



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Ciência e Tecnologia

Faculdade de Engenharia

Luiz Augusto de Oliveira Costa

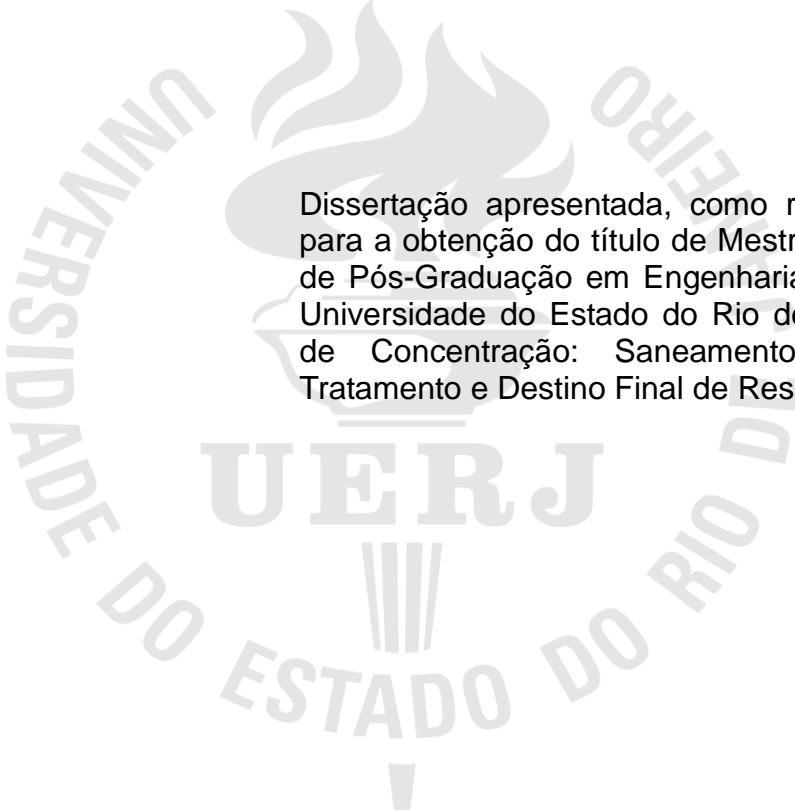
**Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental preliminar da
aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e
Materiais Multifásicos – TTRM a resíduos de terra diatomácea de
usina genérica de produção de biodiesel**

Rio de Janeiro

2014

Luiz Augusto de Oliveira Costa

Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental preliminar da aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM a resíduos de terra diatomácea de usina genérica de produção de biodiesel



Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Orientadora: Prof^a. Dra Elisabeth Ritter

Coorientadora: Prof.^a Dra. Celina Aída Bittencourt Schmidt

Rio de Janeiro

2014

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ / REDE SIRIUS / BIBLIOTECA CTC/B

C837 Costa, Luiz Augusto de Oliveira.
Estudo da viabilidade técnica, econômica e ambiental preliminar da aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM a resíduos de terra diatomácea de usina genérica de produção de biodiesel / Luiz Augusto de Oliveira Costa. - 2014.
100f.

Orientador: Elisabeth Ritter.
Coorientador: Celina Aída Bittencourt Schmidt.
Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Faculdade de Engenharia.

1. Engenharia Ambiental. 2. Tratamento térmico – Dissertações. 3. Resíduos industriais -- Aspectos ambientais -- Dissertações. I. Ritter, Elisabeth. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. III. Título.

CDU 628.54

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação, desde que citada a fonte.

Assinatura

Data

Luiz Augusto de Oliveira Costa

Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental preliminar da aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM a resíduos de terra diatomácea de usina genérica de produção de biodiesel

Dissertação apresentada, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de Concentração: Saneamento Ambiental - Tratamento e Destino Final de Resíduos Sólidos.

Aprovada em: 14 de março de 2014

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Elisabeth Ritter (Orientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Prof.^a Dra. Celina Aída Bittencourt Schmidt (Coorientadora)
Faculdade de Engenharia – UERJ

Dra. Arilza de Castilho Pickler
Petróleo Brasileiro - PETROBRAS

Dr. Roberto de Barros Emery Trindade
Petróleo Brasileiro - PETROBRAS

Rio de Janeiro

2014

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos que, dia a dia, tentam deixar o mundo melhor do que aquele que encontraram.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta e indiretamente para a execução deste trabalho.

À Deus pela saúde e oportunidades colocadas no caminho de minha vida.

Aos meus familiares pela compreensão nos momentos de ausência.

Aos colegas de trabalho pelas trocas de aprendizado.

Ao PEAMB pela fundamental e necessária contribuição para com a nossa querida Engenharia Ambiental que tenho como mais que uma simples profissão.

À Petrobras pelo imenso aprendizado e oportunidades de desenvolvimento profissionais, empresa que orgulha a nós com seus ótimos e inúmeros exemplos de pesquisa de ponta desenvolvidos por profissionais brasileiros.

À empresa ALBRECHT pela parceria com a Petrobras no desenvolvimento de tecnologia que corrobora com “um tijolinho” para o desenvolvimento sustentável.

À minha orientadora Beth e coorientadora Celina, pelos aprazíveis momentos de discussões e aprendizados proporcionados.

À Arilza, pelas conversas e estímulo com essa nova oportunidade de tecnologia.

Ao meu irmão Léo (não fique na Austrália, senão vou te buscar), pelos debates na arte da ciência de engenharia de materiais, e à minha irmã Liza pelo carinho e estímulo para os desafios.

Aos amigos pelas conversas e distrações necessárias a qualquer alma vivente (em especial Vini louco e todo sulnetwork, Baba, Santana Lima Comesa, Marcelita, Andrey, Ciça cigarra, Liudmila, Rodrigo Fred, Ernani o normal, Min Zang nômade Darth Vader, Obi-Wan Kenobi e o mestre Yoda).

E finalmente, fechando com chave de ouro, à minha mãe Luzia, pela dedicação e entrega aos seus filhos, a quem devemos muito pelas conquistas alcançadas.

RESUMO

COSTA, Luiz Augusto de Oliveira. Estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental preliminar da aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos-TTRM a resíduos de terra diatomácea de usina genérica de produção de biodiesel. 2014.100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

O cenário mundial de matriz energética apresenta dados crescentes de contribuição das energias renováveis. No Brasil, o governo tem realizado esforços para aumento da parcela de combustíveis renováveis, e com isso também para o aumento da produção de biodiesel. O principal processo de fabricação de biodiesel com seu polimento em via seca gera quantidades significativas de resíduos, dentre eles, o resíduo de terra diatomácea, com potenciais características de inflamabilidade. Em contrapartida existe a Política Nacional de Resíduos Sólidos com objetivos de não geração, redução, reutilização, reciclagem e redução de periculosidade dos resíduos, e envio para aterro somente de resíduos sem qualquer possibilidade viável de tratamento. O presente trabalho objetiva realizar um estudo de viabilidade técnica, econômica e ambiental preliminar da aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM a resíduo de terra diatomácea - RTD de usina genérica de biodiesel. Foram utilizados como base para o estudo: os resultados dos testes da PETROBRAS e da ALBRECHT realizados em escala de bancada de laboratório e em planta piloto que simularam a aplicação do TTRM ao RTD; premissas técnicas; premissas operacionais; e dados econômicos de referência. Foram estabelecidos cenários específicos para o estudo da aplicabilidade e realizada análise de sensibilidade para os principais fatores da composição dos custos. Observou-se para este estudo preliminar que: na dimensão técnica o TTRM demonstrou ser aplicável; na dimensão econômica, os indicadores são positivos em sua totalidade no cenário esperado, mesmo após análise de sensibilidade com variações de 25% dos principais parâmetros de entrada do estudo de viabilidade; na dimensão ambiental o TTRM demonstrou ser uma alternativa que incorpora os conceitos para uma gestão alinhada com a Política Nacional de Resíduos Sólidos, seja na redução da periculosidade do resíduo, na potencial minimização da geração dos resíduos ou no reuso e reaproveitamento resíduos.

Palavras-chave: Resíduos; Tratamento térmico; Estudo de viabilidade; Resíduo de terra diatomácea; Usina de biodiesel.

ABSTRACT

Renewable energy has played an ever increasing role in the global energy matrix. In Brazil, the public administration has shown efforts to increase the share of renewable fuels and the biodiesel production. The Brazilian National Waste Policy has among its goals non-generation, minimization, reuse, recycling and hazard reduction of waste, considering the alternative of landfill disposal only where waste treatment is not viable. However, the final filtering process in biodiesel production can generate a great amount of waste, including diatomaceous earth waste with significant inflammable characteristic. This work conducts a feasibility study of Multiphase Waste and Materials Thermal Treatment technology applied to diatomaceous earth waste generated from a generic biodiesel production plant. The present study has been based on: the results of diatomaceous earth waste thermal treatment tests performed by PETROBRAS and ALBRECHT both on laboratory and pilot scales; Technical and operational assumptions; and economic reference data. Specific scenarios were established to study the applicability and sensitivity analysis where performed for key factors of costs composition. The study concluded that thermal treatment is technically applicable to diatomaceous earth waste. In the economic dimension all indicators were be positive even where variations of 25% were introduced into the main input parameters. In the environmental dimension the Multiphase Waste Thermal Treatment of diatomaceous earth waste proved to be aligned with the Brazilian National Waste Policy, with regard to hazard reduction and minimization of waste generation as well as improving the potential for waste reuse.

Keywords: Waste; Thermal treatment; Feasibility study; Diatomaceous earth; Biodiesel plant.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 Consumo de Petróleo no mundo (Fonte de dados: BP, 2013).....	16
FIGURA 2 Brasil - Consumo Total de Derivados de Petróleo e de Gás Natural em tonelada equivalente de petróleo - tep (EPE, 2013).....	17
FIGURA 3 Evolução da produção de biocombustíveis no mundo (Fonte de dados: BP, 2013).....	18
FIGURA 4 Consumo de Biodiesel por setores (Fonte de dados: EPE, 2013).....	20
FIGURA 5 Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil (Parcial) (MMA, 2011)	26
FIGURA 6 Esquemas das reações de transesterificação. (a) Fórmula estrutural de uma molécula de triglicerídeo. (b) Reação de transesterificação simplificada em três etapas. (c) Reação geral de transesterificação. (d) Representação gráfica da transesterificação. (adaptado de LORA e VENTURI, 2012).....	30
FIGURA 7 Brasil – Capacidade instalada autorizada de produção local de biodiesel	31
FIGURA 8 Evolução mensal da produção, da demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP no país (ANP, 2014).....	32
FIGURA 9 Carapaças de diatomita in natura da Mina Ponte - formato navicular (FRANÇA et al., 2005).....	35
FIGURA 10 Diferentes formas de algas diatomáceas (IBRAHIM e SELIM, 2011)...	36
FIGURA 11 Unidade de bancada para simulação do TTRM – esquema de diagrama em blocos simplificado (adaptado de PICKER, 2010).....	48
FIGURA 12 (a) Unidade piloto TELAB 100 do processo de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos – TTRM; (b) TELAB 100 – Vista lateral dos sistemas de condensação (PICKLER, 2010).....	49
FIGURA 13 Fluxograma esquemático da unidade TELAB 100 (Adaptado de PICKLER, 2010)	50
FIGURA 14 Desenho esquemático do processo de TTRM (adaptado de GALLO e PICKLER, 2012).....	52

FIGURA 15 Tarifa Média de Fornecimento por setor (fonte de dados: ANEEL, 2014)	59
.....	
FIGURA 16 Setor industrial – tarifa média de fornecimento de energia regional – média 2013.....	59
FIGURA 17 Destilados obtidos no teste de TTRM de bancada (ALBRECHT, 2011)	66
.....	
FIGURA 18 (a) Resíduo de Terra Diatomácea; (b) Sólido Residual; (c) Sólido Residual calcinado (ALBRECHT, 2011).....	68
FIGURA 19 Teste TELAB 100, da esquerda para a direita: Amostras de resíduos de terra diatomácea (RTD), óleo recuperado (OR), água de reação (AR) e sólido recuperado (SR) (ALBRECHT, 2012).....	69
FIGURA 20 Curvas de calcinação do SR (ALBRECHT, 2012).....	70
FIGURA 21 SR T103 calcinados a 440°C até 10 minutos (Obs: de cima para baixo: SR 1ª Passagem, SR 2ª Passagem e SR 3ª Passagem; da esquerda para a direita do primeiro ao décimo minuto) (ALBRECHT, 2012).....	71
FIGURA 22 Imagens por MEV: Diatomita bruta (1) x Diatomita calcinada (2): (a1) e (a2) ampliação de 400x; (b1) ampliação de 1500x e (b2) ampliação de 1000x.....	73
FIGURA 23 Imagens por MEV: Diatomita bruta (1) x Diatomita calcinada (2): (a1) e (a2) ampliação de 3000x; (b1) e (b2) ampliação de 4000x.....	74
FIGURA 24 Diatomita bruta - Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS).....	76
FIGURA 25 Diatomita bruta – resultados da Microanálise Química.....	76
FIGURA 26 Diatomita bruta - Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS).....	77
FIGURA 27 Diatomita bruta – resultados da Microanálise Química.....	77
FIGURA 28 Diatomita calcinada- Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS).....	78
FIGURA 29 Diatomita calcinada – resultados da Microanálise Química.....	78
FIGURA 30 Diatomita calcinada- Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS).....	79
FIGURA 31 Diatomita calcinada – resultados da Microanálise Química.....	79
FIGURA 32 Indicadores de Rentabilidade – Investimento x Receita Líquida – Variação de custos regionais de energia e geração própria	84

FIGURA 33	Análise de Sensibilidade: VPL x Fornecimento de Energia.....	85
FIGURA 34	Análise de Sensibilidade: VPL x Tecnologia competitiva.....	87
FIGURA 35	Análise de Sensibilidade: VPL x Capacidade do TTRM.....	89
FIGURA 36	Gráfico spider – Cenário SR 50 - Análise de Sensibilidade: VPL x Energia x Capacidade TTRM x Aterro custo x Depreciação x Valor Biodiesel B100 x Terra Diatomácea virgem x Tecnologia competitiva x Geração anual de resíduos...	91
FIGURA 37	Gráfico spider – Todos os cenários - Análise de Sensibilidade: VPL x Energia x Terra Diatomácea virgem x Tecnologia competitiva x Geração anual de resíduos.....	93
FIGURA 38	Análise de Sensibilidade: TIR x Capacidade.....	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	Principais impurezas do biodiesel e problemas causados nos motores ciclo diesel (FACCINI, 2008).....	33
TABELA 2	Especificações de diatomita calcinada para auxiliar de filtração – baixas vazões (FRANÇA 2005).....	39
TABELA 3	Especificações de diatomita calcinada para auxiliar de filtração – altas vazões (FRANÇA 2005).....	39
TABELA 4	Condições operacionais do TTRM em escala de bancada para o teste em resíduo de Terra Diatomácea.....	48
TABELA 5	Parâmetros operacionais dos testes TELAB100.....	52
TABELA 6	Cenários gerais adotados para o Estudo de Viabilidade Preliminar....	57
TABELA 7	Custo estimado do TELAB K500 (capacidade 500 kg/h) - atualização dos custos de equipamento e instalação.....	62
TABELA 8	Aspectos estabelecidos para definição de escolhas de formas de destinação de resíduos.....	65
TABELA 9	Balanco de massas do TTRM de bancada no teste com resíduo de terra diatomácea (ALBRECHT, 2011).....	66
TABELA 10	Perda ao rubro da amostra de SR obtido no TTRM da amostra de terra diatomácea contaminada (ALBRECHT, 2011).....	68
TABELA 11	Balanco de massas – teste de bancada de laboratório e teste TELAB-100.....	69
TABELA 12	Teor de óleos e graxas nas amostras de diatomitas (ALBRECHT, 2012).....	71
TABELA 13	Equipamento de 75kg/h - Indicadores de Rentabilidade: Cenários Otimista, Promissor e Mais provável.	80
TABELA 14	Equipamento de 75kg/h – Indicadores de Rentabilidade: cenários menos provável, pessimista 1 e pessimista 2.....	81
TABELA 15	Indicadores de Rentabilidade: Cenário mais provável SR50 – variação dos custos de fornecimento de energia por geração própria ou “interno”, e média para as regiões Centro-Oeste e Nordeste.....	83

TABELA 16	Indicadores de Rentabilidade: Cenário mais provável SR50 – variação dos custos de fornecimento de energia para as regiões Sul, norte e Sudeste.....	83
TABELA 17	Cenários x Valor de R\$/ton que torna VPL positivo.....	87
TABELA 18	Cenários x Valor capacidade que torna VPL positivo.....	90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ANP – Agência Nacional do Petróleo
- ASTM - *American Society for Testing and Materials*
- BP – *British Petroleum*
- CNORP - Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos
- CNPE – Conselho Nacional de Política Energética
- CTF-AIDA - Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental
- CTF-APP - Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética
- EVTEA – Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental
- FGV – Fundação Getúlio Vargas
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
- IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
- MMA – Ministério do Meio Ambiente.
- NBR – Norma Brasileira Regulamentadora
- PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A.
- PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010
- RTD – Resíduo de Terra Diatomácea Contaminada com Biodiesel.
- SR – Sólido Residual Recuperado pós processamento no TTRM
- TIR – Taxa Interna de Retorno
- USEPA - *Environmental Protection Agency – United States*
- VPL – Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	16
Objetivos.....	22
Objetivo Geral.....	22
Objetivos Específicos.....	22
Organização da dissertação.....	22
1. REFERENCIAL TEÓRICO.....	24
1.1. Resíduos industriais no Brasil.....	24
1.1.1. Classificação dos resíduos sólidos.....	28
1.1.2. Processos de fabricação de biodiesel em escala industrial.....	29
1.2. Produção brasileira de biodiesel.....	31
1.3. Formas de polimento final do biodiesel.....	32
1.4. Terra Diatomácea no processo de fabricação de Biodiesel.....	35
1.4.1. Terras Diatomáceas ou diatomitas.....	35
1.4.2. Produção das Terras diatomáceas.....	37
1.4.3. Terra Diatomácea como material de filtragem.....	38
1.4.4. Resíduo de Terra Diatomácea - Classificação segundo a periculosidade.....	40
1.5. Estudos de Viabilidade.....	41
1.5.1. Indicadores Econômicos	42
1.5.2. Análise de Sensibilidade.....	44
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
2.1. Dimensão técnica.....	46
2.1.1. Testes de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM no Resíduo de Terra Diatomácea - RTD.....	47
2.1.1.1. TTRM de bancada - escala de laboratório.....	47
2.1.1.2. Equipamento TELAB 100 – testes piloto para o TTRM.....	49
2.1.1.2.1. Calcinação dos sólidos recuperados.....	53
2.1.1.2.2. Balanço de massas e perfil térmico.....	53
2.1.1.2.3. Balanço energético.....	54
2.1.1.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	54
2.1.1.2.5. Microanálise Química por Microsonda Eletrônica EDS.....	54
2.1.1.2.6. Teor de Óleos e Graxas.....	55

2.2.Dimensão econômica.....	55
2.2.1.Premissas Técnicas.....	56
2.2.2.Premissas Operacionais.....	56
2.2.3.Cenários considerados.....	57
2.2.4.Dados Econômicos de Referência.....	58
2.2.4.1.Tarifa de Consumo Industrial de Energia Elétrica.....	58
2.2.4.2.Custo da Terra Diatomácea virgem.....	60
2.2.4.3.Custos para outras formas de destinação dos resíduos de Terra Diatomácea	60
2.2.4.4.Custos com mão de obra para operação.....	61
2.2.4.5.Investimento, custos de implantação de custos de manutenção.....	61
2.2.5.Análise de sensibilidade.....	63
2.3.Dimensão Ambiental.....	64
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	66
3.1.Dimensão técnica.....	66
3.1.1.Processo de TTRM de bancada de laboratório.....	66
3.1.2.Teste no Equipamento piloto TELAB-100.....	69
3.1.2.1.Calcinação dos sólidos residuais - SR - Teste no TELAB-100.....	70
3.1.2.2. Aspectos microscópicos – Teste no TELAB-100.....	72
3.1.2.3. Microanálise Química por Microsonda Eletrônica EDSs – Teste no TELAB- 100.....	75
3.2. Dimensão Econômica.....	80
3.2.1.Proposta de equipamento de TTRM de capacidade de 75kg/h.....	80
3.2.2.Análise de Sensibilidade.....	82
3.2.2.1.Análise de Sensibilidade: Valor do fornecimento de energia.....	82
3.2.2.1.1.Análise de Sensibilidade: Valor fornecimento de energia – Médias por região do país e geração própria.....	83
3.2.2.1.2.Análise de Sensibilidade da taxa de energia por cenários de referência....	85
3.2.2.2.Análise de Sensibilidade: VPL x Tecnologia de tratamento competitiva.....	86
3.2.2.3.Análise de Sensibilidade: VLP x Capacidade do TTRM.....	88
3.2.2.4.Análise de Sensibilidade: VPL x Energia x Eficiência Energética x Capacidade x Destinação Rejeito x Depreciação x Valor Biodiesel x Terra Diatomácea Virgem x Tecnologia Competitiva x Geração de Resíduos.....	91
3.2.2.5.Análise de sensibilidade: Cenários x Taxa interna de Retorno.....	94

3.3.Dimensão ambiental.....	95
4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	96
REFERÊNCIAS.....	98

INTRODUÇÃO

O cenário mundial da matriz energética apresenta dados crescentes de consumo de combustíveis fósseis.

A exemplo, conforme FIGURA 1, comparando-se somente os anos de 1965 e 2012, observa-se aumento do consumo de petróleo para todos os continentes, com o total mundial representando aumento de 232%. Porém, a variação do comportamento ao longo do período, se observado a partir do final da década de 1970, apresenta declínio para a Europa e Eurásia com relativo aumento para os demais continentes.

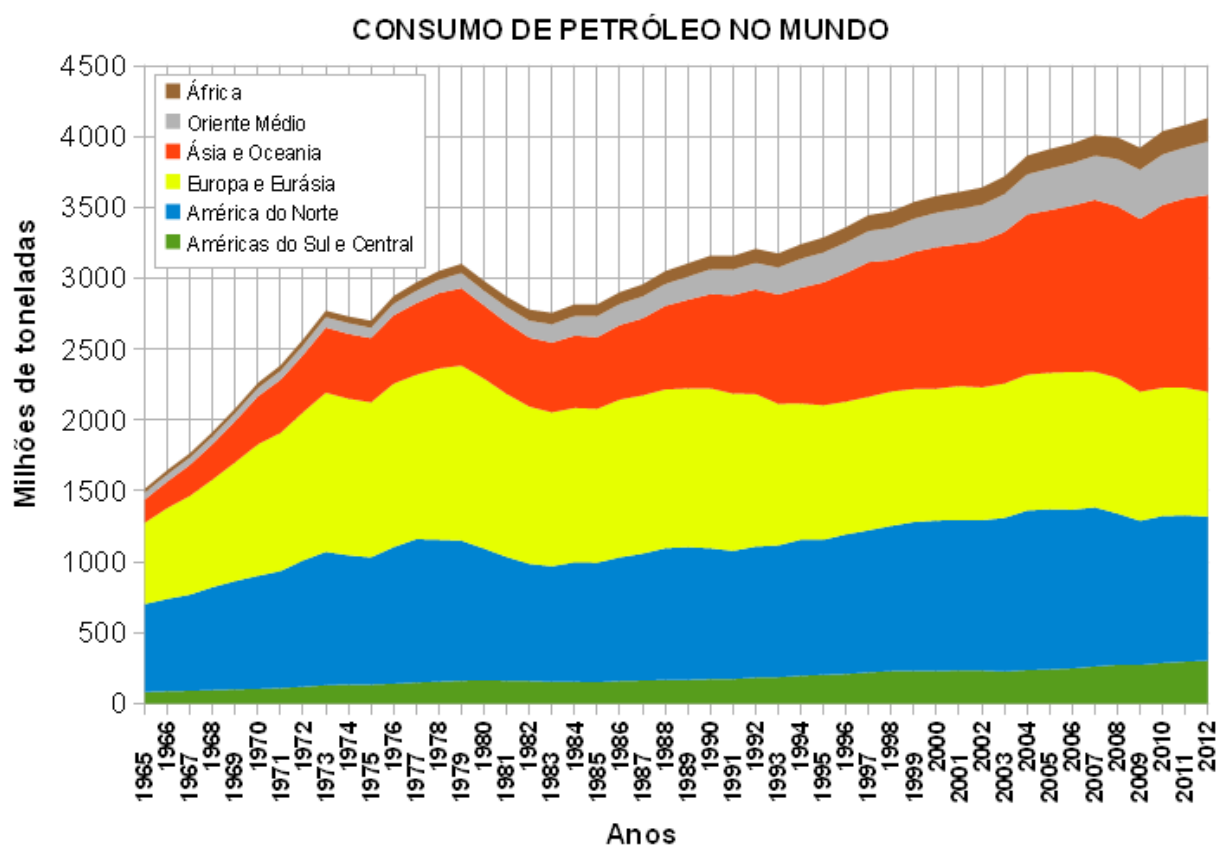


FIGURA 1 Consumo de Petróleo no mundo (Fonte de dados: BP, 2013).

Em relação ao Brasil, de acordo com o Balanço Energético Nacional, o consumo de petróleo também é crescente, principalmente no setor de transportes, conforme FIGURA 2.

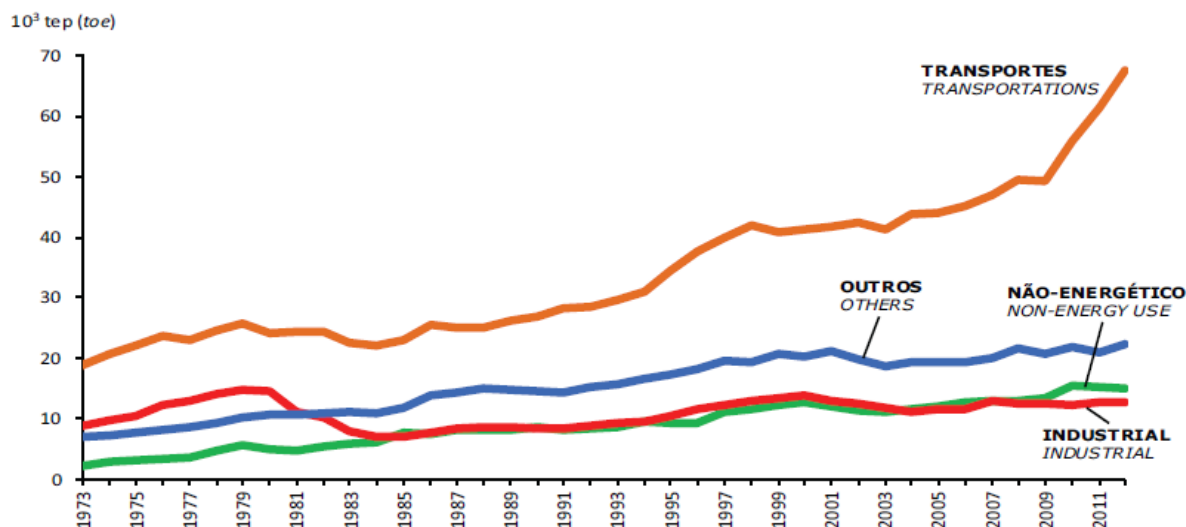


FIGURA 2 Brasil - Consumo Total de Derivados de Petróleo e de Gás Natural em tonelada equivalente de petróleo - tep (EPE, 2013)

LORA e VENTURINI, 2012, citam que as reservas de petróleo estão distribuídas de maneira extremamente irregular, pois apenas algumas áreas reúnem características geológicas excepcionais que permitiram a formação e o acúmulo de quantidades significativas de petróleo. Isso faz com que se busque outras fontes energéticas alternativas, constituindo uma constante preocupação dos governos para garantia da segurança energética dos países consumidores.

