIRASSOL + ETANOL	54	978	-3
CASTANHA + METANOL	202	3937	-3
BABAÇU + METANOL	92	1737	-3
BURITI + METANOL	182	3542	-3
CASTANHA + ETANOL	196	3823	-3
BABAÇU + ETANOL	90	1699	-3
BURITI + ETANOL	177	3442	-3
DENDÊ + METANOL	-1	-129	+3
COCO + METANOL	-4	-172	+3
DENDÊ + ETANOL	0	-100	+3
COCO + ETANOL	-2	-142	+3

Fonte: Elaboração Própria

DIMENSÃO TECNOLÓGICA

Indicador 7: Contribuição para a auto-suficiência tecnológica

Devem ser contempladas questões relacionadas à redução das importações de óleo diesel face aos insumos usados para o biodiesel, ao índice de nacionalização dos equipamentos utilizados e à possibilidade de transferência de tecnologia desenvolvida no país.

A produção de biodiesel será realizada com tecnologia totalmente desenvolvida no país, com duas possibilidades reais de transferência para o mercado internacional: o processo de utilização de espuma de esgoto e a extração direta de biodiesel da oleaginosa⁵⁰.

Quanto ao índice de nacionalização dos equipamentos, a produção de biodiesel a ser utilizada permite que este índice seja 100% nacional.

No caso do uso de metanol, haverá manutenção da importação, ainda que este percentual caia para 12% em volume e para cerca de 9% em custo.

Quando usado etanol, a redução da importação será total.

A tabela 31, a seguir, apresenta os resultados.

⁵⁰ Como a patente pode ser utilizada em vários insumos, fica difícil avaliar os insumos com o uso desta patente, ao contrário da espuma, que só pode ser aproveitada com o processo patenteado.

TABELA 31 – Avaliação quanto a Contribuição para a Auto-Suficiência Tecnológica.

	REDUÇÃO DE IMPORTAÇÕES	TRANSFERÊNCIA DE TECNOLOGIA	REDUÇÃO DE ROYALITES	TOTAL
ÓLEO USADO + METANOL	+2	0	3	1
ESCUMA + METANOL	+2	+3	3	2
SEBO + METANOL	+2	0	3	1
GRAXOS + METANOL	+2	0	3	1
ÓLEO USADO + ETANOL	+3	0	3	2
ESCUMA + ETANOL	+3	+3	3	3
SEBO + ETANOL	+3	0	3	2
GRAXOS + ETANOL	+3	0	3	2
MAMONA + METANOL	+2	0	3	1
MAMONA + ETANOL	+3	0	3	2
SOJA + METANOL	+2	0	3	1
GIRASSOL + METANOL	+2	0	3	1
SOJA + ETANOL	+3	0	3	2
GIRASSOL + ETANOL	+3	0	3	2
CASTANHA + METANOL	+2	0	3	1
BABAÇU + METANOL	+2	0	3	1
BURITI + METANOL	+2	0	3	1
CASTANHA + ETANOL	+3	0	3	2
BABAÇU + ETANOL	+3	0	3	2
BURITI + ETANOL	+3	0	3	2
DENDÊ + METANOL	+2	0	3	1
COCO + METANOL	+2	0	3	1
DENDÊ + ETANOL	+3	0	3	2
COCO + ETANOL	+3	0	3	2

Fonte: Elaboração Própria

Indicador 8: Potencial de inovação tecnológica

Apesar de serem poucas as inovações no projeto e na execução do empreendimento, foram geradas duas patentes: uma da COPPE para uso de espuma de esgoto (já em operação na CEDAE-RJ) e outra da PETROBRAS para produção direta da oleaginosa (prevista para iniciar em janeiro de 2005).

As duas aproveitam os equipamentos já existentes, tendo direito a pontuação **+3** neste indicador.

O aproveitamento de resíduos requer uso de catalisadores ácidos, os quais demandam cuidados especiais com os equipamentos, configurando-se em inovação internacional de grau **+2**

A maior parte dos empreendimentos será executada com similares de equipamentos já existentes.

Assim, o biodiesel oriundo de espuma terá avaliação +3, os de resíduos +2 e os demais serão nulos, até que seja configurada a utilização da patente da PETROBRAS.

DIMENSÃO OPERACIONAL

Indicador 9: Viabilidade de Implementação e Operação do Empreendimento

Excetuando alguns obstáculos relacionados ao processo de homologação do biodiesel, que serão resolvidos no decorrer da utilização do combustível por frotas cativas, há total viabilidade técnica, ambiental, social e política, como comprovam os diversos programas já em desenvolvimento no país.

Assim, a principal barreira para cada insumo diz respeito a seu prazo de disponibilização, que está na tabela 32 a seguir:

TABELA 32 – Avaliação quanto a Viabilidade de Implementação e Operação

DISPONIBILIDADE		AVALIAÇÃO
ÓLEO USADO + METANOL	IMEDIATA	3
ESCUMA + METANOL	IMEDIATA	3
SEBO + METANOL	IMEDIATA	3
GRAXOS + METANOL	IMEDIATA	3
ÓLEO USADO + ETANOL	IMEDIATA	3
ESCUMA + ETANOL	IMEDIATA	3
SEBO + ETANOL	IMEDIATA	3
GRAXOS + ETANOL	IMEDIATA	3
MAMONA + METANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 6 MESES	1
MAMONA + ETANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 6 MESES	1
SOJA + METANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 6 MESES	1
GIRASSOL + METANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 3 MESES	1
SOJA + ETANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 6 MESES	1
GIRASSOL + ETANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 3 MESES	1
CASTANHA + METANOL	ESTRUTURAR MANEJO + IMEDIATA	2
BABAÇU + METANOL	ESTRUTURAR MANEJO + IMEDIATA	2
BURITI + METANOL	ESTRUTURAR MANEJO + IMEDIATA	2
CASTANHA + ETANOL	ESTRUTURAR MANEJO + IMEDIATA	2
BABAÇU + ETANOL	ESTRUTURAR MANEJO + IMEDIATA	2
BURITI + ETANOL	ESTRUTURAR MANEJO + IMEDIATA	2
DENDÊ + METANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 4 ANOS	0
COCO + METANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 4 ANOS	0
DENDÊ + ETANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 4 ANOS	0
COCO + ETANOL	PREPARAÇÃO DE ÁREA + 4 ANOS	0

Fonte: Elaboração Própria

Indicador 10: Possibilidades de Integração Regional e Articulação com Outros Setores

Boa perspectiva, pois o fundamento técnico do sistema só requer adaptações locais, com vistas a utilizar diversos tipos de óleo. Há uma excelente possibilidade de associações com programas sociais e ambientais regionais, bem como de articulação entre o empreendimento e setores de pesquisa e desenvolvimento, ONG's (organizações não-governamentais), fabricantes de equipamentos, fornecedores de insumos. **Esta avaliação não apresenta diferenciação em relação ao biodiesel obtido a partir dos vários insumos analisados. Grau do indicador = +3**

A tabela 33, a seguir, sintetiza os resultados das cinco dimensões de sustentabilidade para todos os insumos analisados.

TABELA 33 - Totalização:

GRUPO	Ambiental		Social		Econômica		Tecnológica		Implementação e Operação		TOTAL	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	â	Colocação
ÓLEO USADO + METANOL	3	2	3	2	1	3	1	2	3	3	23	5
ESCUMA + METANOL	3	2	3	2	2	3	2	3	3	3	26	2
SEBO + METANOL	3	2	3	2	0	3	1	2	3	3	22	8
GRAXOS + METANOL	3	2	3	2	1	3	1	2	3	3	23	5
ÓLEO USADO + ETANOL	3	2	3	2	1	3	2	2	3	3	24	3
ESCUMA + ETANOL	3	2	3	2	2	3	3	3	3	3	27	1
SEBO + ETANOL	3	2	3	2	0	3	2	2	3	3	23	5
GRAXOS + ETANOL	3	2	3	2	1	3	2	2	3	3	24	3
MAMONA + METANOL	2	0	3	2	0	-3	1	0	1	3	9	15
MAMONA + ETANOL	2	0	3	2	0	-3	2	0	1	3	10	13
SOJA + METANOL	2	0	3	2	-1	-3	1	0	1	3	8	21
GIRASSOL + METANOL	2	0	3	2	-1	-3	1	0	1	3	8	21
SOJA + ETANOL	2	0	3	2	-1	-3	2	0	1	3	9	15
GIRASSOL + ETANOL	2	0	3	2	-1	-3	2	0	1	3	9	15
CASTANHA + METANOL	2	1	3	2	-3	-3	1	0	2	3	8	21
BABAÇU + METANOL	2	1	3	2	-2	-3	1	0	2	3	9	15
BURITI + METANOL	2	1	3	2	-3	-3	1	0	2	3	8	21
CASTANHA + ETANOL	2	1	3	2	-3	-3	2	0	2	3	9	15
BABAÇU + ETANOL	2	1	3	2	-2	-3	2	0	2	3	10	13
BURITI + ETANOL	2	1	3	2	-3	-3	2	0	2	3	9	14
DENDÊ + METANOL	2	0	3	2	0	3	1	0	0	3	14	11
COCO + METANOL	2	0	3	2	0	3	1	0	0	3	14	11
DENDÊ + ETANOL	2	0	3	2	0	3	2	0	0	3	15	9
COCO + ETANOL	2	0	3	2	0	3	2	0	0	3	15	9

Fonte: Elaboração Própria

Nota: Critério de desempate deve ser estabelecido.

Como existe a possibilidade de que o início de um programa nacional de biodiesel demore e que plantios sejam iniciados a tempo de disponibilizarem óleos vegetais simultaneamente aos resíduos, foi realizada uma simulação alterando os valores atribuídos aos itens 5, 6 e 9 apenas para os insumos não residuais.

O incremento na avaliação destes insumos está relacionada à desoneração fiscal de suas cadeias produtivas e ao aumento da escala de produção, tornando competitivos seus preços e permitindo aos indicadores 5 e 6 tenderem aos valores máximos.

No caso do indicador 9 considerou-se que todas as culturas passassem a ter avaliação máxima.

A tabela 34, a seguir, mostra as somas e classificações face a estas alterações

TABELA 34 – Resultado Simulando Disponibilidade Simultânea

INSUMOS	SOMA	CLASSIFICAÇÃO
ÓLEO USADO + METANOL	23	5
ESCUMA + METANOL	26	2
SEBO + METANOL	22	8
GRAXOS + METANOL	23	5
ÓLEO USADO + ETANOL	24	3
ESCUMA + ETANOL	27	1
SEBO + ETANOL	23	5
GRAXOS + ETANOL	24	3
MAMONA + METANOL	20	20
MAMONA + ETANOL	21	12
SOJA + METANOL	20	20
GIRASSOL + METANOL	20	20
SOJA + ETANOL	21	12
GIRASSOL + ETANOL	21	12
CASTANHA + METANOL	21	12
BABAÇU + METANOL	21	12
BURITI + METANOL	21	12
CASTANHA + ETANOL	22	8
BABAÇU + ETANOL	22	8
BURITI + ETANOL	22	8
DENDÊ + METANOL	20	20
COCO + METANOL	20	20
DENDÊ + ETANOL	21	12
COCO + ETANOL	21	12
ÓLEO DIESEL	0	25

Fonte: Elaboração Própria

Esta simulação mostra que, mesmo se todas estas alterações fossem possíveis simultaneamente, nenhum dos biodieseis de insumos cultivados atingiriam posições de destaque perante os oriundos de fontes residuais.

Considerações Finais

Deve-se considerar que, na avaliação efetiva (sem disponibilidade simultânea) os insumos residuais obtiveram avaliação 30% maior que os grupos classificados em terceiro e quarto lugares, diferença que só voltou a ser notada entre o terceiro e o oitavo colocados, em termos proporcionais, pois em valores absolutos só foi repetida entre o terceiro e o último.

O óleo diesel, que serviu de referência para todas as análises, seria classificado em último lugar, uma vez que todos seus indicadores seriam nulos, assim como sua soma.

Mesmo na simulação, onde foi estabelecida disponibilidade imediata de todos os insumos e viabilidade econômica daqueles oriundos de cultivos, os resíduos mantiveram-se com melhor avaliação, apenas tendo reduzido a diferença na avaliação entre os diversos insumos.

Isto ressalta a importância do aproveitamento energético destes insumos.

VI.2 – ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS (DEA)⁵¹:

No presente trabalho foi aplicado o modelo dos multiplicadores, com a minimização dos insumos, a orientação aos produtos e o retorno variável de escala (fronteira VRS). Estas condições foram aplicadas ao programa de computação FRONTIER, compatível com ambiente Windows, que restringe os pesos virtuais de todas as unidades produtoras (DMUs) simultaneamente. Como os valores que representam as dimensões de sustentabilidade das unidades produtoras são muito dispares, o resultado da aplicação dos dados ao programa de computação foi inviável. A solução deste problema passou a depender, então, da formulação de um modelo específico, no qual a unidade produtora analisada tivesse sua restrição aos pesos virtuais individualizada, o que foi feito como segue abaixo.

Como o objetivo do Desenvolvimento Sustentável é a expansão da oferta de energia, otimizando a geração de empregos, pelo menor custo financeiro e ambiental possível, a orientação do problema a ser analisado refere-se aos produtos.

