



Victor Kraemer Wermelinger Sancho Araujo

**Avaliação de custos para a produção de biodiesel a partir
de óleos residuais frita**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre pelo Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da
PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sílvio Hamacher

Rio de Janeiro

Abril de 2008



Victor Kraemer Wermelinger Sancho Araujo

**Avaliação de custos para a produção de biodiesel a partir
de óleos residuais fritura**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Sílvio Hamacher

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Dr. Eduardo Homem de Siqueira Cavalcanti

INT/SECTI-RJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 9 de abril de 2008

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Victor Kraemer Wermelinger Sancho Araujo

Graduou-se em Engenharia de Produção pela PUC-Rio em 2005. Durante a graduação, estagiou em empresa do ramo de telecomunicações, atuando nas áreas de Previsão de Indicadores, e completou o curso seqüencial em empreendedorismo da PUC-Rio. Em 2006, ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da PUC-Rio para obtenção do título de Mestre. Nesse período, trabalhou como pesquisador no Projeto Biodiesel.

Ficha Catalográfica

Araujo, Victor Kraemer Wermelinger Sancho

Avaliação de custos para a produção de biodiesel a partir de óleos residuais fritura / Victor Kraemer Wermelinger Sancho Araujo ; orientador: Silvio Hamacher. – 2008

97 f. : Il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia industrial – Teses. 2. Biodiesel. 3. Problema de Roteamento de veículos. 4. Óleo Residual de fritura. 5. Rio de Janeiro. 6. Logística. I. Hamacher, Sílvio. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Agradecimentos

Agradeço, antes de tudo, a Deus, por me dar forças nos momentos difíceis e por me permitir atingir este estágio. Tudo o que alcancei e o que hei de alcançar por Ele me foi e será permitido.

À minha família, pelo suporte e pelas críticas. Certamente devo a ela muitos de meus valores e conquistas.

Ao meu orientador, professor Silvio Hamacher, pela paciência, disponibilidade e inteligência na transmissão de seus conhecimentos.

Aos meus amigos, com destaque aos grandes amigos verdadeiros da época de colégio e aos amigos do Effatá, pelo incentivo. Aos amigos de graduação da PUC e aos meus colegas de mestrado, pelos momentos felizes e partilhas de estudo. Em especial, agradeço à Patrícia, pelo companheirismo, pelos momentos de descontração, pelas conversas e pela crença no meu potencial.

Aos funcionários e professores, que, de alguma forma, me transmitiram conhecimentos, educação e disciplina para toda vida. Sou especialmente grato aos professores Luiz Felipe Scavarda, Madiagne Diallo e José Eugênio Leal, pela amizade e confiança no meu trabalho.

Ao CNPq e à Fundação de Apoio à Pesquisa da Bahia (FAPESB-BA), pelo apoio financeiro, e a Eduardo Cavalcanti, coordenador do Programa RioBiodiesel.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

Resumo

Araujo, Victor Kraemer Wermelinger Sancho. Hamacher, Silvio. **Avaliação de custos para a produção de biodiesel a partir de óleos residuais fritura.** Rio de Janeiro, 2008. 97 p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca pelo desenvolvimento sustentável tem como importante fator diferencial as fontes de energia renováveis. O biodiesel desponta como uma das alternativas mais relevantes, mas suas formas de obtenção no Rio de Janeiro não foram suficientemente investigadas. Este trabalho identifica a oportunidade da produção de biodiesel a partir de óleos residuais de fritura neste cenário, enfatizando os custos de transporte do óleo desde os principais produtores comerciais até a obtenção do biocombustível. O objetivo é avaliar os custos de forma a verificar a viabilidade do emprego desta alternativa. Para tanto, foram estudadas as diversas ferramentas de resolução do Problema de Roteamento de Veículos e foi proposto um algoritmo que visa à otimização dos custos. A formulação matemática utilizada baseia-se numa extensão de algoritmos clássicos, como o apresentado por Arenales *et al.* (2007), e nas equações desenvolvidas em Kallehauge (2006). Os resultados do modelo de roteamento, atrelados aos custos de produção, impostos e insumos, foram comparados com informações sobre a comercialização do biodiesel, comprovando sua viabilidade econômica. A consolidação dos dados obtidos aponta a produção de biodiesel a partir de óleo residual de fritura como viável, com custos logísticos equivalentes a R\$0,19 por litro e custo final de R\$1,22 por litro.

