



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA



ENG07053 – TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

## ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DO RECOLHIMENTO DE RESÍDUOS DE ÓLEO DE FRITURA

MAURICIO LOSS

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Farenzena

PORTO ALEGRE, JULHO DE 2011.

# SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1. Biodiesel .....	3
2.2. Uso de rejeitos para produção energética .....	6
2.3. Tipos de resíduos utilizados para produção energética .....	7
2.4. Gestão de frotas de veículos .....	15
2.5. Logística de biocombustíveis .....	17
3. MÉTODO .....	18
3.1. Descrição do caso em estudo .....	18
3.2. Descrição do problema de otimização .....	18
4. RESULTADOS.....	25
4.1. Resultados do caso base .....	25
4.2. Variantes do cenário do caso base .....	28
5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	33
5.1. Conclusões.....	33
5.2. Sugestões de trabalhos futuros .....	34
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
Apêndice 1.....	39

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Reação de transesterificação de triglicerídeo com álcool.....	5
Figura 2.2: Fluxograma do processo de produção de biodiesel..	6
Figura 2.3: Planta de recuperação de biogás de RSU..	9
Figura 3.1: FIAT Fiorino Furgão. ....	19
Figura 3.2: Mercedes-Benz Sprinter Furgão. ....	19
Figura 3.3: Vista aérea de Porto Alegre com pontos de coleta e depósito demarcados. ....	21
Figura 4.1: Rota utilizada pelo veículo 1. ....	26
Figura 4.2: Rota utilizada pelo veículo 2. ....	27
Figura 4.3: Rota utilizada pelo veículo 3. ....	27
Figura 4.4: Rota utilizada pelo veículo 1. ....	29
Figura 4.5: Rota utilizada pelo veículo 2. ....	30
Figura 4.6: Comparação entre preço de venda do biodiesel e o preço obtido na matéria-prima. .....	32

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Equivalência do biogás com outras fontes energéticas. ....	11
Tabela 3.1: Pontos de coleta de ROF. ....	20
Tabela 4.1: Valores utilizados para cálculo do caso base. ....	25
Tabela 4.2: Descrição das rotas utilizadas por cada Fiorino. ....	26
Tabela 4.3: Descrição das rotas 1 e 2 utilizadas pelo Sprinter. ....	29
Tabela 4.4: Comparação entre Fiorino e Sprinter. ....	30
Tabela 4.5: Tabela resumo dos cenários utilizados nos cálculos. ....	32

# 1. INTRODUÇÃO

O uso do óleo de fritura de cozinha tem aumentado fortemente nos últimos anos, tanto em uso doméstico quanto industrial. O destino de boa parte desse resíduo é o esgoto, o que acarreta problemas nas estações de tratamento, devido ao seu alto potencial poluente (Sabudak e Yildiz, 2010) e custos no sistema de saúde, devido aos nocivos impactos para a saúde humana (Costa Neto et al., 2000). Atualmente, uma série de destinos finais tem sido proposta para tal óleo: produção de sabão (Mittelbach e Tritthart, 1988), produção energética, via digestão anaeróbia e quebra térmica (Zaher, 2003).

Atualmente, uma série de estudos acerca do aproveitamento do óleo de cozinha para produção de combustíveis está disponível na literatura. Um deles é o de El Sabagh, Keera e Taman (2011), cujo estudo destina-se a considerar aspectos relacionados à viabilidade da produção de biodiesel a partir de resíduos de óleo de fritura na tentativa de ajudar a reduzir o custo do biodiesel e a poluição proveniente dos resíduos deste óleo.

Apesar do óleo de cozinha estar disponível sem custos, seu recolhimento pode ser oneroso, visto que se deve coletar em diversos pontos da cidade o óleo deixado pela população, diariamente. Tal coleta acarreta um custo ao produto, podendo torná-lo até mais caro que o óleo virgem de soja (Araújo, Hamacher e Scavarda, 2010). O escopo do trabalho se insere nesse contexto: estudar a coleta do óleo de fritura na cidade de Porto Alegre, visando a minimização do custo de transporte e a posterior averiguação de sua viabilidade econômica.

A importância de tal ação é visível: uma reportagem veiculada pelo Canal Rural em 20 de agosto de 2010 (Reportagem Canal Rural, 2010) mostra um estudo feito pela Prefeitura Municipal de Porto Alegre que estima que cerca de 11 mil litros de óleo de cozinha são gerados como resíduo por dia na capital gaúcha. A mesma afirma que cada litro de óleo de cozinha derramado nos recursos hídricos pode contaminar até um milhão de litros d'água.

Como origem deste óleo, foram escolhidos quinze pontos dos cento e quarenta e nove pontos de coleta de óleo de fritura existentes do Departamento Municipal de Limpeza Urbana (DMLU) da cidade de Porto Alegre. Para determinar a melhor rota e os custos logísticos, um modelo de programação matemática foi implementado. Para a determinação da viabilidade econômica, ao final será obtido o custo total por litro de óleo de fritura recolhido, e então, de acordo com os valores de referência, saber-se-á se os cenários propostos tornam viável a coleta deste óleo.

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que o primeiro traz a motivação e objetivo deste trabalho. O segundo capítulo traz uma introdução sobre o biodiesel, além de alguns exemplos de rejeitos que podem ser utilizados como matéria-prima na produção de energia. Ao final, é feita uma breve introdução sobre gestão de frotas de veículos e sobre logística de biocombustíveis. No terceiro capítulo a descrição do caso em estudo, juntamente com descrição do problema de otimização. Por fim há uma pequena descrição sobre o *software* utilizado para a construção do modelo matemático. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e também quais seriam as conseqüências caso alterações fossem feitas no caso base. No último capítulo as conclusões obtidas e sugestões de trabalhos futuros serão delineadas.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Biodiesel

A história do biodiesel tem seu início quatro décadas após a descoberta do petróleo na Pensilvânia em 1859 e se dá juntamente com a criação dos motores diesel ao final do século XIX. Desenvolvido por Rudolf Diesel, o motor a diesel foi construído inicialmente para operar com óleo mineral. Entretanto, por solicitação do governo da França, óleo de amendoim foi utilizado para teste em motores a diesel com o objetivo de tornar-se auto-suficiente em energia em suas colônias do continente africano, reduzindo assim as importações de carvão e combustíveis líquidos. A escolha do óleo de amendoim deve-se a abundância do mesmo em suas colônias na África. O motor diesel movido a óleo de amendoim produzido pela companhia francesa Otto foi apresentado na Exposição de Paris em 1900. Outros experimentos conduzidos por Rudolf Diesel foram realizados em São Petersburgo com locomotivas movidas a óleo de mamona e a óleos animais. Em ambos os casos, os motores apresentaram bom desempenho (SEBRAE, 2007).