Para aplicação da metodologia de Análise Envoltória de Dados foram estabelecidos sete conjuntos de dados, um sobre Fontes Alternativas de Energia (tabela 35) e seis sobre Biodiesel (tabelas 41, 46, 50, 51, 55 e 59). No caso do biodiesel, os insumos foram agrupados segundo a diferença de tempo para sua disponibilidade, o que está descrito na apresentação de cada tabela.

⁵¹ Modelagem realizada pelo Prof. Marcos Estellita e por Angela Cristina em 2003 e aplicada aos dados deste trabalho, originando o documento cuja referência consta em Lins et al, 2004.

VI.2.1 – FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA

A tabela 35, a seguir, apresenta os valores para cada uma das dimensões de sustentabilidade das unidades produtoras (DMUs) de energia elétrica consideradas.

TABELA 35 – Dados de Entrada para Fontes Alternativas de Energia

	EMIÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (t CO2/GWh)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	POTENCIAL DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GWh/ano)	CUSTO DE O&M + CC (US\$/MWh)	CUSTO DE INVESTIMENTO (US\$/MWh)
1.UTE GN CC	449	600	83.220	28,00	18
2.UTE GN Merchant	600	600	81.468	24,00	27
3.EÓLICA	-	250	17.520	7,00	43
4.SOLAR	-	300	49.056	4,00	76
5.PCH	1	270	21.024	8,51	21,49
6.Casca de Arroz	(1.950)	300	6.833	(3,28)	24,98
7.GDL + CONSERVAÇÃO	(7.033)	1.001.400	68.000	17,54	7,5
8.DRANCO (+GDL+ CONSERVAÇÃO)	(5.223)	1.004.200	85.000	14,04	15,13
9.INCINERAÇÃO (+GDL+ CONSERVAÇÃO)	(3.113)	1.004.000	120.000	9,72	23,37
10.BEM (+GDL+ CONSERVAÇÃO)	(2.163)	1.006.400	92.000	14,19	11,91
11.BAGAÇO + P&P (BIG/STIG)	(53,57)	250	133.296	62,53	14,96

Fonte: Elaboração Própria

Nota: Os valores entre parênteses são negativos.

Para utilizar os valores acima na Análise Envolvória de Dados (DEA) foi necessário adaptá-los à restrição desta modelagem, de que todos sejam positivos. Para tanto, cada coluna que conta com valores negativos ou nulos teve todas as células somadas a valor superior, em uma unidade, ao menor valor desta coluna. Assim, a coluna sobre emissões de gases do efeito estufa teve todas as células somadas a 7.034, enquanto a coluna de custo de O&M + CC teve os valores adicionados de 4,28, o que permitiu construir a tabela 36 a seguir.

TABELA 36 - Dados corrigidos de entrada para Fontes Alternativas de Energia

	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (t CO ₂ /GWh)	CUSTO DE INVESTIMENTO (US\$/MWh)	CUSTO DE O&M + CC (US\$/MWh)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	POTENCIAL DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GWh/ano)
UTE GN CC	6.320	18,00	32,28	600	83.200
UTE GN Merchant	6.471	27,00	28,28	600	81.400
EÓLICA	5.871	43,00	11,28	7.700	272.200
SOLAR	5.871	76,00	8,28	300	49.000
PCH	5.872	21,49	12,79	270	21.000
CASCA DE ARROZ	3.921	24,98	1	300	6.800
GDL	1	7,5	21,82	1.001.400	68.000
DRANCO (+GDL+ CONSERVAÇÃO)	3.341	15,13	18,32	1.004.200	85.000
INCINERAÇÃO (+GDL+ CONSERVAÇÃO)	4.039	23,37	14,00	1.004.000	120.000
BEM (+GDL+ CONSERVAÇÃO)	4.111	11,91	18,47	1.006.400	92.000
BAGAÇO + P&P (BIG/STIG)	5.817	14,96	66,81	250	133.200

As linhas de 7 a 10 representam as rotas tecnológicas de aproveitamento energético de lixo, agregando a geração de energia e a conservação através da reciclagem. Nas linhas 8, 9 e 10 é compatibilizada, também, a rota GDL às demais, visto que os gases disponíveis nos aterros podem ser retirados independentemente da rota tecnológica utilizada para o lixo novo. Doravante as tabelas apresentarão apenas o nome da tecnologia principal, ficando subentendido que representa a reunião das alternativas.

As duas últimas colunas representam os produtos (O), enquanto as outras três representam os insumos (I). A lógica do modelo é priorizar o menor insumo e o maior produto.

A tabela 37 a seguir mostra os limites atribuídos para restrições aos pesos dos insumos e produtos (outputs), o que foi feito através da técnica de ensaio-erro, tendo

sido encerrada quando encontrados os valores anteriores aos que anulavam a existência de solução.

TABELA 37 - Limites Atribuídos para Restrições aos Pesos:

INSUMOS E PRODUTOS	Inferior	Superior
Potencial de Geração Distribuída (GWh/ano)	0,4	0,6
Potencial de Criação de Empregos	0,4	0,6
Emissão de Gases do Efeito Estufa (t CO ₂ /GWh)	0,3	0,5
Custo de Investimento (US\$/MWh)	0,3	0,5
Custo de O&M + Combustível	0,3	0,5

Fonte: Lins et al, 2004.

Os resultados do modelo são apresentados nas tabelas 38 e 39 a seguir:

TABELA 38 - Resultados do Modelo com Pesos Virtuais:

Alternativas Energéticas	EFICIÊNCIA	Pesos Virtuais				
		INSUMOS			PRODUTOS	
		EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (t CO ₂ Eq/GWh)	O&M + CC (US\$/MWh)	CUSTO DE INVESTIMENTO (US\$/MWh)	POTENCIAL DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA (GWh/ano)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1- UTE GN CC	0,3954	0,50	0,50	0,30	0,30	0,40
2 - UTE GN Merchant	0,3920	0,50	0,50	0,30	0,30	0,40
3 - EÓLICA	0,4711	0,60	0,40	0,40	0,30	0,30
4 - SOLAR	0,4021	0,60	0,40	0,40	0,30	0,30
5 - PCH	0,6722	0,50	0,50	0,30	0,38	0,32
6 - CASCAS DE ARROZ	1,0000	0,60	0,40	0,30	0,40	0,30
7 - GDL	1,0000	0,60	0,40	0,30	0,30	0,40
8 - DRANCO	0,7932	0,40	0,60	0,30	0,30	0,40
9 - INCINERAÇÃO	1,0000	0,55	0,45	0,30	0,40	0,30
10 - BEM	0,9367	0,40	0,60	0,30	0,40	0,30
11 - BAGAÇO	0,3948	0,50	0,50	0,38	0,30	0,32

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 39 - Resultados do Modelo com Definição de Referências:

DMUs	1-UIEGNCC	2-UIEGNMediant	3-EÓLICA	4-SOLAR	5-PCH	6-CascadeArroz	7-GDL+CONSERVAÇÃO	8-DRANCO+GDL+CONSERVAÇÃO	9-INCINERAÇÃO+GDL+CONSERVAÇÃO	10-BEM+GDL+CONSERVAÇÃO	11-BAGAÇO+R&P(BG&SIG)
1-UIEGNCC	-0,60	-0,56	-0,95	-1,27	-0,77	9,44	-2229,53	-2,09	-1,52	-2,62	-0,64
2-UIEGNMediant	-0,71	-0,61	-0,91	-1,17	-0,84	8,39	-2295,04	-2,21	-1,62	-2,89	-0,63
3-EÓLICA	-0,74	-0,52	-0,53	-0,57	-0,68	-3,43	0,00	-0,25	0,00	-0,54	-0,38
4-SOLAR	-1,25	-0,84	-0,68	-0,60	-1,19	-3,14	-2475,40	-3,00	-2,23	-4,60	-0,49
5-PCH	-0,40	-0,30	-0,42	-0,55	-0,33	-3,63	-2783,52	-2,29	-1,61	-3,22	-0,31
6-CascadeArroz	-0,22	-0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	-2355,30	-2,07	-1,38	-3,19	0,00
7-GDL+CONSERVAÇÃO	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,81	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8-DRANCO+GDL+CONSERVAÇÃO	-0,24	-0,19	-0,19	-0,13	-0,22	-1,12	-812,54	-0,21	-0,17	-0,21	-0,20
9-INCINERAÇÃO+GDL+CONSERVAÇÃO	-0,35	-0,25	-0,18	-0,05	-0,30	0,00	-635,02	0,00	0,00	0,00	-0,21
10-BEM+GDL+CONSERVAÇÃO	-0,23	-0,19	-0,22	-0,17	-0,21	-1,16	-964,88	-0,14	-0,12	-0,06	-0,24
11-BAGAÇO+R&P(BG&SIG)	-1,16	-0,84	-0,88	-0,94	-1,22	-6,19	-1527,07	-2,16	-1,58	-3,20	-0,61
EFICIÊNCIA (FO)	0,40	0,39	0,47	0,40	0,67	1,00	1,00	0,79	1,00	0,94	0,39

Fonte: Lins et al, 2004.

Obs.: As células com valor nulo agregam as unidades produtivas (DMUs), dispostas nas colunas, e suas referências, dispostas nas linhas.

Os resultados mostram que três tecnologias empatam em primeiro lugar: CASCA DE ARROZ e duas de aproveitamento de lixo: GDL e INCINERAÇÃO. Em seguida figuram BEM, com 94% e DRANCO, com 79%. As demais fontes alternativas ficam depois dos 67% obtidos pela PCH. Cabe ressaltar que a tecnologia GDL apresenta-se como referência para 10 das 11 DMUs.

A aplicação do conceito de referência permite hierarquizar as alternativas empatadas. Assim, teremos na tabela 40, a seguir, a classificação segundo a Análise Envoltória de Dados para as Fontes Alternativas de Energia (FAE):

TABELA 40: Classificação das Fontes Alternativas de Energia segundo modelo DEA

FAE	CLASSIFICAÇÃO
UTE GN CC	8
UTE GN Merchant	10
EÓLICA	7
SOLAR	8
PCH	6
CASCA DE ARROZ	2
GDL + CONSERVAÇÃO	1
DRANCO + GDL + CONSERVAÇÃO	5
INCINERAÇÃO + GDL + CONSERVAÇÃO	3
BEM + GDL + CONSERVAÇÃO	4
BAGAÇO + P&P (BIG/STIG)	10

Fonte: Elaboração Própria

VI.2.2 - BIODIESEL

A aplicação da modelagem de Análise Envoltória de Dados para as alternativas de insumo foi executada em relação à sua disponibilidade, o que permitiu dividir os combustíveis em três grupos: imediatos, tempo 1 e tempo 2.

No grupo dos insumos imediatos estão os residuais, pois sua oferta junto aos centros consumidores e sua característica de custo negativo, por ser um poluente, facilitam a exploração. Além disto, foram inseridos o óleo de soja que pode ser extraído dos grãos atualmente exportados e o óleo de babaçu, oriundo do extrativismo.

No grupo do Tempo 1 estão os óleos provenientes de cultivos anuais e do extrativismo. Neste caso a oferta de óleo de soja relaciona-se ao aumento da produção nas áreas ociosas, enquanto o óleo de babaçu apresenta o mesmo potencial usado no caso anterior.

No Tempo 2 ficaram aquelas culturas perenes, que demoram cerca de 7 anos para permitir a primeira colheita do potencial.

A definição dos limites a serem utilizados foi feita através da técnica de ensaio-erro, tendo sido encerrada quando encontrados os valores anteriores aos que anulavam a existência de solução.

TABELA 41 - Dados de Entrada (GRUPO DE COMBUSTÍVEIS DE USO IMEDIATO):

	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)
DIESEL	0,001	0,750	2,600	100	6.500
ÓLEO USADO + METANOL	0,076	0,410	-1,294	1.000	10
ESCUMA + METANOL	0,106	0,120	-1,294	100	50
SEBO + METANOL	0,076	0,570	-1,294	500	250
GRAXOS + METANOL	0,091	0,250	-1,294	700	150
ÓLEO USADO + ETANOL	0,076	0,420	-1,380	1.130	10
ESCUMA + ETANOL	0,106	0,130	-1,380	752	50
SEBO + ETANOL	0,076	0,580	-1,380	3.761	250
GRAXOS + ETANOL	0,091	0,260	-1,380	2.657	150
SOJA + METANOL	0,076	1,061	0,636	100	10
SOJA + ETANOL	0,076	1,071	0,550	230	10
BABAÇU + METANOL	0,076	1,325	0,586	1.000.000	1.700
BABAÇU + ETANOL	0,076	1,335	0,500	1.022.174	1.700

Fonte: Elaboração Própria a partir de dados

Os valores negativos precisaram ser eliminados, para o que somou-se um fator a toda a coluna, de forma que o menor valor seja 1, o que é apresentado na tabela 42.