Palavras-chave

Biodiesel; Problema de Roteamento de Veículos; Óleo Residual de Fritura; Rio de Janeiro; Logística.

Abstract

Araujo, Victor Kraemer Wermelinger Sancho. Hamacher, Silvio. **Cost evaluation for biodiesel production from waste cooking oil**. Rio de Janeiro, 2008. 97 p. M. Sc. Dissertation - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The search for a sustainable development has in renewable energy sources an important differential factor. Biodiesel is one of the most important alternatives, but its obtainment forms in Rio de Janeiro have not been investigated enough. This work identifies the opportunity of biodiesel production from waste cooking oil in this scenery, emphasizing oil's transport costs until factories, where it is possible to obtain biodiesel in its final form. The objective is to evaluate costs in order to verify viability of this alternative source of energy. Hence, this research analysed several tools for solving Vehicle Routing Problem and it proposes an algorithm that results in cost optimization. The adapted mathematic formulation is based in an extension of classic algorithms, like those presented by Arenales (2007), and in equations developed by Kallehauge (2006). The routing model results, linked to production, tributes and input costs, have been compared with information about biodiesel commercialization, verifying its economic viability. The data consolidation obtained indicates that the biodiesel production from waste cooking oil is viable, with logistic costs equal to R\$0,19 per liter and final cost equal to R\$1,22 per liter.

Key words

Biodiesel; Vehicle Routing Problem; Waste Cooking Oil; Rio de Janeiro; Logistics

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.1. OBJETIVOS	15
1.2. HIPÓTESES E SUPOSIÇÕES	15
1.3. DELIMITAÇÃO DO ESTUDO	15
1.4. MOTIVAÇÃO	16
1.5. RELEVÂNCIA	16
1.6. ESTRUTURA	17
2 BIODIESEL	19
2.1. IMPORTÂNCIA DO BIODIESEL	19
2.2. DEFINIÇÕES	21
2.3. PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO	22
2.4. MERCADO DO BIODIESEL	26
2.5. A CADEIA PRODUTIVA DO BIODIESEL	26
2.5.1. <i>Comparação entre matérias-primas</i>	29
2.6. BIODIESEL A PARTIR DE RESÍDUOS	31
2.7. LEILÕES DE BIODIESEL	33
3 SISTEMAS DE ROTEAMENTO	36
3.1. O PROBLEMA DO CAIXEIRO VIAJANTE (PCV)	38
3.2. O PROBLEMA DO CARTEIRO CHINÊS	42
3.3. PROBLEMA DE ROTEAMENTO DE VEÍCULOS	45
4 METODOLOGIA	47
4.1. TIPO DE PESQUISA	47
4.2. UNIVERSO E AMOSTRA	47
4.3. COLETA DE DADOS	49
4.4. TRATAMENTO DOS DADOS	50
4.4.1. <i>Google Earth</i>	50
4.4.2. <i>AIMMS</i>	51
4.5. LIMITAÇÕES DO MÉTODO	52
4.6. CRONOGRAMA	53
5 MATERIAIS E MÉTODOS	56
5.1. TESTES	60
6 ANÁLISE DE RESULTADOS	64
6.1. CUSTOS LOGÍSTICOS	64
6.2. CUSTOS DE PRODUÇÃO	73
6.3. CUSTOS NÃO OPERACIONAIS	75