Durante 30 anos seguintes, óleos de origem vegetal deixaram de ser utilizados como combustível, tendo o baixo custo do óleo diesel de fonte mineral e algumas razões técnicas como o entupimento de bicos injetores ocasionando perda de rendimento, como principal motivo. Porém, com o surgimento da Segunda Guerra Mundial, muitos governos temiam que a quantidade de suprimento de derivados de petróleo não fosse suficiente e passaram a adotar o óleo de origem vegetal como combustível de emergência. As indústrias de produção de óleo, instaladas para suprir essa demanda, não tinham conhecimento tecnológico adequado e acabaram parando suas atividades após 1945, com o término do conflito mundial. Apesar disso, a utilização do óleo vegetal como combustível deixou uma importante herança na área da ciência abrindo caminhos para muitas pesquisas sobre a temática. Países como a Alemanha, os Estados Unidos e a Índia deram continuidade a pesquisas com óleos vegetais e atualmente ocupam importantes posições mundiais como referência no uso de óleos vegetais para produção de combustíveis.

No Brasil, a trajetória do biodiesel iniciou na década de 20 do século passado com a iniciativa de estudos pelo Instituto Nacional de Tecnologia, e ganhou ênfase no início dos anos 70, com a criação do Pró-óleo – Plano de Produção de Óleos Vegetais para Fins Energéticos, que nasceu na esteira da primeira crise do petróleo, ocorrida entre 1973 e 1974.

Em 1980, passou a ser chamado de Programa Nacional de Óleos Vegetais para Fins Energéticos, de acordo com a Resolução nº 7 do Conselho Nacional de Energia. A finalidade do programa era promover a troca de até 30% de óleo diesel apoiado na produção de girassol, colza, amendoim e soja. Outra vez, a consolidação dos preços do petróleo e a entrada da segunda fase do Proálcool, juntamente com o elevado custo de produção e esmagamento das oleaginosas, foram fatores decisivos para a desaceleração do programa (SEBRAE, 2007).

Hoje o Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo, com uma produção anual, em 2010, de 2,4 bilhões de litros e uma capacidade instalada, no mesmo ano, para cerca de 5,8 bilhões de litros (ANP, 2011)

O biodiesel é um combustível que pode ser obtido tanto a partir óleos vegetais quanto de gorduras animais. As matérias-primas vegetais para a produção do biocombustível são provenientes de óleos vegetais tais como soja, colza (canola), girassol, mamona, palma e amendoim, entre outros. Já as de origem animal são obtidas de sebo bovino, suíno e de aves. Além das matéria-primas citadas anteriormente, pode-se ainda obter biodiesel de óleo residual de fritura, chamado também de cocção.

O biodiesel representa hoje, juntamente com o etanol, uma importante alternativa para o segmento de combustíveis. Ambos são classificados como biocombustíveis por serem derivados de biomassa, matéria orgânica de origem vegetal ou animal utilizada na produção de energia, além de serem menos poluentes.

Segundo a Lei nº 11.097, criada em 13 de setembro de 2005, a descrição correta para biodiesel é: “biocombustível derivado de biomassa renovável para uso em motores a combustão interna com ignição por compressão ou, conforme regulamento, para geração de outro tipo de energia, que possa substituir parcial ou totalmente combustíveis de origem fóssil” (Portal do Biodiesel, 2011).

O biodiesel pode ser utilizado puro ou misturado ao diesel derivado do petróleo. No caso de misturas, a concentração de biodiesel é informada através de nomenclatura específica, definida como BX, onde X refere-se à porcentagem em volume do biocombustível. Assim B2, B5 e B20 referem-se, respectivamente, aos combustíveis com concentração de 2%, 5% e 20% de biodiesel adicionado ao diesel (FANGRUI, 1999). Desde 1º de janeiro de 2010, o diesel brasileiro já está sendo comercializado com 5% de biodiesel. Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (Anfavea), os resultados demonstraram que, até o momento, não há necessidade de qualquer ajuste ou alteração nos motores e veículos que utilizem essa mistura (ANP, 2011).

Atualmente, existem duas tecnologias aplicadas para a obtenção do biodiesel: o craqueamento e a transesterificação. A primeira trata-se de um processo químico que tem como objetivo dividir em partes menores um composto pela ação de calor e/ou catalisador, porém esta técnica vem sendo muito pouco utilizada. Já a transesterificação é o processo que separa o óleo do glicerol (ou glicerina), que passa a ser um subproduto do biodiesel. Uma molécula de óleo vegetal tem sua estrutura formada por três ésteres ligados a uma molécula de glicerina, o que faz dele um triglicerídeo (CAIXETA, 2009).

Para a obtenção de biodiesel, a reação de transesterificação de óleos vegetais dá-se tanto com metanol quanto com etanol. Mundialmente, a rota escolhida é a metílica devido ao menor custo, apesar deste álcool ser mais tóxico e apresentar menor poder de combustão. No Brasil, há alguns estudos com rotas etílicas devido à grande oferta de etanol no país.

A reação de transesterificação ocorre na presença de um catalisador, podendo ser este um ácido (normalmente HCl ou H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) ou uma base (NaOH ou KOH). No entanto, o catalisador básico é o mais utilizado devido a sua eficiência, simplicidade e rapidez.

A Figura 2.1 abaixo ilustra a reação de transesterificação.