TABELA 42: Dados de Entrada Corrigidos (GRUPO DE COMBUSTÍVEIS DE USO IMEDIATO):

DMUs	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	4,950	0,750	0,001	6.500	100
2 - ÓLEO USADO + METANOL	1,060	0,410	0,076	10	1.000
3 - ESCUMA + METANOL	1,060	0,120	0,106	50	100
4 - SEBO + METANOL	1,060	0,570	0,076	250	500
5 - GRAXOS + METANOL	1,060	0,250	0,091	150	700
6 - ÓLEO USADO + ETANOL	1,000	0,420	0,076	10	1.130
7 - ESCUMA + ETANOL	1,000	0,130	0,106	50	752
8 - SEBO + ETANOL	1,000	0,580	0,076	250	3.761
9 - GRAXOS + ETANOL	1,000	0,260	0,091	150	2.657
10 - SOJA + METANOL	2,986	1,061	0,076	10	100
11 - SOJA + ETANOL	2,923	1,071	0,076	10	230
12 - BABAÇU + METANOL	2,936	1,325	0,076	1.700	1.000.000
13 - BABAÇU + ETANOL	2,873	1,335	0,076	1.700	1.022.174

Fonte: Elaboração Própria

Os valores acima foram aplicados ao modelo e obtidos os seguintes resultados quanto a limites atribuídos às restrições aos pesos, na tabela 43, os pesos virtuais, na tabela 44, e o resultado do modelo DEA propriamente dito, na tabela 45.

TABELA 43 - Limites Atribuídos às Restrições aos Pesos:

INSUMOS E PRODUTOS	LIMITES	
	INFERIOR	SUPERIOR
EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	0,2	0,5
CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	0,2	0,5
CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	0,2	0,5
POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	0,3	0,6
POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	0,3	0,6

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 44 - Resultados do Modelo (GRUPO DE COMBUSTÍVEIS DE USO IMEDIATO) COM DEFINIÇÃO DOS PESOS VIRTUAIS:

Alternativas Energéticas	EFICIÊNCIA	Pesos Virtuais				
		INSUMOS			PRODUTOS	
		EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	1,0000	0,30	0,50	0,20	0,40	0,60
2 - ÓLEO USADO + METANOL	0,9922	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50
3 - ESCUMA + METANOL	1,0000	0,46	0,34	0,20	0,40	0,60
4 - SEBO + METANOL	0,9305	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
5 - GRAXOS + METANOL	0,9703	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
6 - ÓLEO USADO + ETANOL	1,0000	0,36	0,20	0,44	0,40	0,60
7 - ESCUMA + ETANOL	1,0000	0,43	0,37	0,20	0,40	0,60
8 - SEBO + ETANOL	0,9542	0,49	0,20	0,31	0,60	0,40
9 - GRAXOS + ETANOL	0,9881	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
10 - SOJA + METANOL	0,6698	0,31	0,20	0,49	0,50	0,50
11 - SOJA + ETANOL	0,6737	0,31	0,20	0,49	0,50	0,50
12 - BABAÇU + METANOL	0,8214	0,50	0,30	0,20	0,40	0,60
13 - BABAÇU + ETANOL	0,8338	0,50	0,27	0,23	0,40	0,60

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 45 - Resultados do Modelo (GRUPO DE COMBUSTÍVEIS DE USO IMEDIATO) COM DEFINIÇÃO DE REFERÊNCIAS:

DMUs	1 - DIESEL	2 - ÓLEO USADO + METANOL	3 - ESCUMA + METANOL	4 - SEBO + METANOL	5 - GRAXOS + METANOL	6 - ÓLEO USADO + ETANOL	7 - ESCUMA + ETANOL	8 - SEBO + ETANOL	9 - GRAXOS + ETANOL	10 - SOJA + METANOL	11 - SOJA + ETANOL	12 - BABAÇU + METANOL	13 - BABAÇU + ETANOL
1 - DIESEL	0,0000	-0,6310	-3,2440	-0,7250	-0,9797	-0,6536	-3,0071	-1,5867	-0,8728	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
2 - ÓLEO USADO + METANOL	-14,5251	-0,0078	-0,7681	-0,0136	-0,0762	-0,0167	-0,7662	-0,0263	-0,0696	-0,0044	-0,0045	-0,0171	-0,008
3 - ESCUMA + METANOL	-20,3452	-0,0263	0,0000	-0,1098	-0,0098	-0,0521	0,0000	-0,0476	-0,0111	-0,1413	-0,1433	-0,0272	-0,035
4 - SEBO + METANOL	-14,6392	-0,1065	-1,2257	-0,0695	-0,2027	-0,0760	-1,2135	-0,0757	-0,1853	-0,0346	-0,0344	-0,0328	-0,021
5 - GRAXOS + METANOL	-17,4229	-0,0078	-0,3399	-0,0560	-0,0297	-0,0184	-0,3350	-0,0284	-0,0247	-0,0700	-0,0711	-0,0084	-0,008
6 - ÓLEO USADO + ETANOL	-14,5262	0,0000	-0,7702	0,0000	-0,0670	0,0000	-0,7683	0,0000	-0,0591	0,0000	0,0000	-0,0091	0,000
7 - ESCUMA + ETANOL	-20,3385	-0,0185	0,0000	-0,0958	0,0000	-0,0349	0,0000	-0,0207	0,0000	-0,1368	-0,1387	-0,0191	-0,026
8 - SEBO + ETANOL	-14,5936	-0,0987	-1,2150	-0,0534	-0,1895	-0,0563	-1,2030	-0,0458	-0,1710	-0,0302	-0,0299	-0,0241	-0,012
9 - GRAXOS + ETANOL	-17,3967	0,0000	-0,3346	-0,0409	-0,0182	0,0000	-0,3297	0,0000	-0,0119	-0,0656	-0,0666	0,0000	0,000
10 - SOJA + METANOL	-15,0890	-0,8581	-3,4606	-0,7877	-1,1429	-1,0116	-3,4488	-1,2006	-1,1489	-0,3302	-0,3312	-0,4926	-0,477
11 - SOJA + ETANOL	-15,0899	-0,8496	-3,4614	-0,7733	-1,1329	-0,9939	-3,4496	-1,1729	-1,1376	-0,3255	-0,3263	-0,4841	-0,468
12 - BABAÇU + METANOL	-0,3283	-1,0097	-0,0895	-0,0327	-0,0384	-0,0389	-0,0879	-0,0535	-0,0388	-0,3748	-0,3753	-0,1786	-0,179
13 - BABAÇU + ETANOL	0,0000	-1,0012	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,3701	-0,3704	-0,1652	-0,166
EFICIÊNCIA (FO)	1,0000	0,9922	1,0000	0,9305	0,9703	1,0000	1,0000	0,9542	0,9881	0,6698	0,6737	0,8214	0,833

Fonte: Lins et al, 2004.

Os resultados demonstram que o biodiesel de espuma, com qualquer álcool, e o de óleo usado com etanol concorrem com o óleo diesel diretamente, seguidos de perto pelo óleo usado com metanol. Além destes, apenas os ácidos graxos e o sebo, com ambos os álcoois, superam 90% de eficiência.

Cabe ressaltar que o biodiesel de óleo usado com etanol serve de referência para 7 elementos do conjunto, enquanto o óleo diesel serve de referência para 5. Os biodieseis de espuma servem como referência de 6 elementos, sendo que o etílico atende a 4 e o metílico a 2.

A seguir são realizadas as mesmas etapas para os insumos considerados no tempo 1. A tabela 46 apresenta os valores aplicados ao modelo DEA. Os limites atribuídos às restrições aos pesos são apresentados na tabela 47, os resultados do modelo com pesos virtuais estão na tabela 48, enquanto os resultados do modelo DEA propriamente dito estão na tabela 49.

TABELA 46 - Biodiesel das Oleaginosas Produzidas a partir de um Programa – (CULTIVO ANUAL E EXTRATIVISMO)

DMUs	EMISSAO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 – DIESEL	2,600	0,750	0,001	6.500	100
2 - SOJA + METANOL	0,636	1,061	0,076	12.500	1.250.000
3 - MAMONA + METANOL	0,636	0,750	0,076	5.584	3.000.000
4 - GIRASSOL + METANOL	0,636	1,052	0,076	59.375	1.250.000
5 - CASTANHA + METANOL	0,586	2,090	0,091	250	50.000
6 - BABAÇU + METANOL	0,586	1,325	0,076	1.700	1.000.000
7 - BURITI + METANOL	0,586	1,290	0,751	1.200	240.000
8 - SOJA + ETANOL	0,573	1,071	0,076	12.500	1.413.043
9 - MAMONA + ETANOL	0,573	0,760	0,076	5.584	3.072.838
10 - GIRASSOL + ETANOL	0,573	1,062	0,076	59.375	2.024.457
11 – CASTANHA + ETANOL	0,523	2,100	0,091	250	53.261
12 -BABAÇU + ETANOL	0,523	1,335	0,076	1.700	1.022.174
13 - BURITI + ETANOL	0,523	1,300	0,751	1.200	255.652

Fonte: Elaboração Própria

TABELA 47 - Limites Atribuídos para Restrições aos Pesos:

INSUMOS E PRODUTOS	LIMITES	
	INFERIOR	SUPERIOR
EMIÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	0,2	0,5
CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	0,2	0,5
CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	0,2	0,5
POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	0,3	0,6
POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	0,3	0,6

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 48 - Resultados do Modelo com Pesos Virtuais (CULTIVO ANUAL E EXTRATIVISMO):

Alternativas Energéticas	EFICIÊNCIA	Pesos Virtuais				
		INSUMOS			PRODUTOS	
		EMIÇÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	1,0000	0,30	0,50	0,20	0,40	0,60
2 - SOJA + METANOL	0,9136	0,30	0,20	0,50	0,50	0,50
3 - MAMONA + METANOL	0,9869	0,20	0,50	0,30	0,50	0,50
4 - GIRASSOL + METANOL	0,9148	0,30	0,20	0,50	0,50	0,50
5 - CASTANHA + METANOL	0,8122	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
6 - BABAÇU + METANOL	0,9080	0,30	0,20	0,50	0,50	0,50
7 - BURITI + METANOL	0,6859	0,50	0,30	0,20	0,50	0,50
8 - SOJA + ETANOL	0,9420	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
9 - MAMONA + ETANOL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,60	0,40
10 - GIRASSOL + ETANOL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,60	0,40
11 - CASTANHA + ETANOL	0,8707	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
12 - BABAÇU + ETANOL	0,9616	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
13 - BURITI + ETANOL	0,7434	0,50	0,30	0,20	0,50	0,50

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 49 - Resultados do Modelo com Definição de Referências (CULTIVO ANUAL E EXTRATIVISMO):

DMUs	1 - DIESEL	2 - SOJA + METANOL	3 - MAMONA + METANOL	4 - GIRASSOL + METANOL	5 - CASTANHA + METANOL	6 - BABAÇU + METANOL	7 - BURITI + METANOL	8 - SOJA + ETANOL	9 - MAMONA + ETANOL	10 - GIRASSOL + ETANOL	11 - CASTANHA + ETANOL	12 - BABAÇU + ETANOL	13 - BURITI + ETANOL
1 - DIESEL	0,0000	-0,4608	-0,3347	-0,4608	-1,4813	-0,5428	-1,7072	-1,4708	-1,5738	-1,7201	-1,6897	-1,6403	-1,915
2 - SOJA + METANOL	-8,9710	-0,0864	-0,2202	-0,0869	-0,0825	-0,0776	-0,1237	-0,1111	-0,1630	-0,2135	-0,0889	-0,1053	-0,129
3 - MAMONA + METANOL	-0,3508	-0,0278	-0,0131	-0,0278	-0,0528	-0,0307	-0,0514	-0,0531	-0,0512	-0,0558	-0,0593	-0,0587	-0,057
4 - GIRASSOL + METANOL	-8,9628	-0,0847	-0,2143	-0,0852	-0,0817	-0,0763	-0,1216	-0,1095	-0,0532	-0,0909	-0,0880	-0,1039	-0,127
5 - CASTANHA + METANOL	-18,4214	-0,3556	-0,9500	-0,3577	-0,1878	-0,3060	-0,3244	-0,3190	-0,5962	-0,5916	-0,1885	-0,2708	-0,323
6 - BABAÇU + METANOL	-10,3442	-0,1127	-0,3810	-0,1136	-0,0652	-0,0920	-0,1426	-0,1169	-0,2490	-0,2848	-0,0663	-0,0971	-0,142
7 - BURITI + METANOL	-148,9745	-4,5469	-3,0219	-4,5477	-2,2871	-4,5274	-0,3141	-2,7748	-2,0146	-2,0905	-2,2882	-2,7563	-0,314
8 - SOJA + ETANOL	-8,1865	-0,0586	-0,2071	-0,0591	-0,0297	-0,0469	-0,0722	-0,0580	-0,1115	-0,1532	-0,0296	-0,0465	-0,071
9 - MAMONA + ETANOL	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,000
10 - GIRASSOL + ETANOL	-5,2388	-0,0569	-0,2012	-0,0574	-0,0289	-0,0455	-0,0702	-0,0564	0,0000	0,0000	-0,0287	-0,0452	-0,069
11 - CASTANHA + ETANOL	-18,4051	-0,3278	-0,9368	-0,3299	-0,1350	-0,2753	-0,2730	-0,2659	-0,5452	-0,5393	-0,1293	-0,2121	-0,265
12 - BABAÇU + ETANOL	-10,2369	-0,0849	-0,3678	-0,0858	-0,0124	-0,0612	-0,0911	-0,0638	-0,1979	-0,2316	-0,0070	-0,0384	-0,085
13 - BURITI + ETANOL	-148,8987	-4,5190	-3,0088	-4,5199	-2,2343	-4,4967	-0,2627	-2,7217	-1,9635	-2,0376	-2,2289	-2,6976	-0,256
EFICIÊNCIA (FO)	1,0000	0,9136	0,9869	0,9148	0,8122	0,9080	0,6859	0,9420	1,0000	1,0000	0,8707	0,9616	0,743

Fonte: Lins et al, 2004.