Os autores acrescentam que a utilização dos biocombustíveis torna-se atrativa, uma vez que constituem substitutos diretos e imediatos dos combustíveis líquidos empregados no transporte, sendo facilmente integrados aos sistemas logísticos atualmente em operação.

Aliado a isso, também existe pressão pela substituição de combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, com a finalidade de redução dos Gases do Efeito Estufa – GEE, problemática acompanhada pelo Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas – IPCC.

Assim, a contribuição de biocombustíveis se apresenta de forma crescente. Na FIGURA 3 é demonstrada a evolução da produção de biocombustíveis no mundo, observando-se a produção nos continentes em aumento. A capacidade mundial nesse período de duas décadas cresceu cerca de 749%. Existe significativa contribuição da parcela da América do Sul e Central, sendo que o Brasil representava cerca de 98,9% no ano de 1990 e 81,2% em 2012. A redução do percentual de contribuição citada se deve ao início da produção de países como Argentina, que em 2012 representou 13,6% e em 1990 era insignificante.

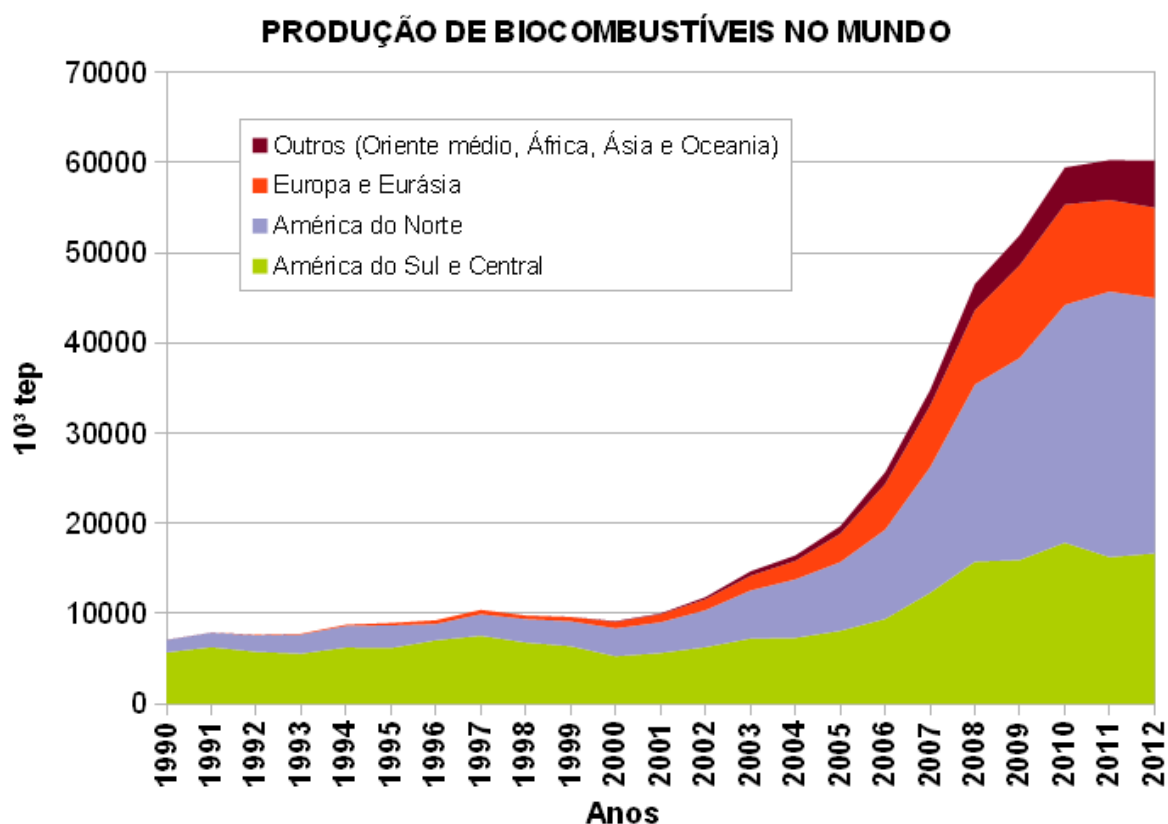


FIGURA 3 Evolução da produção de biocombustíveis no mundo (Fonte de dados: BP, 2013)

A parcela brasileira se deve à significativa produção de álcool. LOPES e MASIERO, 2008, comentam que o governo brasileiro deu início ao Programa Brasileiro de Etanol, o Pró-álcool, em 1975, para desenvolvimento do uso do etanol ou do etil álcool como combustível, podendo ser utilizado para substituir o *methyl tert-butyl ether* (MTBE) da gasolina ou utilizado na forma pura como combustível de veículos automotores.

LOPES e MASIERO, 2008 acrescentam que foram produzidos aproximadamente 5,6 milhões de automóveis com motores a álcool de 1975 a 2000 e que, além disso, em menos de um quarto de século, o governo aprovou a mistura de etanol na gasolina de 1,1% a 25% em cada litro de combustível, evitando a emissão de 110 milhões de toneladas de gás carbônico na atmosfera e a importação de 550 milhões de barris de petróleo, equivalentes a US\$ 11,5 bilhões.

Em relação ao Biodiesel, os autores comentam que em 1975 o governo criou, mas não implementou o Pró-óleo – Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos, transformando-o em programa em 1983, quando dá início ao Programa Nacional de Óleos Vegetais para Produção de Energia, também chamado de Pró-óleo. O foco desse programa foi o desenvolvimento e a produção de biodiesel a partir de algodão, babaçu, resíduos, palma, algodão, canola, girassol, nabo forrageiro, mamona, soja e gordura animal para misturá-lo ao diesel, mas os esforços foram descontinuados em 1985, devido à redução dos preços do petróleo, e retomados em 2003, com Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel.

A partir de 2008 a mistura de biodiesel puro (B100) ao óleo diesel passou a ser obrigatória no Brasil. Entre janeiro e junho de 2008 a mistura foi de 2%, entre julho de 2008 e junho de 2009 foi de 3% e entre julho e dezembro de 2009 foi de 4%. Em 2012 o percentual de B100 adicionado compulsoriamente ao diesel mineral ficou constante em 5%.

A FIGURA 4 apresenta a evolução do consumo de biodiesel no Brasil. Em 2005 praticamente não havia consumo, em 2012 são consumidos 2,7 milhões de metros cúbicos, principalmente para atendimento a esse percentual obrigatório de 5% na mistura com o diesel de transporte.

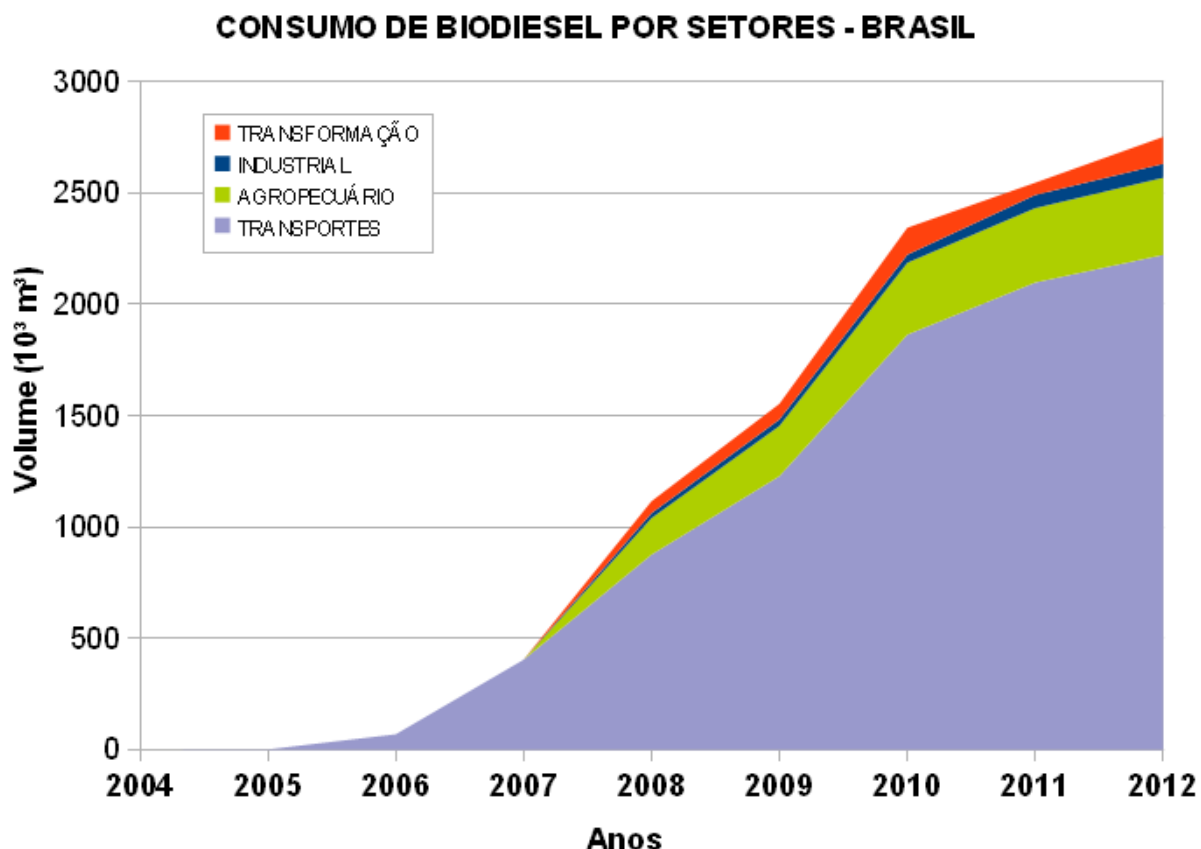


FIGURA 4 Consumo de Biodiesel por setores (Fonte de dados: EPE, 2013)

Ocorre que da produção de bens e produtos resultam impactos ao meio ambiente. Para a produção de biodiesel, apesar de constituir um combustível renovável, sua produção gera emissões, efluentes e resíduos.

Nas usinas de biodiesel, na etapa específica de polimento do biodiesel em escala industrial, pode haver alto consumo de água e geração de efluentes (no polimento feito na via úmida) e produção de resíduos (no polimento via seca) dos materiais filtrantes gastos, dentre eles os resíduos das terras diatomáceas.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, promulgada em 2010 pela Lei 12.305, possui como alguns de seus diversos princípios e objetivos: a ecoeficiência; a adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais.

Em essência, uma lei ou política reflete os anseios de toda a sociedade, o que demonstra a evolução da conjuntura atual na busca pelo desenvolvimento sustentável. Por outro lado, existe a necessidade de atendimento ao crescente consumo dessa mesma sociedade, que demanda mais recursos naturais, com potencial aumento de impacto.

Nesse sentido, o Tratamento Térmico de Resíduos Multifásicos – TTRM vem a constituir uma nova proposta de tecnologia para redução e beneficiamento de diversos tipos de resíduos. Trata-se de tecnologia desenvolvida pelas empresas PETROBRAS e ALBRECHT que detém patente conjunta do processo que possibilita a separação de fases de resíduos com vistas ao seu beneficiamento.

Este trabalho apresenta a avaliação dessa tecnologia aplicada a resíduos de terra diatomácea contaminadas com biodiesel gerados em usina genérica, que pode corroborar para a minimização dos impactos ambientais das usinas de biodiesel com polimento final via seca, seja contribuindo para a redução do volume e da periculosidade dos resíduos gerados, seja promovendo a reutilização, reciclagem e envio para aterros somente de rejeitos, visando esgotar todas as possibilidades de recuperação e tratamento por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, mandamentos da PNRS.

Objetivos

Objetivo Geral

Efetuar o Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental – EVTEA Preliminar da aplicação da tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM a resíduo de terra diatomácea contaminada com biodiesel - RTD de usina genérica de produção de Biodiesel.

Objetivos Específicos

- Verificar os aspectos físico-químicos do RTD antes e pós processamento no TTRM, além de comparação com a terra diatomácea virgem;
- Propor dimensionamento de capacidade de carga a ser tratada pelo equipamento de TTRM a ser fabricado para usina genérica de biodiesel adotada;
- Verificar o comportamento dos indicadores econômicos com a variação dos principais componentes de custo para os cenários estabelecidos;
- Comparar o TTRM com demais rotas de destinação e tratamento no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos.

Organização da dissertação

No capítulo 1 REFERENCIAL TEÓRICO são apresentados os principais conceitos para a temática da dissertação.

No capítulo 2 MATERIAIS E MÉTODOS são apresentados os aspectos gerais do experimento realizado de TTRM com o RTD, as metodologias de análises, as premissas operacionais e técnicas, os dados econômicos de referência e os cenários considerados.

No capítulo 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO são apresentados e discutidos os resultados do experimento do TTRM ao RTD, os resultados da análise econômica para cada cenário estabelecido e as considerações sobre os aspectos ambientais da aplicação do TTRM na ótica da PNRS.

No capítulo 4 seguem as conclusões e recomendações do trabalho.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados: a questão dos resíduos industriais no Brasil; os processos de fabricação de biodiesel em escala industrial; a produção brasileira de biodiesel; suas principais formas de polimento final, com destaque para as terras diatomáceas; e os estudos de viabilidade de projetos.

1.1. Resíduos industriais no Brasil

Há duas significativas definições no âmbito da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, que são as de “resíduos” e “rejeitos”, conforme segue:

“Art. 3º Para os efeitos desta Lei, entende-se por:

[..]

XV - rejeitos: resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada;

XVI - resíduos sólidos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível;”

Em essência, a categorização do termo “rejeitos” exprime a vontade do legislador de estabelecer mecanismos distintos para gestão. Ou seja, determina-se legalmente que, dentro da possibilidade técnica e a viabilidade econômica, se execute toda possibilidade de tratamento e recuperação do resíduo para somente após a realização da disposição final ambientalmente adequada em aterros dos rejeitos.

Incorporado a esses conceitos, existem os objetivos⁽¹⁾ da PNRS, dos quais destacam-se para efeito prático sobre o gerenciamento de resíduos a minimização da geração de resíduos, a adoção de tecnologias limpas, a redução de volume e da periculosidade dos resíduos e o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados.

A PNRS estabelece em seu artigo 13 que resíduos industriais são os gerados nos processos produtivos e instalações industriais.

MMA, 2011, evidencia uma série de dificuldades na consolidação de diagnóstico preciso para a situação dos resíduos no país. Geralmente isso é parte normal de qualquer processo em seu estado inicial, já que se trata de uma nova política e elaboração de um Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

Aliada às dimensões continentais do Brasil, existe a dispersão da gestão ambiental governamental, que se dá em nível federal, estadual e municipal, espalhada em diversos órgãos e entidades da administração pública, conforme se vê estabelecido na Política Nacional do Meio Ambiente, instituída pela Lei 6.938 de

⁽¹⁾Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

- I - proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
- II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
- III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
- IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
- V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
- VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
- VII - gestão integrada de resíduos sólidos;
- VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
- IX - capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
- X - regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007;
- XI - prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
 - a) produtos reciclados e recicláveis;
 - b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
- XII - integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
- XIII - estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
- XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
- XV - estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável.

31 de agosto de 1981, refletindo-se também no gerenciamento diferenciado de informações.

A FIGURA 5 apresenta a geração de resíduos sólidos industriais no Brasil, ressaltando-se que MMA, 2011 afirma que não foi possível a realização de um diagnóstico completo e atualizado dos resíduos industriais, uma vez que a principal fonte de dados para essa análise foram inventários estaduais que apresentaram alguns problemas: alguns estados da Federação não elaboraram seus inventários de resíduos industriais; os inventários estaduais produzidos, em geral, não apresentam uma padronização; e os inventários estaduais de resíduos industriais elaborados não foram atualizados recentemente em sua maioria.

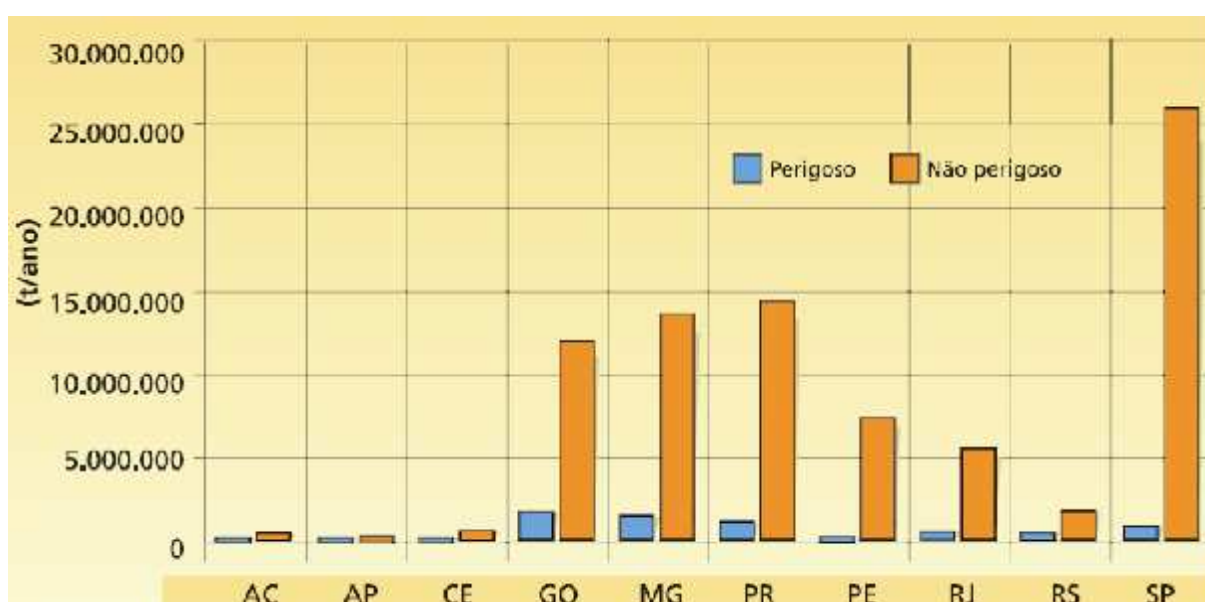


FIGURA 5 Geração de resíduos sólidos industriais no Brasil (Parcial) (MMA, 2011)

Dentre os estados inventariados, o Paraná (PR) foi o grande gerador de resíduo não perigoso, sendo que destes, “bagaço de cana”, corresponde ao maior percentual, 17,58% do total. A geração desse resíduo é significativa também nos estados do Ceará (CE), Paraíba (PB), Mato Grosso (MT), Pernambuco (PE) e Rio Grande do Norte (RN). Minas Gerais (MG) é o segundo maior produtor de resíduos, com destaque para a produção de escória de ferro e aço (30,19%). A geração de

resíduos industriais do Rio Grande do Sul (RS) foi significativamente inferior à dos estados equivalentes, Minas Gerais e Paraná (MMA, 2011).

Observam-se iniciativas para uniformizar as informações de resíduos no Brasil, entre elas o estabelecimento da “Lista Brasileira de Resíduos Sólidos” ⁽²⁾ e da regulamentação do Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Industriais – CNORP⁽³⁾. A lista brasileira é baseada na nomenclatura europeia que também estabelece estrutura de números que identifica a origem e o processo gerador do resíduo.

BARROS, 2012 comenta que no contexto industrial existe grande diversidade de geração de resíduos sólidos, cuja diversidade e periculosidade se dão em função do processo produtivo empregado, das matérias-primas, da pureza das matérias-primas, da eficiência dos processos e/ou reações, do produto final, entre muitas outras variáveis.

⁽²⁾Instrução Normativas Nº 13, de 18 de dezembro de 2012, que estabelece a “Lista Brasileira de Resíduos Sólidos” será utilizada pelo Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais, pelo Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental e pelo Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos, bem como por futuros sistemas informatizados do Ibama que possam vir a tratar de resíduos sólidos.

⁽³⁾Instrução Normativa Nº 1 de 25 de janeiro de 2013 que visa regulamentar o Cadastro Nacional de Operadores de Resíduos Perigosos (CNORP), estabelecer sua integração com o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF-APP) e com o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos de Defesa Ambiental (CTF-AIDA), e definir os procedimentos administrativos relacionados ao cadastramento e prestação de informações sobre resíduos sólidos, inclusive os rejeitos e os considerados perigosos.

1.1.1. Classificação dos resíduos sólidos

Segundo a PNRS, os resíduos sólidos são classificados quanto a sua origem e a sua periculosidade⁽⁴⁾.

As características que conferem periculosidade ao resíduo são a inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, conforme é estabelecido pela Norma ABNT 10.004⁽⁵⁾. Trata-se de uma norma de classificação de resíduos que leva em conta os riscos à saúde pública e ao meio ambiente.

⁽⁴⁾ Art. 13. Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação:

I - quanto à origem:

- a) resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas “a” e “b”;
- d) resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas “b”, “e”, “g”, “h” e “j”;
- e) resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea “c”;
- f) resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - quanto à periculosidade:

- a) resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea “a”.

Parágrafo único. Respeitado o disposto no art. 20, os resíduos referidos na alínea “d” do inciso I do caput, se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

⁽⁵⁾ ABNT NBR 10.004 Resíduos sólidos – Classificação

1.1.2. Processos de fabricação de biodiesel em escala industrial

Segundo LORA e VENTURI, 2012, nos últimos anos, diversas tecnologias para produção de biodiesel a partir de diferentes matérias-primas têm sido implementadas em usinas de grande capacidade. De acordo com estudos recentes é possível identificar mais de 21 países no mundo onde os projetos de biodiesel, com objetivos comerciais, foram implementados. A Europa iniciou a produção de biodiesel desde o início dos anos 1990. Hoje países como Alemanha, Áustria, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Malásia, e Suécia são pioneiros na produção, testes e uso de biodiesel nos automóveis. Existem mais de 250 usinas de biodiesel no mundo, sendo que a maioria das instalações comerciais que produzem biodiesel utiliza a transesterificação alcalina com metanol, uma vez que é o processo mais simples e econômico para a sua produção.

É preciso durante a análise das tecnologias de processamento de óleos vegetais e gorduras animais diferenciar as reações de esterificação e transesterificação. A primeira se refere à conversão de ácidos graxos livres em ésteres, enquanto a segunda se refere à conversão dos triglicerídeos em ésteres e glicerol. Os ésteres são finalmente conhecidos como biodiesel. A esterificação é uma reação pré-tratamento dos óleos e gorduras para produzir a saponificação. Nem sempre é necessário que ocorram as duas reações, depende da qualidade da matéria-prima. O processo utilizado para produzir biodiesel é a transesterificação, porém a esterificação tem sido aplicada em combinação com a transesterificação para aproveitar os subprodutos, ácidos graxos ou matérias-primas de baixa qualidade para potencializar a produção de biodiesel. A reação de esterificação envolve a reação de um ácido graxo livre com um álcool (geralmente de baixo peso molecular) para produzir um alquil-éster (biodiesel) e água, esta reação é conhecida como esterificação de Fischer (LORA e VENTURI, 2012).

A FIGURA 6 apresenta os esquemas das reações de transesterificação para produção de biodiesel.

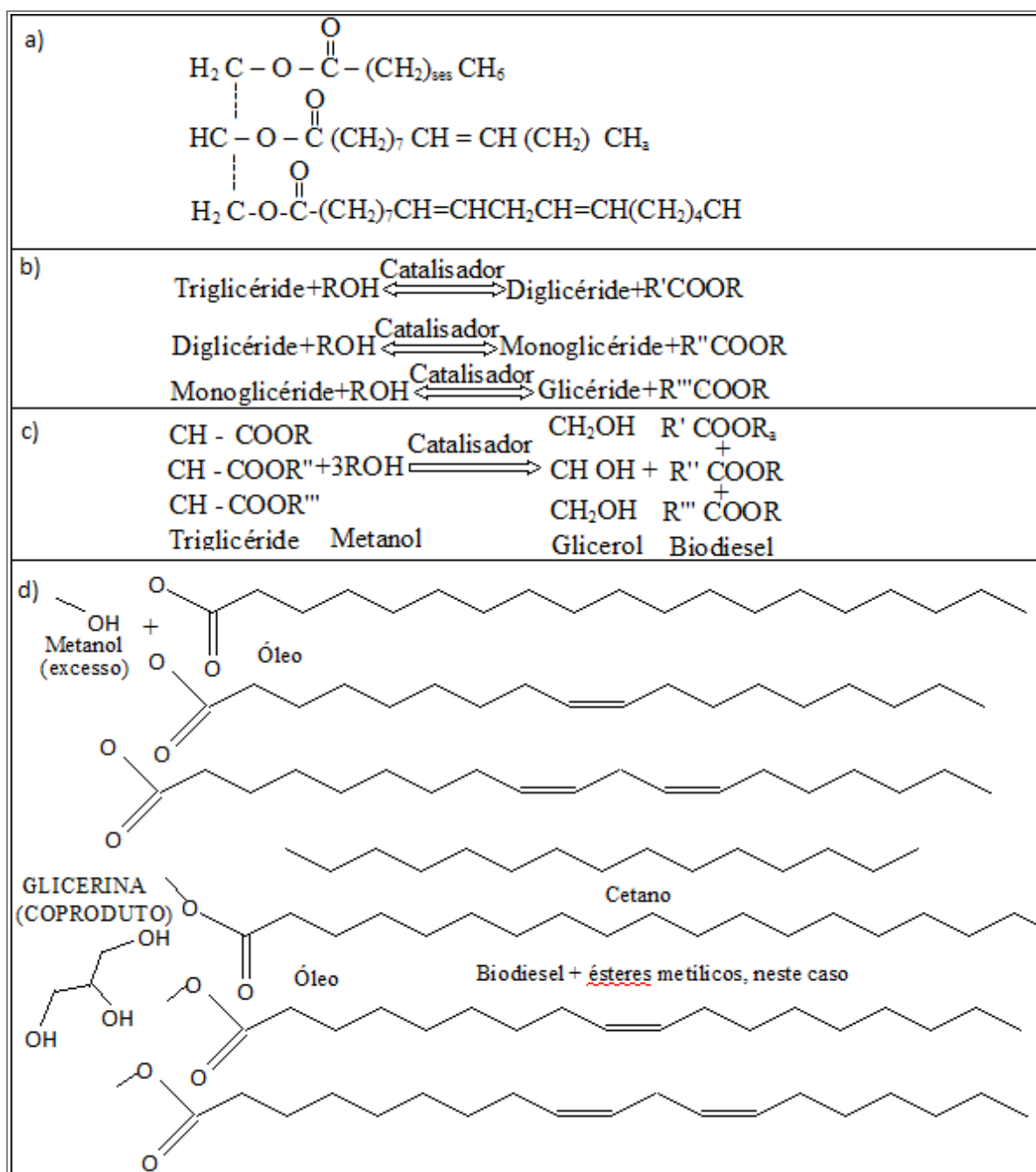


FIGURA 6 Esquemas das reações de transesterificação. (a) Fórmula estrutural de uma molécula de triglicéride. (b) Reação de transesterificação simplificada em três etapas. (c) Reação geral de transesterificação. (d) Representação gráfica da transesterificação. (adaptado de LORA e VENTURI, 2012)

1.2. Produção brasileira de biodiesel

A FIGURA 7 apresenta a capacidade instalada autorizada pela ANP de produção em plantas de biodiesel em mapa consolidado por localidade.