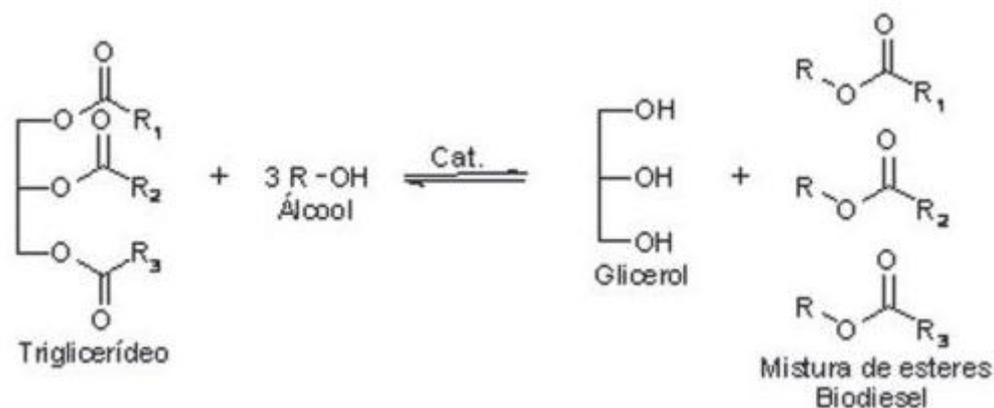


Figura 2.1: Reação de transesterificação de triglicerídeo com álcool. Extraído de: SILVA, 2008.

Na Figura 2.2, segue um fluxograma completo do processo de produção do biodiesel.

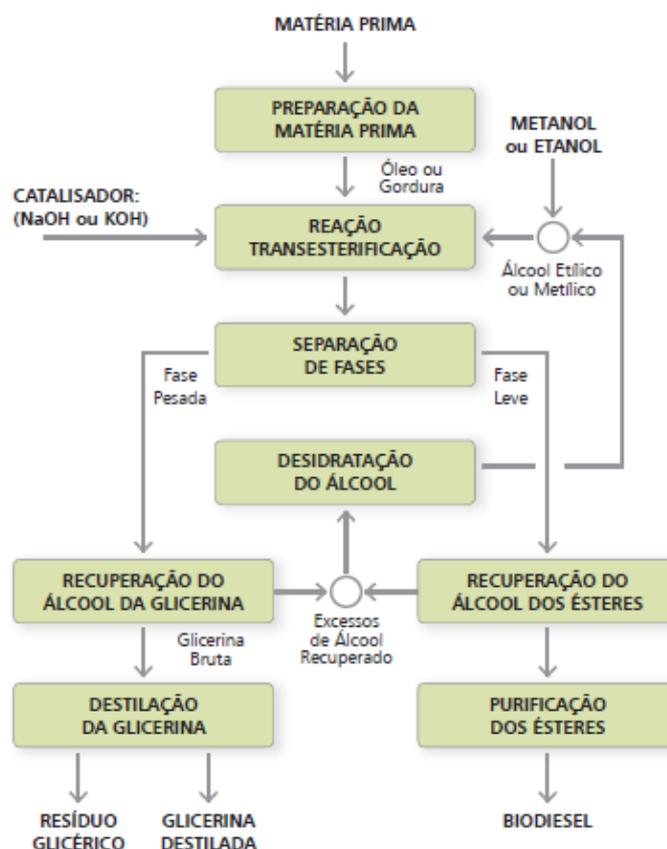


Figura 2.2: Fluxograma do processo de produção de biodiesel. Fonte: SEBRAE, 2007.

Como já citado anteriormente, resíduos de óleo de fritura (também chamados de cocção) podem também servir de matéria-prima para a produção de biodiesel. Por ser tratar de um rejeito, sem mais nenhuma utilidade, torna-se muito atrativo economicamente processá-lo, além do fato do resíduo não ser jogado na rede de esgoto, uma das grandes causas de poluição das águas hoje.

## 2.2. Uso de rejeitos para produção energética (SEBRAE, 2008)

O constante aumento de áreas de aterros sanitários para a deposição de lixo urbano e a elevação do número de rios e lagos contaminados pelo mesmo motivo vem trazendo preocupações em relação ao nosso futuro. Por isso, o uso de resíduos vem se tornando cada vez mais comum, já que estes apresentam um grande potencial de produção de energia a um baixo custo. Na tentativa de amenizar este problema, o Brasil apresenta vantagem no que diz respeito à oferta de energia de fontes renováveis. Foram 44,4% do total de sua geração de energia em 2006, frente uma média mundial de 13,2%.

Resíduos são classificados como tudo o que sobra da atividade de homens e animais e de processos industriais, por exemplo: biomassa (matéria orgânica), lixo doméstico, efluentes industriais e gases provenientes de motores e indústrias.

A utilização de resíduos e dejetos para a produção de energia é a base do conceito de sustentabilidade: produzir mais com menos e com menor impacto ambiental, sem utilizar recursos das gerações futuras, o que significa produzir de forma mais eficiente, com a utilização racional das matérias-primas, água e energia. Além disso, os produtos oriundos do uso de rejeitos podem ser utilizados na substituição de combustíveis fósseis, o que implica numa menor emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), além de reduzir também os impactos ambientais na água e no solo.

A utilização de resíduos como matéria-prima para produção de energia é muito antiga. O uso de biomassa como fonte de energia é uma prática utilizada desde o início da civilização com a queima direta da lenha, carvão e óleo animal para cozinhar alimentos e aquecimento.

Mais adiante, durante os séculos XIX e XX, surge a gaseificação com carvão mineral e com lenha. Ao final do século XIX, surge o primeiro registro em relação ao aproveitamento de gases derivados da decomposição de resíduos agropecuários e humanos, o chamado biogás, que será explicado no decorrer deste capítulo.

No Brasil, foi desenvolvido pelas Empresas de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater) em parceria com a Universidade Federal da Paraíba (UFPB), a partir de 1977, o Projeto Biogás. Esse projeto foi desenvolvido principalmente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste e se tratava de prestar apoio técnico e transferir tecnologia para a construção de biodigestores em pequenas propriedades rurais. Porém, com a queda do preço do petróleo e o fim dos incentivos do governo na época, este projeto foi perdendo força. Um estudo recente no Núcleo de Energia da UFPB mostrou que dos quase 200 biodigestores instalados na época, apenas 4,6% estão em funcionamento.