Os resultados destas alternativas mostram que os biodieseis etílicos de mamona e de girassol são capazes de competir com o óleo diesel, por serem os únicos a atingir a eficiência máxima. As opções com mais de 90% de eficiência são mamona com metanol, babaçu com etanol, soja com etanol, seguidos por girassol com metanol, soja e babaçu com metanol.

Com relação a servir de referência para as demais unidades produtivas, o biodiesel etílico de mamona foi uma unanimidade, enquanto o biodiesel etílico de girassol serviu de referência para 2 alternativas e o óleo diesel apenas para 1.

A seguir são apresentados, na tabela 50, os valores referentes aos insumos do “tempo 2”.

TABELA 50 – Dados de Biodiesel para uso em 84 meses

	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)
DENDÊ + METANOL	0,090	0,65	0,636	1.500.000	50.000
COCO + METANOL	0,075	0,65	0,636	200.000	4.750
DENDÊ + ETANOL	0,090	0,66	0,550	2.152.173	50.000
COCO + ETANOL	0,075	0,66	0,550	261.956	4.750

Fonte: Elaboração Própria

Neste caso não é necessário aplicar modelos, pois o dendê é dez vezes (900%) mais produtivo e possibilita oferta de empregos sete vezes (600%) maior que o coco, apesar de ser vinte por cento (20%) mais caro no custo de investimento.

Assim, a avaliação que a Análise Envoltória de Dados permitiu dos grupos em questão ainda não é conclusiva com relação a todos os insumos simultaneamente. Para tanto, os insumos foram reunidos em três conjuntos, um com os resíduos, a mamona e a soja, que serão os principais insumos disponíveis após um ano de plantio, outro

conjunto em que todos os insumos utilizam o mesmo álcool, e um terceiro conjunto no qual são estabelecidos grupos de insumos com ambos os álcoois.

Quanto ao primeiro conjunto, em que são reunidos os resíduos, a mamona e a soja, os dados são apresentados na tabela 51, a seguir:

TABELA 51 - Dados de Entrada do Modelo (RESIDUOS, MAMONA E SOJA)

DMUs	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	4,950	0,750	0,001	6.500	100
2 - ÓLEO USADO + METANOL	1,060	0,410	0,076	10	1.000
3 - ESCUMA + METANOL	1,060	0,120	0,106	50	100
4 - SEBO + METANOL	1,060	0,570	0,076	250	500
5 - GRAXOS + METANOL	1,060	0,250	0,091	150	700
6 - ÓLEO USADO + ETANOL	1,000	0,420	0,076	10	1.130
7 - ESCUMA + ETANOL	1,000	0,130	0,106	50	752
8 - SEBO + ETANOL	1,000	0,580	0,076	250	3.761
9 - GRAXOS + ETANOL	1,000	0,260	0,091	150	2.657
10 - MAMONA + METANOL	2,986	0,750	0,076	5.584	3.000.000
11 - MAMONA + ETANOL	2,923	0,760	0,076	5.584	3.072.838
12 - SOJA + METANOL	2,986	1,061	0,076	12.500	1.250.000
13 - SOJA + ETANOL	2,923	1,071	0,076	12.500	1.413.043

Fonte: Elaboração Própria

A aplicação destes valores ao modelo DEA resulta nos limites atribuídos às restrições aos pesos, apresentados na tabela 52, aos resultados do modelo com pesos virtuais, mostrados na tabela 53, e no resultado do modelo DEA propriamente dito, a ser visto na tabela 54.

TABELA 52 - Limites Atribuídos para Restrições aos Pesos:

INSUMOS E PRODUTOS	LIMITES	
	INFERIOR	SUPERIOR
EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	0,2	0,5
CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	0,2	0,5
CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	0,2	0,5
POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	0,3	0,6
POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	0,3	0,6

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 53 - Resultados do Modelo com Pesos Virtuais (RESIDUOS, MAMONA E SOJA):

Alternativas Energéticas	EFICIÊNCIA	Pesos Virtuais				
		INSUMOS			PRODUTOS	
		EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,40	0,60
2 - ÓLEO USADO + METANOL	0,9922	0,25	0,25	0,50	0,50	0,50
3 - ESCUMA + METANOL	1,0000	0,47	0,33	0,20	0,40	0,60
4 - SEBO + METANOL	0,9304	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
5 - GRAXOS + METANOL	0,9696	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
6 - ÓLEO USADO + ETANOL	1,0000	0,40	0,20	0,40	0,40	0,60
7 - ESCUMA + ETANOL	1,0000	0,45	0,35	0,20	0,40	0,60
8 - SEBO + ETANOL	0,9475	0,50	0,20	0,30	0,60	0,40
9 - GRAXOS + ETANOL	0,9837	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
10 - MAMONA + METANOL	0,9977	0,21	0,50	0,29	0,57	0,43
11 - MAMONA + ETANOL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,44	0,56
12 - SOJA + METANOL	0,8783	0,35	0,20	0,45	0,60	0,40
13 - SOJA + ETANOL	0,9067	0,35	0,20	0,45	0,60	0,40

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 54 - Resultados do Modelo com Definição de Referências (RESIDUOS, MAMONA E SOJA):

DMUs	1 - DIESEL	2 - ÓLEO USADO + METANOL	3 - ESCUMA + METANOL	4 - SEBO + METANOL	5 - GRAXOS + METANOL	6 - ÓLEO USADO + ETANOL	7 - ESCUMA + ETANOL	8 - SEBO + ETANOL	9 - GRAXOS + ETANOL	10 - MAMONA + METANOL	11 - MAMONA + ETANOL	12 - SOJA + METANOL	13 - SOJA + ETANOL
1 - DIESEL	0,0000	-0,6310	-3,2481	-0,7363	-1,0244	-1,2017	-3,2007	-1,7437	-1,0375	0,0000	-0,3888	0,0000	0,0000
2 - ÓLEO USADO + METANOL	-14,4671	-0,0078	-0,7339	-0,0135	-0,0762	-0,0191	-0,7336	-0,0266	-0,0688	-0,0803	-0,0434	-0,0051	-0,0000
3 - ESCUMA + METANOL	-20,3554	-0,0263	0,0000	-0,1093	-0,0092	-0,0393	0,0000	-0,0450	-0,0105	0,0000	-0,0064	-0,1293	-0,0000
4 - SEBO + METANOL	-14,5335	-0,1065	-1,1706	-0,0696	-0,2038	-0,0907	-1,1682	-0,0801	-0,1902	-0,1761	-0,0971	-0,0326	-0,0000
5 - GRAXOS + METANOL	-17,4045	-0,0078	-0,3258	-0,0560	-0,0304	-0,0196	-0,3248	-0,0297	-0,0272	-0,0247	-0,0142	-0,0630	-0,0000
6 - ÓLEO USADO + ETANOL	-14,4644	0,0000	-0,7344	0,0000	-0,0671	0,0000	-0,7340	0,0000	-0,0584	-0,0827	-0,0371	0,0000	0,0000
7 - ESCUMA + ETANOL	-20,3502	-0,0185	0,0000	-0,0957	0,0000	-0,0200	0,0000	-0,0182	0,0000	-0,0024	0,0000	-0,1242	-0,0000
8 - SEBO + ETANOL	-14,5157	-0,0987	-1,1685	-0,0554	-0,1939	-0,0707	-1,1661	-0,0525	-0,1790	-0,1784	-0,0905	-0,0273	-0,0000
9 - GRAXOS + ETANOL	-17,3930	0,0000	-0,3247	-0,0421	-0,0208	0,0000	-0,3238	-0,0025	-0,0163	-0,0271	-0,0077	-0,0578	-0,0000
10 - MAMONA + METANOL	-0,3532	-0,6665	-0,0604	-0,0300	-0,0305	-0,0396	-0,0594	-0,0526	-0,0315	-0,0023	-0,0135	-0,0108	-0,0000
11 - MAMONA + ETANOL	0,0000	-0,6580	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
12 - SOJA + METANOL	-8,9058	-0,8583	-2,3333	-0,5106	-0,7625	-0,5139	-2,2602	-0,6976	-0,7070	-0,0080	-0,0217	-0,1217	-0,0000
13 - SOJA + ETANOL	-8,1182	-0,8498	-2,1990	-0,4613	-0,7064	-0,4503	-2,1282	-0,6146	-0,6504	0,0000	0,0000	-0,1043	-0,0000
EFICIÊNCIA (FO)	1,0000	0,9922	1,0000	0,9304	0,9696	1,0000	1,0000	0,9475	0,9837	0,9977	1,0000	0,8783	0,0000

Fonte: Lins et al, 2004.

Os resultados acima mostram que os biodieseis etílicos de mamona, óleo usado e escuma, além do metílico de escuma são eficientes junto com o óleo diesel.

Percebe-se que o biodiesel etílico de mamona serviu de referência para 12 elementos do conjunto, o etílico de óleos usados serviu a 6, o etílico de escuma a 5, o óleo diesel a 4 e o metílico de escuma a 3.

O biodieseis metílicos de mamona e de óleo usado obtiveram mais de 99% de eficiência. Dos demais, 5 ficaram com mais de 90% de eficiência e somente o biodiesel metílico de soja teve menos de 90 % de eficiência.

No segundo caso, utilizando um tipo de álcool, temos os dados fornecidos pela tabela 55, a seguir:

TABELA 55 - Dados de Entrada do Modelo (TODOS COM METANOL):

DMUs	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	4,95	0,750	0,001	6.500	100
2 - ÓLEO USADO + METANOL	1,06	0,41	0,076	10	1.000
3 - ESCUMA + METANOL	1,06	0,12	0,106	50	100
4 - SEBO + METANOL	1,06	0,57	0,076	250	500
5 - GRAXOS + METANOL	1,06	0,25	0,091	150	700
6 - SOJA + METANOL	0,636	1,0605882	0,076	12.500	1.250.000
7 - MAMONA + METANOL	0,636	0,75	0,076	5.584	3.000.000
8 - GIRASSOL + METANOL	0,636	1,0517647	0,076	59.375	1.250.000
9 - CASTANHA + METANOL	0,586	2,09	0,091	250	50.000
10 - BABAÇU + METANOL	0,586	1,3252941	0,076	1.700	1.000.000
11 - BURITI + METANOL	0,586	1,29	0,751	1200	240.000
12 - DENDÊ + METANOL	0,636	0,09	0,650	50.000	1.500.000
13 - COCO + METANOL	0,636	0,075	0,650	4.750	200.000

Fonte: Elaboração Própria

A aplicação destes valores ao modelo DEA resulta nos limites atribuídos às restrições aos pesos, apresentados na tabela 56, aos resultados do modelo com pesos virtuais, mostrados na tabela 57, e no resultado do modelo DEA propriamente dito, a ser visto na tabela 58.

TABELA 56 - Limites Atribuídos para Restrições aos Pesos:

INSUMOS E PRODUTOS	LIMITES	
	INFERIOR	SUPERIOR
EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	0,2	0,5
CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	0,2	0,5
CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	0,2	0,5
POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	0,3	0,6
POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	0,3	0,6

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 57 - Resultados do Modelo com Pesos Virtuais (TODOS COM METANOL):

Alternativas Energéticas	EFICIÊNCIA	Pesos Virtuais				
		INSUMOS			PRODUTOS	
		EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO2 Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,40	0,60
2 - ÓLEO USADO + METANOL	1,0000	0,40	0,20	0,40	0,40	0,60
3 - ESCUMA + METANOL	1,0000	0,49	0,31	0,20	0,60	0,40
4 - SEBO + METANOL	0,9437	0,30	0,20	0,50	0,50	0,50
5 - GRAXOS + METANOL	0,9785	0,30	0,20	0,50	0,60	0,40
6 - SOJA + METANOL	0,9414	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
7 - MAMONA + METANOL	1,0000	0,36	0,44	0,20	0,40	0,60
8 - GIRASSOL + METANOL	0,9426	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
9 - CASTANHA + METANOL	0,8650	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
10 - BABAÇU + METANOL	0,9558	0,50	0,20	0,30	0,50	0,50
11 - BURITI + METANOL	0,7358	0,50	0,30	0,20	0,50	0,50
12 - DENDÊ + METANOL	1,0000	0,30	0,20	0,50	0,40	0,60
13 - COCO + METANOL	1,0000	0,36	0,20	0,44	0,40	0,60

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 58 – Resultados do Modelo com Definição de Referências (TODOS COM METANOL):