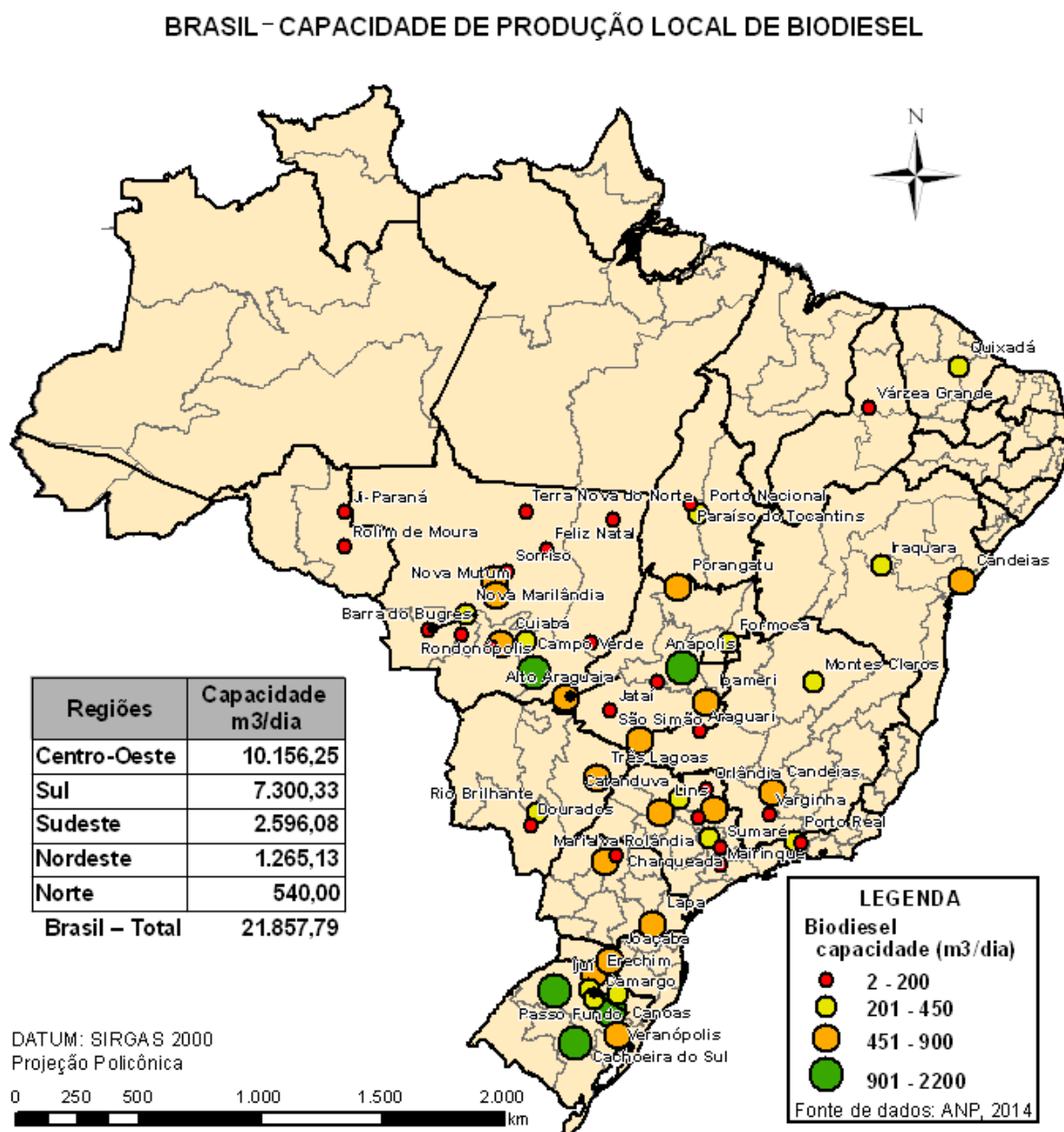


FIGURA 7 Brasil – Capacidade instalada autorizada de produção local de biodiesel

As regiões Centro-Oeste e Sul são as que possuem maiores capacidades produtivas, instaladas em localidades grandes produtoras de soja e de gado bovino. O Balanço Energético Nacional destaca que a principal matéria-prima em 2012 para produção de biodiesel foi o óleo de soja, com 69,6%, seguido do sebo bovino, com 14,7%.

Na FIGURA 8 observa-se que a produção de biodiesel está sendo utilizada para atender minimamente a demanda compulsória (5% de mistura no diesel⁽⁵⁾), e que a demanda poderia ainda quase que triplicar até atingir a capacidade nominal autorizada pela Agência Nacional do Petróleo, Gás e Biocombustíveis - ANP.

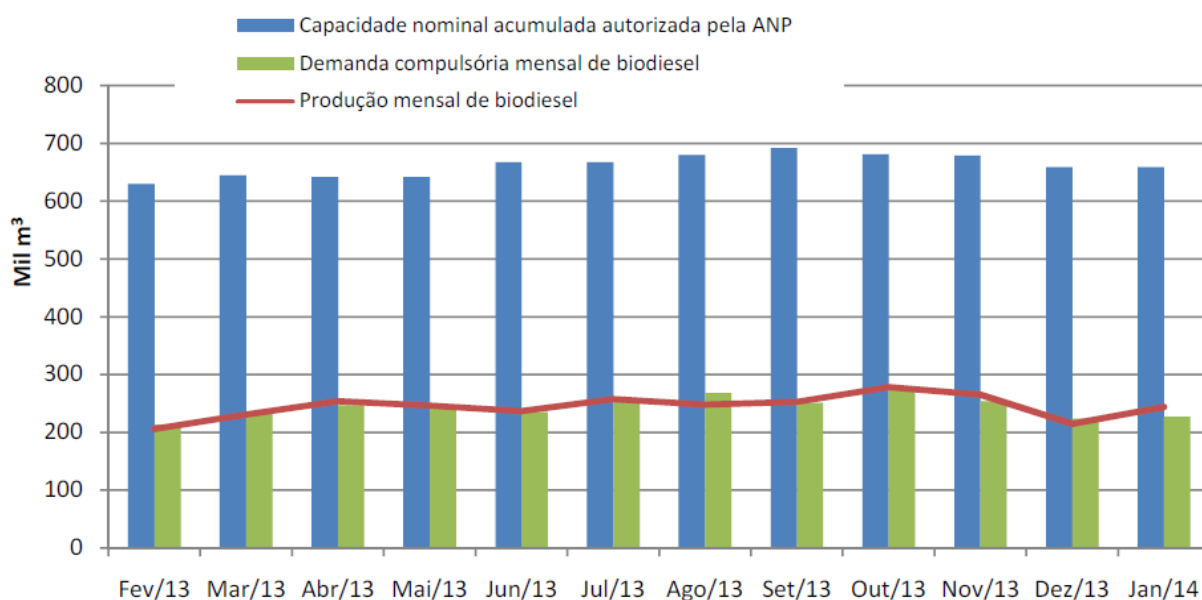


FIGURA 8 Evolução mensal da produção, da demanda compulsória e da capacidade nominal autorizada pela ANP no país (ANP, 2014)

1.3. Formas de polimento final do biodiesel

Segundo FACCINI, 2008, após a reação de transesterificação, na etapa de decantação, teoricamente a glicerina arrasta consigo a maior parte do sabão, do catalisador e do metanol. Porém os produtos da reação encontram-se contaminados com subprodutos desta reação. Esses compostos podem ser os tricilglicerídeos que não reagiram, metanol, catalisador, mono e diacilgliceróis, sabão, glicerina e água.

⁽⁵⁾ Demanda estabelecida pela Resolução nº 6, de 16/9/2009 do Conselho Nacional de Política Energética.

O limite máximo de concentração permitido desses compostos é especificado nos padrões nacionais pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP, e a não concordância com esses limites pode resultar em uma série de problemas operacionais como depósitos no motor, entupimento de filtro, deterioração do tanque combustível e aumento de emissões perigosas. Desta forma, a subtração dessas substâncias indesejáveis faz com que seja fundamental a etapa de filtração e polimento (purificação) do biodiesel (FACCINI, 2008).

Os efeitos dos contaminantes sobre o motor são apresentados na TABELA 1.

TABELA 1 Principais impurezas do biodiesel e problemas causados nos motores ciclo diesel (FACCINI, 2008)

Contaminação	Efeito	Falha
Metanol livre	Corrosão do alumínio e do zinco Diminuição do ponto de fulgor	Corrosão
Catalisador (Na ⁺ , K ⁺)	Produção de partículas sólidas	Entupimento dos injetores
Água dissolvida no biodiesel	Formação de ácidos graxos	Entupimento dos filtros
Água livre em misturas	Corrosão de todas as partes metálicas Proliferação de bactérias Aumento da condutividade elétrica	Corrosão e formação de depósitos
Glicerina livre, mono e diacilgliceróis	Corrosão de metais não ferrosos Entupimento dos filtros de celulose Sedimentação em partes móveis	Entupimento dos filtros e coqueificação nos injetores
Ácidos graxos livres	Geração de calor excessivo nas bombas Maior tensão entre componentes	Falhas nas bombas e baixa atomização do combustível
Impurezas sólidas	Problemas de lubrificidade	Reduzido tempo de serviço
Ácidos corrosivos (fórmico e acético)	Corrosão de todas as partes metálicas	Corrosão
Produtos de polimerização	Formação de depósitos	Entupimento dos filtros Formação de depósitos

Como forma de remover os compostos indesejáveis, ocorrem processos de polimento em escala industrial sob duas formas básicas: via úmida e via seca.

FACCINI, 2008, comenta que o processo de purificação do biodiesel teve início com a utilização de água, devido ao seu poder de solubilizar a glicerina, formada como subproduto e indesejada no biodiesel após separação de fases. O

metanol residual pode permanecer no biodiesel devido ao seu uso em excesso durante a reação de transesterificação. A facilidade de manuseio e de acesso fez da água um reagente de grande potencial, porém, por motivos ambientais, devido ao grande volume necessário, e também por exigência de tratamento e disposição adequada de efluente gerado, o que era solução passou a ser um problema para as usinas de biodiesel.

Segundo DE PAULA *et al.*, 2011, a purificação do biodiesel empregando-se a lavagem com água apresenta muitas desvantagens, entretanto, é o método mais utilizado pelas indústrias, devido à carência de alternativas viáveis. No processo são utilizadas grandes quantidades de água, havendo a possibilidade de emulsões estáveis. A geração de efluentes e seu tratamento oneram o produto final e comprometem a viabilidade econômica, pois, apesar da baixa toxicidade, o efluente não pode ser descartado sem tratamento. A água também está associada à proliferação de micro-organismos e corrosão em tanques de estocagem.

FACCINI, 2008, comenta que a purificação de biodiesel por via seca vem sendo bastante aceita pelo fato de não utilizar água no processo, gerando menor quantidade de efluentes. Esse processo de purificação pode tornar mais rápido o processamento e não há geração de resíduos aquosos. Vários absorventes podem ser utilizados neste processo: silicato de magnésio, silicato de alumínio, silicato de cálcio, silicato de sódio, carvão ativado, sílica gel, fosfato de magnésio, hidróxidos metálicos, óxidos metálicos, carbonatos, bicarbonatos, terras diatomáceas, dentre outros. Também vem sendo testada nos últimos anos a utilização de absorventes orgânicos, como por exemplo, a casca de arroz, por apresentar cerca de 60% de sílica e pelo fato de ser facilmente obtida como resíduo da indústria do arroz.

1.4. Terra Diatomácea no processo de fabricação de Biodiesel

Estão apresentadas neste item as Terras diatomáceas quanto: a sua origem, características e usos; às etapas produtivas das terras diatomáceas; às características como material filtrantes; e suas características de periculosidade como resíduos após processo de polimento final de biodiesel.

1.4.1. Terras Diatomáceas ou diatomitas

Segundo SOUZA, 2003, a terra diatomácea (FIGURA 9) é um sedimento amorfo, originado a partir de frústulas ou carapaças de organismos unicelulares vegetais tais como algas microscópicas aquáticas, marinhas e lacustres (FIGURA 10), normalmente denominada diatomita. Por apresentarem natureza silicosa, as frústulas desenvolvem-se indefinidamente nas camadas geológicas da crosta terrestre.

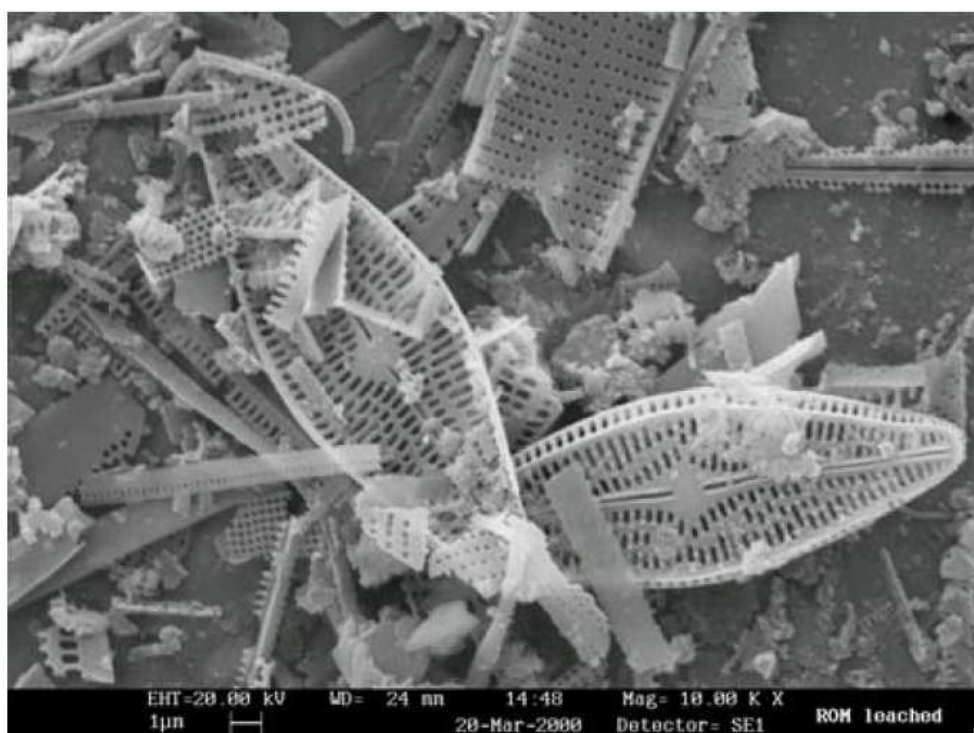


FIGURA 9 Carapaças de diatomita in natura da Mina Ponte - formato navicular (FRANÇA *et al.*, 2005)

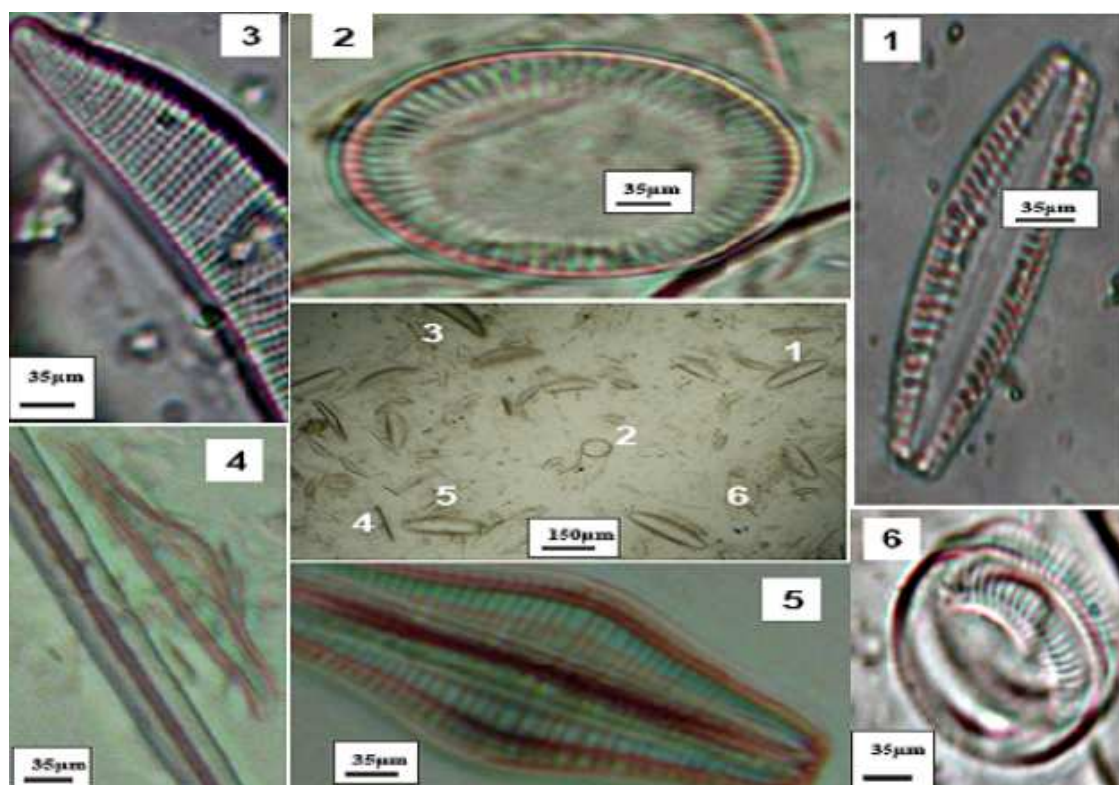


FIGURA 10 Diferentes formas de algas diatomáceas (IBRAHIM e SELIM, 2011)

IBRAHIM e SELIM, 2011, comentam que as diatomitas são compostas na faixa de 87% a 91% de óxidos de silício (SiO_2), com quantidades de alumina (Al_2O_3) e óxidos de ferro (Fe_2O_3).

Segundo BREESE, 1994, citado por FRANÇA, 2005 *et al.*, a diatomita é uma matéria-prima mineral de origem sedimentar e biogênica, constituída a partir do acúmulo de carapaças de algas diatomáceas que foram se fossilizando, desde o período pré-cambriano, pelo depósito de sílica sobre a sua estrutura. A fixação dessa sílica pelas algas diatomáceas está relacionada com o ciclo geoquímico de decomposição das argilas, servindo como parte do material de estrutura para essas algas. Existem propriedades físicas da diatomita que agregam valor comercial ao produto, tais como baixa densidade aparente, alta porosidade e área superficial, especiais para o mercado de filtração.

FRANÇA *et al.*, 2005 citam outras propriedades não menos importantes, como a alta abrasividade, alta capacidade de absorção, inércia química, propriedade isolante e alvura, que também são requeridas em diversas aplicações industriais.

Essas características permitem a utilização da diatomita em diferentes segmentos industriais.

No mundo, o uso industrial da diatomita aproxima-se do seguinte perfil: 60% como auxiliar de filtração, 30% como carga funcional e o restante como absorvente, abrasivo e isolante. Como auxiliar de filtração, os principais usos são na purificação de água, clarificação de cerveja, vinho, licor, suco de frutas, refino de açúcar, filtração de produtos farmacêuticos, óleos, ceras, verniz, laquê e diferentes óleos e produtos químicos. Os principais usos da diatomita são: indústrias de tinta, papel, borracha, pasta de dente, fármacos, polimento etc. A diatomita crua, *in natura*, tem uma umidade que varia de 30 a 60%. Onde o clima é favorável para secagem ao sol, isto pode ser feito antes de submetê-la ao processamento, de forma a reduzir os custos de produção. Como as diatomitas no Brasil normalmente ocorrem associadas a argilas, areia de quartzo e óxidos de ferro, vários pesquisados estudaram o seu beneficiamento visando a remoção dessas impurezas para obtenção de produtos, que, após calcinados, possam ser usados como agente de filtração (FRANÇA *et al*, 2005).

1.4.2. Produção das Terras diatomáceas

A produção de diatomita consiste em três etapas distintas: a lavra, o beneficiamento e a calcinação. Os depósitos diatomíticos são formados por terraços secos e submersos (em lagoas, estuários, baías fechadas), existindo lavras a céu aberto, dragagens e túneis. A lavra é feita com a remoção de matéria orgânica e vegetação, presente na superfície da mina. A diatomita é lavrada e depositada em tanque com água para a que ocorra a formação de uma polpa e em seguida ser levada para tanques de decantação onde ocorrerá a separação da argila (SILVA *et al*, 2009).

Após o beneficiamento para remoção de argilas, a fase seguinte é a calcinação. A diatomita, com umidade entre 10 e 20%, é misturada com a barrilha (Na_2CO_3) a uma concentração de 2% em peso. Esse é um fundente e tem a função de auxiliar na aglomeração das partículas de diatomita, bem como na escorificação das impurezas. A seguir, a mistura é alimentada ao forno de calcinação, onde a

temperatura varia de acordo com o teor de material orgânico na diatomita. No caso de diatomitas com teores elevados de material orgânico, tem-se uma maior quantidade de gases de combustão, fazendo com que a temperatura no interior do forno aumente, prejudicando o processo de calcinação. Por isto, tem-se uma temperatura de calcinação que varia entre 800°C e 1.000°C, promovendo a redução da área superficial, através da destruição da estrutura fina, formando aglomerados de partículas, principalmente se há o uso do fluxante carbonato de sódio (Na_2CO_3), que tem a função de diminuir o ponto de fusão da sílica, ajudando a fundir as impurezas e a aglomerar as partículas de diatomita. A densidade aparente da diatomita aumenta de 2,0 para 2,3, porém a área superficial é reduzida de valores na faixa de 10 a 30 m^2/g para 0,5 a 5,0 m^2/g , devido à aglomeração das partículas durante o processo de calcinação. Quando há a utilização de fluxante no processo de calcinação, essa aglomeração ocorre de maneira mais efetiva. O processo de calcinação também influencia na dureza da diatomita, que passa de valores entre 4,5 e 5,0 para 5,5 a 6, na escala Mohs. A diatomita calcinada, proveniente do forno, passa por um resfriador cilíndrico, cai em um ventilador para ser desagregada e segue para a etapa de classificação pneumática. Os produtos obtidos são submetidos a ensaios específicos, dependendo do tipo de utilização a que se destinam. A diatomita é mais utilizada em sua forma calcinada, abrangendo as indústrias alimentícia, de bebida, farmacêutica, têxtil e cosmética, mais fortemente. Dessa forma, as propriedades físicas da diatomita comercial são definidas durante o processo de calcinação (FRANÇA *et al.*, 2005).

1.4.3. Terra Diatomácea como material de filtragem

A diatomita calcinada é utilizada como auxiliar filtrante poroso, para filtrações de alta ou baixa vazões, onde é necessário um bom rendimento e polimento do produto filtrado. Nos casos de filtrações a baixas vazões, a diatomita é mais utilizada na indústria alimentícia, nos processos de filtração de xaropes, glicose, vinhos, cervejas, refrigerantes, uísques, sucos, enzimas e proteínas, dentre outros. Para as filtrações a altas vazões, faz-se necessária a formação de pré-capas, além do bom rendimento de filtração. Nesse caso, a diatomita calcinada é mais utilizada nos processos de filtração de aditivos de óleos, óleos de corte e lubrificantes, colas,

adesivos, resinas, ceras, soluções de galvanoplastia, soluções de sulfato de titânio e óleos vegetais (FRANÇA 2005).

A diferença básica entre o meio filtrante de alta ou baixa vazão reside na granulometria e empacotamento do material. Algumas especificações de produto para essas vazões são mostradas na TABELA 2 e na TABELA 3 (FRANÇA *et al.* 2005).

TABELA 2 Especificações de diatomita calcinada para auxiliar de filtração – baixas vazões (FRANÇA 2005)

Propriedade	Análise típica	Variação
Coloração	bege	Rosa
Alvura ISO (%)	69,0	-
Umidade (%)	1,0	máximo
SiO ₂ (%)	90,0	± 3,0
Al ₂ O ₃ (%)	6,0	± 3,0
Fe ₂ O ₃ (%)	1,5	máximo
CaO (%)	0,5	máximo
MgO (%)	0,2	± 0,1
Na ₂ O (%)	0,5	± 0,2
K ₂ O (%)	0,3	± 0,2
Perda ao fogo (%)	1,0	máximo
Densidade aparente livre (g/cm ³)	0,170	± 0,030
Wasserwert (L/h)	15	10 a 25
Granulometria - retido em 200 # (%)	8	± 3,0

TABELA 3 Especificações de diatomita calcinada para auxiliar de filtração – altas vazões (FRANÇA 2005)

Propriedade	Análise típica	Variação
Coloração	bege	Rosa
Alvura ISO (%)	64,7	-
Umidade (%)	1,0	máximo
SiO ₂ (%)	87,0	± 3,0
Al ₂ O ₃ (%)	5,0	± 2,0
Fe ₂ O ₃ (%)	1,5	máximo
CaO (%)	0,5	máximo
MgO (%)	0,2	± 0,1
Na ₂ O (%)	2,5	máximo
K ₂ O (%)	0,3	± 0,2
Perda ao fogo (%)	1,0	máximo
Densidade aparente livre (g/cm ³)	0,200	± 0,030
Filtrabilidade a vácuo (s)*	35	± 5
Granulometria - retido em 200 # (%)	10	± 3,0

EDIZ, 2010, analisou as características de filtração da diatomita calcinada a 1000°C, com as características físicas, químicas, térmicas e microestruturais da diatomita bruta e calcinada determinadas e também comparadas a outras formas de filtração comerciais para a cerveja, sendo demonstrado que a diatomita calcinada poderia ser utilizada na filtração de cerveja com o arranjo adequado da distribuição do tamanho de partícula.