6.3.1. <i>Tributos</i>	75
6.3.2. <i>Aquisição de Insumos</i>	77
6.4. FORMAÇÃO DOS CUSTOS DO BODIESEL	79
6.5. ANÁLISE COMPARATIVA	80
7 CONCLUSÕES	82
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
APÊNDICE I: ESPECIFICAÇÕES	88
PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	89
APÊNDICE II: PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DO BODIESEL	91
<i>CRAQUEAMENTO</i>	92
<i>ESTERIFICAÇÃO</i>	92
APÊNDICE III: QUESTIONÁRIO	94
APÊNDICE IV: HORÁRIOS DE CHEGADA	96

Lista de Figuras

Figura 1: Reação de transesterificação por rota metílica	23
Figura 2: Obtenção do biodiesel através do processo de transesterificação	24
Figura 3: Transesterificação considerando tratamento do álcool e glicerina	24
Figura 4: Fluxograma das cadeias produtivas no Brasil	27
Figura 5: Distribuição dos custos de produção do biodiesel por matéria-prima	29
Figura 6: Decomposição dos custos variáveis do biocombustível	30
Figura 7: Biodiesel proveniente do óleo de fritura	31
Figura 8: Fluxograma da produção de biodiesel a partir de óleos residuais	32
Figura 9: Jogo de Hamilton	38
Figura 10: Desenho da cidade de Königsberg	42
Figura 11: Conjunto de rotas para o PRV	46
Figura 12: Consumo de óleo de fritura e número de clientes nos diferentes estabelecimentos	48
Figura 13: Grafos das variações no roteamento de veículos	62
Figura 14: Representação dos grupamentos para roteamento no mapa do Rio de Janeiro	66
Figura 15: Rotas obtidas para o terceiro <i>cluster</i>	70
Figura 16: Novas rotas obtidas para o terceiro <i>cluster</i>	72
Figura 17: Destino final dos óleos residuais de fritura nas lanchonetes pesquisadas	77
Figura 18: Série histórica de preços do metanol	78
Figura 19: Comparação de custos para produção de biodiesel obtidos pelos diferentes trabalhos e leilão	81
Figura 20: Reação de esterificação	93

Lista de Tabelas

Tabela 1: Definição de biodiesel	22
Tabela 2: Comparação das rotas metilica e etilica	25
Tabela 3: Classificação do óleo residual de acordo com sua origem	32
Tabela 4: Propriedades da transesterificação supercrítica e convencional	33
Tabela 5: Volume de biodiesel arrematado por empresa (m³)	34
Tabela 6: Quadro resumo de dados dos leilões	35
Tabela 7: Matriz O/D utilizada para testes iniciais	60
Tabela 8: Valores de demanda utilizados para o caso inicial	61
Tabela 9: Horas de chegada do veículo em cada cliente	62
Tabela 10: Custos dos veículos	63
Tabela 11: Variação de rotas de acordo com as capacidades dos veículos	63
Tabela 12: Configuração das rotas para os diferentes <i>clusters</i>	67
Tabela 13: Dados relativos ao processamento do algoritmo no AIMMS	68
Tabela 14: Horários de chegada para atendimento dos clientes no terceiro <i>cluster</i>	70
Tabela 15: Configuração de rotas <i>clusters</i> após mudança de veículo	71
Tabela 16: Horários de chegada para atendimento dos clientes no terceiro <i>cluster</i> após mudança de veículo	72
Tabela 17: Investimento e custos operacionais para biodiesel	74
Tabela 18: Tributos incidentes na produção de biodiesel	76
Tabela 19: Coeficientes técnicos para produção de biodiesel	77
Tabela 20: Formação do preço do biodiesel	80
Tabela 21: Especificações do biodiesel	88
Tabela 22: Propriedades físico-químicas do biodiesel	89
Tabela 23: Descrição das etapas da transesterificação	91
Tabela 24: Horários de chegada para atendimento dos clientes na Barra	96
Tabela 25: Horários de chegada para atendimento dos clientes na Zona Sul	96
Tabela 26: Horários de chegada para atendimento dos clientes na Barra após mudança de veículo	96
Tabela 27: Horários de chegada para atendimento dos clientes na Zona Sul após mudança de veículo	97