DMUs	1 - DIESEL	2 - ÓLEO USADO + METANOL	3 - ESCUMA + METANOL	4 - SEBO + METANOL	5 - GRAXOS + METANOL	6 - SOJA + METANOL	7 - MAMONA + METANOL	8 - GIRASSOL + METANOL	9 - CASTANHA + METANOL	10 - BABAÇU + METANOL	11 - BURITI + METANOL	12 - DENDÊ + METANOL	13 - COCO + METANOL
1 – DIESEL	0,0000	-1,2595	-3,2193	-0,7246	-1,0248	-3,0955	-2,2730	-3,0955	-3,4336	-3,3848	-3,6606	-3,1463	-3,8209
2 – ÓLEO USADO + METANOL	-14,4670	0,0000	-0,6930	0,0000	-0,0671	-0,2692	-0,0912	-0,2687	-0,3292	-0,3105	-0,2835	-0,6214	-0,7531
3 – ESCUMA + METANOL	-20,3554	-0,0147	0,0000	-0,0952	0,0000	-0,3330	0,0000	-0,3320	-0,4004	-0,3851	-0,2249	0,0000	0,0000
4 – SEBO + METANOL	-14,5334	-0,0780	-1,1067	-0,0563	-0,1950	-0,2994	-0,1842	-0,2991	-0,3446	-0,3346	-0,3204	-0,9767	-1,1797
5 -GRAXOS + METANOL	-17,4045	0,0000	-0,3075	-0,0423	-0,0215	-0,2983	-0,0364	-0,2975	-0,3634	-0,3455	-0,2508	-0,2772	-0,3365
6 – SOJA + METANOL	-8,6200	-0,1531	-1,5925	-0,1094	-0,3712	-0,0586	-0,1748	-0,0591	-0,0297	-0,0469	-0,0715	-1,7761	-2,2218
7 – MAMONA + METANOL	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,9880	-1,3693
8 - GIRASSOL + METANOL	-8,6141	-0,1450	-1,5055	-0,1063	-0,3405	-0,0569	0,0000	-0,0574	-0,0289	-0,0455	-0,0694	-1,6995	-2,1778
9 – CASTANHA + METANOL	-17,8532	-0,7166	-4,8243	-0,5565	-1,3557	-0,2726	-0,8460	-0,2747	-0,1350	-0,2188	-0,2697	-4,1394	-4,9725
10 – BABAÇU + METANOL	-9,9351	-0,2643	-2,3828	-0,1885	-0,5923	-0,0692	-0,3433	-0,0701	-0,0124	-0,0442	-0,0897	-2,3690	-2,9078
11 - BURITI + METANOL	- 148,6108	-3,7607	-3,9127	-4,6169	-4,3279	-2,7270	-2,1084	-2,7279	-2,2343	-2,7033	-0,2642	-2,8566	-3,2805
12 - DENDÊ + METANOL	- 121,8162	-2,6634	0,0000	-3,5439	-2,7116	-2,1413	-0,9780	-2,1403	-1,8291	-2,1662	-0,0035	0,0000	0,0000
13 - COCO + METANOL	- 128,1238	-2,6612	-0,6165	-3,5386	-2,8162	-2,1385	-1,1460	-2,1374	-1,8277	-2,1639	0,0000	-0,1006	0,0000
EFICIÊNCIA (FO)	1,0000	1,0000	1,0000	0,9437	0,9785	0,9414	1,0000	0,9426	0,8650	0,9558	0,7358	1,0000	1,0000

Fonte: Lins et al, 2004.

Desta forma mostraram-se tão eficientes quanto o óleo diesel o biodiesel de óleo usado, escuma, mamona, dendê e coco. Ficaram com eficiência superior a 90% os biodieseis de graxo, babaçu, sebo e soja.

Quanto às referências, o biodiesel de mamona serviu a 11 elementos, o de escuma a 5, o de dendê a 3, o de óleo usado e o de coco a 2 e o óleo diesel a 1.

A terceira opção, reunindo-se os insumos de acordo com suas origens – resíduos (óleo usado, sebo e graxos), extrativismo (castanha, buriti e babaçu), cultivo manual (mamona), cultivo mecanizado (soja) e perene (dendê) – e utilizando os dois tipos de álcoois, apresenta os valores na tabela 59, a seguir:

TABELA 59 - Dados de Entrada do Modelo (GRUPOS COM DOIS ALCOOIS):

DMUs	EMISSÃO DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 - DIESEL	4,95	0,750	0,001	6.500	100
2 - CULTIVO MANUAL+ METANOL	2,986	0,75	0,076	5.584	3.000.000
3 - CULTIVO MANUAL+ ETANOL	2,923	0,76	0,076	5.584	3.072.838
4 - EXTRATIVISMO + METANOL	2,936	1,373	0,334	3.150	1.290.000
5 - EXTRATIVISMO + ETANOL	2,873	1,383	0,334	3150	1.331.087
6 - CULTIVO MECANIZADO + METANOL	2,986	1,061	0,076	12.500	1.250.000
7 - CULTIVO MECANIZADO + ETANOL	2,923	1,071	0,076	12.500	1.413.043
8 - RESÍDUOS + METANOL	1,06	0,449	0,081	410	2.200
9 - RESÍDUOS + ETANOL	1	0,459	0,081	410	7.548
10 -ESCUMA + METANOL	1,06	0,12	0,106	50	100
11 - ESCUMA + ETANOL	1	0,13	0,106	50	752
12 - PERENE + METANOL	2,986	0,65	0,090	50.000	1.500.000
13 - PERENE + ETANOL	2,9	0,66	0,090	50.000	2.152.173

Fonte: Elaboração Própria.

A aplicação destes valores ao modelo DEA resulta nos limites atribuídos às restrições aos pesos, apresentados na tabela 60, aos resultados do modelo com pesos virtuais, mostrados na tabela 61, e no resultado do modelo DEA propriamente dito, a ser visto na tabela 62.

TABELA 60 - Limites Atribuídos para Restrições aos Pesos:

INSUMOS E PRODUTOS	LIMITES	
	INFERIOR	SUPERIOR
EMISSION DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	0,2	0,5
CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	0,2	0,5
CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	0,2	0,5
POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	0,3	0,6
POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS	0,3	0,6

Fonte:Lins et al, 2004.

TABELA 61 - Resultados do Modelo com Pesos Virtuais:

Alternativas Energéticas	Eficiência	Pesos Virtuais				
		INSUMOS			PRODUTOS	
		EMISSION DE GASES DO EFEITO ESTUFA (kg CO ₂ Eq/L)	CUSTO DE O&M (R\$/LITRO)	CUSTO DE INVESTIMENTO (R\$/L)	POTENCIAL DE PRODUÇÃO (MILHÕES DE LITROS POR ANO)	POTENCIAL DE CRIAÇÃO DE EMPREGOS
1 – DIESEL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,40	0,60
2 – CULTIVO MANUAL+ METANOL	0,8075	0,34	0,20	0,46	0,40	0,60
3 – CULTIVO MANUAL+ ETANOL	0,8115	0,33	0,20	0,47	0,40	0,60
4 - EXTRATIVISMO + METANOL	0,3367	0,50	0,20	0,30	0,40	0,60
5 - EXTRATIVISMO + ETANOL	0,3414	0,50	0,20	0,30	0,40	0,60
6 - CULTIVO MECANIZADO + METANOL	0,8062	0,34	0,20	0,46	0,40	0,60
7 - CULTIVO MECANIZADO + ETANOL	0,8168	0,34	0,20	0,46	0,40	0,60
8 - RESÍDUOS + METANOL	0,9883	0,29	0,21	0,50	0,50	0,50
9 - RESÍDUOS + ETANOL	1,0000	0,35	0,20	0,45	0,56	0,44
10 -ESCUMA + METANOL	1,0000	0,30	0,50	0,20	0,40	0,60
11 – ESCUMA + ETANOL	1,0000	0,50	0,30	0,20	0,49	0,51
12 - PERENE + METANOL	0,9539	0,25	0,27	0,48	0,60	0,40
13 – PERENE + ETANOL	1,0000	0,30	0,50	0,20	0,40	0,60

Fonte: Lins et al, 2004.

TABELA 62 - Resultados do Modelo com Definição de Referências (GRUPOS COM DOIS ALCOOIS):

DMUs	1 - DIESEL	2- CULTIVO MANUAL+ METANOL	3- CULTIVO MANUAL+ ETANOL	4- EXTRATIVISMO + METANOL	5- EXTRATIVISMO + ETANOL	6- CULTIVO MECANIZADO + METANOL	7- CULTIVO MECANIZADO + ETANOL	8- RESÍDUOS + METANOL	9- RESÍDUOS + ETANOL	10- ESCUMA + METANOL	11- ESCUMA + ETANOL	12- PERENE + METANOL	13- PERENE + ETANOL
1 – DIESEL	0,0000	0,0000	0,0000	-0,6256	-0,6388	0,0000	0,0000	-0,7211	-1,0197	-3,5191	-3,1394	0,0000	-0,6172
2 - CULTIVO MANUAL+ METANOL	-0,3532	-0,1925	-0,1942	-0,2912	-0,2979	-0,0621	-0,0741	-0,6478	-0,0352	-0,0504	-0,0629	-0,0450	-0,1131
3 - CULTIVO MANUAL+ ETANOL	0,0000	-0,1869	-0,1885	-0,2801	-0,2867	-0,0526	-0,0648	-0,6353	0,0000	0,0000	0,0000	-0,0391	-0,1027
4 - EXTRATIVISMO + METANOL	-60,4334	-1,9677	-1,9785	-0,6633	-0,6691	-1,8385	-1,8545	-2,5190	-2,1586	-4,8639	-3,2685	-1,8056	-1,4331
5 - EXTRATIVISMO + ETANOL	-60,2331	-1,9626	-1,9733	-0,6530	-0,6586	-1,8308	-1,8470	-2,5065	-2,1311	-4,8459	-3,2293	-1,8018	-1,4277
6 – CULTIVO MECANIZADO + METANOL	-8,9058	-0,2636	-0,2635	-0,3331	-0,3381	-0,1938	-0,1973	-0,7937	-0,5556	-3,1193	-2,0170	-0,2685	-0,5927
7 – CULTIVO MECANIZADO + ETANOL	-8,1182	-0,2566	-0,2563	-0,3199	-0,3246	-0,1793	-0,1832	-0,7812	-0,4985	-2,9771	-1,8865	-0,2567	-0,5681
8 - RESÍDUOS + METANOL	-15,4769	-0,0042	-0,0043	-0,0318	-0,0316	-0,0053	-0,0053	-0,0117	-0,0178	-1,3210	-0,7141	-0,0012	-0,1917
9 - RESÍDUOS + ETANOL	-15,4490	0,0000	0,0000	-0,0229	-0,0225	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-1,3403	-0,7031	0,0000	-0,1923
10 – ESCUMA + METANOL	-20,3554	-0,0710	-0,0734	-0,0088	-0,0090	-0,0957	-0,0975	-0,0117	-0,0166	0,0000	-0,0074	-0,0009	0,0000
11 – ESCUMA + ETANOL	-20,3502	-0,0669	-0,0692	0,0000	0,0000	-0,0907	-0,0925	0,0000	0,0000	-0,0240	0,0000	0,0000	-0,0013
12 – PERENE + METANOL	-10,3355	-0,0176	-0,0176	-0,0292	-0,0293	-0,0449	-0,0426	-0,6873	-0,1834	-1,1276	-0,5081	-0,0461	-0,1039
13 – PERENE + ETANOL	-7,1897	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-0,6686	0,0000	-0,4807	0,0000	0,0000	0,0000
EFICIÊNCIA (FO)	1,0000	0,8075	0,8115	0,3367	0,3414	0,8062	0,8168	0,9883	1,0000	1,0000	1,0000	0,9539	1,0000

Fonte: Lins et al, 2004.

Neste caso, ficaram tão eficientes quanto o óleo diesel os biodieseis etílicos de insumos perenes, residuais e de espuma, além do metílico de espuma. Acima de 90% de eficiência ficaram os biodieseis metílicos de resíduos e de insumos perenes.

Quanto a servir como referência para os demais, o biodiesel etílico de insumos perenes atendeu a 10 dos 13 elementos, enquanto o etílico de resíduos atendeu a 7. Empataram com 6 referências o biodiesel etílico de espuma e o óleo diesel, seguidos do biodiesel metílico de espuma com 2 referências.

Reunindo as conclusões parciais obtidas em cada uma das análises acima, temos as **opções eficientes hierarquizadas** pelo número de vezes que serviram de referência para as demais unidades produtivas de cada grupo:

- Insumos disponíveis imediatamente:

1^o usado etílico,

2^o óleo diesel,

3^o espuma etílico e

4^o espuma metílico;

- Insumos disponíveis após plantio (sem resíduos):

1^o etílico de mamona,

2^o etílico de girassol, e

3^o óleo diesel

- insumos perenes:

dendê etílico (ainda que não tenha sido utilizada Análise Envoltória de Dados);

Caso a política pública para produção e consumo de biodiesel demore a ser implementada, e isto permita que o início de um programa nacional ocorra quando já existirem insumos oriundos do cultivo com preços competitivos, disputando com insumos residuais, as prioridades devem ser estabelecidas para:

- insumos disponíveis após plantio (mamona, soja e resíduos):

1º etílico de mamona;

2º etílico de óleo usado;

3º etílico de espuma;

4º óleo diesel; e

5º metílico de espuma.

Na avaliação de todos os insumos serem processados com o mesmo álcool, no caso o metanol, a prioridade também recaiu sobre a mamona, seguida pelos resíduos e pelos insumos perenes, como mostra a lista abaixo:

- todos os insumos com metanol:

1º mamona,

2º espuma,

3º dendê,

4º usado,

5º coco, e

6º óleo diesel.

Para avaliar todos os tipos de insumos com os dois álcoois foi necessário estabelecer grupos de insumos (restrição do modelo matemático elaborado). Neste caso a prioridade recaiu sobre os insumos perenes (que somente estarão disponíveis cinco anos depois de plantados), seguido pelos insumos residuais.

- grupos com ambos os álcoois:

1º etílico de insumos perenes,

2º etílico de resíduos e óleo diesel,

4º etílico de espuma, e

5º metílico de espuma.