### 2.3. Tipos de resíduos utilizados para produção energética

#### i. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

Aterros sanitários são considerados atualmente como uma solução prática e relativamente barata para a deposição de RSU, inclusive de resíduos que poderiam ser reciclados. Entretanto, exigem grandes áreas de terra para que os resíduos possam ser depositados, que devem ser adequadamente impermeabilizadas para que não haja

contaminação do solo e águas subterrâneas. A poluição se deve ao processo de decomposição da matéria orgânica, que gera enormes quantidades de chorume (fluido tóxico que se infiltra para o solo e nos lençóis d'água) e biogás.

Para atenuar problemas de contaminação, inúmeras maneiras de utilização de RSU foram criadas. Algumas delas serão citadas no decorrer deste item.

a) Incineração (HENRIQUES, OLIVEIRA E COSTA, 2003)

Muito utilizada em resíduos hospitalares por se tratarem de resíduos altamente contaminados, a incineração tem sido utilizada como um método para processar RSU com o intuito de obter aproveitamento energético, além de ser uma opção de disposição final de resíduos.

O processo de incineração se dá em dois estágios. Primeiro o RSU é queimado a uma temperatura suficiente alta para que a grande massa se transforme em partículas menores e para que algumas substâncias presentes se tornem gases. Em seguida, a temperatura é então elevada para que haja combustão completa da matéria. A temperatura entre os dois estágios varia de 750 °C a 1200 °C. O tempo no primeiro estágio é de aproximadamente 30 minutos e para o segundo de 2 a 3 segundos.

Os gases resultantes da incineração têm de sofrer um tratamento posterior, uma vez que são compostos por inúmeras substâncias consideradas tóxicas (chumbo, cádmio, mercúrio, cromo, dioxinas e furanos, entre outros). Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) também é gerado. Como parte do processo, faz-se necessário a utilização de equipamentos de limpeza de gases, tais como precipitadores ciclônicos de partículas, precipitadores eletrostáticos e lavadores de gases.

O resultado é a produção de energia térmica que posteriormente é transformada em energia elétrica.

Como resíduos, cinzas são geradas. Estas equivalem a 30% em massa e 10% em volume da massa original. O resíduo é tratado para que haja recuperação de materiais ferrosos. As cinzas têm como destino final aterros devidamente impermeabilizados ou pode ser usada na fabricação de cimento.

b) Biogás

O biogás é um dos produtos da decomposição anaeróbia (ausência de oxigênio gasoso) da matéria orgânica, que se dá através da ação de determinadas espécies de bactérias (CETESB, 2011). Trata-se de um gás composto por aproximadamente 50% metano ( $\text{CH}_4$ ), 45%  $\text{CO}_2$ , 3% nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), 1% oxigênio ( $\text{O}_2$ ) e 1% de outros gases, segundo WILLUMSEN (1999).

O biogás pode ter sua origem de duas fontes diferentes: aterros sanitários (de forma natural ou em biodigestores) ou de fezes de animais.

Em aterros sanitários, conforme o RSU vai sendo acumulado é formada uma camada espessa. Assim, o lixo que fica por baixo passa a não ter mais contato com  $\text{O}_2$ , então inicia-se um processo de decomposição anaeróbica natural e o biogás (gás de lixo) começa a ser formado.

Para que este gás possa ser recolhido e utilizado como fonte de energia, dutos devem ser instalados previamente a deposição dos RSU ou no início da utilização da área como aterro sanitário. O sistema de coleta é formado por dutos verticais perfurados (ou horizontais se ainda não há RSU na área) colocados em vários pontos do aterro. Estes dutos são interligados e o gás formado é então succionado até um reservatório.

A Figura 2.3 ilustra uma planta de recuperação de biogás em aterros sanitários.

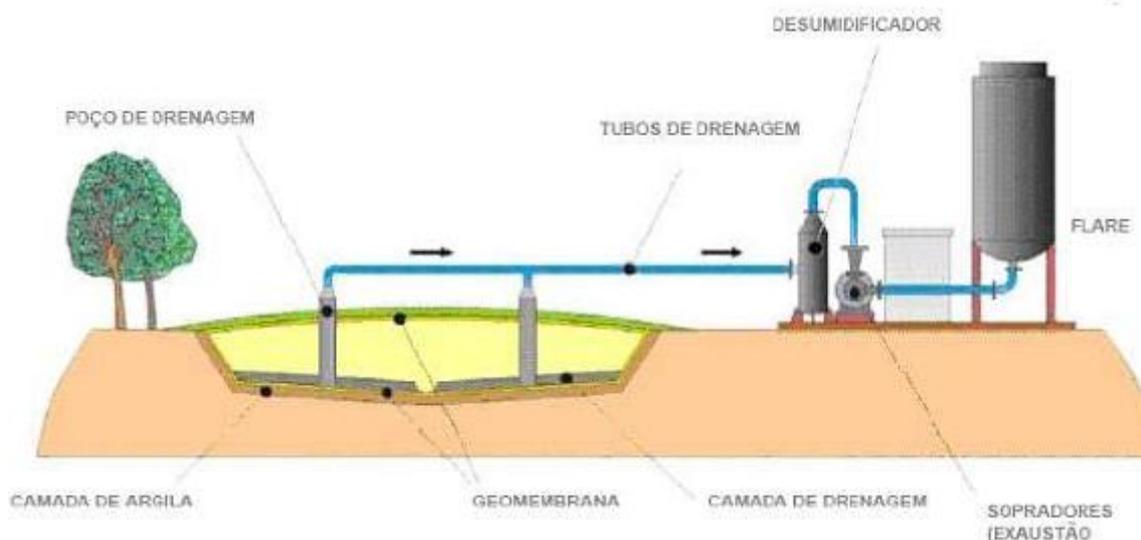


Figura 2.3: Planta de recuperação de biogás de RSU. Fonte: COELHO, 2008.

O biogás pode ser utilizado, salvo devidas proporções, em substituição do gás natural ou do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP). Pode ser utilizado também na geração de energia elétrica, através de geradores elétricos acoplados a motores de explosão adaptados ao consumo de gás.