GOULART *et al.*, 2011, conclui que a terra diatomácea recuperada com o tratamento térmico pode ser reutilizada na composição de novos sistemas de filtração e clarificação da cerveja, diminuindo a quantidade de resíduo gerado.

1.4.4. Resíduo de Terra Diatomácea - Classificação segundo a periculosidade

A América do Norte é a maior fabricante de biocombustíveis do mundo. Em USEPA, 2008, a agência ambiental norte-americana aponta que os resíduos de filtração de processo de fabricação de biodiesel podem ser inflamáveis, aplicando-se tanto para as terra diatomáceas auxiliares de filtração, como para resinas e filtros de pano, observando-se que esses resíduos de filtração podem entrar em combustão espontânea sejam eles oriundos da filtração do óleo ou do biodiesel, classificados pela agência americana como resíduos perigosos.

No Brasil o resíduo deve seguir a metodologia de classificação da ABNT NBR 10.004 de classificação de resíduos sólidos, que inclui característica de inflamabilidade para que o resíduo seja classificado como perigoso.

1.5. Estudos de Viabilidade

Conforme CONFORTO, 2011, um estudo de viabilidade técnica e econômica - EVTE consiste na comparação entre o valor do investimento inicial a ser realizado em determinado projeto e seus benefícios econômicos. O EVTE pode ser desenvolvido nos seguintes casos:

- Implantação de um novo negócio;
- Expansão de um negócio já existente; e
- Investimento para redução de custos.

No primeiro e segundo casos, comparam-se as receitas líquidas futuras com o custo do investimento, no terceiro caso, comparam-se os ganhos com a redução de custos, isto é, as economias geradas com o investimento.

CONFORTO, 2011, acrescenta que o EVTE é constituído de três peças fundamentais:

- Estimativa de Custos de Investimento – tem por objetivo a avaliação prévia do montante que será despendido para implantação. São computados os gastos com, por exemplo, a contratação de serviços de engenharia, a aquisição de equipamentos, a aquisição de materiais, a execução de obras civis, dentre outros. Para sua elaboração são utilizadas técnicas especiais de Engenharia de Custos.
- Estimativa de Custos Operacionais – tem por objetivo estimar os custos de funcionamento ou de operação. São computados gastos com, por exemplo, os custos de pessoal, de materiais e despesas operacionais.
- Estimativa de Receitas Operacionais - previsão de entrada de recursos no caixa do negócio a partir do início da sua operação.

A partir desses três elementos prepara-se o Fluxo de Caixa Descontado. Por fluxo de Caixa entende-se o volume de recursos que saem do caixa do negócio, tanto para pagamento dos custos de implantação do empreendimento, como para pagamento dos seus custos operacionais, assim como também dos recursos que

nele entram. Esse fluxo de caixa possui um período pré-definido, denominado “horizonte”, com diferentes durações:

- Prazo indeterminado pelo tempo necessário para retorno do capital investido;
- Prazo definido pela vida útil dos equipamentos; ou
- Prazo de duração qualquer (usualmente 5, 10 ou 20 anos)

Independente do horizonte, o fluxo de caixa, em geral, é definido em períodos de um ano.

Para o caso de um Fluxo de Caixa Descontado, considera-se o custo de oportunidade ou custo de capital, ou seja, “aquilo que o investidor receberia, caso aplicasse os seus recursos em outro investimento que não fosse o projeto em análise”.

A taxa de juros que se utiliza no cálculo do custo do capital é denominada Taxa de Atratividade, podendo cada empresa ou negócio possuir as suas taxas estipuladas. Em geral costuma-se definir esta Taxa de Atratividade como sendo igual à taxa básica de juros (Selic) acrescida de um *spread*, correspondente ao risco que a empresa corre por estar investindo os seus recursos ao invés de aplicá-lo no mercado de capitais.

1.5.1. Indicadores Econômicos

Por mais complexos e diferentes que sejam os projetos a serem analisados, todos eles podem ser representados por um fluxo de caixa, ou seja, entradas e saídas de capital divididas em várias categorias e dispostos em um horizonte temporal (BASTOS, 2006).

BASTOS, 2006, coloca que a estimativa dos principais componentes formadores do fluxo de caixa – preços, custos, quantidades, consumos específicos, tributos – deverá ser feita, inicialmente, com base no valor esperado – Análise Determinística. Contudo, considerando as incertezas futuras poderão se refletir

fortemente nos indicadores do projeto, sugere-se que se faça sempre Análise de Sensibilidade em relação às principais variáveis do projeto.

CONFORTO, 2011, cita os principais indicadores econômicos para o EVTE, obtidos a partir do Fluxo de Caixa, são eles:

- Valor Presente Líquido – VPL – saldo total do investimento, computados o investimento inicial e todas as receitas e despesas no tempo de vida útil;
- Tempo de Retorno do Capital – ano em que ocorre a recuperação do capital investido.
- Taxa Interna de Retorno - TIR – é a taxa de desconto que anula o fluxo de caixa, uma taxa calculada a partir da equação (1).

$$-INV + \sum \left(\frac{C_n}{(1+TIR)^n} \right) = 0 \quad (1)$$

Onde:

INV → Investimento inicial

n → ano (número natural, ano inicial 1, e final “n”, ou horizonte do investimento)

C_n → Receita Líquida no final do ano “n”

TIR → Taxa Interna de Retorno – pode ser interpretado como uma taxa implícita no fluxo de caixa de tal modo a equilibrar os embolsos e desembolsos do projeto, ou de zerar o VPL.

Uma equação para um investimento de horizonte de 10 anos, o TIR será calculado a partir de uma equação do décimo grau apresentada na equação 2, onde o investimento inicial e as receitas líquidas são conhecidas/estimadas e a TIR é a variável:

$$-INV + \frac{C_1}{(1+TIR)^1} + \frac{C_2}{(1+TIR)^2} + \frac{C_3}{(1+TIR)^3} + \frac{C_4}{(1+TIR)^4} + \dots + \frac{C_{10}}{(1+TIR)^{10}} = 0 \quad (2)$$

1.5.2. Análise de Sensibilidade

Segundo BIERMAN, 1993, a análise de projeto vai além estimativas pontuais para variáveis de estudo, necessitando levar em conta a incerteza envolvida nessas estimativas e o seu conseqüente impacto com a ocorrência de faixas de oscilações para a aplicação real, prevendo os impactos sobre os indicadores do projeto. Variedade de eventos pode ocasionar mudanças nos valores das variáveis de entrada, resultando em alterações na Taxa Interna de Retorno, no Valor Presente Líquido calculados, por exemplo.

Para BASTOS, 2006, a Análise de Sensibilidade permite conhecer a importância das variáveis consideradas do projeto, observando o impacto da variação isolada de uma variável no fluxo de caixa do projeto, mantidas as demais variáveis constantes, provendo informação da magnitude da influência de uma determinada variável sobre os indicadores econômicos.

Outra forma de realizar a Análise de Sensibilidade, segundo VOSE, 2008, é através do gráfico de tornado, utilizado para identificar as principais variáveis e parâmetros de incerteza que regem o modelo, sendo utilizados para mostrar a influência que as variações da entrada tem sobre a mudança no valor da saída, sendo também úteis para verificar se o modelo se comporta conforme se espera. Cada distribuição de entrada é representada por uma barra, e a faixa horizontal das barras representa medida da influência da distribuição de entrada na saída. A principal vantagem é identificação visual dos parâmetros de entrada mais influentes.

Apesar da análise financeira já incorporar o risco do negócio na Taxa Mínima de Atratividade - TMA, os estudos determinísticos não explicitam a variedade de eventos que pode resultar em mudanças nas variáveis de entrada, que pode resultar em alterações (BASTOS, 2006).

Conforme PEREIRA, 2009, outro exemplo de aplicação de análise de sensibilidade é através do gráfico aranha ou *spider*, que apresenta o desvio percentual da variável de entrada no eixo das abscissas e o VPL (ou outro indicador desejado) no eixo das ordenadas.

Nessa análise, cada variável de entrada são individualmente deslocadas para cima ou para baixo em determinados percentuais, mantidas todas as outras variáveis constantes (*ceteris paribus*). A interpretação desse gráfico é quanto maior a declividade da curva que representa a variável de entrada maior é o seu impacto no indicador considerado (PEREIRA, 2009).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o Estudo de Viabilidade preliminar, seguem-se os materiais e métodos, organizados por cada uma das dimensões do estudo, quer sejam: dimensão técnica, dimensão econômica e dimensão ambiental.

- Dimensão técnica – verificação preliminar da aplicabilidade técnica do Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM ao resíduo de terra diatomácea - RTD a partir de experimentos de TTRM em escalas reduzidas.
- Dimensão econômica – verificação preliminar da viabilidade econômica do tratamento a partir dos aspectos econômicos da tecnologia (resultados do experimento de escala reduzida do TTRM), de dados econômicos de mercado, dos cenários estipulados e da análise de sensibilidade.
- Dimensão ambiental – análise preliminar da aplicabilidade ambiental da tecnologia a partir dos principais aspectos ambientais do TTRM sob a ótica da PNRS.

Os testes do TTRM ao RTD foram realizados por PETROBRAS e ALBRECHT em equipamentos que simularam a tecnologia em duas escalas: equipamento de escala de bancada de laboratório e no equipamento piloto TELAB 100 com capacidade de 30kg/h de tratamento de resíduo. Ambos localizados em Joinville, no estado de Santa Catarina.

Os resultados desses testes deram base à análise econômica, que foi realizada com a adoção de premissas técnicas (item 2.2.1), premissas operacionais (item 2.2.2) e dados econômicos de referência (item 2.2.4).

2.1. Dimensão técnica

A dimensão técnica foi analisada a partir de experimentos de TTRM, envolvendo: testes em escala de bancada de laboratório, testes em escala de planta piloto com análises de aspectos físico-químicos.

2.1.1. Testes de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos - TTRM no Resíduo de Terra Diatomácea - RTD

Os testes foram realizados por PETROBRAS e ALBRECHT de acordo com os procedimentos estabelecidos para testes da aplicação da tecnologia, cujos equipamentos de escala de bancada de laboratório, planta piloto para TTRM e processos resultam de diversos pedidos de patentes compartilhadas entre a PETROBRAS e a ALBRECHT.

Do conhecimento adquirido pela PETROBRAS com o estudo do processo de tratamento de lodos secos por conversão térmica a baixa temperatura – LTC (*Low Temperature Conversion*) e da patente do secador de resíduos Bruthus, da ALBRECHT foi desenvolvida a tecnologia de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos em parceria entre a PETROBRAS e a empresa ALBRECHT, ambas detentoras de 50% da sua patente (PETROBRAS, 2004).

2.1.1.1. TTRM de bancada - escala de laboratório

Utiliza-se um equipamento de bancada onde a amostra de resíduo é submetida a uma simulação do processo de tratamento térmico. Esta unidade é composta de um sistema de destilação em vidro, balão, condensador e recipiente de coleta, submetida a um ambiente de vácuo regulável e controlada (FIGURA 11). Eleva-se a temperatura até que a amostra libere os componentes voláteis. Através de um sistema de aquecimento especial é possível reproduzir as características de potência, temperatura, dentre outros, similares ao processo TTRM em que será submetida a amostra de resíduo sob avaliação de tratabilidade. Com o equipamento de bancada é possível simular de forma expedita o que poderá ocorrer em escalas maiores na unidade piloto e/ou na semi-industrial.

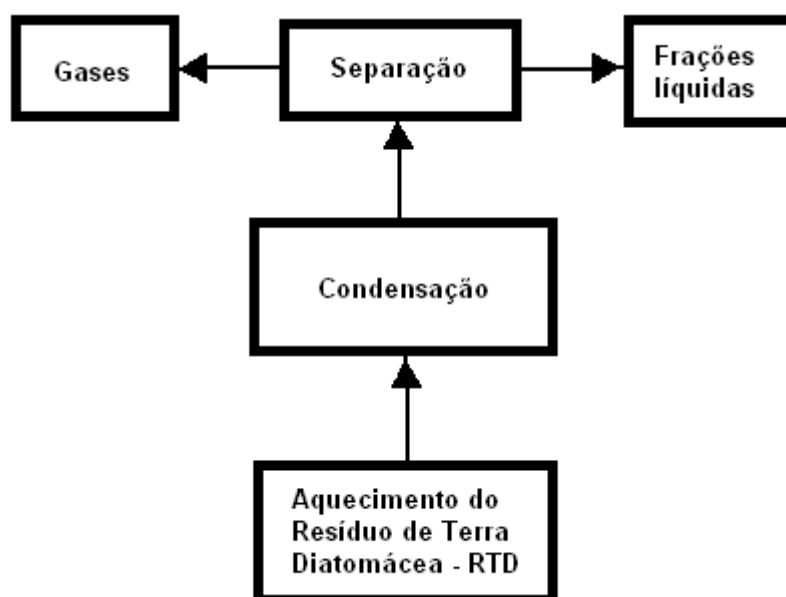


FIGURA 11 Unidade de bancada para simulação do TTRM – esquema de diagrama em blocos simplificado (adaptado de PICKER, 2010)

A TABELA 4 apresenta as condições operacionais do TTRM em escala de bancada ao teste de RTD.

TABELA 4 Condições operacionais do TTRM em escala de bancada para o teste em resíduo de Terra Diatomácea

Temperatura (graus Celsius - °C)	200 - 600
Pressão (mm c.a.)*	-1000
Tempo (minutos)	205

* mm c.a = milímetros de coluna d'água

O sólido residual obtido do tratamento de bancada do RTD foi submetido à calcinação para redução de componentes orgânicos, conforme descrito em 2.1.1.2.1

A partir dessa etapa de bancada foram obtidos o balanço de massas do TTRM, a curva de tendência de destilações e os percentuais de perda ao rubro na calcinação.

2.1.1.2. Equipamento TELAB 100 – testes piloto para o TTRM

Foi utilizada para os testes iniciais de aplicação da tecnologia a unidade de TTRM TELAB 100 (FIGURA 12), planta-piloto instalada em Joinville com capacidade de processamento de 30kg/h. Nesses ensaios foram registrados os comportamentos térmicos do processo, consumos de insumos e energia, balanços de massa, análise de transporte dos materiais, mecanismos de carga e descarga, corrente gasosa, eficiência de recuperação das frações condensáveis, taxas de perda, entre outros parâmetros pertinentes ao processo e importantes para a concepção de um projeto para aplicação da tecnologia TTRM em escala industrial. Na FIGURA 13 é apresentado o fluxograma esquemático da unidade TELAB 100.



FIGURA 12 (a) Unidade piloto TELAB 100 do processo de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos – TTRM; (b) TELAB 100 – Vista lateral dos sistemas de condensação (PICKLER, 2010)

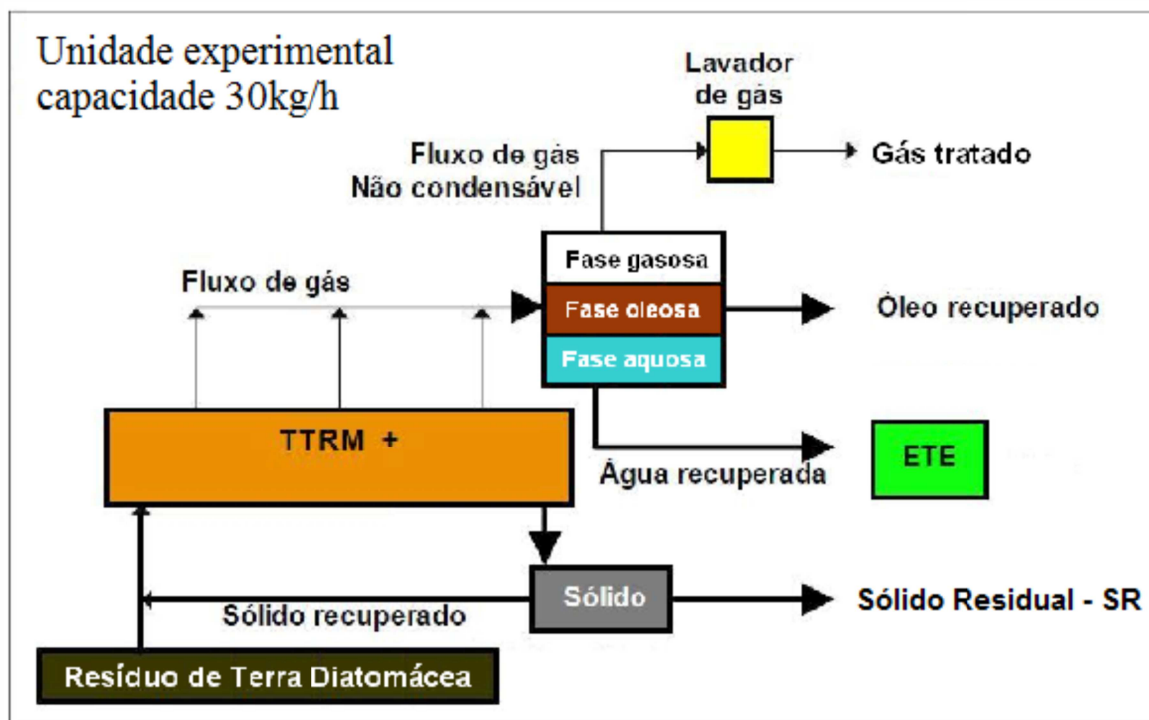


FIGURA 13 Fluxograma esquemático da unidade TELAB 100 (Adaptado de PICKLER, 2010)

O resíduo de terra diatomácea contaminado com biodiesel é alimentado no equipamento de TTRM de onde saem frações de gás (condensáveis e não condensáveis) e sólido. Parte do gás é condensada e obtidas as fases chamadas de oleosa (para posterior tentativa de aproveitamento do produto, óleo ou combustível) e aquosa (enviada para Estação de Tratamento de Efluentes - ETE), e parte desse gás não condensável é enviado para sistema de lavadores de gases para tratamento. A fração “sólido”, parte pode retornar ao início do processo para nova passagem do TTRM (chamado sólido recuperado) dependendo das características que se queira chegar do resíduo processado, e outra parte é chamada de Sólido Residual pode ser reaproveitada ou enviada para destinação. Para o caso do experimento com os RTD, não houve nova passagem no TTRM.

O processo de Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos – TTRM utiliza técnicas térmicas acopladas em processo contínuo. Originalmente, na unidade piloto TELAB100, foram definidos três estágios básicos (ou zonas), podendo ser incorporada uma quarta fase considerada uma nova zona de pós-

processamento onde podem ser aplicados os processos de inertização e/ou beneficiamento do subproduto Sólido Residual – SR. Este último estágio não foi utilizado, ao invés, o SR foi calcinado em forno mufla, conforme apresentado no item 2.1.1.2.1

A FIGURA 14 apresenta o desenho esquemático do processo de TTRM e na TABELA 5 os parâmetros operacionais dos testes. Seguem-se os estágios básicos e os potenciais eventos associados:

- Primeiro estágio (zona 1): evaporação da fração líquida e frações leves do combustível/óleo;
- Segundo estágio (zona 2): dessorção térmica e pirólise do óleo existente na matriz do substrato;
- Terceiro estágio (zona 3): garantir a extração dos componentes orgânicos que por ventura ainda estejam presentes no sólido; craqueamento da fração pesada restante (para borras oleosas de petróleo), mantendo nesta última fase, agregados os sedimentos inorgânicos oriundos da composição inicial do substrato a tratar.
- Quarto estágio (zona 4) – opcional (não utilizado): calcinação para eliminação total da matéria orgânica e óleos e graxas ainda sorvidos no sólido residual, inertização e/ou beneficiamento do subproduto SR.

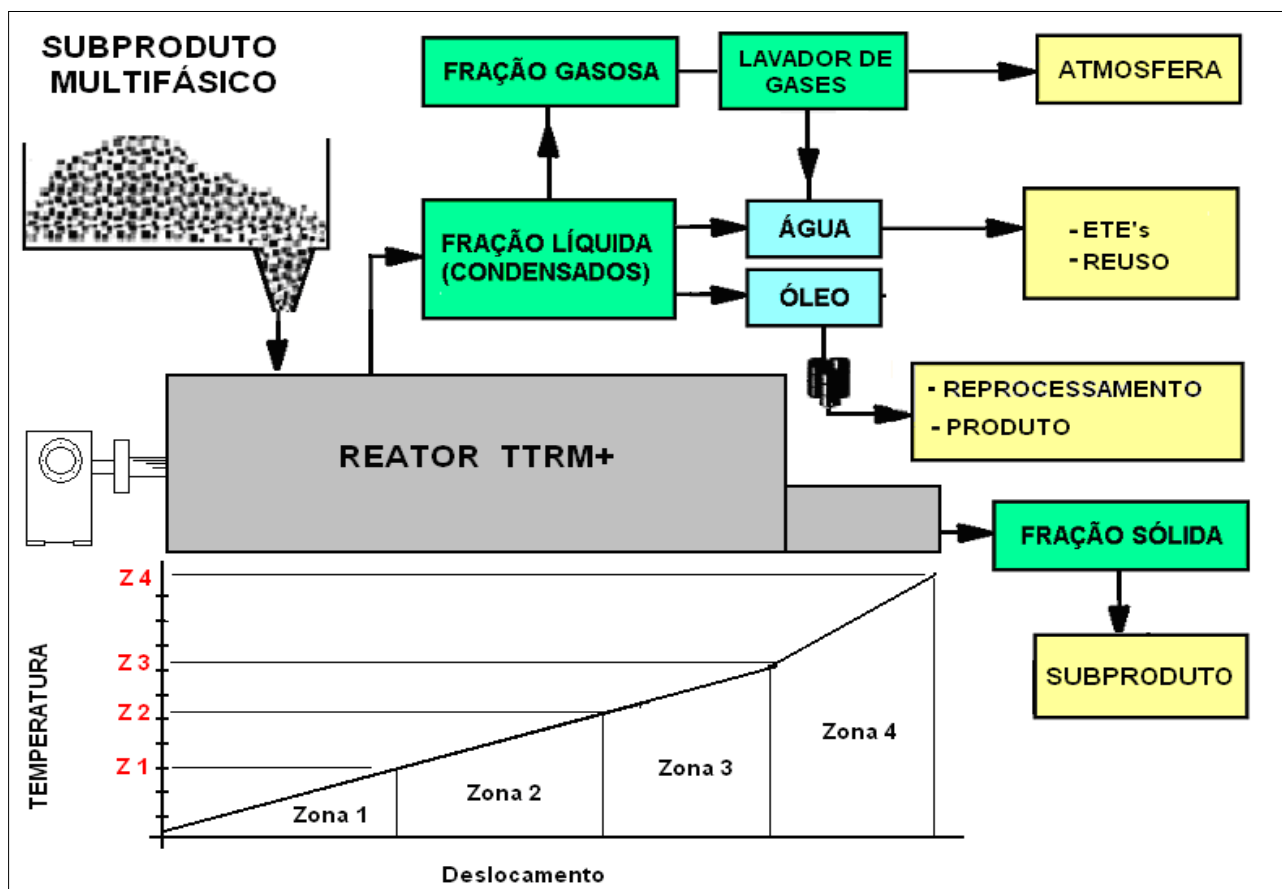


FIGURA 14 Desenho esquemático do processo de TTRM (adaptado de GALLO e PICKLER, 2012)

TABELA 5 Parâmetros operacionais dos testes TELAB100

Parâmetros	Utilizado no teste
Material processado	Resíduo de terra diatomácea filtração biodiesel (B100)
Massa utilizada (kg)	21,74
Set Point Temperatura* Z 1 [°C]	120
Set Point Temperatura* Z 2 [°C]	280
Set Point Temperatura* Z 3 [°C]	420
Mufla – [°C]	440
Tempo em mufla [h]	3
Vazão do Processo [kg h ⁻¹]	3,58

*Set Point de Temperatura – temperatura controlada em cada uma das zonas

Obteve-se a partir dos experimentos diretamente no TELAB 100:

- Balanço de massas e perfil térmico;
- Balanço energético.

Nos subitens 2.1.1.2.2 e 2.1.1.2.3 são apresentados os respectivos materiais e métodos.

2.1.1.2.1. Calcinação dos sólidos recuperados

O SR resultante do processamento na unidade TELAB 100 foi calcinado em escala de bancada em forno mufla, marca Jung, Modelo X, na temperatura de 440°C por 3 horas, de acordo com a NBR 13600:1996, sendo também obtida curva de calcinação do SR a 440°C por 10 minutos.

2.1.1.2.2. Balanço de massas e perfil térmico

Obteve-se a fração em massa e percentual em relação a massa do resíduo inicial das seguintes frações: (SR) – Sólido residual; (AR) – Água recuperada; (OR) – Óleo recuperado; (EM) – Emulsão Recuperada; (PE) – Perdas.

Os percentuais em massa foram continuamente registrados em função da temperatura ao longo das zonas de aquecimento em rampa, sendo possível monitorar a evolução térmica *versus* o tempo decorrido através da carcaça do reator, da massa transportada e do gás transportado, através dos termopares posicionados no sistema. A variação média da temperatura ocorre em torno da temperatura fixada para cada zona.

2.1.1.2.3. Balanço energético

Existiram dois tipos distintos de consumo de energia: um independente e outro dependente do total da carga de resíduos processada.

As parcelas independentes foram aquelas utilizadas nas chamadas fases de aquecimento e de resfriamento do equipamento, já a parcela dependente foi monitorada na chamada fase de alimentação.

Foi obtido o consumo específico de energia em kWh/kg de resíduos processado a partir da relação entre o consumo de energia monitorado na fase de alimentação e da massa total do resíduo tratado no teste.

Os consumos de energia nas fases de aquecimento e de resfriamento foram obtidos com os respectivos monitoramentos do consumo de energia em kWh.

Os valores de consumo aliados à tarifa de consumo industrial de energia elétrica (item 2.2.4.1) compuseram parcela de custos da dimensão econômica.

2.1.1.2.4. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Foi utilizado o Microscópio Eletrônico de Varredura HITACHI, modelo TM 3000. As amostras do sólido residual (o RTD tratado no TTRM) e da terra diatomácea virgem foram tratadas com Sputtering Balzer (Batec SCD 050) para recobrimento com ouro, as partículas e aglomerados foram fixados ao suporte de amostra através de tinta adesiva de prata (silverpaint). Foi utilizado feixe de elétrons regulável para tensão de 15 V (Tensão de Aceleração), na distância de trabalho 10mm, de acordo com a *ASTM E1829: Standart Guide for Handling Specimens Prior to Surface Analysis*.