Assim, é possível afirmar que:

- Os biodieseis de escuma, óleo usado, mamona e dendê apresentam-se como prioritários, pois aparecem como eficientes mais de uma vez nas seis avaliações realizadas;

- Quando todos os insumos estiverem disponíveis simultaneamente, o biodiesel etílico de insumos perenes (dendê) deverá ser priorizado, seguido do de óleo usado;

- Para atender a demanda imediata, o biodiesel etílico de óleo usado deve ser priorizado;

- O biodiesel etílico de mamona e o de girassol mostram-se favorecidos quando disputam com outras oleaginosas de ciclo curto e com o extrativismo;

- Os biodieseis etílicos de mamona e de resíduos mostram-se favorecidos quando disputam com resíduos e oleaginosas de ciclo curto;

- O biodiesel metílico de escuma é o único que consegue ficar na fronteira de eficiência quando comparado aos biodieseis etílicos;

- A utilização de etanol prioriza a maior parte dos biodieseis eficientes, o que decorre do grande número de empregos que a produção do etanol oferece;

- Ainda que não sejam os mais eficientes, os biodieseis de escuma sempre ficam na fronteira de eficiência;

- Como o relatório final do GIT do biodiesel recomendou que o biodiesel etílico de mamona represente metade da produção nacional, de 2005 a 2010, os insumos residuais devem ser incentivados a preencher, prioritariamente, a outra metade da produção.

VI.3. SÍNTESE DOS RESULTADOS

Os resultados da Análise de Sustentabilidade e da Análise Envoltória de Dados serão compatibilizados nas tabelas 63 e 64, a seguir.

Na primeira estarão os resultados relacionados às Fontes Alternativas de Energia, enquanto a segunda apresentará os resultados referentes aos insumos para a produção de biodiesel.

A compatibilização, conforme apresentado no item V.5, será feita mediante a convergência entre as posições obtidas nas metodologias.

Como as FAE reúnem 11 alternativas, as faixas para a aplicação dos conceitos são as seguintes: “A” para as que ficarem simultaneamente entre as três primeiras classificações; “C” para as classificadas nas últimas quatro posições (8^a a 11^a) e “B” para as demais.

Na tabela 60 são apresentados os resultados das FAEs e sua compatibilização. Na última coluna foi simulada uma compatibilização com os resultados da Análise Envoltória de Dados antes de aplicado o critério de desempate entre as alternativas que classificaram-se nas cinco primeiras posições.

TABELA 63 - Síntese dos Resultados das Metodologias para F AE e Compatibilização

ROTA TECNOLÓGICA	CLASSIFICAÇÃO ORIGINAL		COMPATIBILIZAÇÃO
	ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE	ANÁLISE ENVOLTÓRIA DE DADOS	DIRETA
GÁS DE LIXO + CONSERVAÇÃO	1	1	A
DIGESTÃO ACELERADA + GDL + CONSERVAÇÃO	2	5	B
B.E.M. + GDL + CONSERVAÇÃO	3	4	B
INCINERAÇÃO + GDL + CONSERVAÇÃO	3	3	A
Geração Termelétrica c/ Casca de Arroz	5	2	B
Sistemas Fotovoltaicos	8	8	C
Pequenas Centrais Hidrelétricas – ELETROSOL	6	6	B
Usina Eólica– COELCE, CBEE/UFPE	7	7	B
Bagaço com Palha e Pontas	8	10	C
UTE GN CC	10	8	C
UTE GN MERCHANT	11	10	C

Fonte: Elaboração Própria.

A tabela acima mostra que na compatibilização direta das alternativas, apenas duas obtiveram conceito “A” e quatro obtiveram conceito “C”. As primeiras consorciaram tecnologias mais consolidadas de aproveitamento energético, recuperação de gás do lixo e incineração, com aquela e ambas com a conservação através da reciclagem. Dentre as últimas ficaram a fotovoltaica, para a qual o elevado custo foi decisivo, e as que consomem gás natural, o que pode ser atribuído à poluição causada e à baixa quantidade de empregos.

A aplicação da metodologia de compatibilização para o caso do biodiesel, que reúne 25 alternativas, fará com que os conceitos sejam considerados nos seguintes intervalos: “A” para as classificadas simultaneamente entre as sete primeiras posições; “C” será atribuído as classificadas entre dez últimas (15^a a 25^a); enquanto “B” será concedido as demais.

Na tabela 64 são apresentados os resultados do biodiesel e sua compatibilização. Isto foi feito para o caso real, em que a oferta dos insumos será realizada em tempos diferentes, mas também foi simulada a oferta simultânea de todos os insumos. Neste caso foi aplicado o resultado da Análise Envoltória de Dados para grupos.

TABELA 64 - Síntese das Metodologias Aplicadas aos Insumos para Biodiesel

GRUPO	TEMPOS DIFERENTES			OFERTA SIMULTANEA		
	CLASSIFICAÇÃO		COMPATIBILIZAÇÃO	CLASSIFICAÇÃO		COMPATIBILIZAÇÃO
	ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE	ANÁLISE ENVOLTORIA DE DADOS		ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE	ANÁLISE ENVOLTORIA DE DADOS	
ÓLEO USADO + METANOL	5	5	A	5	6	A
ESCUMA + METANOL	2	4	A	2	5	A
SEBO + METANOL	8	9	B	8	6	B
GRAXOS + METANOL	5	7	A	5	6	A
ÓLEO USADO + ETANOL	3	1	A	3	2	A
ESCUMA + ETANOL	1	3	A	1	3	A
SEBO + ETANOL	5	8	B	5	2	A
GRAXOS + ETANOL	3	6	A	3	2	A
MAMONA + METANOL	15	14	B	20	10	B
MAMONA + ETANOL	13	12	B	12	9	B
SOJA + METANOL	21	17	C	20	11	B
GIRASSOL + METANOL	21	16	C	20	-	-
SOJA + ETANOL	15	15	C	12	8	B
GIRASSOL + ETANOL	15	13	B	12	-	-
CASTANHA + METANOL	21	19	C	12	13	B
BABAÇU + METANOL	15	11	B	12	13	B
BURITI + METANOL	21	21	C	12	13	B
CASTANHA + ETANOL	15	18	C	8	12	B
BABAÇU + ETANOL	13	10	B	8	12	B
BURITI + ETANOL	14	20	B	8	12	B
DENDÊ + METANOL	11	23	B	20	7	B
COCO + METANOL	11	25	B	20	-	-
DENDÊ + ETANOL	9	22	B	12	1	B
COCO + ETANOL	9	24	B	12	-	-
ÓLEO DIESEL	25	2	B	25	4	B

Fonte: Elaboração Própria.

A tabela acima com a compatibilização dos resultados das duas metodologias ao caso do biodiesel mostrou que, quando considerada a diferença de tempo para oferta dos insumos, que os biodieseis produzidos com insumos residuais, exceto os de sebo, obtiveram conceito “A”. Os principais atributos para este resultado são a disponibilidade imediata e o baixo custo destes insumos

No extremo oposto ficaram os biodieseis produzidos com óleos provenientes de extrativismo e de culturas de ciclo curto, já comercializados em nível internacional. O motivo para tal classificação decorre dos elevados custos para sua utilização, uma vez que toda a produção já está direcionada para atender mercados determinados.

A compatibilização feita para a simulação quanto à oferta simultânea de insumos apenas inseriu o biodiesel etílico de sebo ao grupo que obtivera conceito “A” na compatibilização acima. Alguns elementos não dispuseram de classificação na Análise Envoltória de Dados, uma vez que foi utilizada a simulação feita para grupos, a qual reuniu alguns dos elementos. Mas como estes elementos já haviam sido classificados na Análise de Sustentabilidade nas posições 12^a e 20^a, não seria possível atingirem o conceito “A”, o que não comprometeu a compatibilização da simulação.

CAPÍTULO VII - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES:

A avaliação dos empreendimentos energéticos através do conceito de Desenvolvimento Sustentável amplia o escopo do Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica (EVTE) ao incorporar variáveis sociais e ambientais. Como a aplicação prática deste conceito envolve questões não objetivas de difícil quantificação, a mesma foi feita mediante a utilização simultânea de duas metodologias multi-critério, sendo uma quali-quantitativa (Análise de Sustentabilidade) e outra somente quantitativa (Análise Envoltória de Dados), para comparar os resultados e verificar sua convergência. Estas metodologias foram aplicadas ao aproveitamento energético de dois conjuntos de dados: Fontes Alternativas de Energia e insumos para produção de Biodiesel.

Os resultados da aplicação das metodologias de Análise de Sustentabilidade e da Análise Envoltória de Dados às Fontes Alternativas de Energia (FAE) e aos insumos para produção de Biodiesel convergiram, na maioria das alternativas, apontando para a priorização do aproveitamento energético dos insumos residuais.

O presente trabalho permitiu avaliar diversas FAE simultaneamente. Os resultados da Análise de Sustentabilidade mostraram as quatro tecnologias de aproveitamento energético dos resíduos urbanos⁵² nas primeiras posições, seguidas pelos resíduos agrícolas, no caso, as cascas de arroz. A Análise Envoltória de Dados (DEA) mostrou as mesmas cinco alternativas nas primeiras posições, apesar de classificar as cascas de arroz em primeiro lugar. Cabe ressaltar que houve empate entre as cinco primeiras, e que a classificação final requereu a aplicação de critério de desempate.

Entretanto, como a escala de produção das cascas de arroz em nível nacional é pouco expressiva, seja em quantidade de energia a ser gerada, 6,8 TWh/ano (tabela 36) ou no que se refere à melhoria da qualidade de vida das populações, face aos cerca de 120 TWh/ano (tabela 36) que o aproveitamento energético do lixo pode oferecer em

⁵² Recuperação de Gás de Lixo, Incineração, Digestão Acelerada e B.E.M.

eletricidade e em solução sanitária, além de um milhão de empregos para a população brasileira, fica evidente que o aproveitamento do resíduo agrícola “casca de arroz” (como integrante do planejamento energético mesmo que regional), não seja priorizado perante os resíduos sólidos urbanos. (o lixo).

Assim, é possível afirmar que os resultados das metodologias convergiram quanto à priorização, à luz do conceito de Desenvolvimento Sustentável ⁵³, do aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos perante as outras FAE.

Este resultado é importante para justificar a proposição feita no presente trabalho de que o PROINFA⁵⁴, em sua parcela de biomassa (1100 MW), permita que lixo e casca de arroz sejam contemplados com a garantia de aquisição de uma quantidade de energia. Isto permitirá que seja instituída uma política industrial de fabricação dos equipamentos necessários para estas atividades e, com o passar do tempo e o aumento da escala de processamento, poderá representar a redução nos custos de produção destes equipamentos e aumento da competitividade destas fontes renováveis de energia.

No caso do biodiesel, ficou claro que os resíduos são os insumos mais sustentáveis no curtíssimo prazo, uma vez que obtiveram os melhores resultados dentre os insumos disponíveis imediatamente nas duas metodologias.

Entretanto, como ainda não foram instaladas as plantas industriais para o aproveitamento destes insumos e já estão sendo iniciadas plantações de oleaginosas de curto prazo, tende a existir uma competição entre biomassas residual, plantada e coletada. Por isto, foi realizada uma simulação quanto à disponibilidade simultânea nas duas metodologias, mas só houve alteração no resultado da Análise Envoltória de Dados, onde o biodiesel de mamona mostra-se como prioritário, seguido dos outros tipos de biodiesel produzidos com resíduos, também considerados como eficientes.

A mesma simulação foi aplicada ao caso de quando os insumos perenes estiverem disponíveis simultaneamente aos demais e, neste caso, a Análise de

⁵³Análise integrada das viabilidades social, ambiental, técnica, operacional e econômica .

Sustentabilidade mostrou o biodiesel de resíduos à frente dos demais. Isto foi corroborado pela Análise Envoltória de Dados, que sinalizou para a priorização do biodiesel etílico de dendê, seguido pelos insumos residuais.

Assim, fica claro que em uma competição natural os resíduos devem ser priorizados, sendo a espuma (de esgoto) e o óleo usado os mais eficientes quando compatibilizados os resultados das duas metodologias. A perspectiva de consumo superior à escala disponível com estes insumos residuais requer cultivos, sendo prioritários a mamona e o dendê, conforme mostraram os resultados das simulações.

Como a política estabelecida pelo governo federal (GIT, 2004) instituiu que o óleo diesel seja substituído por biodiesel na proporção de 2% em 2005, com incremento anual até atingir 5% no ano 2010, sendo metade oriundo de mamona, e a outra metade ainda sem definição, somente a priorização dos resíduos não promoveria controvérsias e seria bastante adequada, como comprovou este trabalho.

Visto que, em ambos os casos, são verificados benefícios ambientais (possibilidade de mitigação do efeito estufa e de redução da poluição local), sociais (geração de empregos e distribuição de renda), econômicos (redução das importações de combustíveis), tecnológicos (desenvolvimento de tecnologia nacional e receita advinda de pagamento de royalties) e operacionais (capacidade de instalação, operação e reprodução nas diversas regiões brasileiras), a premissa deste trabalho de que, à luz do conceito de desenvolvimento sustentável, o aproveitamento energético dos insumos residuais deveriam ser priorizados, foi comprovada.

Isto é reforçado pela aceitação, tanto da Comissão Interministerial de Mudanças Globais do Clima, do governo brasileiro, quanto por uma organização não governamental internacional, dos projetos USINAVERDE, GRAMACHO e de biodiesel no setor de transportes, descritos no capítulo 4, para servirem de base à elaboração de um Guia Internacional sobre identificação e implantação de projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Este conceito, conforme explicado no capítulo

⁵⁴ Ver Lei 10438 de 2002, Programa de incentivo às fontes alternativas.