Em Porto Alegre, um estudo realizado pelas Centrais Elétricas Brasileiras (ELETROBRÁS) e pela Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica (CGTEE) em parceria com o DMLU, atestou a viabilidade técnica, econômica, social e ambiental do Projeto Ecoparque, onde era proposta a instalação de um biodigestor anaeróbico com capacidade de processamento de 420 mil toneladas de RSU para geração de biogás. Porém, este projeto encontrasse arquivado desde a época de sua pesquisa (RIBEIRO, 2008).

Um outro estudo iniciado este ano em Porto Alegre pela Companhia de Gás do Estado (SULGÁS) e Sil Soluções Ambientais em parceria com o DMLU estuda a utilização de biogás produzido em aterros em veículos já adaptados para rodar com Gás Natural Veicular (GNV). Segundo reportagem veiculada no jornal Zero Hora do dia 2 de junho de 2011, os testes seguirão por um ano para avaliar critérios como eficiência, qualidade do gás e custos operacionais.

ii. Biogás de dejetos de animais (SEBRAE, 2008)

Outra forma de obtenção de biogás se dá através das fezes de bovinos, suínos e aves. O processo de geração deste gás não ocorre de forma natural como no caso citado anteriormente. Aqui, os dejetos dos animais são colocados em biodigestores anaeróbicos, sistema no qual ocorre a digestão anaeróbica.

A degradação anaeróbia da matéria orgânica até a formação de metano ocorre em quatro etapas: hidrólise, fermentação, acetogênese e metanogênese.

A primeira e a segunda etapa ocorrem simultaneamente, onde moléculas orgânicas complexas como polícarboidratos, lipídeos e proteínas são hidrolisadas (quebradas) e fermentadas por bactérias hidrolíticas fermentativas a compostos orgânicos simples como açúcares, aminoácidos, ácidos graxos e alcoóis pela adição de grupos hidroxilas.

Na terceira etapa, as moléculas simplificadas da fermentação são digeridas a acetato e hidrogênio pelas bactérias acetogênicas sintróficas.

Na quarta e última etapa, ocorre a formação de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  pela ação de bactérias metanogênicas.

A grande vantagem deste processo é que os resíduos podem ser utilizados como fertilizantes em lavouras e hortas.

A Tabela 2.1 traz uma comparação do biogás com outras fontes energéticas.

Tabela 2.1: Equivalência do biogás com outras fontes energéticas. Fonte: Barrera, Paulo. Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. 1993, pg. 10 *apud* SEBRAE, 2008.

Fontes Energéticas	m <sup>3</sup> de gás equivale a
Gasolina	0,613 litros
Querosene	0,576 litros
Óleo diesel	0,553 litros
Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)	0,454 litros
Lenha	1,536 kg
Álcool hidratado	0,790 litros
Eletricidade	1,428 kW

O biogás gerado tem a mesma utilidade do biogás de RSU. No caso do biogás de dejetos animais, como este geralmente é gerado em biodigestores instalados na própria localidade, pode ser utilizado na substituição do GLP de aquecedores de aviários, por exemplo.

iii. Casca de arroz

A casca de arroz vem sendo utilizada como fonte de energia. Um artigo técnico do Instituto Rio-Grandense do Arroz (IRGA) aponta que a casca representa 22% da produção de arroz e que 500 kg de casca de arroz equivalem a um barril de petróleo (SEBRAE, 2008).

Um dos métodos utilizados para conversão da biomassa em energia elétrica se dá através da queima da mesma. As etapas podem ser resumidas da seguinte forma: queima ou combustão do resíduo, geração de vapor, turbinagem do vapor e geração de energia elétrica (MAYER et al., 2007).

iv. Cana-de-açúcar (SEBRAE, 2008)

A cana-de-açúcar é uma matéria-prima com um grande número de utilidades, seja na indústria alimentícia ou na produção energética.

A planta é colhida e levada para a usina. O produto da primeira moagem é destinado a produção de açúcar por conter uma enorme quantidade do mesmo. A segunda e a terceira moagem resultam em um líquido destinado a produção de álcool.

A partir desta etapa o bagaço da cana e o vinhoto, subproduto da produção do álcool seriam resíduos. Porém, o bagaço vem sendo utilizado na alimentação das caldeiras onde é feita a queima. Aqui vale salientar que a queima deste bagaço para geração de energia é o que viabiliza o processo de produção de álcool aqui no Brasil. Caso contrário, o processo se tornaria tão caro quanto o processo de produção de álcool de milho nos Estados Unidos.

Depois de passar pelas turbinas e geradores, o vapor produzido na queima gera a energia elétrica, da mesma forma que a casca de arroz. Já o vinhoto, resíduo da produção do álcool, pode ter seu aproveitamento energético através da biodigestão anaeróbica tendo como produto o biogás, que também pode operar como fonte de energia complementar no processo produtivo, de forma isolada ou juntamente com o bagaço de cana-de-açúcar.

A palha da cana-de-açúcar também seria aproveitada juntamente com o bagaço na produção de energia, porém esta é geralmente queimada ainda no canavial para facilitar a colheita pelos bóias-frias e também para eliminar pragas.

#### v. Açaí

O açaizeiro é uma planta nativa da Região Norte. Do seu fruto, 30% de seu peso representam a polpa destinada ao consumo *in natura*, sorvetes e outros derivados e 70% corresponde ao caroço, que pode ser utilizado na produção de cosméticos, fibras de móveis, xaxim, compensados e adubo orgânico. Além disso, o caroço também pode ser utilizado na produção de energia elétrica (SEBRAE, 2008).

Após passar por um processo de secagem para perder parte de sua umidade, o caroço do açaí é então encaminhado ao gaseificador. A gaseificação é um processo de degradação térmica a altas temperaturas (acima de 600°) que possibilita transformar biomassa em gás para acionar motores.

Neste caso, ocorre inicialmente a combustão do caroço de açaí a uma temperatura de 900 °C, liberando gás quente, que passa por um processo de limpeza e de resfriamento. Em seguida, o gás é consumido em um motor de combustão interna acoplado a um gerador elétrico, que gera então energia elétrica (XAVIER, 2006).