2.1.1.2.5. Microanálise Química por Microsonda Eletrônica EDS

Foi realizada análise química do SR através de Microsonda Eletrônica de Energia Dispersiva – EDS, equipamento fabricante BRUKER Quantax 70 , acoplada

ao Microscópio eletrônico de Varredura. Parâmetros de ensaio de tensão de aceleração de 15V e distância de trabalho de 10mm, conforme *ASTM E1508: Standart Guide for Quantitative Analysis by Energy-Dispersive Spectroscopy*. Obtidos percentuais de Silício (Si) e Oxigênio (O), Carbono (C), Alumínio (Al), Sódio (Na), Potássio (K) e Cálcio (Ca).

2.1.1.2.6. Teor de Óleos e Graxas

Para verificar o teor de óleos e graxas presente nas amostras antes e após o processo no TELAB 100 foi utilizado equipamento extrator ASE (*Accelerated Solvent Extractor*) (Marca Dionex, Modelo 300) conforme os métodos 1664 e 3545a da U.S. EPA.

2.2. Dimensão econômica

A análise da dimensão econômica foi realizada para cada cenário proposto (item 2.2.3), tomando-se como base premissas técnicas (item 2.2.1), operacionais (item 2.2.2) e dados econômicos de referência (item 2.2.4), além de realizada análise de sensibilidade (2.2.5) com a variação dos principais fatores da composição de custos.

Foi utilizada Taxa Mínima de Atratividade - TMA nula, em fluxo de caixa simples, por se considerar que não se trata de opção de escolha por uma nova oportunidade de negócio, mas de possibilidade de substituir uma opção de destinação já existente e praticada dentro de uma planta de biodiesel. Porém, no item 3.2.2.5, houve a comparação dos resultados caso fosse aplicada uma Taxa Mínima de Atratividade – TMA de até 15%.

2.2.1. Premissas Técnicas

Considerou-se que o RTD é classificado como um resíduo perigoso, de acordo com a ABNT NBR 10.004, pois conforme NDEQ, 2009, há evidências que o resíduo de terra diatomácea oriundo de processo de filtração de biodiesel pode, por vezes, entrar em combustão espontânea, e nesse caso recomenda a sua classificação como resíduo perigoso, além de terem sido realizados testes de inflamabilidade de acordo com a ABNT 10.004, e ter sido verificada a característica inflamável do RTD. Considerou-se ainda que o SR resultante do tratamento do RTD no TTRM é classificado como não perigoso, de acordo com testes de inflamabilidade realizados.

2.2.2. Premissas Operacionais

Assumiu-se que a quantidade anual de RTD gerada pela usina genérica de biodiesel é de 480 toneladas, produzidas com a média de 10 toneladas por batelada semanal.

Foi adotado como referência um equipamento de TTRM com capacidade de tratamento de 75kg/h, característica que resultava numa taxa de utilização de 75% para atender a unidade de produção de biodiesel genérica que possua a geração anual de 480 toneladas de RTD.

O consumo energético específico adotado foi de 3,91 kWh/kg, resultado observado no teste no TELAB 100 para o tratamento da Terra Diatomácea contaminada com B100.

Tanto a capacidade do equipamento como o consumo energético foram variados para a análise de sensibilidade econômica.

2.2.3. Cenários considerados

Para o estudo de viabilidade preliminar foram estabelecidos alguns possíveis cenários com a aplicação do TTRM, foram eles: Otimista SR 90; Promissor SR 70; Mais provável SR 50; Menos provável SR 20; Pessimista 1 SR0 -1 e Pessimista 2 SR 0-2.

Os aspectos considerados em cada um desses cenários estão apresentados na TABELA 6.

TABELA 6 Cenários gerais adotados para o Estudo de Viabilidade Preliminar

Cenários / siglas	Aspectos
Otimista SR 90	Retorno de 90% do Sólido Residual ao processo de filtragem, com reaproveitamento da parcela restante de 10% como material filtrante para outro processo da próprio interno (material filtrante da estação de tratamento de efluentes, água ou sanitário) ou em outra forma de uso sem receita/custo significativo adicional.
Promissor SR 70	Retorno de 70% do Sólido Residual ao processo de filtragem, com reaproveitamento da parcela restante de 30% como material filtrante para outro processo interno (material filtrante da estação de tratamento de efluentes, água ou sanitário) ou em outra forma de uso sem receita/custo significativo adicional.
Mais provável SR 50	Retorno de 50% do Sólido Residual ao processo de filtragem, com reaproveitamento da parcela restante de 50% como material filtrante para outro processo interno (material filtrante da estação de tratamento de efluentes, água ou sanitário) ou em outra forma de uso sem receita/custo significativo adicional.
Menos provável SR 20	Retorno de 20% do Sólido Residual ao processo de filtragem, com reaproveitamento da parcela restante de 80% como material filtrante para outro processo interno (material filtrante da estação de tratamento de efluentes, água ou sanitário) ou em outra forma de uso sem receita/custo significativo adicional.
Pessimista 1 SR 0-1	Nenhum retorno (0%) do Sólido Residual ao processo de filtragem, com aproveitamento de 100% como material filtrante para outro processo interno (material filtrante da estação de tratamento de efluentes, água ou sanitário) ou em outra forma de uso sem receita/custo significativo adicional.
Pessimista 2 SR 0-2	Nenhum retorno (0%) do Sólido Residual ao processo de filtragem, sem aproveitamento algum do Sólido Residual e seu envio como rejeito para Aterro industrial classe II.

Imagina-se que a parcela sem custo significativo adicional apresentado na TABELA 6, referente ao sólido residual que não retornaria ao processo, poderia ser utilizada como material filtrante em outro processo interno, após devidos testes para verificação da aplicabilidade, podendo ser utilizado como, por exemplo, material complementar de filtração de uma estação de tratamento água para uso industrial, ou estação de tratamento de esgoto (efluentes sanitários) ou outro processo.

Considerou-se que não haveria custo significativo adicional pois não constituiria uma aplicação a um novo processo, mas sim um material substitutivo complementar, incorporando os custos de operação e destinação do material original a ser substituído, apesar de gerar economia de custos com a redução do consumo do material original. Decidiu-se por não contabilizar essa economia nessa análise preliminar pois seria vago definir o seu uso substitutivo a outro processo de filtração genérico, que dependeria da situação específica de cada planta industrial, verificando-se, por exemplo, se existe na instalação processo de captação e tratamento de água com filtração final para uso como material filtrante complementar, o que dependeria de testes adicionais para o uso específico. O estudo dos demais usos corrobora para um balanço mais positivo de aplicação da tecnologia.

2.2.4. Dados Econômicos de Referência

2.2.4.1. Tarifa de Consumo Industrial de Energia Elétrica

Os dados das tarifas de consumo de energia foram retirados da ANEEL, 2014, Tarifas Médias de Fornecimento por Classe de Consumo para o ano de 2013, sendo adotada média nacional para o setor industrial de 222,50 R\$/MWh na condição de referência (FIGURA 15).

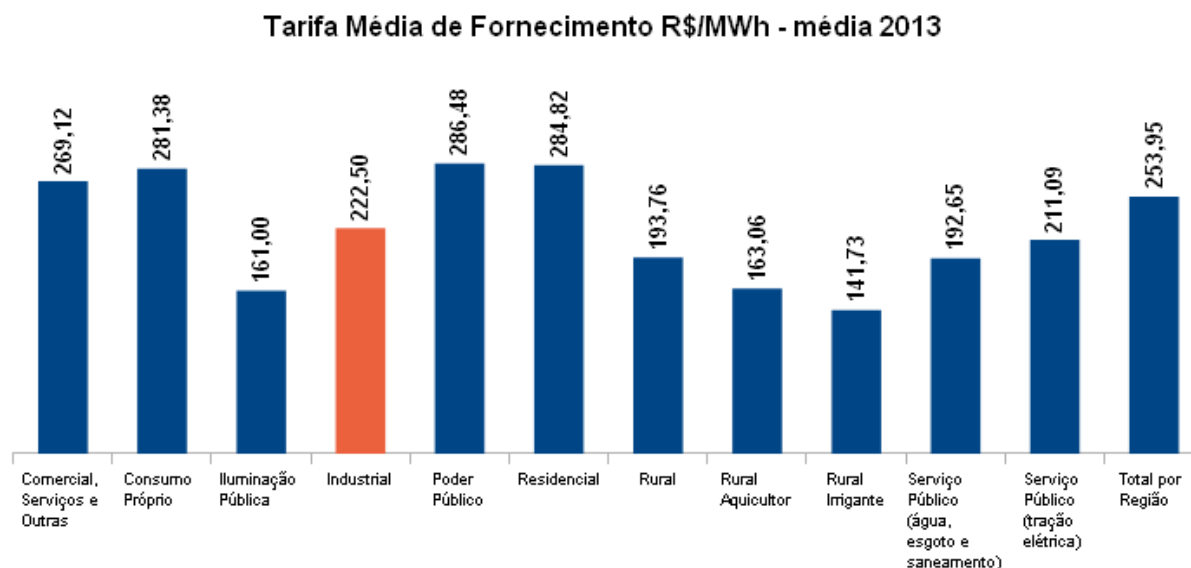


FIGURA 15 Tarifa Média de Fornecimento por setor (fonte de dados: ANEEL, 2014)

Na análise de sensibilidade, para o cenário “mais provável SR50” foram variados os custos de fornecimento de energia de acordo com as médias das tarifas regionais e com o custo assumido para geração própria de energia apresentados na FIGURA 16, como forma de simular um cenário em que uma usina de biodiesel possuísse geração de energia própria interna a custos mais baratos que da concessionária de energia. Para os demais cenários do mais otimista ao mais pessimista, também foram variados os custos de energia e verificados o impacto sobre os indicadores econômicos.

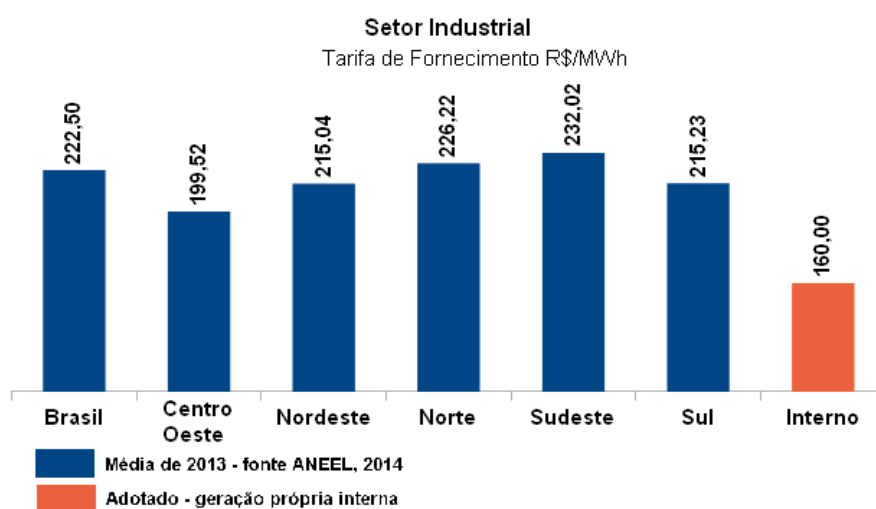


FIGURA 16 Setor industrial – tarifa média de fornecimento de energia regional – média 2013

2.2.4.2. Custo da Terra Diatomácea virgem

O custo utilizado foi de 2,74 R\$/kg, aplicado a grandes consumidores, valor obtido a partir de consulta a consumidor, além de ser realizada análise de sensibilidade variando-se esse custo.

2.2.4.3. Custos para outras formas de destinação dos resíduos de Terra Diatomácea

Foi adotado valor de 1.400,00 R\$/ton para destinação do resíduo de Terra Diatomácea contaminada pela chamada “tecnologia competitiva” (tecnologia de destinação convencional a ser utilizada para destinação do RTD caso se opte pela não aplicação do TTRM) , como forma de computar os custos evitados se fosse aplicada unidade de TTRM na unidade industrial de produção de biodiesel. Esse custo adotado como referência, foi variado para análise de sensibilidade.

Para o eventual Sólido Residual do TTRM que não fosse reutilizado ou reaproveitado em outro processo foi adotado um custo de 210 R\$/ton, como forma de equiparar à disposição em Aterro Industrial Classe IIA, considerado o resíduo tratado como não perigoso. Esse custo com aterro foi considerado apenas para os cenários apresentados no item 2.2.3 em que há frações de sólidos recuperados pós-processamento do TTRM que não possuem forma de destinação viáveis, assim constituindo um rejeito. Esse custo também foi variado, para análise de sensibilidade na parcela de destinação do rejeito.

Para esses custos de destinação considerou-se os custos de transporte inclusos, já que se trata de um estudo aplicado a uma planta genérica em que não se pode saber a distância ao local de tratamento.

Estes custos foram incorporados no fluxo de caixa como custos evitados, para contabilizar a economia de recursos financeiros com a aplicação do TTRM em substituição a uma tecnologia convencional competitiva.

Os custos de tratamento da “tecnologia competitiva” foram variados para análise de variação dos indicadores econômicos verificação do comportamento da

viabilidade econômica pela opção de utilização do TTRM em uma planta genérica de produção de biodiesel.

2.2.4.4. Custos com mão de obra para operação

Foram computados custos com mão de obra para a operação do TTRM a partir do valor de R\$ 750,00 (equiparado a um salário mínimo), com carga de impostos de 95% totalizando valor de R\$ 1.462,50 para o trabalho mensal com 44 horas de trabalho de carga semanal.

Para o caso, resulta um valor de R\$ 8,31/hora (homem hora de trabalho), valor considerado para o tempo específico de operação, imaginando não necessária contratação de mão de obra, deslocando mão de obra da unidade industrial apenas nas horas de operação do equipamento.

2.2.4.5. Investimento, custos de implantação de custos de manutenção

Os custos de implantação e manutenção do equipamento foram adaptados de PICKLER, 2010, a partir dos custos apresentados do equipamento de TTRM TELAB K500 de escala semi-industrial, com capacidade de tratamento de 500 kg/h.

O valor de PICKLER, 2010 (de referência de 2008) foi atualizado com base nos índices da Fundação Getúlio Vargas - FGV indicados na TABELA 7, sendo eles:

INCC – Índice Nacional de Custo de Construção – com abrangências setoriais específicas sobre máquinas, equipamentos e mão de obra, cada qual aplicado a parcela específica para composição de custo do TTRM.

Índice de Equipamento Nacional – aplicado a valores de equipamentos.

TABELA 7 Custo estimado do TELAB K500 (capacidade 500 kg/h) - atualização dos custos de equipamento e instalação

Conta	Índice	Valor informado (2008)	Valor atualizado (dez- 2013)
Equipamento R\$ R\$	Índice de Equipamento Nacional	R\$ 2.548.000,00	R\$ 2.903.478,36
Obra civil R\$ R\$	INCC mao de obra	R\$ 150.000,00	R\$ 203.933,87
Instalações R\$ R\$	INCC materiais	R\$ 85.000,00	R\$ 100.739,70
Época do custo TOTAL R\$	-	R\$ 2.783.000,00	R\$ 3.208.151,93

O custo estimado do equipamento foi atualizado com o último índice disponível pesquisado de referência de dezembro de 2013.

Com base nesse valor atualizado, foi aplicada equação de Estimativa de Custo por Ajuste de Capacidade (equação 3), conforme CONFORTO, 2011, para que se tenha o custo genérico do equipamento considerando capacidades distintas de processamento para cada cenário estabelecido:

$$P_1 = P_0 \times (C_1 / C_0)^k \text{ - Estimativa de Custo por Ajuste de Capacidade} \quad (3)$$

Onde:

P_0 = custo do equipamento existente

P_1 = custo do equipamento que se deseja conhecer

C_0 = capacidade do equipamento existente (de custo conhecido)

C_1 = capacidade ser construída (de custo que se deseja conhecer)

K = fator de potência (0,68 para equipamentos em geral, CONFORTO, 2011)

Para os custos de depreciação do equipamento foi adotado tempo de 10 anos, geralmente aplicado a equipamentos.

Assim, a depreciação foi computada no balanço mensal de forma que represente em dez anos o custo do equipamento. O custo do equipamento em si também foi considerado no valor do investimento inicial. Do ponto de vista prático, isso representa que será necessário um equipamento novo a cada dez anos de uso.

O tempo de depreciação também foi variado na análise de sensibilidade na parcela chamada de “depreciação”.

2.2.5. Análise de sensibilidade

A fim de conhecer a importância das variáveis consideradas na avaliação do projeto, a Análise de Sensibilidade permite avaliar o impacto da variação isolada de uma variável no fluxo de caixa do projeto nos demais indicadores de decisão.

Para avaliação da sensibilidade da competitividade do TTRM aos principais custos envolvidos foram realizados cálculos para cada cenário estabelecido variando-se:

- Custos de Energia
- Eficiência Energética do TTRM
- Capacidade de tratamento do TTRM
- Valor de tratamento da tecnologia competitiva
- Valor de disposição do rejeito para aterro
- Tempo de depreciação do equipamento
- Valor do biodiesel
- Valor da terra diatomácea virgem
- Geração de resíduos anual da usina genérica

Assim, apesar de preestabelecidos uma condição padrão para cada um desses fatores mencionados, eles foram variados para os cenários estabelecidos na análise de sensibilidade.

2.3. Dimensão Ambiental

A análise da dimensão ambiental do tratamento se restringiu à determinação dos principais aspectos ambientais do TTRM comparado a outras formas de destinação convencionais usualmente disponíveis.

Para essa análise preliminar, os aspectos ambientais foram explicitados em termos qualitativos, não sendo estimados em termos quantitativos ou monetários, o que tornaria o estudo preliminar denso e com muitas incertezas, já que foi adotada uma usina genérica sem localização específica e sem conhecimento das especificidades locais.

A análise comparativa das possibilidades de destinação foi realizada a partir do estabelecimento dos aspectos qualitativos levantados a partir de oficina realizada com profissionais da área ambiental de empresas geradoras de resíduos que atuam no tema de gerenciamento de resíduos, a partir da ótica da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS e de demais aspectos considerados importantes para efeito de escolha da tecnologia por esses profissionais, tudo isso sem levar em conta o custo da destinação. A TABELA 8 apresenta o resultado consolidado dos aspectos observados pelo grupo, onde se considerou o seguinte:

- Forma de destinação baseada na PNRS – de acordo com o artigo 9º da PNRS, onde se deve observar a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.
- Potencial de geração de passivo (alto, médio e baixo) – percepção dos profissionais quanto a possibilidade de geração de passivo ambiental: Aterro Industrial foi considerado alto pelo grupo por constituir uma forma de “armazenamento” do resíduo, com potenciais geração impactos caso mal operado ou caso haja comprometimento dos fatores construtivos do aterro

que promovem o confinamento dos resíduos em relação ao meio; a incineração foi considerada de potencial médio porque ao final desse tratamento podem ser destinadas as cinzas deste tratamento para aterro, podendo constituir obrigações futuras; e o TTRM e Coprocessamento de potenciais baixos pela geração de um produto final, desconstituindo o resíduo inicial.

- Localidade – solução para o resíduo pode ser dada na própria localidade, ou em localidade distinta da geração de resíduos.

TABELA 8 Aspectos estabelecidos para definição de escolhas de formas de destinação de resíduos

Nome da possibilidade	Forma de destinação baseado na PNRS	Potencial de geração de passivo	Localidade
Aterro Industrial Classe I	Disposição final	Alto	Fora do local
Coprocessamento em fornos de clínquer	Reciclagem	Baixo	Fora do local
Incineração	Tratamento	Médio	Fora do local
TTRM	Redução e Reutilização	Baixo	No local

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Dimensão técnica

3.1.1. Processo de TTRM de bancada de laboratório

A FIGURA 17 apresenta os destilados (fase aquosa e fase oleosa) e a TABELA 9 o balanço de massas de cada fase (fase aquosa, fase oleosa e fase sólida residual – SR) obtidos no processo de TTRM de bancada de laboratório.

TABELA 9 Balanço de massas do TTRM de bancada no teste com resíduo de terra diatomácea (ALBRECHT, 2011)

Parâmetros	Massa (g)	Proporção (%)
Amostra	100,84	-
Sólido Residual - SR	69,44	68,86
Fase aquosa – Fase 01	12,13	12,03
Fase oleosa – Fase 02	8,38	8,31
Perdas	-	10,80



FIGURA 17 Destilados obtidos no teste de TTRM de bancada (ALBRECHT, 2011)

ALBRECHT, 2011 apresenta obtenção de fase aquosa (Fase 01) entre as temperaturas de 200°C e 500°C e a fase oleosa (Fase 02) entre 500°C e 600°C. No experimento de bancada, a amostra de resíduo de terra diatomácea foi submetida ao tempo total do processo de 205 minutos, em teste estático (em batelada, sem alimentação contínua de resíduo). Espera-se que o processamento em um equipamento dinâmico resulte em tempo de residência menor.

As faixas de temperatura submetidas no experimento de bancada (de 200°C e 600°C) são inferiores à temperatura de mencionada por FRANÇA *et al.*, 2005 utilizadas para calcinação das diatomitas (de 800°C e 1.000°C). Nessas faixas de temperaturas mais altas é que ocorreria maior agregação das partículas de diatomita segundo o autor, o que reduziria sua superfície específica.

A redução da superfície específica em faixas de temperatura de 800°C e 1.000°C poderia alterar negativamente a capacidade filtrante do material. Assim, existe vantagem da aplicação do TTRM justamente pela possibilidade de controle da temperatura do processo de tratamento, que pode ser fundamental para manutenção das características filtrantes da Terra Diatomácea tratada.

A análise de características específicas dos destilados se faz necessária para verificação das possibilidades de tratamento ou até mesmo retorno ao processo produtivo.

ALBRECHT, 2011, mostra que a aplicação do RTD no TTRM em baixas temperaturas houve baixa produção de gases condensáveis. A partir do *set point* (controle no interior do equipamento) em 500°C (140 minutos de processo) obteve-se maior produção de gases condensáveis e conseqüentemente maior obtenção de óleo. A temperatura máxima atingida pelos gases produzidos foi de 144 °C (medidos na saída dos gases) no *set point* de 600° C.

O sólido residual do processamento no TTRM obteve aproximadamente 14% de perda ao rubro quando submetido à calcinação, conforme apresentado na TABELA 10.

TABELA 10 Perda ao rubro da amostra de SR obtido no TTRM da amostra de terra diatomácea contaminada (ALBRECHT, 2011)

Identificação	Perda ao rubro (%)
Amostra 01	13,9643
Amostra 02	14,2049
Amostra 03	13,9821
Média (%)	14,0504 ± 0,1340

Observa-se na FIGURA 18 a mudança na coloração entre (b) – Sólido Residual e (c) – Sólido Residual Calcinado, nessa ordem, de preta para rosa claro, ressaltando que parte de material orgânico sorvido na estrutura da diatomita foi eliminada após a calcinação.



FIGURA 18 (a) Resíduo de Terra Diatomácea; (b) Sólido Residual; (c) Sólido Residual calcinado (ALBRECHT, 2011)

3.1.2. Teste no Equipamento piloto TELAB-100

A TABELA 11 apresenta o balanço de massas comparativo entre o teste de escala de bancada de laboratório e no TELAB-100, e na FIGURA 19 os aspectos visuais das frações obtidas no TELAB-100.

TABELA 11 Balanço de massas – teste de bancada de laboratório e teste TELAB-100

		Bancada	TELAB-100
		Terra Diatomácea Contaminada (Biodiesel) – 100,84g	Terra Diatomácea Filtração Biodiesel (B100) – 27,4 kg
Balanço de massas (%)	Material processado	100%	100%
	(SR) - Sólido Residual	68,86%	33,49%
	(AR) - Água recuperada	12,03%	23,18%
	(OR) - Óleo recuperado	8,31%	13,43%
	Perdas	10,80%	29,90%



FIGURA 19 Teste TELAB 100, da esquerda para a direita: Amostras de resíduos de terra diatomácea (RTD), óleo recuperado (OR), água de reação (AR) e sólido recuperado (SR) (ALBRECHT, 2012)

Comparado ao teste de bancada de laboratório, houve menor produção percentual de sólido residual, isso talvez se deva às diferenças de características da carga processada.

Para essa avaliação preliminar do TTRM foram adotados os valores percentuais obtidos no teste de laboratório. Contudo, é importante a repetibilidade futura dos testes e a avaliação da heterogeneidade de condições do resíduo da entrada do equipamento de tratamento, que depende, dentre outros, fundamentalmente da operação e dos procedimentos de troca do material filtrante.

3.1.2.1. Calcinação dos sólidos residuais - SR - Teste no TELAB-100

O sólido residual foi submetido à calcinação, conforme 2.1.1.2.1. Os resultados de redução do percentual de matéria orgânica estão apresentados na FIGURA 20, observando-se redução da matéria orgânica e alteração do aspecto visual a cada passagem no forno e a cada minuto na FIGURA 21, ocasionando a redução do teor de óleos e graxas apresentado na TABELA 12.

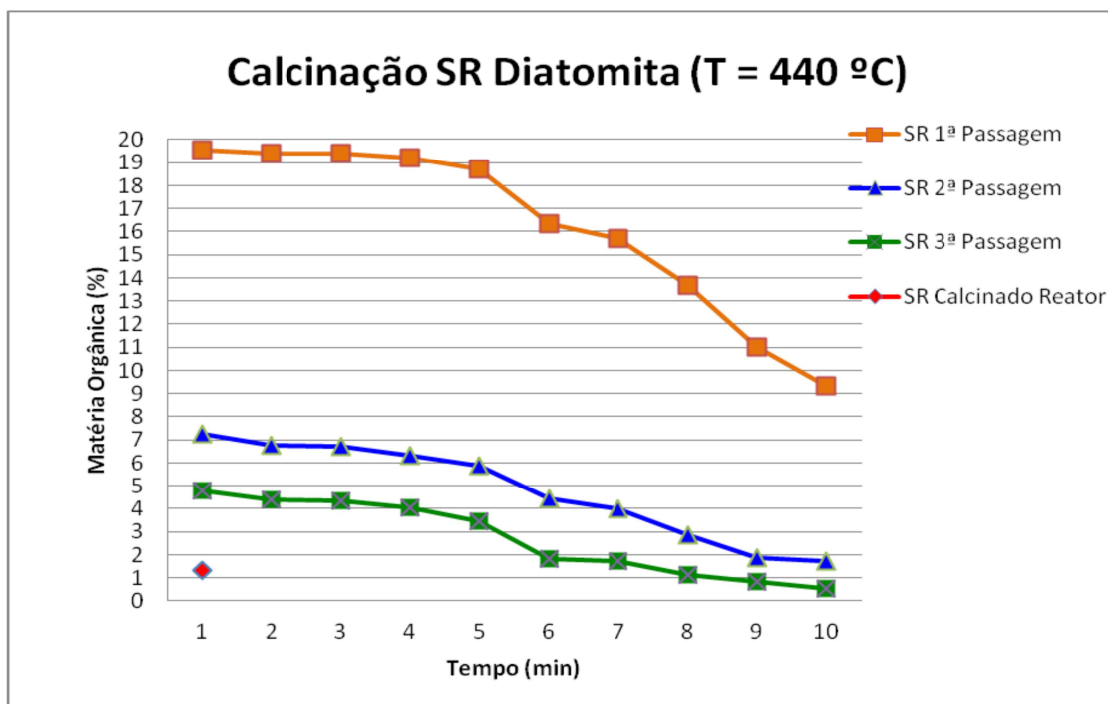


FIGURA 20 Curvas de calcinação do SR (ALBRECHT, 2012)



FIGURA 21 SR T103 calcinados a 440°C até 10 minutos (Obs: de cima para baixo: SR 1ª Passagem, SR 2ª Passagem e SR 3ª Passagem; da esquerda para a direita do primeiro ao décimo minuto) (ALBRECHT, 2012)

TABELA 12 Teor de óleos e graxas nas amostras de diatomitas (ALBRECHT, 2012)

Identificação	Óleos e graxas [%, b.u.]
Diatomita Bruta	37,5592 [b.s.]
SR T103 1ª Passagem	7,5148
SR T103 2ª Passagem	2,6006
SR T103 3ª Passagem	2,1193

Da mesma forma que no experimento de escala de bancada, as temperaturas envolvidas no processamento do RTD no TELAB-100 (até 440°C) envolveram temperaturas abaixo da mencionada por FRANÇA *et al.*, 2005 (de 800°C a 1.000°C). Há potenciais possibilidades de reuso de percentual do sólido residual dentro do próprio processo de filtragem ou em outros processos, dependendo de testes específicos posteriores.