II, envolve a redução de emissões de gases responsáveis pelo efeito estufa e o comércio destas reduções através de CERs (certificados de emissões reduzidas), para o que é preciso preparar documentos para obtenção dos créditos, e o atendimento aos requisitos do desenvolvimento sustentável previstos na Resolução n.1 da Comissão Interministerial do Clima.

As diversas etapas para elaboração deste Guia vêm sendo realizadas desde o ano 2001, em uma parceria entre o governo holandês e instituições do Brasil, Indonésia, África do Sul e Bangladesh, através de uma organização não governamental denominada “South South North” (SSN). Os projetos práticos brasileiros (plantas piloto), que obtiveram avaliação máxima da SSN em abril de 2004, que estão sob coordenação técnica do autor do presente trabalho, terão seus documentos analisados pelo Painel Metodológico do IPCC e pela Autoridade Nacional Designada brasileira a partir de outubro de 2004. A aprovação destes projetos permitirá a comercialização dos créditos, para o que já existem confirmações de interesse de fundos de investimento internacionais. Há, inclusive, o intuito dos investidores de divulgar estas comercializações ainda no decorrer de 2004.

Este interesse pode ser estendido para programas nacionais, no recém criado mercado internacional de CERs (exemplificado pela Bolsa de Chicago, Natsource, etc), sendo que no caso do lixo esta receita (utilizando o menor valor praticado atualmente) é capaz de tornar a eletricidade obtida a partir desta fonte mais barata que aquela proveniente do gás natural. Já no caso do biodiesel, esta receita será importante para viabilizar parte dos investimentos, mesmo não sendo decisiva na competitividade face ao óleo diesel.

Por outro lado, estes insumos são benéficos principalmente nos demais aspectos da sustentabilidade. O aproveitamento energético do lixo representa uma nova Usina Hidrelétrica de Itaipu (cerca de 90 TWh/ano) passível de ser construída em 18 meses, prazo de UTE, com custos competitivos aos do gás natural, e capaz de resolver um problema ambiental de qualquer cidade, a disposição final dos resíduos, gerando

emprego para 1 milhão de pessoas de baixa qualificação profissional em cerca de 2 anos. Com relação às emissões evitadas de gases do efeito estufa, o aproveitamento energético do lixo pode representar 150 milhões de toneladas anuais de CO₂ equivalente, 15% do que era emitido pelo país em 1994.

A produção de biodiesel com resíduos permite ofertar cerca de 1% do consumo nacional de óleo diesel imediatamente e com preços similares aos daquele combustível, ainda que não gerem emprego de maneira significativa quando comparado aos cultivos de oleaginosas. Por outro lado, o efeito de confiança no produto por parte das montadoras de veículos incentivará o cultivo agrícola, atividade que pode permitir ao país eliminar a importação e caracterizar-se como grande exportador deste combustível, gerando milhões de empregos. No caso de reflorestar os 50 milhões de hectares do “Arco do Desmatamento” com dendê, é possível ao Brasil produzir em biodiesel cerca de 30% do óleo diesel consumido hoje no planeta e, com isso, empregar 7,5 milhões de pessoas de baixa qualificação profissional, em cerca de 5 anos. Se este biodiesel utilizar etanol, serão oferecidos mais 2,5 milhões de empregos no setor rural, no mesmo período. No caso de toda esta área ser cultivada, o biodiesel evitará emissões superiores a 600 milhões de toneladas anuais de CO₂ equivalente, ou 60% das emissões nacionais de 1994.

Portanto, o aproveitamento energético de resíduos para geração elétrica e produção de biodiesel (integrando todos os insumos), no Brasil, é capaz de ofertar mais de 10 milhões de empregos, principalmente para pessoas de baixa qualificação profissional, além de dinamizar a economia, reverter o fluxo internacional de capitais e reduzir a poluição local e as emissões de gases de efeito estufa de forma significativa e, por isto, deve ser considerado como prioritário pelas políticas públicas.

Como desdobramento deste trabalho, sugere-se o desenvolvimento dos seguintes temas:

- **AMPLIAÇÃO DO MONITORAMENTO:** Apesar da grande quantidade atual de informações, ficou clara a necessidade de uma série histórica mais abrangente, com

trabalhos de monitoramento teóricos e práticos, para que seja possível aprimorar os resultados.

- ELABORACAO DE CENÁRIOS: Simulações de aumento nos preços dos combustíveis fósseis e redução dos custos dos equipamentos para aproveitamento energético de resíduos.
- ECO-POLO BIOENERGÉTICO: Aproveitamento consorciado de lixo, lodo de esgoto e biogás para geração elétrica, além de biodiesel oriundo de esgoto sanitário para propulsão veicular ou combustão em grupo-geradores. O aproveitamento do calor excedente da geração já conta com três aplicações: (i) secagem do lodo e do lixo para aumentar o rendimento destes materiais na incineração; (ii) secagem das cascas de coco verde, cujas fibras serão aplicadas na produção de aglomerados para móveis e divisórias; e (iii) auxiliar no processo de produção de biodiesel de esgoto, que requer cerca de 80 graus Celsius. Este sistema pode ser consorciado a utilização de gás natural.
- BIODIESEL – Mapeamento das oportunidades regionais de produção e de consumo. Estudar as misturas de biodiesel de vários insumos como alternativa para ampliar a participação deste combustível na matriz energética. Análise do aproveitamento dos co-produtos. Alternativas para o etanol hidratado produzido.
- LIXO – elaboração do MAPA do LIXO, analisando a viabilidade de consorciar municípios para atender à escala necessária para cada tecnologia.
- ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COMO PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA – avaliar o potencial das ETEs e a viabilidade de caracterizá-las como Produtores Independentes de Energia.
- BIOGÁS TRATADO – Redução do teor de enxofre e do dióxido de carbono para atingir a especificação do Gás Natural, possibilitando utilizar diretamente em transportes, como feito pela COMLURB na década de 1980, ou para servir como insumo na produção de:

- METANOL RENOVÁVEL – Repetindo atividade da Alcohol Solutions, USA.
- DI-METIL ÉTER – Utilização no processo de liquefação.
- ÓLEO DIESEL SINTÉTICO - Utilização no processo de liquefação (FISCHER-TROPSCHER).

CAPÍTULO VIII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL (1999). *Resolução nº 245*. Versa sobre a Conta de Consumo de Combustíveis.
- ANP (2002). *Estatísticas sobre a importação e o consumo de óleo diesel no Brasil*. Disponível em www.anp.gov.br/estatisticas. Recuperado em 18 de março de 2003.
- ANP (2003). *Estatísticas sobre a importação e o consumo de óleo diesel no Brasil*. Disponível em www.anp.gov.br/estatisticas. Recuperado em 26 de fevereiro de 2004.
- ARANDA, D.A.G.; RAMOS, A. L. D.; NOVA, G. D.; MARTINS, B. B. "Catalisadores para Tratamento de Gases Tóxicos Provenientes de Incineração de Lixo". In: Anais do XI Congresso Brasileiro de Catálise, 2001, Bento Gonçalves. IBP, 2001. v. 1, p. 228-231
- B.E.N (2001). "Balanco Energético Nacional".
- BNDES (2002). *Programa para Apoio Financeiro a Investimentos em Energia*. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, acessado em 30/06/2002, disponível em <http://www.bndes.gov.br/produtos/financiamento/energia.asp>.
- CCX (2004). (Chicago Climate Exchange). Bolsa de créditos de carbono. Disponível em <http://www.chicagoclimateexchange.com>. Acessado em 10 de março de 2004.
- CEMPRE (2003). "Oportunidades de negócios com reciclagem". Cadernos de Reciclagem.
- CENPES, 2000. "Análise de biodiesel de óleo de frituras para uso como combustível substituto ao óleo diesel". Rio de Janeiro.
- CERUPT (2002). Fundo holandês para créditos de carbono. Disponível em <http://www.senter.nl/>. Acessado em 20 de abril de 2002.
- CETESB (1998) *Inventário Nacional de Emissões de Metano pelo Manejo de resíduos – Enabling Brazil to Fulfill its commitments to the United Nations Convention on Climate Change* – vol. I – Relatório Final – Julho/ 1998
- CHARNES, A., COOPER, W. W., RHODES, E. (1978). "Measuring the efficiency of Decision-Making Units". *European Journal of Operational Research*, vol. 2, pp. 429-444.
- CORMA, A., (1995) "Inorganic Solid Acids and their use in hydrocarbon reactions". *Chem. Rev.* v. 95, pp. 559-624.
- COSTA NETO, P. R.; *et alli.*, 1999. "Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras". *Química NovaCor*.
- DI LÁSCIO, M.A. (2001). "Relatório do Projeto Equinócio". Universidade de Brasília.
- DI LASCIO, M.A.; ROSA, L.P.; MOLION, L.C.B., 1994. "Projeto de Atendimento Energético para Comunidades Isoladas da Amazônia". COPPE/UFRJ, UNB, UF AL.
- DUBEUX, C.B.S. (2004). Mercado de Créditos de Carbono. PPE/ COPPE/UFRJ.

- ELETRÓBRÁS (1999) – “Plano de Expansão do Setor Elétrico de 1999-2010”.
- EMBRAPA (2002). “Ricinocultura consorciada com no Semi-Árido nordestino, visando produção de biodiesel, emprego e renda”. 8p.
- EPA (1996). *Turning a liability into an asset: a landfill gas-to-energy project development handbook*. U.S. Environmental Protection Agency.
- FIRJAN (2004). Relatório do Conselho Empresarial de Energia. Rio de Janeiro.
- FREEDMAN, B.; BUTTERFIELD, R. O.; PRYDE, E. H.; 1986. J. Am. Oil Chem. Soc. 63, 1375
- GIT (2004). Relatório final do grupo de trabalho interministerial encarregado de apresentar estudos sobre a viabilidade de utilização de óleo vegetal – biodiesel como fonte alternativa de energia. 110 p
- GOLDEMBERG, J.(2002) *Secretário José Goldemberg propõe à ONU, em Nova Iorque, a adoção de 12% de energias renováveis no mundo na próxima década*. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/destaque/goldemberg%5Frio%2B10.htm>, acessado em 04/06/2002
- GOMES, E.G. (1999). “Integração entre Sistemas de Informação Geográfica e Métodos Multicritério no Apoio à Decisão Espacial”. Tese (de mestrado). Programa de Engenharia de Produção. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. RJ. 229 p.
- GOMES, M. S. P., MUYLAERT, M. S., PAULA, R. R. C. (2004). “Analysis of a CDM project involving alcohol-fueled cars in Brazil: local emissions during the production and use of the fuel alcohol versus the production and use of gasoline”. In: Proceedings of the 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress, London, UK.
- HIDROVEG (2002). “Estimativa sobre o potencial de insumos residuais no país”. Comunicação pessoal.
- IBAMA, 2001. “Fatores de emissão dos motores homologados pelo PROCONVE”. Comunicação pessoal.
- IBGE (1989). *I Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, RJ.
- IBGE (2000). *II Pesquisa Nacional de Saneamento Básico*. Disponível em www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb/lixo_coletado/def_aullixo.shtm, acessado em 04/06/2002.
- IEA (2003) . International Energy Agency. “International demand of diesel oil”. Disponível em: www.iea.org.
- ____ (2004). International Energy Agency. “International electric demand”. available: www.iea.org/statistics.
- IPCC (1996). *Intergovernmental Panel on Climate Change Greenhouse gas inventory reference Manual*, revised – chapter 6 – Waste. 350 p.