#### vi. Cupuaçu

O cupuaçu também é uma espécie nativa da Amazônia. A composição física do fruto do cupuaçu varia conforme o formato do fruto: a polpa corresponde de 38% a 43% do total do fruto e a casca varia de 37% a 44%, e o restante do fruto é composto por fibras e sementes. A polpa é utilizada na indústria alimentícia, como na produção de sucos, sorvetes e bombons. Já a casca é utilizada parcialmente como adubo e o restante é descartado. A casca também pode ser usada no processo de gaseificação, e este gás utilizado como combustível (SEBRAE, 2008).

vii. Mandioca (SEBRAE, 2008)

O cultivo de mandioca está presente em quase todo o território nacional e seus produtos fazem parte da mesa dos brasileiros. As formas de processamento da mandioca consistem na produção de farinha obtida das raízes da planta e na produção de insumo para ração animal. As casas de fabricação de farinha estão mais presentes nas regiões Norte e Nordeste e as fecularias de maior porte nas regiões sudeste e sul.

O processamento gera tanto resíduos líquidos quanto sólidos. Os resíduos líquidos englobam a água de lavagem, a manipueira (líquido amarelado resultante da prensagem da mandioca) e a água de extração da fécula (amido). Já os sólidos correspondem às ramas, cepas (tronco), cascas, farelo, folhas e crueira (pedaços de mandioca ralada).

Desses resíduos, o farelo tem um grande potencial para a produção de briquetes, que nada mais são do que aglomerados de biomassa seca utilizados como substituto de lenha em fornos, caldeiras e aquecedores ou no processo de gaseificação.

Outro resíduo que pode ser utilizado como fonte energética é a manipueira. Esta possui caráter tóxico e não pode ser descartada diretamente em rios e lagos ou em redes de esgoto. Como forma de aproveitá-la antes de ser tratada para descarte, a manipueira pode ser utilizada na produção de biogás, através de biodigestão anaeróbica. O biogás gerado poderia ser utilizado nas casas de farinha, substituindo ou complementando o uso de combustíveis fósseis.

viii. Coco

A produção de cocos vem crescendo de forma acentuada no Brasil nos últimos anos. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), de 1996 para 2006, a

produção do fruto cresceu 107,6%, passando de 956.537 mil para 1.985.478 mil cocos colhidos. Ou seja, somente em 2006, quase dois bilhões de casca de coco viraram resíduos (SEBRAE, 2008).

Com o intuito de amenizar essa produção de resíduos, estudos vêm sendo feitos para utilizar casca de coco como matéria-prima para produção de energia.

Um estudo da Embrapa Tabuleiros Costeiros divulgado na Circular Técnica, n° 46 de novembro de 2007, mostra que uma das principais aplicações para a casca do coco seco é a produção de briquetes, podendo estes serem utilizados como alternativa de carvão vegetal em substituição à lenha. A mesma técnica pode ser aplicada na casca de coco verde (SEBRAE, 2008).

Outra alternativa para a produção energética utilizando casca de coco verde seria a gaseificação, o que além de gerar energia, diminuiria de forma razoável o volume deste resíduo. Entretanto, assim como o açaí, a casca de coco verde também deve passar por um secador para que o teor de umidade da casca esteja dentro dos padrões exigidos (BITTI, PERAZZINI e SILVÉRIO, 2009).

#### ix. Óleo de cozinha

As recentes preocupações com a sustentabilidade, meio ambiente, e os custos das matérias-primas têm feito com que resíduos de óleo de fritura (ROF) tornem-se atraentes para a indústria para a produção de sabão ou biodiesel.

Um estudo feito por Felizardo et al. (2005) mostra a viabilidade técnica da produção de biodiesel a partir de óleo de cozinha usado recolhido em cantinas de escolas e residências.

Neste estudo, reações de transesterificação foram realizadas com várias amostras durante 1 h, utilizando ROF, metanol como reagente (rota metílica) e hidróxido de sódio como catalisador. Foram utilizadas razões molares de metanol/ROF entre 3,6 e 5,4 e quantidades de catalisador de 0,2% a 1,0% da massa de óleo a fim de se obter os melhores resultados para o biodiesel. Para óleos com um valor de 0,42 mg de ácido KOH/g de ROF, os resultados mostram que a proporção de metanol/ROF de 4,8 e uma relação catalisador/ROF de 0,6%, apresenta o maior rendimento de ésteres metílicos.

Amostras de 200 g (228,6 mmol considerando massa molar de 874,8 g/mol) foram aquecidas a 65 °C. Metanol e hidróxido de sódio foram adicionados em quantidades diferentes em cada amostra, porém dentro dos valores estipulados no início deste item.

Após uma hora, a fase rica em glicerol foi separada da camada de éster metílico em um funil de decantação. A fase contendo éster foi lavada com água, solução de 0,5% HCl e água novamente para obter o biodiesel puro.

Análises de densidade a 15 °C, viscosidade cinemática a 40 °C, índice de Iodo, acidez, teor de água, quantidade de sódio, concentração de metanol, ponto de fulgor, pureza e cinzas sulfatadas foram realizadas a fim de aferir a qualidade do biodiesel produzido.

O teor de Iodo ficou entre 123 e 130 g/g de amostra. O limite é de 120 g/g de amostra. Isso se dá porque a maior parte do óleo utilizado para fritura em Portugal é feito de girassol, que apresenta um alto nível de Iodo. Além disso, o índice de Iodo também aumenta durante os últimos estágios da degradação do óleo e, especialmente, se o óleo é exposto a temperaturas superiores a 180 °C por um grande período de tempo, devido à eliminação de reações das moléculas de triglicerídeos oxidados.

Óleos vegetais expostos a altas temperaturas e por períodos muito longos começam a sofrer reações hidrolíticas e oxidativas. A rancidez oxidativa é a principal responsável pela modificação das características físico-químicas e organolépticas do óleo, tornando-o mais escuro, viscoso e com odor desagradável conhecido como ranço. O aumento da acidez indica o desenvolvimento de reações hidrolíticas, que proporcionam o aparecimento de ácidos graxos livres. Estes, durante o processo de transesterificação, podem reagir com o catalisador formando um produto saponificado, o que diminui a eficiência do processo reacional.