3.1.2.2. Aspectos microscópicos – Teste no TELAB-100

A FIGURA 22 apresenta o aspecto geral das partículas de diatomita bruta (virgem) e da diatomita calcinada. Em ambas as amostras, o aspecto geral das partículas de diatomita apresenta estrutura física heterogênea, com os tamanhos das partículas da diatomita bruta variando entre 7 a 80 microns e na amostra de diatomita calcinada de 19 a 108 microns. Essas faixas de variação estão praticamente em mesma ordem de grandeza, o que sugere que o material não sofreu grandes transformações após o tratamento térmico.

Conforme no item 3.1.2, as faixas de temperatura do tratamento foram abaixo de 440°C, inferiores à faixa de temperaturas de 800°C a 1.000°C apontadas por FRANÇA *et al.*, 2005, que ocorre a destruição da estrutura fina, redução da área superficial, aglomeração das partículas, aumento da densidade aparente e redução da área superficial.

Entretanto, é necessário aprofundamento das pesquisas para verificação das alterações do material que impactem suas características filtrantes. Este teste preliminar do TTRM no equipamento TELAB-100 visou verificar características e parâmetros gerais do processamento do resíduo de terra diatomácea para o estudo de viabilidade preliminar.

Da FIGURA 22, comparando-se (a1) da terra diatomácea virgem ou bruta e (a2) do sólido residual calcinado, ambas com aumento de 1000x, observa-se aproximação entre as partículas. Na FIGURA 23 em (b1) e (b2), ambas com aumento maior de 4000x, observa-se que não houve sinterização do material, ou que não houve fusão com junção a agregação entra as partículas na diatomita calcinada.

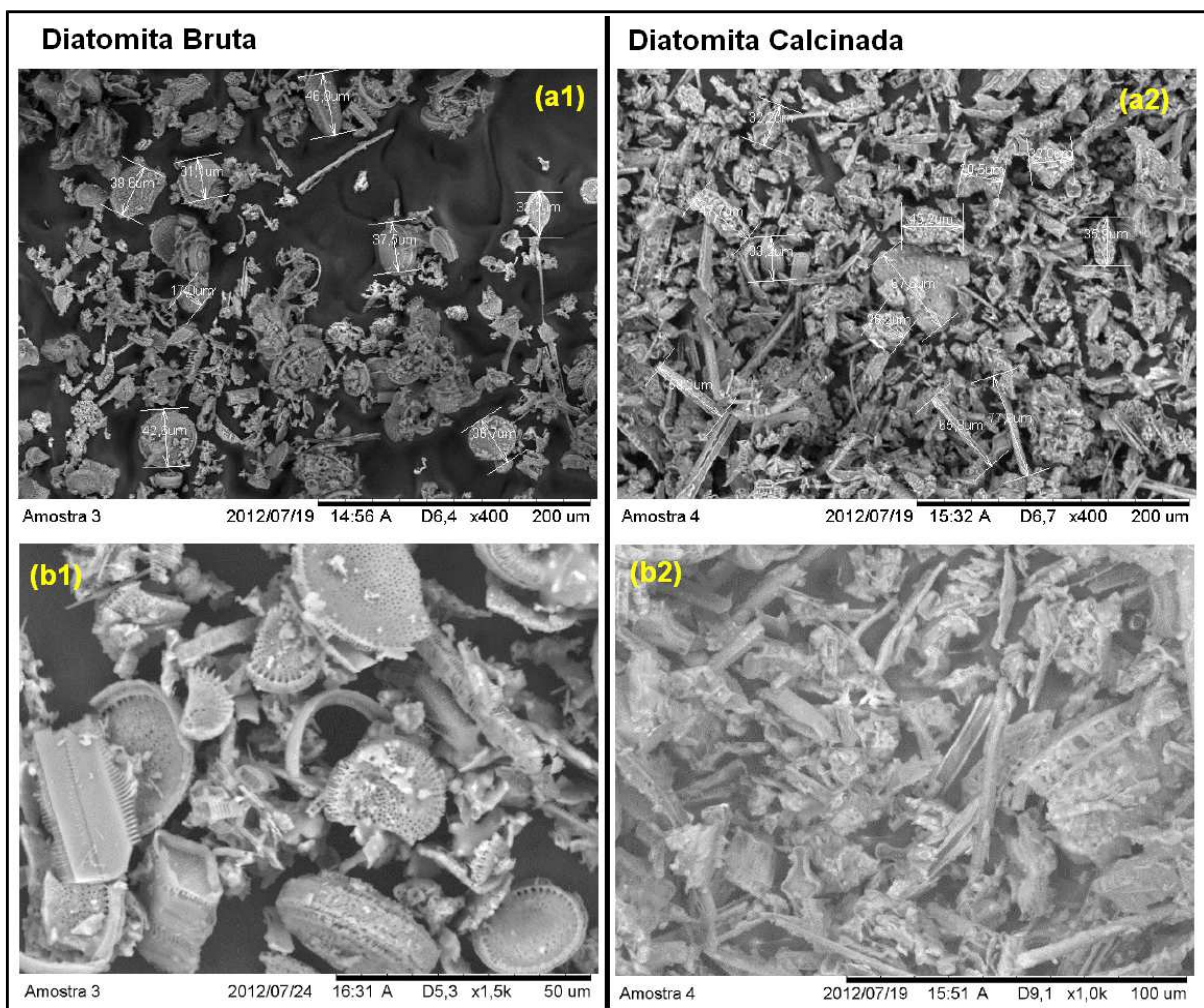


FIGURA 22 Imagens por MEV: Diatomita bruta (1) x Diatomita calcinada (2): (a1) e (a2) ampliação de 400x; (b1) ampliação de 1500x e (b2) ampliação de 1000x

Para aumentos de 3.000x e 4.000x (FIGURA 23), observa-se manutenção da microestrutura que corrobora para a tese de que o RTD tratado termicamente nessas condições possa retornar ao processo de filtragem de biodiesel e mantendo suas propriedades filtrantes.

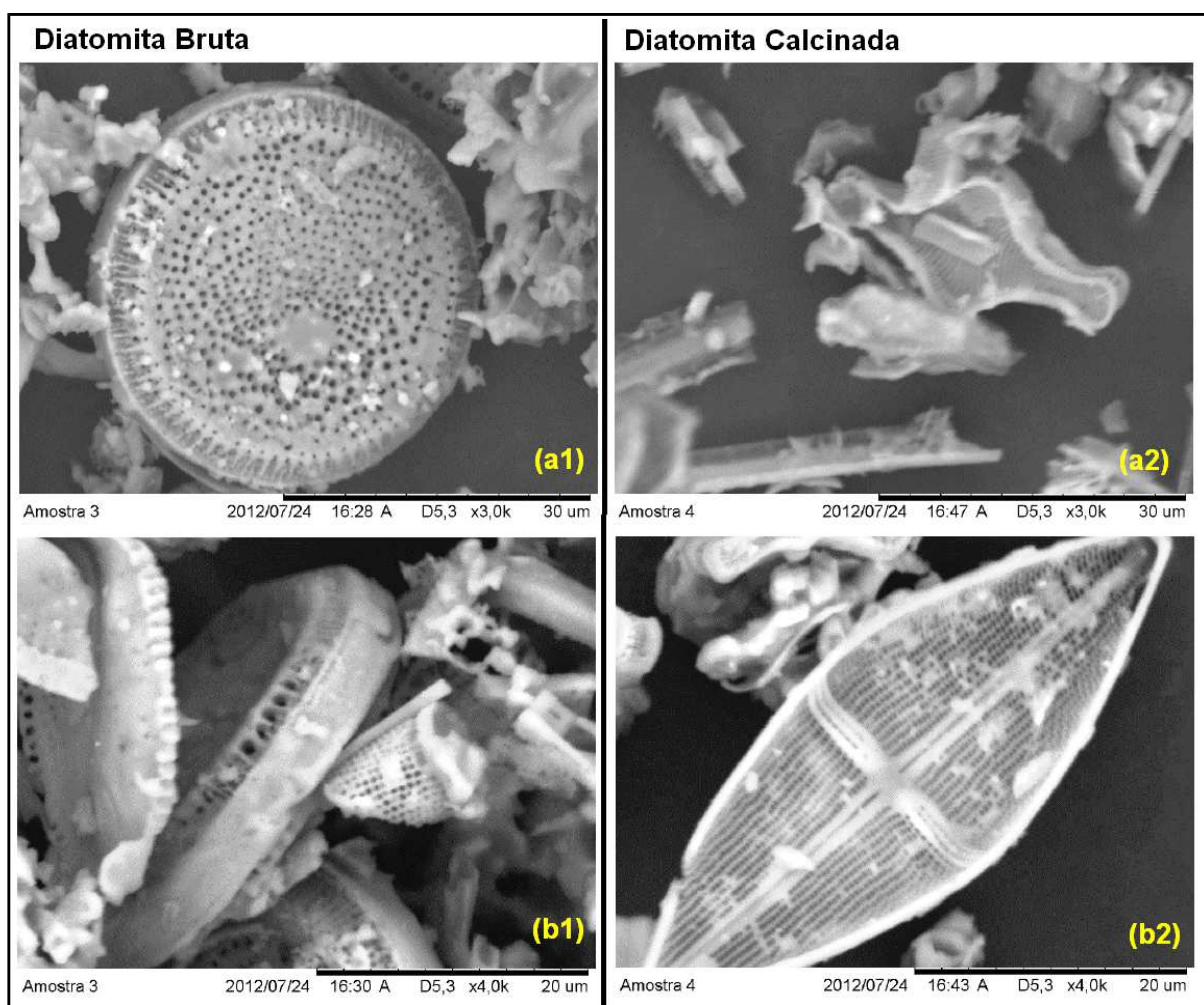


FIGURA 23 Imagens por MEV: Diatomita bruta (1) x Diatomita calcificada (2): (a1) e (a2) ampliação de 3000x; (b1) e (b2) ampliação de 4000x

3.1.2.3. Microanálise Química por Microsonda Eletrônica EDSs – Teste no TELAB-100

A FIGURA 24 e a FIGURA 26 apresentam análise química da diatomita bruta (virgem) onde se observam elevados picos de Silício (Si) e Oxigênio (O), com a presença dos elementos Carbono (C), Alumínio (Al), Potássio (K) e Cálcio (Ca). Os percentuais de massa são apresentados na FIGURA 25 e FIGURA 27.

Já na FIGURA 28 e a FIGURA 30 apresentam análise da diatomita calcinada onde se observam elevados picos de Silício (Si) e Oxigênio (O), com a presença dos elementos Carbono (C), Alumínio (Al), Sódio (Na) e Potássio (K). Os percentuais de massa são apresentados na FIGURA 29 e FIGURA 31.

Tanto para a diatomita bruta (virgem) como para a diatomita calcinada, infere-se que a presença preponderante dos elementos Oxigênio, Silício e Alumínio estão associados à presença dos óxidos SiO_2 e Al_2O_3 , típicos de material diatomáceo. A composição se refere a análise do espectro obtido à superfície microscópica de aplicação, podendo haver outros constituintes.

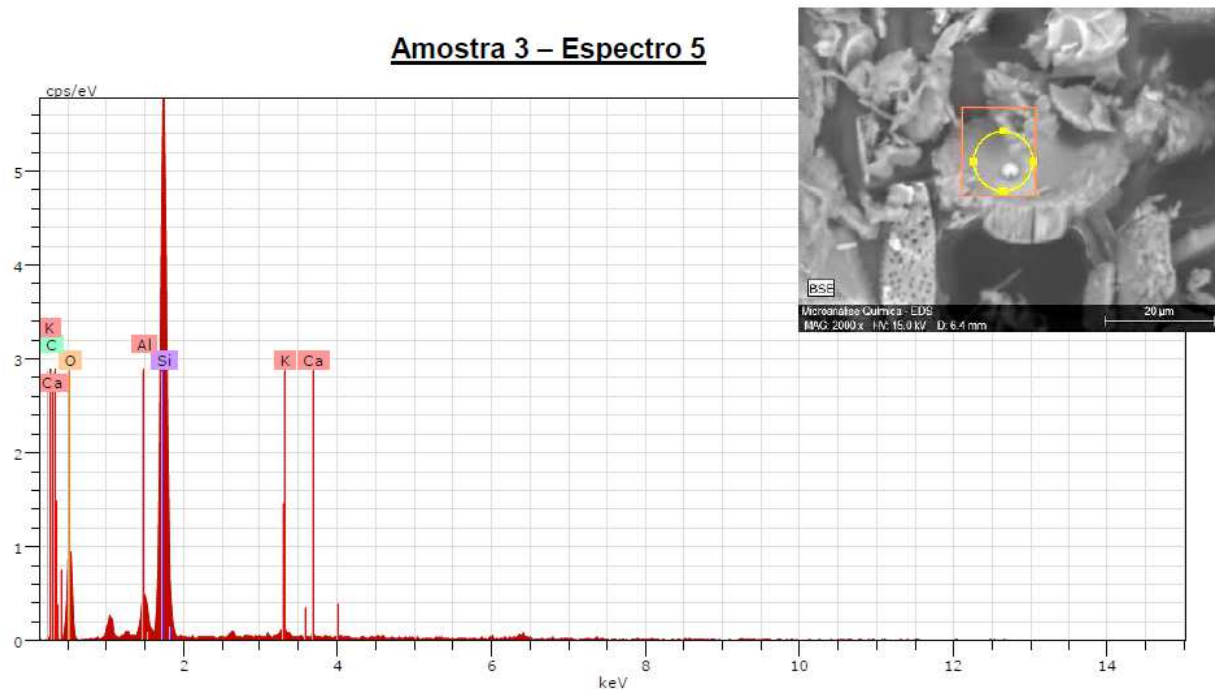


FIGURA 24 Diatomita bruta - Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS)

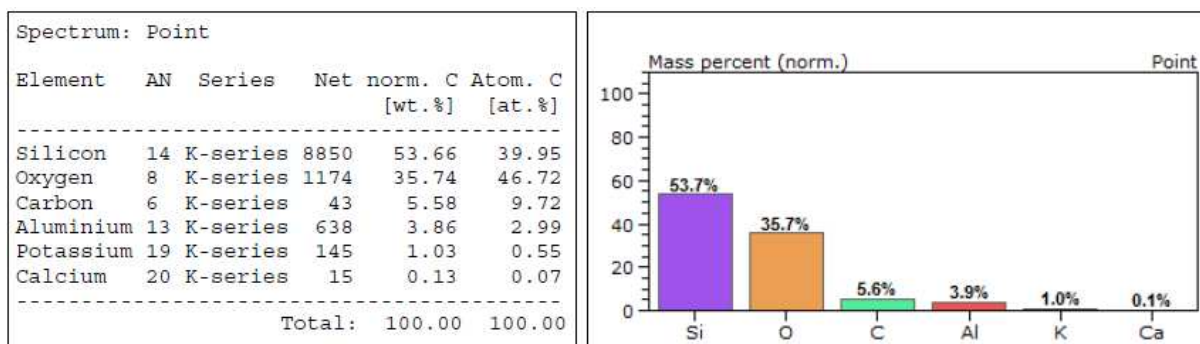


FIGURA 25 Diatomita bruta – resultados da Microanálise Química

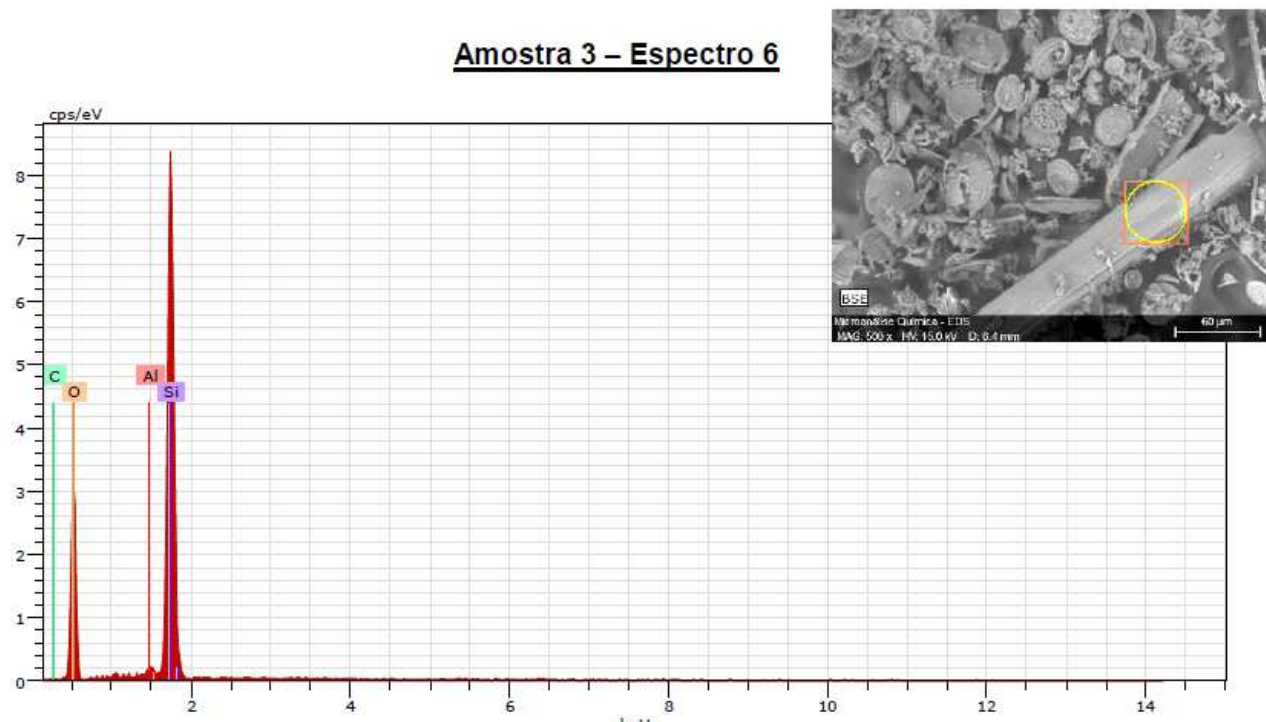


FIGURA 26 Diatomita bruta - Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS)

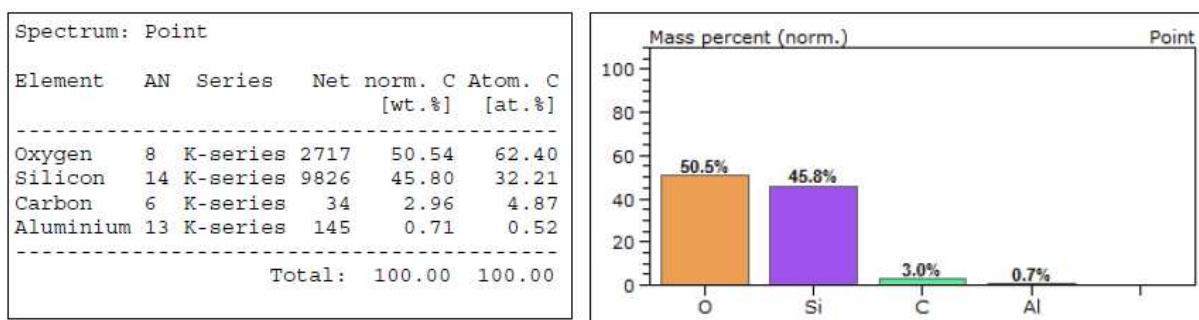


FIGURA 27 Diatomita bruta – resultados da Microanálise Química.

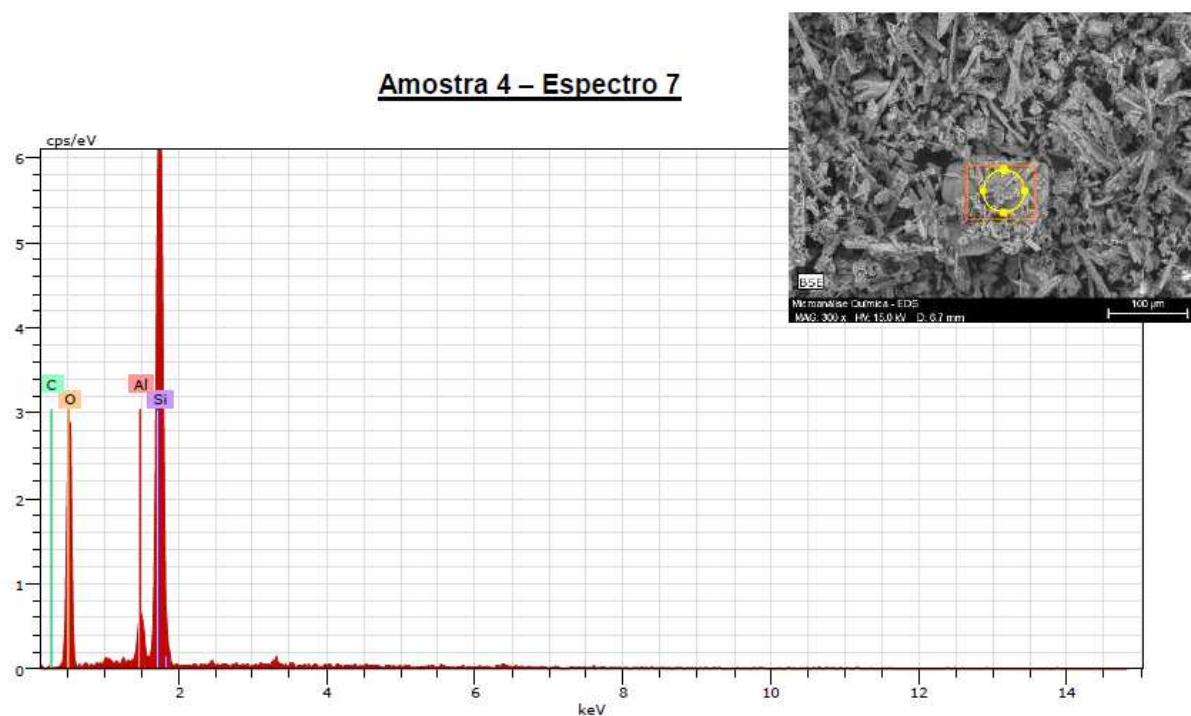


FIGURA 28 Diatomita calcinada- Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS)

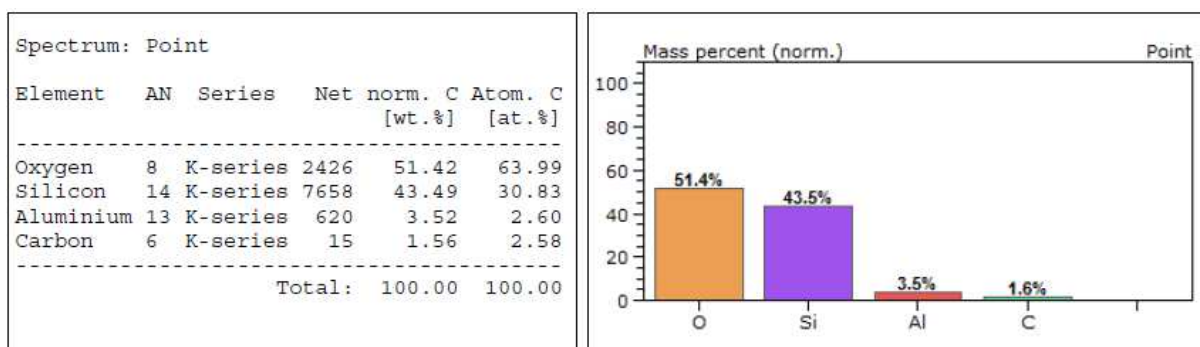


FIGURA 29 Diatomita calcinada – resultados da Microanálise Química.

