



**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

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
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
<b>2 BIODIESEL</b>	<b>19</b>
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
<b>3 SISTEMAS DE ROTEAMENTO</b>	<b>36</b>
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
<b>4 METODOLOGIA</b>	<b>47</b>
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
<b>5 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>56</b>
5.1. TESTES	60
<b>6 ANÁLISE DE RESULTADOS</b>	<b>64</b>
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
<b>7 CONCLUSÕES</b>	<b>82</b>
7.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	83
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICE I: ESPECIFICAÇÕES</b>	<b>88</b>
PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS	89
<b>APÊNDICE II: PROCESSOS DE TRANSFORMAÇÃO DO BODIESEL</b>	<b>91</b>
<i>CRAQUEAMENTO</i>	92
<i>ESTERIFICAÇÃO</i>	92
<b>APÊNDICE III: QUESTIONÁRIO</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE IV: HORÁRIOS DE CHEGADA</b>	<b>96</b>

## Lista de Figuras

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

## Lista de Tabelas

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