O teor de água também ficou acima do permitido. De 0,08% a 0,21% quando o máximo é de 0,05% de água no combustível.

Para resolver isto, destilação a vácuo foi realizada, o que baixou o nível de água das amostras com, por exemplo, 0,12% e 0,21% para 0,02% e 0,04% respectivamente.

Em relação à pureza, esta deve estar acima de 96,5%, notada apenas em amostras com quantidade de catalisador acima de 0,6% da quantidade de massa de óleo e relação de metanol/ROF acima de 4,8.

Os demais testes ficaram dentro dos valores limite.

Além da utilização como matéria-prima para produção de biodiesel, os resíduos de óleo de cozinha servem também como base na fabricação de sabões tanto na indústria como de maneira artesanal, já que possuem em sua composição a glicerina. Ração animal e lubrificante de máquinas agrícolas também pode ser obtidos com o reuso do óleo de cozinha.

#### 2.4. Gestão de frotas de veículos (CLEMENTE, 2008)

As operações logísticas de uma empresa iniciam desde o carregamento de matéria-prima junto ao fornecedor, e terminam quando o produto final é entregue ao consumidor final. Desde a compra da matéria-prima até a entrega do produto final a um consumidor ou outro cliente, os processos logísticos envolvidos têm influência na decisão do valor do produto final. Por isso, uma correta gestão dos processos logísticos faz com os custos sejam minimizados, o que acarreta numa menor necessidade de compensação desses custos.

Frotas de veículos são conjuntos de veículos utilizados para realizar o transporte de mercadorias e passageiros. Podem ser de propriedade das empresas que as utilizam ou podem pertencer a uma empresa de prestação de serviço de transportes. Como exemplos de frotas são dados os veículos de autolocadoras, empresas de táxi, serviços públicos, caminhões utilizados para entregas, etc.

Em uma frota de veículos, independentemente de ser uma frota da própria empresa ou de uma empresa terceirizada, inúmeros custos (fixos e variáveis) são gerados. São exemplos: depreciação dos veículos; seguro; IPVA; taxas de circulação; custos administrativos; manutenção; pneus; pedágios; etc. Além destes custos, existem ainda outros problemas associados a operações com frotas de veículos, como por exemplo, veículos que são utilizados por vários motoristas apresentam um desgaste acelerado, bem como o excesso de peso, que acarreta no mesmo problema.

Estratégias adotadas pelas empresas como minimizar o número de veículos, reduzir a distância percorrida e reduzir os custos administrativos são estratégias que visam reduzir os custos com as frotas. Para isso, as empresas hoje vêm investindo cada vez mais na utilização de um conjunto de sistemas ou ferramentas tecnológicas. Estes auxiliam as empresas de transporte a eliminarem ou minimizarem os riscos associados com o investimento dos seus veículos, melhorarem a eficiência das suas operações, aumentarem a produtividade e reduzirem os custos de transporte globais.

Um dos sistemas utilizados na gestão de frotas é conhecido como *tracking* de veículos. Este sistema é utilizado por empresas para monitoramento de veículos. Trata-se de um equipamento instalado ao veículo que utiliza a tecnologia de sistema de posicionamento global (GPS). Antigamente, estes sistemas serviam apenas para auxiliar as empresas proprietárias dos veículos ou a polícia em caso de roubo de veículos, pois se trata de um sistema que informa a posição exata do veículo através de um sinal enviado a um satélite e deste a uma central de monitoramento. Hoje, com o avanço da tecnologia, os sistemas de *tracking* são capazes de informar velocidade do veículo, consumo, quantas vezes o motor foi ligado e desligado durante o percurso e até o nível de combustível no tanque. Essas e outras

informações ajudam na gestão da frota, pois auxiliam as empresas a identificarem pontos onde podem melhorar para que os custos sejam minimizados.

Outra ferramenta utilizada na gestão de frotas de veículos são os *softwares*. Estes programas permitem às empresas realizarem uma série de tarefas específicas na gestão de qualquer um ou todos os aspectos relacionados a uma frota de veículos. Através de uma série de dados externos como, por exemplo, distância entre origem e destino e custos fixos e variáveis dos veículos, estes *softwares* podem fornecer resultados como qual a melhor rota a seguir, qual veículo comprar, quantos veículos são necessários para a frota da empresa, etc.

## 2.5. Logística de biocombustíveis

Logística de matérias-primas, localização e distribuição, bem como a infra-estrutura do transporte, mostram-se fatores determinantes da dimensão, localização e seleção de tecnologia de qualquer biorrefinaria que venha a ser construída.

O modo de entrega do biocombustível (rodoviário, ferroviário ou terrestre), a distância, o estado da matéria (sólido, líquido ou gasoso), safras, quantidades, etc. todos esses são os desafios encontrados na logística. Situações que exploram esses desafios e buscam solucioná-los são estudados por Stephen, Mabee e Saddler (2010) e Boukis et al. (2009).

## 3. MÉTODO

### 3.1. Descrição do caso em estudo

Conforme já citado no capítulo 1, o problema proposto trata da produção de biodiesel a partir de resíduos de óleo de fritura (ROF). Para isto, os resíduos devem ser recolhidos em pontos de coleta estabelecidos e levados a um depósito, onde servirá de matéria-prima para a produção do biocombustível. O custo gerado pelo recolhimento será apenas o do transporte, já que o óleo será coletado sem custo de aquisição.

### 3.2. Descrição do problema de otimização

O estudo teve como base o trabalho de Araújo, Hamacher e Scavarda (2010), onde foi proposto um estudo para o custo de produção de biodiesel utilizando ROF como matéria-prima na cidade do Rio de Janeiro.

Um algoritmo matemático foi implementado baseado no trabalho citado acima para a elaboração de um modelo de roteamento de veículos para coleta de ROF nos pontos estabelecidos da cidade de porto Alegre. Este modelo matemático visa otimizar a logística do problema proposto, ou seja, traçar rotas para a coleta minimizando os custos logísticos, dentro do período de tempo determinado e com o menor número de veículos.