- IPCC. Greenhouse Gas Inventory. 1996.
- IPT (1998). *Lixo Municipal – Manual de Gerenciamento Integrado* – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 227p. São Paulo.
- ISWA (1993) Working Group on Sanitary Landfill Yearbook. International Solid Waste Association, Copenhagen.
- JONES, K. H. (1994) , “Comparing Air Emissions from Landfills and WTE Plants”. *Solid Waste Technologies*. v. march/april, pp. 28-39.
- JOVEM CIENTISTA (2004). “Geração de energia elétrica em Pilha Combustível utilizando glicerol”. Premiado: Maurício Brandão – UFRJ. Disponível em www.premiojovemcientista.org.br.
- LA ROVERE e BRAGA (1981). “Óleos vegetais para fins energéticos: análise comparativa de algumas avaliações econômicas”. FINEP. 43p.
- LA ROVERE, E. L. et alli. (2001). “Assessment of CDM Project Candidates and Selection of Five Proposals in The Brazilian Context”. South South North, available at <http://www.southsouthnorth.org>, since august 2001
- LINS, M.P.E e MEZA, L.A. (2000) (editores). *Análise envoltória de dados e perspectivas de integração no ambiente do apoio à decisão* Ed. COPPE/UFRJ. 232 p.
- LINS, M.P.E et al. (2004). *Análise envoltória de dados aplicada a fontes alternativas de energia e desenvolvimento sustentável*.
- MATTAR, H. , 1982. *Análise comparativa da economicidade dos óleos vegetais para fins energéticos*. In: Perspectivas de utilização de óleos vegetais para fins energéticos. FINEP, Rio de Janeiro.
- MCT (2002) – “Comunicação Nacional” – Inventário de emissões de gases do efeito estufa. Disponível em www.mct.gov.br/mudancasclimaticas [capturado em 23 de outubro de 2002].
- MCT (2002). Perguntas e Respostas Frequentes sobre os Fundos Setoriais. Ministério da Ciência e Tecnologia, disponível em www.mct.gov.br/Fontes/Fundos/perg_resp.htm, acessado em 30/06/2002.
- MDIC (1998). Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior. *Programa Brasileiro de Reciclagem . PBR*. Disponível em: www.reciclagem.ibict.br/pbr . Acessado em: 20/04/1999
- MERCEDES, S.S.P, SAUER, I. L., COELHO, S. T. (1999). *Barriers to Implementation of Waste-to-Energy (WTE) Technologies in Brazil*. In: Proceedings of Fourth Biomass Conference of The Americas. v.2. p.1777 – 1783.
- MIC (Ministério da Indústria e do Comércio), 1985. *Produção de combustíveis líquidos a partir de óleos vegetais*. Secretaria de tecnologia industrial, Coordenadoria de informações tecnológicas. Brasília, DF.
- MITTELBAACH, M.; TRITTHART, P.; 1988. J. Am. Oil Chem. Soc., 65, 1185

- MME (2000). *Programa Prioritário de Termelétricas*. Disponível em www.mme.gov.br [capturado em 15 de maio de 2002].
- MME (2001). Plano Decenal de Expansão 2001/2010. Disponível em www.mme.gov.br/planodecena1 [capturado em 12 de setembro de 2001].
- MME (2002). *Plano Decenal de Expansão do Setor Elétrico*. Ministério das Minas e Energia. Disponível em www.mme.gov.br, acessado em 04/06/2002.
- MUYLAERT, M.S. (2000). *Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta*. Ed. COPPE/UFRJ. 247 p.
- ____ (2002). “Indicadores de Equidade e o Setor Elétrico Brasileiro”. In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia*. p. 843-852.
- NREL (National Renewable Energy Laboratory) (1998). Life Cycle Inventory of Biodiesel and Petroleum Diesel for Use in an Urban Bus. USA.
- ____ (2002). Effect of biodiesel composition on NOx and PM emissions from a DDC series 60 engine. 78 p.
- OLIVEIRA, L. B. & ROSA, L.P. (2003). “Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits”. *Energy Policy*. v 31. pp. 1481-1491.
- OLIVEIRA, L. B. (2000). *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e abatimento de gases do efeito estufa*. Dissertação (de mestrado). Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. RJ. 148 p.
- OLIVEIRA, L., HENRIQUES, R., PEREIRA, A. (2002). “Coleta Seletiva, Reciclagem e Conservação de Energia”. In: *Anais do IX Congresso Brasileiro de Energia*, vol. 3, pg. 1461, Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, L.B., 2001. “Biodiesel: Combustível Limpo para o Transporte Sustentável”. In: RIBEIRO, S.K. *Transporte Sustentável: Alternativa para Ônibus Urbanos*. Ed. COPPE/UFRJ. 198 p.
- ONU (2000). *Indicators of sustainable development: guidelines and methodologies*. Ed. United Nations. 315 p.
- OWS (2002). www.ows.be acessado em 03 de outubro de 2002.
- PARENTE, E.J.S., 1993. *Proposta de um óleo diesel alternativo*. Tese do concurso para professor titular do Departamento de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará.
- PAULA, C.P., SAUER, I. L. (2002). “Cogeração e Geração Distribuída”. In: *Soluções para a Energia no Brasil*. In: *IX Congresso Brasileiro de Energia e IV Seminário Latinoamericano de Energia*, Rio de Janeiro. v.4. p.1915 – 1924
- PINATTI, D.G.(1996). *Programa BEM – Biomassa, Energia e Materiais – Documento Básico DEMAR- Lorena, SP – 1996*
- PISCHINGER, G.H. et al., 1981. “Resultados de testes veiculares e dinamométricos utilizando-se ésteres metílicos de óleos vegetais como combustível alternativo para

- motores diesel”. In: Simpósio anual da Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 4º . São Paulo, IPT.
- PNUMA (1992). Convenção do Clima. Disponível em www.pnuma.org. Acessado em 15 de outubro de 1999.
- PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA (2001). *Resolução nº 23, de 5 de julho de 2001- Confere prerrogativas do Programa Prioritário de Termelétricidade - PPT, a empreendimentos de geração termelétrica*. CÂMARA DE GESTÃO DA CRISE DE ENERGIA ELÉTRICA, Brasília, D.F. Disponível em www.energiabrasil.gov.br/resolucoes/resolucao_23.asp, acessado em 04/06/2002.
- PROGEDIS (2001). *Propostas de Curto Prazo para a Crise de Energia: Programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica*. COPPE/UFRJ. Disponível em www.ivig.coppe.ufrj.br.
- PT (2002). Programa de Governo para o Setor Elétrico.
- ROSA, L.P. et alli (2003). “Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais”. In: TOLMASQUIM, M.T (Coord) *Fontes Alternativas de Energia no Brasil - CENERGIA* 1ª Ed. Editora Interciência. 515 p.
- ROSA, L.P.(2001) *O apagão – Por que veio? Como sair dele?* Editora Revam – 1ª edição – Rio de Janeiro. 125 p.
- SALAMA, C. (1982). *Estudo da viabilidade de utilização de óleos vegetais em substituição ao óleo diesel*. Tese (de mestrado). Programa de Planejamento Energético. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- SANT’ANNA, L.A.F.P. (1999). *Análise de Envoltória de Dados Aplicada à Avaliação de Performance no Sistema Elétrico Brasileiro*. Tese (de mestrado). Programa de Engenharia de Produção. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro. 123 p.
- SHAPIRO, A (1999). *Lixo urbano: tecnologia e economia*. Jornal Gazeta Mercantil em 09/11/1999.
- SILVA, V.L. (2002). *O Futuro das Indústrias e o Papel da Universidade no Desenvolvimento Sustentável*. Disponível em, www.mdic.gov.br/tecnologia/revista/artigos/PE/art09vandinete.PDF, acessado em 04/06/2002.
- TEIXEIRA, P. R. M., GOMES, M. S. P. (2004). “Simulação do Processo de Combustão de Gases Provenientes de Aterros Sanitários”. In: *Anais do III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Belém, PA.
- TEIXEIRA, P. R. M. (2004). *Análise do Aproveitamento Energético de Gases de Aterros Sanitários - Simulação do Processo de Combustão*. Dissertação (de Mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- USEPA (1998). Summary results from NBB/USEPA tier I. “Health and environmental effects testing for biodiesel under the requirements for USEPA registration of fuels and fuel additives” (40 CFR Part 79, Sec 21 1 (b)(2) and 21 1 (e)). Final report.
- USEPA (2002). “A comprehensive analysis of biodiesel impacts on exhaust emissions”. Draft technical report. 126 p.

VELEVA, V. and ELLENBECKER, M. (2001). "Indicators of sustainable production: framewok and methodologie". *Journal of cleaner production*, 9. 519-49 p.

WILLUMSEN, H. C. (2001). "Energy Recovery From Landfill Gas in Denmark and Worldwide". Disponível em: <http://www.lei.lt/Opet/Pdf/Willumsen.pdf>; acessado em 25/09/2002.

ANEXOS

LAUDO DO LABORATÓRIO ASG ANALYTIC-SERVICE GESELLSCHAFT mbH
 REALIZADO PARA ROBERT BOSCH GmbH EM JULHO DE 2003
 AMOSTRAS ENCAMINHADAS PELO IVIG/COPPE/UFRJ

CARACTERÍSTICAS	MÉTODO	RESULTADO			UNIDADE	NORMA ALEMÃ (prEN 14.214)	
		FRITURA	SOJA	ESGOTO		Min.	Max.
TEOR DE ÉSTER	prEN 14103	92,8*	97,8	59,7*	Gew.-%	96,5	-
DENSIDADE	EN ISO 12185	881,5	884,2	866,6	Kg/m ³	860	900
VISCOSIDADE	EN ISO 3104	4,31	4,09	3,92	mm ² /s	3,5	5
PONTO DE FULGOR	ISSO/CD 3679	148	166	102	°C	101	-
TEOR DE ENXOFRE	EN 24260	9,1	0,9	1,2	mg/kg	-	10
RESÍDUOS DE CARBONO	EN ISO 10370	0,01	0,01	0,02	Gew.-%	-	0,3
CINZAS SULFATADAS	ISO 3987	0,016	0,08*	0,03*	Gew.-%	-	0,02
TEOR DE ÁGUA	EN ISO 12937	189	172	335	mg/kg	-	500
TEOR DE CONTAMINANTES	EN 12662	99*	141*	67*	mg/kg	-	24
CORROSIVIDADE AO COBRE	EN ISO	1	1	1	Korr.Grad	1	
ESTABILIDADE A OXIDAÇÃO	prEN 14112	0,8*	0,9*	0,8*	h	6	-
ÍNDICE DE ACIDEZ	prEN 14104	0,503*	0,142	0,274	mg KOH/g	-	0,5
NÚMERO DE IODO	prEn 14111	106	127**	115	g Jod/100g	-	120
TEOR DE ÉSTERES METÍLICOS DE ÁCIDO LINOLÊNICO	prEN 14103	2,7	5,1	2,4	Gew.-%	-	12
TEOR DE METANOL	prEN 14110	0,048	0,017	0,029	Gew.-%	-	0,2
GLICERINA LIVRE	prEN 14105	0,028*	0,02	<0,01	Gew.-%	-	0,02
MONOGLICERÍDEOS		0,08	0,09	0,16	Gew.-%	-	0,8
DIGLICERÍDEOS		0,01	<0,01	0,02	Gew.-%	-	0,2
TRIGLICERÍDEOS		<0,01	<0,01	<0,01	Gew.-%	-	0,2
GLICERINA TOTAL		0,05	0,04	0,04	Gew.-%	-	0,25
TEOR SÓDIO E POTÁSSIO	prEN 14538	<0,5	<0,5	<0,5	mg/kg	-	5
TEOR DE FOSFORO	prEN 14107	<0,5	<0,5	<0,5	mg/kg	-	10
PONTO DE NEVOA	EN 116	-1	-4	-12	°C	-	0
TEOR DE CÁLCIO E MAGNÉSIO	prEN 14538	<0,5	<0,5	<0,5	mg/kg	-	5

* Não atendimento ao padrão.

** Não atendimento ao padrão e Indicação de ligações duplas.

CERTIFICADO DE ANALISE DE PRODUTO ELABORADO PELO IVIG/COPPE/UFRJ

Cliente: Cenpes/Petrobrás

Nº combustível:

Tipo de combustível: Biodiesel Puro

Bateladas: NOV/2003

Laboratório: Escola de Química/UFRJ

CARACTERÍSTICAS	RESULTADO		UNIDADE	MÉTODO	Portaria ANP 255	
	FRITURA	SOJA			Mín.	Máx.
Ponto de fulgor, min.	125	127	°C	ASTM D 93	100	
Água e sedimentos, max.	0,03	0,03	% volume	ASTM D 2709		0.050
Viscosidade a 40°C	4,8	3,9	mm ² / s	ASTM D 445	Anotar ⁱ	Anotar ⁱ
Cinzas sulfatadas, max.	0,01	0,01	% massa	ASTM D 874		0.020
Enxofre total, max.	0,0008	0,0005	% massa	ASTM D 5453		0.001
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, max.	1	1	-	ASTM D 130		1
Número de cetano, min.	-	-	-	ASTM D 613	45	
Resíduo de carbono	0,04	0,02	% massa	ASTM D 4530		0.05
Índice de acidez, max.	0,20	0,15	mg KOH/g	ASTM D 664		0.80
Glicerina livre, max.	0,01	0,01	% massa	ASTM D 6584		0.02
Glicerina total, max.	0,12	0,12	% massa	ASTM D 6584		0.38
Aspecto			-			LII ⁱⁱ
Destilação; 95% vol. recuperado, max.	350	336	°C	ASTM D 1160		360 ⁱⁱⁱ
Massa específica a 20°C	854	851	kg/m ³	ASTM D 1298 ou D 4052	Anotar ^{iv}	Anotar ^{iv}
Metanol ou Etanol, max.	0,05	0,05	% massa	pr EN 14110		0.5
Índice de iodo, max.	112	132	% massa	pr EN 14111		Anotar
Monoglicerídeos, max.	0,5	0,6	% massa	ASTM D 6584		1.00
Diglicerídeos, max.	0,09	0,09	% massa	ASTM D 6584		0.25
Triglicerídeos, max.	0,10	0,12	% massa	ASTM D 6584		0.25
Sódio + Potássio, max.	8	5	mg/kg	pr EN 14108/14109		10
Fósforo, max.	7	9	mg/kg	ASTM D 4951		10
Estabilidade à oxidação a 110 °C, min.	> 6	> 6	H	pr EN 14112	6	

i) A mistura biodiesel-óleo diesel utilizada devesa obedecer aos limites estabelecidos para Viscosidade a 40°C constantes da Portaria ANP que especifica óleo diesel automotivo em vigor.

ii) LII – Límpido e isento de impurezas.

iii) Temperatura equivalente na pressão atmosférica.

iv) A mistura biodiesel-óleo diesel utilizada devesa obedecer aos limites estabelecidos para massa específica a 20°C constantes da portaria ANP que especifica óleo diesel automotivo, em vigor.

Obs.: Teste de Numero de Cetano não foi realizado.