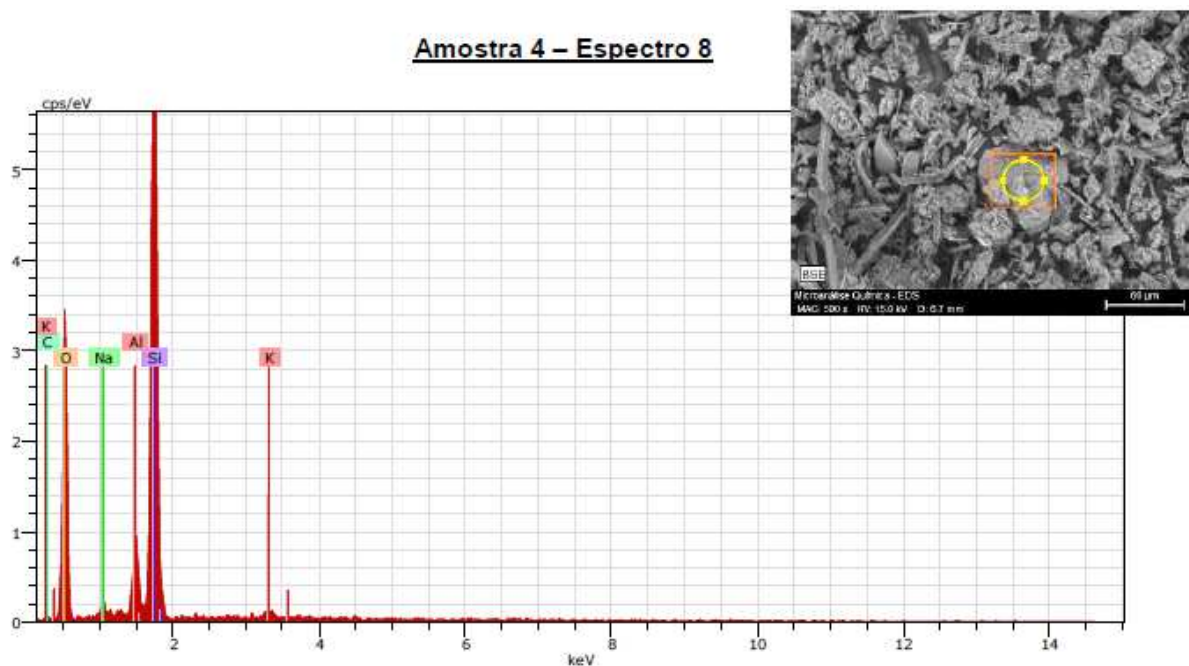


FIGURA 30 Diatomita calcinada- Espectro obtido através da Microsonda Eletrônica (EDS)

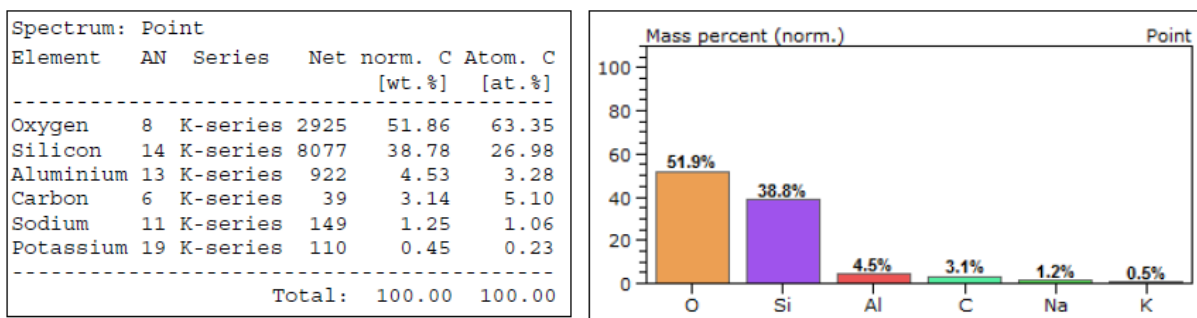


FIGURA 31 Diatomita calcinada – resultados da Microanálise Química.

3.2. Dimensão Econômica

A análise da dimensão econômica foi realizada para cada cenário considerado (item 2.2.3), tomando-se como base premissas técnicas (item 2.2.1), operacionais (item 2.2.2) e dados econômicos de referência (item 2.2.4), além de realizada análise de sensibilidade (2.2.5) com a variação dos principais fatores da composição de custos.

No item 3.2.1 são apresentados os indicadores econômicos para cada cenário estipulado de possibilidades de recuperação dos SR para fatores apresentados em 2.2.4. Dados Econômicos de Referência (tarifa de fornecimento de energia, custo da terra diatomácea virgem, salário mínimo de operação, investimento e outros).

Com a finalidade de verificar a variação desses fatores sobre os indicadores econômicos do projeto, foi realizada análise de sensibilidade com resultados em 3.2.2. Análise de Sensibilidade.

3.2.1. Proposta de equipamento de TTRM de capacidade de 75kg/h

Considerando as premissas adotadas em “2.2. Dimensão econômica“, seguem na TABELA 13 e na TABELA 14 os indicadores econômicos para cada cenário estabelecido.

TABELA 13 Equipamento de 75kg/h - Indicadores de Rentabilidade: Cenários Otimista, Promissor e Mais provável.

Indicadores de Rentabilidade – EVTE	Otimista SR 90	Promissor SR 70	Mais provável SR 50
Investimento	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77
Receita Líquida	R\$ 11.565.362,50	R\$ 9.753.391,36	R\$ 7.941.420,22
Valor Presente Líquido – VPL	R\$ 10.682.288,73	R\$ 8.870.317,59	R\$ 7.058.346,45
Taxa Interna de Retorno – TIR	130,94%	110,38%	89,78%
Taxa de Rentabilidade	1209,67%	1004,48%	799,29%
Prazo de Retorno do Investimento – anos	1	1	2

TABELA 14 Equipamento de 75kg/h – Indicadores de Rentabilidade: cenários menos provável, pessimista 1 e pessimista 2.

Indicadores de Rentabilidade – EVTE	Menos provável SR 20	Pessimista 1 SR 0	Pessimista 2 Aterro
Investimento	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77
Receita Líquida	R\$ 5.223.463,50	R\$ 3.411.492,36	R\$ 2.717.383,56
Valor Presente Líquido – VPL	R\$ 4.340.389,74	R\$ 2.528.418,60	R\$ 1.834.309,80
Taxa Interna de Retorno – TIR	58,56%	36,97%	28,21%
Taxa de Rentabilidade	491,51%	286,32%	207,72%
Prazo de Retorno do Investimento – anos	2	3	4

Para essa proposta de dimensionamento de equipamento de 75kg/h os indicadores econômicos são significativamente positivos em todos os possíveis cenários apresentados.

Destaca-se que mesmo para o cenário mais pessimista, o “Pessimista 2”, que o sólido residual resultante pós-processamento no TTRM não tenha aproveitamento algum, sendo todo enviado como rejeito para Aterro Industrial Classe IIA, o VPL é positivo, com uma rentabilidade que recupera mais que o dobro do capital investido.

A Taxa Interna de Retorno - TIR para o cenário mais pessimista é de 28,21%, o que representa algo extremamente positivo, bem superior à maioria das taxas de atratividade usualmente aplicadas para estudos de investimentos em projetos, que geralmente variam entre 10% e 20%, ou seja, mesmo no cenário mais pessimista a opção pela utilização do TTRM é mais rentável do que a opção por se investir o mesmo montante de recurso numa aplicação externa.

Para o cenário mais provável o capital investido é recuperado antes do segundo ano de investimento e a rentabilidade é de cerca de 800%.

É importante mencionar que a estimativa de custo foi feita com base de preços de um equipamento de escala semi-industrial, conforme PICKLER 2010, aplicada a metodologia de ajuste de capacidade de CONFORTO, 2011. Por ser um equipamento de escala semi-industrial, talvez um equipamento em escala industrial represente redução de investimento inicial no equipamento, o que pode resultar em indicadores econômicos ainda mais positivos.

A metodologia de estimativa de valor por ajuste de capacidade (item 2.2.4.5) pode apresentar algumas distorções, por isso é necessário levantamento real do investimento necessário para desenvolvimento de equipamento de capacidade de 75kg/h.

A taxa de utilização de 85%, conforme item “2.2.2. Premissas Operacionais“, proporciona um equipamento com capacidade de tratamento mensal de 46 toneladas, ou tratamento anual de 550 toneladas de resíduos, o que atende a usina de produção de biodiesel de referência adotada com geração anual de 480 toneladas de geração anual.

3.2.2. Análise de Sensibilidade

Nos itens seguintes estão apresentadas as variações nos Indicadores de Rentabilidade com a variação de aspectos que influenciam nos custos.

3.2.2.1. Análise de Sensibilidade: Valor do fornecimento de energia

No resultado apresentado no item 3.2.1 foi utilizado o valor de 222,50 R\$/kWh, média nacional de fornecimento de energia para o setor industrial e analisados os indicadores econômicos de viabilidade para os cenários estipulados.

Será analisada a sensibilidade dos indicadores econômicos com a variação das tarifas de fornecimento em termos regionais e considerando uma geração própria para o cenário “Mais provável SR 50” no item 3.2.2.1.1.

No item 3.2.2.1.2 são apresentados resultados da análise de sensibilidade para os demais cenários, com as taxas de energia sendo variadas em faixa de valores abrangentes.

3.2.2.1.1. Análise de Sensibilidade: Valor fornecimento de energia – Médias por região do país e geração própria

Para o cenário “Mais provável SR 50”, a aplicação do TTRM demonstrou ser viável com indicadores extremamente positivos, todos apresentando tempo de retorno do investimento dentro dos dois primeiros anos e Taxas de Rentabilidade que representam ganhos de cerca de 8 vezes o investimento inicial, conforme observado na TABELA 15 e na TABELA 16.

Para uma possível geração interna em localidade com disponibilidade de geração própria de energia, os indicadores se mostraram ainda mais positivos, com Taxa de Rentabilidade que representa ganho de cerca de 9 vezes o investimento inicial, e tempo de retorno do investimento já no primeiro ano de investimento, TABELA 15.

TABELA 15 Indicadores de Rentabilidade: Cenário mais provável SR50 – variação dos custos de fornecimento de energia por geração própria ou “interno”, e média para as regiões Centro-Oeste e Nordeste

Indicadores de Rentabilidade – EVTE	Interno 160 R\$/kWh	Centro Oeste 199,52 R\$/kWh	Nordeste 215,04 R\$/kWh
Investimento	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77
Receita Líquida	R\$ 8.899.296,43	R\$ 8.293.612,14	R\$ 8.055.752,32
Valor Presente Líquido – VPL	R\$ 8.016.222,66	R\$ 7.410.538,38	R\$ 7.172.678,55
Taxa Interna de Retorno – TIR	100,68%	93,79%	91,08%
Taxa de Rentabilidade	907,76%	839,18%	812,24%
Prazo de Retorno do Investimento – anos	1	2	2

TABELA 16 Indicadores de Rentabilidade: Cenário mais provável SR50 – variação dos custos de fornecimento de energia para as regiões Sul, norte e Sudeste

Indicadores de Rentabilidade – EVTE	Sul 215,23 R\$/kWh	Norte 226,22 R\$/kWh	Sudeste 232,02 R\$/kWh
Investimento	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77	R\$ 883.073,77
Receita Líquida	R\$ 8.052.840,38	R\$ 7.884.407,42	R\$ 7.795.516,51
Valor Presente Líquido – VPL	R\$ 7.169.766,61	R\$ 7.001.333,66	R\$ 6.912.442,74
Taxa Interna de Retorno – TIR	91,05%	89,13%	88,12%
Taxa de Rentabilidade	811,91%	792,84%	782,77%
Prazo de Retorno do Investimento – anos	2	2	2

A FIGURA 32 mostra em gráfico o comparativo entre o investimento inicial necessário e a receita líquida com a opção pelo TTRM para tratamento do RTD.

Apesar de o equipamento funcionar a base de energia elétrica, observa-se que o TTRM é viável para todas as regiões do país nas condições consideradas, e que uma geração interna própria de energia a custos mais baixos corroboram para um retorno ainda mais positivo.

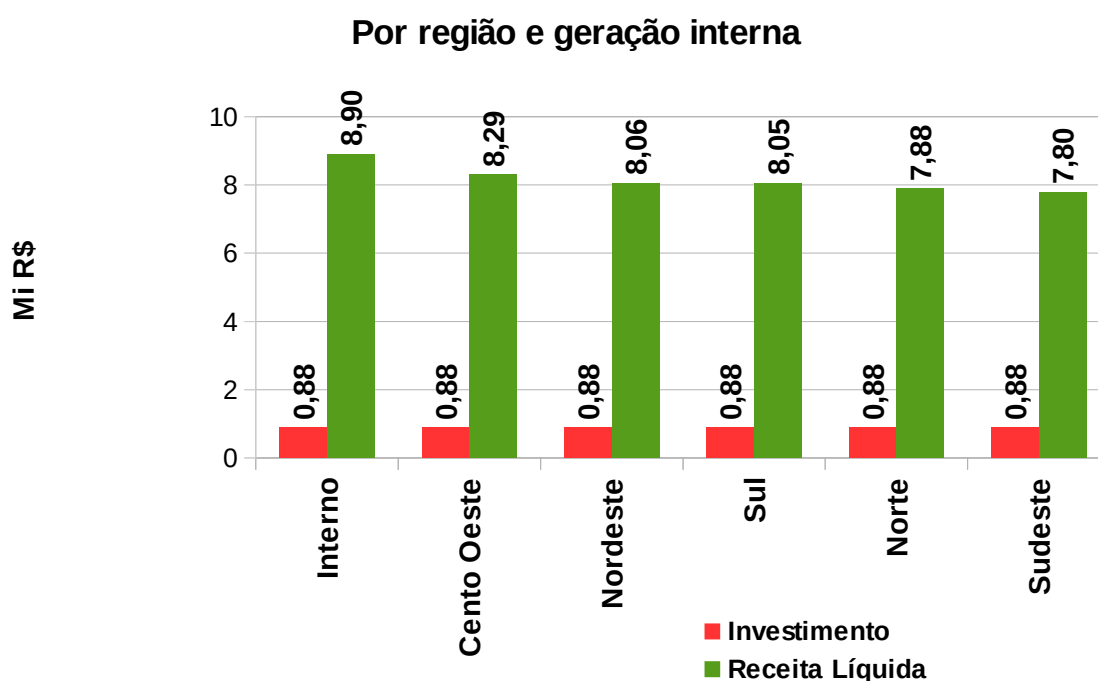


FIGURA 32 Indicadores de Rentabilidade – Investimento x Receita Líquida – Variação de custos regionais de energia e geração própria

3.2.2.1.2. Análise de Sensibilidade da taxa de energia por cenários de referência

Observa-se na FIGURA 33 que para as faixas usuais de taxas de fornecimento energia, que variam entre 150 R\$/MWh a 300 R\$/MWh, o VPL é sempre positivo mesmo para o cenário mais negativo da aplicação do TTRM. Ou seja, mesmo não havendo aproveitamento algum do sólido residual processado e tudo disposto em aterro industrial de classe IIA, a opção pelo TTRM gera retornos econômicos.

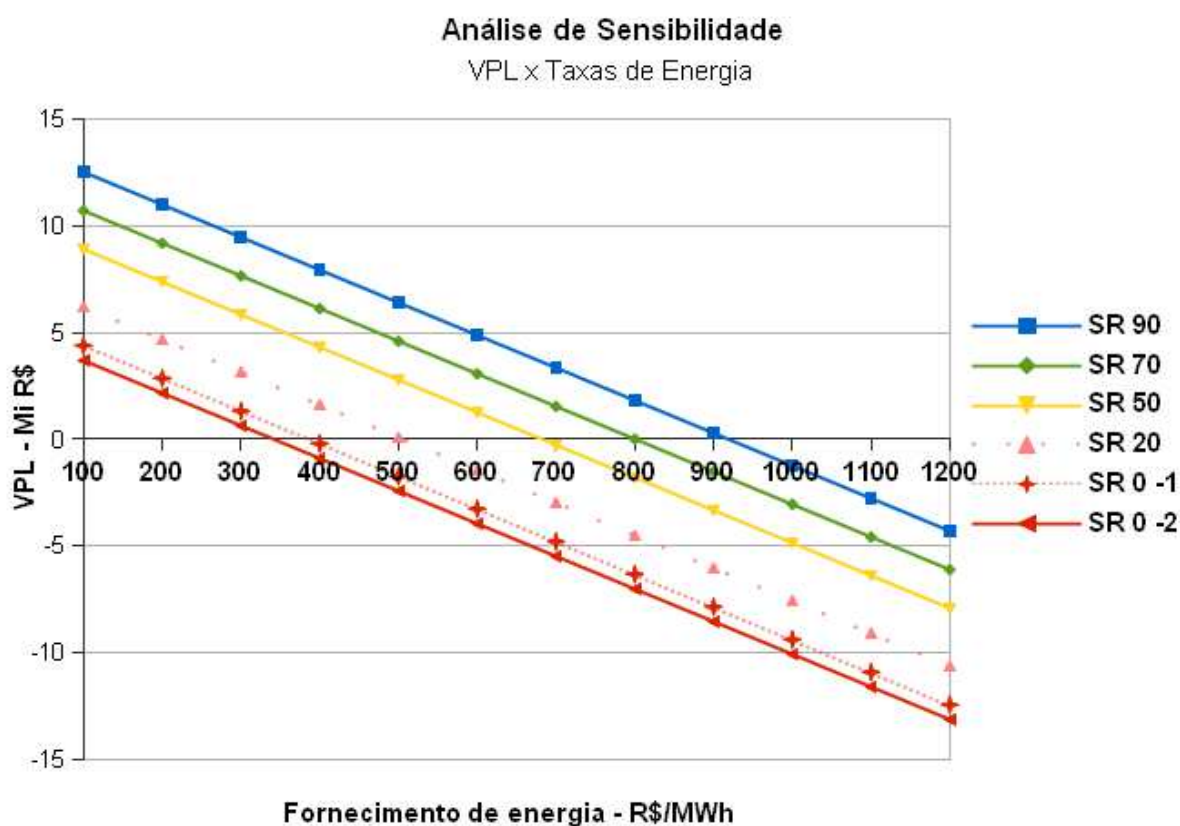


FIGURA 33 Análise de Sensibilidade: VPL x Fornecimento de Energia

3.2.2.2. Análise de Sensibilidade: VPL x Tecnologia de tratamento competitiva

No resultado apresentado no item 3.2.1 foi utilizado o valor de 1.400,00 R\$/ton para o tratamento da tecnologia competitiva, esse valor vem sendo contabilizado como um “custo evitado”, com a ideia de que na opção por se utilizar o TTRM estar-se-ia deixando de utilizar a tecnologia de tratamento dita “competitiva” e assim economizando recursos.

A FIGURA 34 apresenta o comportamento do VPL com a variação dos custos da tecnologia competitiva e a TABELA 17 apresenta os valores da tecnologia competitiva a partir dos quais o VLP se torna positivo.

Observa-se que para os cenários SR 90, SR 70 e SR 50, mesmo para um custo nulo de tratamento da tecnologia competitiva, ou seja, se a destinação do resíduo fosse “de graça” pelo mercado, o VPL se apresenta sempre positivo, ou seja, a receita obtida com o custo evitado do percentual de Terra Diatomácea que retorna ao processo para filtragem cobre os custos de implantação e operação do equipamento de TTRM em seu tempo de vida útil. Isso representa que para esses cenários o TTRM é sempre vantajoso se comparado a qualquer tecnologia de destinação de resíduos disponível no mercado, mesmo que essa tecnologia representasse custo zero de destinação. Assim, por exemplo, para esses cenários, mesmo que o RTD fosse doado (a um custo zero), não seria vantagem essa doação, seria mais vantajosa a opção pela aplicação do TTRM.

Considerando-se os piores cenários SR 20, SR 0 -1 e SR 0 -2, os valores dos custos de tratamento da tecnologia competitiva são respectivamente 495,95 R\$/ton, 873,25 R\$/ton e 1.017,92 R\$/ton, compatíveis às faixas de tratamento de tecnologias convencionais presentes no mercado, como incorporação em cerâmica, coprocessamento em cimenteiras e incineração, incluídos os custos de transporte.

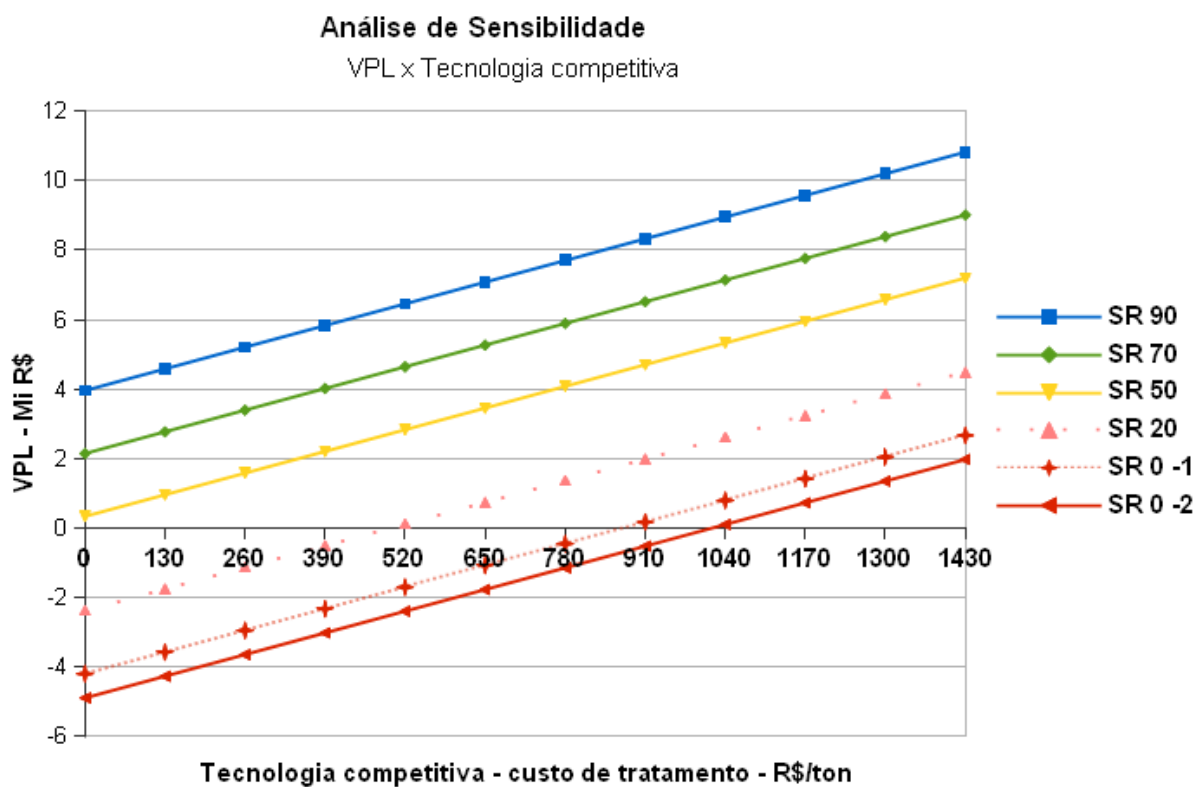


FIGURA 34 Análise de Sensibilidade: VPL x Tecnologia competitiva

TABELA 17 Cenários x Valor de R\$/ton que torna VPL positivo

Cenário	Tecnologia competitiva – Custo do tratamento*
SR 90	VPL sempre positivo
SR 70	VPL sempre positivo
SR 50	VPL sempre positivo
SR 20	495,95 R\$/ton
SR 0-1	873,25 R\$/ton
SR 0-2	1.017,92 R\$/ton

* Valor acima do qual o VPL se torna positivo

3.2.2.3. Análise de Sensibilidade: VLP x Capacidade do TTRM

O resultado apresentado em 3.2.1 foi utilizado o valor de 75 kg/h como referência, característica que resultava numa taxa de utilização de 75% para atender a uma planta de produção de biodiesel de referência que possua a geração mensal de 480 toneladas.

Para cálculo da capacidade máxima anual de tratamento do equipamento foi considerada uma taxa de utilização de 85%, assim, o equipamento de referência teria uma capacidade de tratamento de 560 toneladas anuais, o que atende a planta de referência.

Para a análise de sensibilidade estão variadas as capacidades de tratamento do TTRM, que impacta diretamente nos custos do equipamento (vide item 2.2.4.5), porém reduz-se a hora de necessária de operação para atender ao tratamento de uma geração mensal de 40 toneladas, reduzindo os gastos com a mão de obra para operação.

A FIGURA 35 apresenta o comportamento do VPL com a variação da capacidade de tratamento do equipamento do TTRM e a TABELA 18 apresenta os valores da capacidade do tratamento a partir dos quais o VPL se torna positivo, bem como as respectivas capacidades anual, taxas de utilização e utilização de dias no mês em cada capacidade.

Observa-se que para o pior cenário SR 0 -2, "Pessimista 2", o valor de 184kg/h de capacidade do TTRM que torna o VPL negativo gera uma ociosidade de 68,5% (ou taxa de utilização de 31,5%), ou seja, a capacidade do equipamento está fazendo o mesmo funcionar apenas 9,4 dias no mês para atender a uma geração de 40 toneladas de RTD por mês de uma usina genérica adotada.

Para os demais cenários as taxas de utilização do equipamento são ainda menores que o SR 0 -2, o que demonstra que dimensionamento nessas capacidades maiores não seriam ideais, tanto pelo ponto de vista da ociosidade que ficaria o equipamento, como pelo indicador de viabilidade econômica para a usina de referência (de geração anual de 480 toneladas ou mensal de 40 toneladas).

Caso a geração de resíduos de terra diatomácea fosse maior que a referência adotada de 40 toneladas mensais, caberia a escolha por equipamento de maior capacidade, que não necessariamente diminuiria o VPL, pois haveria aumento da receita pela maior receita oriunda de maior beneficiamento de resíduos de terra diatomácea.

Para a faixa adotada de um equipamento de capacidade de 75kg/h, os indicadores econômicos se apresentam positivos para todos os cenários adotados, do mais otimista ao mais pessimista.

Dimensionar a capacidade do equipamento de TTRM para atender a cada situação distinta pode, em princípio, otimizar os retornos econômicos. Porém para cada dimensionamento pode demandar projetos específicos, encarecendo o custo de produção. A adaptação do custo do equipamento pela sua capacidade pode não fornecer o custo exato, porém é metodologia usualmente utilizada em EVTE quando não se possui detalhes dos custos para fabricação do equipamento.

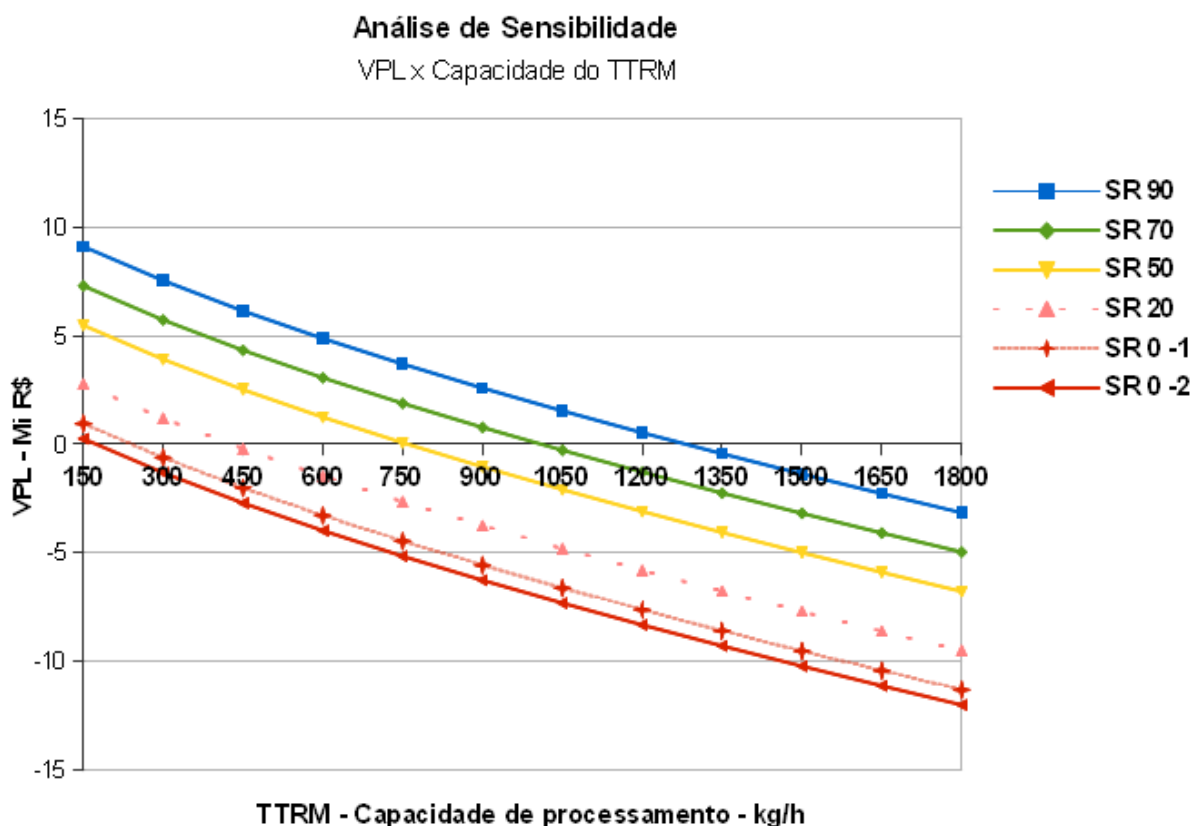


FIGURA 35 Análise de Sensibilidade: VPL x Capacidade do TTRM

TABELA 18 Cenários x Valor capacidade que torna VPL positivo

Cenário	TTRM Capacidade*	Capacidade total anual**	Taxa de utilização***	Funcionamento em dias no mês***
SR 90	1.283 kg/h	9.553 ton	4,2%	1,3
SR 70	1.011 kg/h	7.528 ton	5,4%	1,6
SR 50	760 kg/h	5.659 ton	7,2%	2,2
SR 20	428 kg/h	3.187 ton	12,8%	3,8
SR 0 -1	240 kg/h	1.787 ton	22,8%	6,8
SR 0 -2	174 kg/h	1.296 ton	31,5%	9,4

* Valor abaixo do qual o VPL se torna positivo

** Capacidade total do equipamento com taxa de utilização de 85%

*** Taxa de utilização considerando uma usina de produção anual de 480 ton de resíduos de Terra Diatomácea e mês com trinta dias

3.2.2.4. Análise de Sensibilidade: VPL x Energia x Eficiência Energética x Capacidade x Destinação Rejeito x Depreciação x Valor Biodiesel x Terra Diatomácea Virgem x Tecnologia Competitiva x Geração de Resíduos

Adotando-se todos os fatores com faixa de variação percentual de 25% para mais e para menos, obtém-se o chamado gráfico *spider* na FIGURA 36.

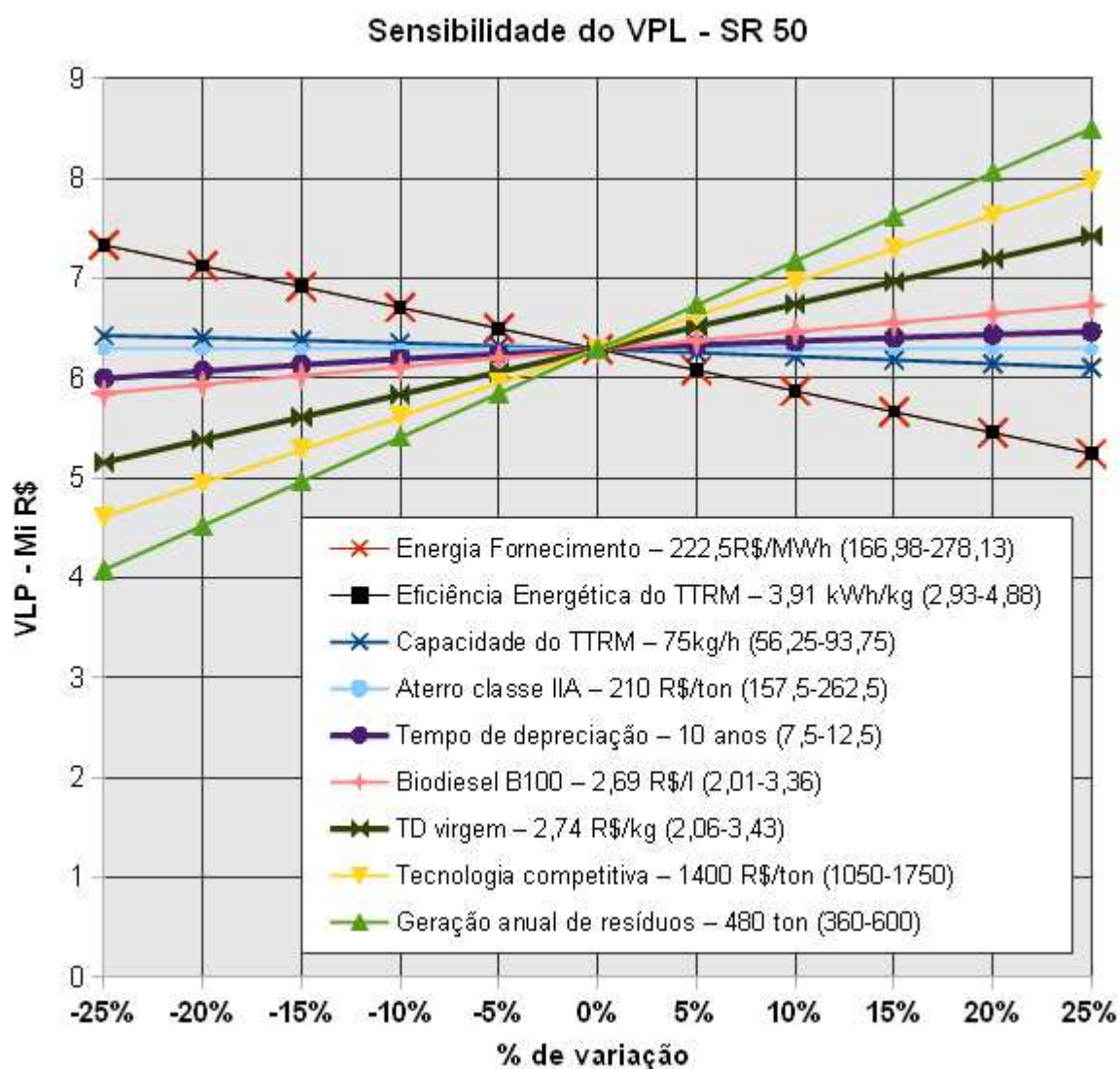


FIGURA 36 Gráfico spider – Cenário SR 50 - Análise de Sensibilidade: VPL x Energia x Capacidade TTRM x Aterro custo x Depreciação x Valor Biodiesel B100 x Terra Diatomácea virgem x Tecnologia competitiva x Geração anual de resíduos

Os 4 fatores mais sensíveis que geram maiores variações no VPL para o cenário SR 50 são, de maior para menor sensibilidade: geração anual de resíduos, tecnologia competitiva, valor da terra diatomácea virgem e fornecimento de energia.

Esses quatro fatores de maior sensibilidade estão apresentados na FIGURA 37 para todos os demais cenários. Observa-se que, aplicando-se essa faixa de variação dos fatores de entrada, o VPL se apresenta majoritariamente positivo, apresentando-se negativo apenas para o cenário mais pessimista para uma variação negativa em faixa maior que 15% do fator do custo da tecnologia competitiva. Ou seja, num cenário em que ocorre utilização do TTRM em que nada se poderia aproveitar do material processado com envio de totalidade para aterro industrial classe IIA , onde os custos evitados seriam pequenos se a tecnologia competitiva estiver abaixo de 1.017 reais. Porém, esse é o cenário SR 0 -2, "Pessimista 2", o mais desvantajoso e improvável.

De acordo com a definição da Política Nacional de Resíduos Sólidos, só deve ser encaminhado para aterros os rejeitos, ou seja, resíduos que tiveram esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, o que dificilmente deverá ser aplicado ao SR resultante do tratamento no TTRM, pois existem múltiplas possibilidades a serem verificadas posteriormente, desde o potencial de reutilização como material filtrante no mesmo ou em outro processo, ou até mesmo outro uso seja como material agregado de cobertura ou outro.

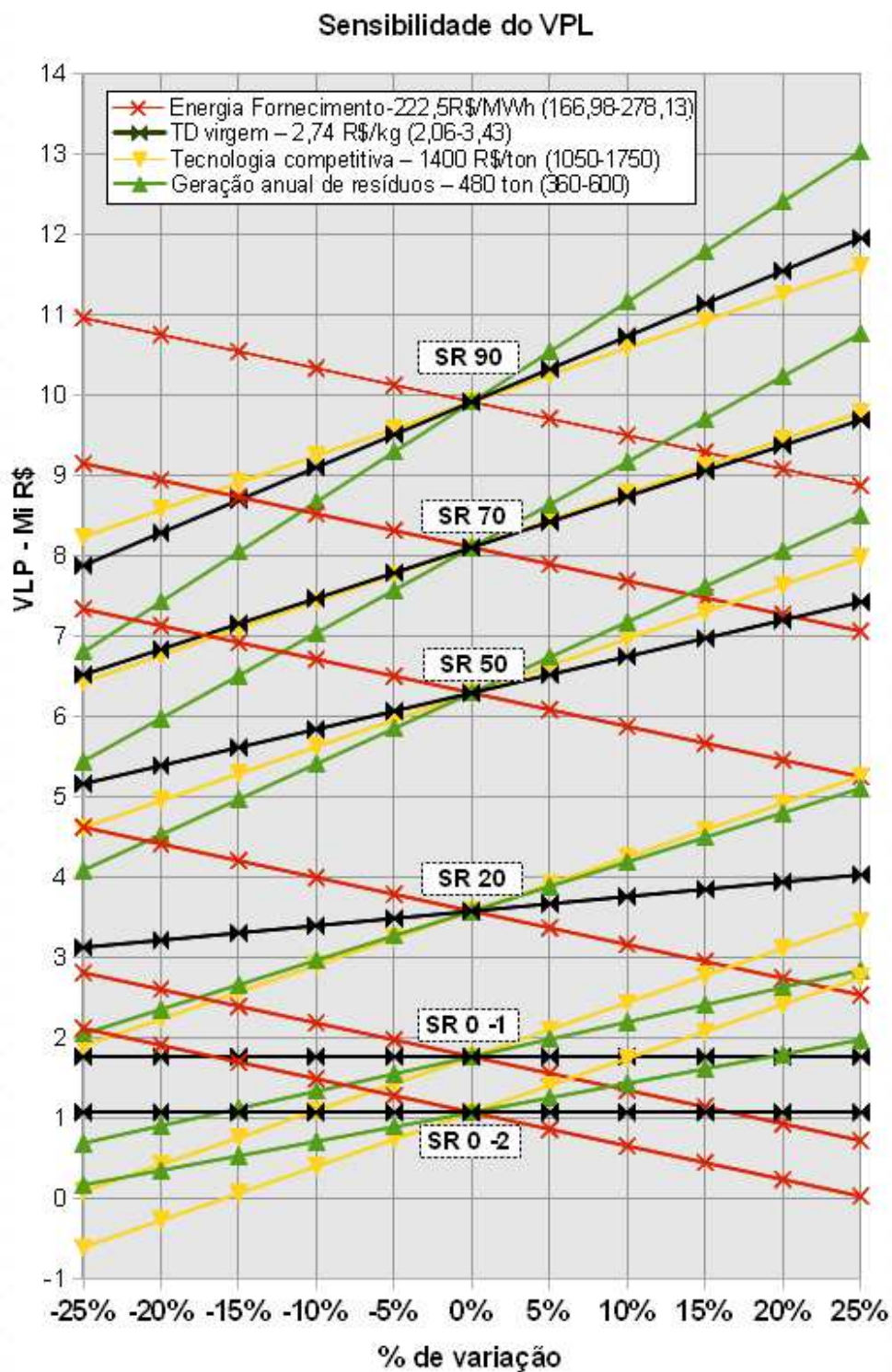


FIGURA 37 Gráfico *spider* – Todos os cenários - Análise de Sensibilidade: VPL x Energia x Terra Diatomácea virgem x Tecnologia competitiva x Geração anual de resíduos

3.2.2.5. Análise de sensibilidade: Cenários x Taxa interna de Retorno

A FIGURA 38 apresenta os valores possíveis do indicador econômico da Taxa Interna de Retorno - TIR, dadas as correspondentes combinações de variáveis possíveis, estendendo-se do cenário otimista até o pessimista.

Observa-se que quase a totalidade do intervalo se posiciona na zona de aceitação do TTRM, no limite de Aprovação/Rejeição em 0%, com o valor esperado dentro dessa zona, e faixa significativamente pequena envolvendo a zona de rejeição, podendo-se concluir que há maiores chances de a opção de processamento dos resíduos de terra diatomácea constituir uma opção economicamente viável.

Adotando-se Taxa Mínima de Atratividade – TMA de até 15% (na FIGURA 38, em pontilhado rosa), usualmente aplicada em investimentos, observa-se que para as zonas do gráfico com a TIR acima de 15% o VPL será positivo em maior área do gráfico, além de englobar toda faixa em amarelo (a “faixa esperada”).

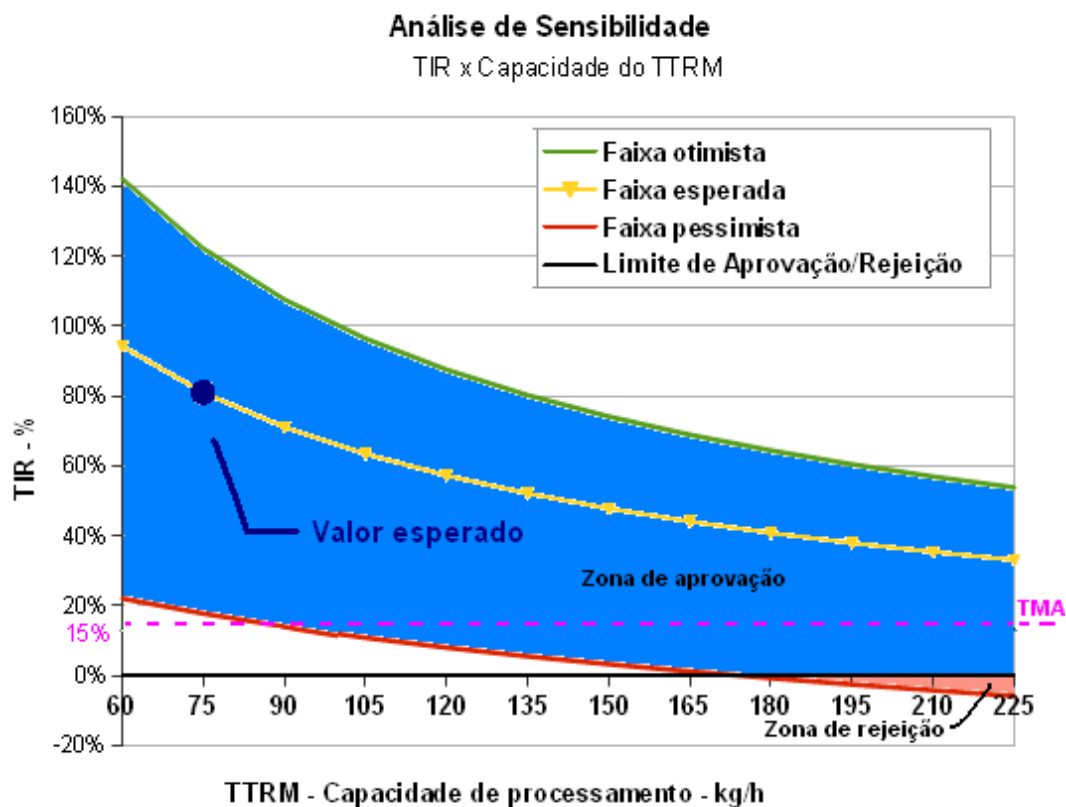


FIGURA 38 Análise de Sensibilidade: TIR x Capacidade

3.3. Dimensão ambiental

A opção pelo TTRM para utilização por uma usina de biodiesel se aproxima muito mais de uma nova unidade de processo de produção do que uma opção de destinação de resíduos, já que o TTRM poderia ser adaptado fisicamente ao esquema de processamento, ou seja, alocada como extensão da unidade de processo.

Assim, do ponto de vista ambiental, o TTRM pode minimizar a geração de resíduos, se encarado como uma unidade de processo, após realizados os devidos testes para verificação do percentual possível de retorno do material processado para o mesmo processo de polimento final do biodiesel.

A TABELA 8 apresenta o resultado consolidado do ponto de vista ambiental dos aspectos estabelecidos para escolha de opção de destinação de resíduos. Comparado a outras formas de destinação convencionais disponíveis, como aterro industrial classe I, coprocessamento e incineração, o TTRM se apresentou como uma opção mais vantajosa, já que corrobora para redução do volume e da periculosidade dos resíduos gerados, além de possuir baixo potencial de geração de passivo e constituir uma solução local, eliminando riscos de transporte e de eventuais passivos ambientais.

Considerando a PNRS, a opção pelo TTRM como uma unidade de processamento também está alinhada com a definição de envio para aterros somente de rejeitos, visando esgotar todas as possibilidades de recuperação e tratamento por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis.

Para controle de emissões, conforme PICLKER, 2010, o TTRM possui sistema de controle de emissões com lavadores de gases patenteado, desenvolvido e testado para o TELAB 100, que deve incorporar o mesmo conceito para um equipamento a ser aplicado para o tratamento dos resíduos de terra diatomáceas.

4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo de viabilidade preliminar aponta para retornos positivos para a totalidade dos cenários estipulados nas condições esperadas. A rentabilidade varia de 1.210% para o cenário “otimista” e 208% para o cenário mais pessimista, sendo de 800% para o cenário considerado “mais provável”.

Verificou-se que os indicadores permanecem em quase que sua totalidade positivos após realizada análise de sensibilidade com a variação dos principais fatores de entrada das condições esperadas, sejam elas: a taxa de fornecimento de energia elétrica; eficiência energética do TTRM; capacidade do TTRM; custo de disposição final em aterro classe IIA; o tempo de depreciação do equipamento; o valor do biodiesel B100; valor da terra diatomácea virgem; o valor do tratamento da tecnologia de tratamento competitiva e a geração anual de resíduos da usina de biodiesel genérica.

A capacidade do equipamento de 75kg/h atende o processamento dos resíduos de terra diatomácea para a usina genérica adotada, além de proporcionar indicadores positivos para todos os possíveis cenários apresentados de reaproveitamento do sólido residual, isso sem considerar a possibilidade de aplicação a outros tipos de resíduos (britas contaminadas, etc) podendo proporcionar indicadores ainda mais positivos, devendo ser considerado a aplicação quando em uma usina específica.

Após a aplicação do TTRM, o resíduo perdeu a característica de periculosidade, deixando de ser inflamável, o que resulta menores riscos do ponto de vista operacional e ambiental, além redução do custo de destinação do resíduo não perigoso.

Não se verificaram alterações microscópicas significativas entre a diatomita virgem e o sólido residual (o resíduo de terra diatomácea tratado no TTRM), que pode contribuir para a tese de que o sólido residual (o RTD tratado no TTRM) possa ser reaproveitado para o mesmo processo de filtragem ou outros usos.

A aplicação do TTRM por unidades industriais de fabricação de biodiesel para processamento de RTD está alinhada a Política Nacional de Resíduos Sólidos,

seja no seu objetivo de redução de volume dos resíduos (com o potencial retorno para o mesmo ou para outros processos) ou na redução da periculosidade dos resíduos quando o RTD tratado no TTRM não apresentou características de inflamabilidade.

A metodologia de estimativa de valor por ajuste de capacidade pode apresentar algumas distorções, por isso é necessário levantamento real do investimento necessário para desenvolvimento de equipamento de capacidade requerida para cada situação a ser atendida, que pode ser impactado, por exemplo com a cotação do dólar, variáveis de taxas, dentre outros. Além do que, ajustes de escala do equipamento podem não ser tão simples, pois não necessariamente aumentando a escala do equipamento haverá manutenção das condições operacionais na mesma escala, que deve ser foco de desenvolvimento e pesquisa.

Para continuidade dos estudos de otimização operacional, além da busca por otimizações em termos eficiência energética do equipamento, o que tornaria os indicadores ainda mais positivos, é recomendável aproximação das condições de processo TTRM ao do beneficiamento da diatomita bruta para fabricação da Terra Diatomácea, o que poderia corroborar para o aumento do percentual a ser reaproveitado no processo de filtragem.

O estudo de viabilidade preliminar aponta para retornos positivos para os cenários estipulados, o que justifica a verificação dos potenciais usos do sólido residual pós-processamento do TTRM e a busca da otimização operacional do equipamento com vistas a obtenção de indicadores ainda mais positivos do que os apresentados.

REFERÊNCIAS

ABNT, Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT-NBR 13.600:1996: *Solo – determinação do teor de matéria orgânica por queima a 440°C*. Rio de Janeiro, 1996. 2 p.

ALBRECHT, Albrecht Equipamentos Industriais Ltda. *Avaliação Preliminar de Terra Diatomácea Contaminada* – Boletim de ensaio, MA101/11, 2011.

ALBRECHT, Albrecht Equipamentos Industriais Ltda. *Relatório de Atividades 01-2012*, 2012.

ANEEL, 2014, Agência Nacional de Elergia Elétrica. www.aneel.gov.br – Tarifas de energia - acessado em 12 fevereiro 2014.

BARROS, R. M. *Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012

BASTOS, B. G (Org.) . *Manual de Análise Empresarial de Projetos de Investimento*. Disponível em <http://www.ceunes.ufes.br/downloads/2/juniorsan-Texto%2000-%20Manual%20BR%20-Petrobr%C3%A1s.pdf>, acesso em: 05/02/2014. PETROBRAS, 2006.

BIERMAN, H. Jr ; SMIDT, S. *The Capital Budgeting Decision – Economic Analysis of Investment Projects*. Prendice-Hall, Inc., 8th Edition, 1993.

BP, *British Petroleum. Statistical Review of World Energy 2013*. Disponível em <http://www.bp.com/en/global/corporate/about-bp/energy-economics/statistical-review-of-world-energy-2013/statistical-review-downloads.html>, acesso em: 26/01/2014. *British Petroleum*, 2013.

CONFORTO, S. *A Engenharia de Custos na Viabilidade Econômica de Empreendimentos Industriais*. Rio de Janeiro: Taba Cultural, 2011.

COSTA, F. C. *Perspectivas da incineração de resíduos de serviços de saúde com o uso de atmosferas ricas em oxigênio*. Dissertação de Mestrado. SÃO CAETANO DO SUL, São Paulo. 2007.

DE PAULA, A. J. A.; KRÜGEL, M.; MIRANDA, J. P.; ROSSI, L. F. S.; NETO, P. R. C. *Utilização de Argilas para purificação de Biodiesel*. Química Nova. Vol 34, N.1, 91-95, 2011.

EDIZ, Nezahat; BENTLI, İsmail; TATAR, İlknur. *Improvement in filtration characteristics of diatomite by calcination*. Elsevier - *International Journal of Mineral Processing*, n94, p.129-134, 2010.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional 2013 – Ano base 2012: Relatório Síntese*. Disponível em https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2013_Web.pdf. 2013.

FACCINI, Candice Schmitt. *Uso de adsorventes na purificação de biodiesel de óleo de soja*. Dissertação (Mestrado em Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre, 2008. 81 p.

FRANÇA, Sílvia Cristina Alves; LUZ, Adão Benvindo da; INFORÇATI, Paulo Francisco. *Diatomita*. Centro de Tecnologia Mineral - Ministério da Ciência e Tecnologia Coordenação de Processos Mineraiis - COPM CT2005-134-00 Comunicação Técnica elaborada para Edição do Livro Rochas & Mineraiis Industriais: Usos e Especificações. p. 399-411, Rio de Janeiro, 2005.

GOULART, M. R.; SILVEIRA, C. B.; CAMPOS, M. L.; ALMEIDA, J.A. *Metodologias para reutilização do resíduo de terra diatomácea, proveniente da filtração e clarificação da cerveja*. Química Nova, v. 34, p. 625-629, 2011.

IBRAHIM, S.S; SELIM, A.Q. *Evaluation of Egyptian diatomite for filter aid applications*. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*. v.47, p.113-122, 2011.

LOPES, H.; MASIERO, G. *Etanol e biodiesel como recursos energéticos alternativos: perspectivas da América Latina e da Ásia*. Revista Brasileira de Política Internacional: n.51(2): 60-79, 2008.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J [coords]. *Biocombustíveis: volumes 1 e 2*. Editora Interciência. 1200 p. Rio de Janeiro, 2012.

MMA, Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos – Verão Preliminar para Consulta Pública - Setembro de 2011*. Disponível em www.mma.gov.br. Acessado em janeiro de 2013. Brasília, 2011.

NDEQ, Nebraska Department Of Environmental Quality - *Waste Tips for Biodiesel Fuel Plants. Environmental Guidance Document. Produced by: Nebraska Department of Environmental Quality*, 2009.

PEREIRA, A. G. T. C. *Incorporação do Valor Econômico da Água na Análise de Custo Benefício em Projetos de Exploração e Produção de Óleo e Gás*. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília, 2009.

PETROBRAS, Petróleo Brasileiro S.A. *Estágio Atual de Desenvolvimento do Tratamento Térmico de Resíduos e Materiais Multifásicos*. RT – TE Nº 032/2004, 2004.

PETROBRAS, Petróleo Brasileiro S.A. *Tratamento Térmico para Minimização de Resíduos* – Relatório Técnico RT AMA nº 4, 2012.

PICKLER, A.C. *Desenvolvimento de Processo Térmico para Recuperação de Resíduo de Petróleo: Uma Abordagem Tecnológica e de Sustentabilidade*. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, 265pp. 2010.

SILVA, Paula Luciana Bezerra da; SOUSA, Lídia Dely Alves de; PINHEIRO, Viviane da Silva; HARIMA, Eiji; LEITE, José Yvan Pereira. *Caracterização da Diatomita de Rio do Fogo – RN – Brasil*. Holos, Ano 25, Vol. 3, p.52-62,

SOUZA, G. P.; FILGUEIRA, M.; ROSENTHAL, R.; HOLANDA, J. N. F. *Caracterização de material compósito diatomáceo natural*. Revista Cerâmica, n49, p. 40-43, 2003.

UERJ, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. *Roteiro para Apresentação das Teses e Dissertações da Universidade do Estado do Rio de Janeiro*. Organização, Simone Faury Dib, Neusa Cardim da Silva; colaboração, Kalina Rita Oliveira da Silva, Rosane Lopes Machado – 2. ed. rev. atual. e ampl. – Rio de Janeiro : UERJ, Rede Sirius, 2012.

USEPA, Environmental Protection Agency – United States. *Environmental Laws Applicable to Construction and Operation of Biodiesel Production Facilities*. EPA-907-B-08-001. Novembro, 2008.

VOSE, D. *Risk analysis : a quantitative guide*. - 3rd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.