Um problema de otimização parecido com o caso acima é o clássico problema do caixeiro viajante, que trata de um conjunto de  $n$  cidades, onde um vendedor deve partir de uma cidade inicial, visitar todas as demais cidades uma única vez e regressar posteriormente à cidade de origem, de tal forma que a distância percorrida seja mínima. O problema se orienta por  $G = (V, A)$ , onde  $V$  é um conjunto de  $n$  vértices, representando as diversas cidades e  $A$  é um conjunto de arcos que ligam duas cidades. Considera-se ainda  $C = (c_{ij})$  uma matriz de custo ou distância associada ao conjunto  $A$ , ou seja, o custo ou a distância de se viajar de uma cidade  $i$  para uma cidade  $j$ .

O modelo proposto traça uma rota utilizando alguns pontos de coleta. Esta rota é designada a apenas um veículo  $e$ , de acordo com cálculos realizados, é a que apresenta o custo mínimo de transporte. Outras rotas são formadas para os demais veículos da frota, de modo que todos os pontos de coletas sejam percorridos. O algoritmo também calcula o número de veículos necessários para a frota da empresa, buscando sempre o menor número possível e

respeitando a capacidade do automóvel. Dois tipos de veículos foram escolhidos para a realização do serviço. Um FIAT Fiorino Furgão, ilustrado na Figura 3.1 e um Mercedes-Benz Sprinter Furgão, mostrada na Figura 3.2. A escolha se deve por estes apresentarem os menores preços das categorias a que correspondem, capacidade aceitável e baixo custo de manutenção por km. O motivo pelo qual foram escolhidos dois veículos de capacidades diferentes é que a quantidade de ROF disponível nos pontos é variável, podendo esta chegar a uma quantidade tão grande que um veículo de pequeno porte teria que fazer inúmeras viagens até que todo óleo seja recolhido.



Figura 3.1: FIAT Fiorino Furgão. Fonte: [www.fiat.com.br](http://www.fiat.com.br)



Figura 3.2: Mercedes-Benz Sprinter Furgão. Fonte: [www.mercedes-benz.com.br](http://www.mercedes-benz.com.br)

Quinze pontos foram escolhidos dentre os cento e quarenta e nove pontos de coleta existentes sob cuidados do DMLU (DMLU, 2010). Estes quinze pontos foram escolhidos de forma a tentar obter uma distribuição mais uniforme dos pontos de coleta com o intuito de abranger toda a população de Porto Alegre.

A Tabela 3.1 traz o endereço dos pontos de coleta escolhidos para integrar a matriz que servirá para o cálculo e traçado da rota.

Os pontos 0 e 16 representam o depósito e correspondem respectivamente ao início e ao destino final para cada veículo independentemente de qual rota este veículo esteja alocado. O endereço citado refere-se ao Complexo Logístico do Porto Seco, que fica situado na divisa dos bairros Sarandi e Rubem Berta. A escolha do local se deve a este ser considerado uma área industrial de Porto Alegre, e também por ser de fácil acesso a outras cidades por estar às margens das BRs 290 e 116.

Tabela 3.1: Pontos de coleta de ROF.

0 – 16	Av. Plínio Kroeff, 1000
1	R. Silva Só, sob a Elevada da Tiradentes
2	R. Pereira Franco, 135
3	Av. Assis Brasil, 1715
4	Av. Dom Jaime de Barros Câmara, 815
5	Av. Plínio Kroeff, 752
6	R. Alfredo Ferreira Rodrigues, 975
7	R. José Rodrigues Sobral, 958
8	Estr. Afonso Lourenço Mariante, 4401
9	R. Caixa Econômica, 528
10	R. Rubem Pereira Torelly, 51
11	Av. Juca Batista, 10400
12	Av. Guaíba, 2027
13	Av. Otto Niemeyer, 3296
14	Av. Wenceslau Escobar, 1980
15	R. da República, 711

As distâncias entre os pontos de coleta foram obtidas através do Google *Maps* (GOOGLE, 2010). Quando mais de um trajeto era disponibilizado para ir de um ponto ao outro, a escolha era feita pela menor distância.

Essas distâncias calculadas serviram para montar uma matriz 17x17 (do 0 ao 16), com a diagonal principal igual a zero, utilizada pelo software para fazer os cálculos para traçar as melhores rotas e calcular a quantidade mínima necessária de veículos. A matriz encontra-se como Apêndice 1 ao final do trabalho.

A Figura 3.3 oferece uma visão da cidade de Porto Alegre com os endereços dos pontos de coleta e o depósito demarcados. O depósito encontra-se com demarcação amarela e os pontos de coleta de ROF com demarcação azul.

O modelo de otimização de roteamento de veículos foi obtido em um computador com processador Intel® Core™ 2 Duo 2.93 GHz com 2 GB de memória RAM do Laboratório de Computadores (LACOMP), situado no Departamento de Engenharia Química (DEQUI) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).



Figura 3.3: Vista aérea de Porto Alegre com pontos de coleta e depósito demarcados.

O modelo proposto foi formulado como um problema de programação linear com variáveis inteiras (MILP).

A fórmula do programa considera uma orientação completa por  $G = (N, M)$ , onde  $N = p \cup \{0, 16\}$ ,  $p = \{1, \dots, 15\}$  é o conjunto de nós que representam os pontos de coleta, com os nós 0 e 16 representando o depósito.  $M = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j, i \neq 16, j \neq 0\}$ , onde  $M$  corresponde aos arcos associados com as conexões entre os nós, e todas as rotas começam em 0 e terminam em 16.  $i$  e  $j$  representam pontos de coleta, onde  $i$  é o ponto de coleta origem e  $j$  o ponto de coleta destino.  $k \in K$ ,  $k = \{1, \dots, 10\}$ , onde  $k$  representa o número de veículos, sendo limitado a uma frota máxima total de 10 automóveis. Outros parâmetros e variáveis também foram definidos de acordo com a seguinte notação:

$x_{ijk}$ : variável binária com valor 1 quando veículo  $k$  opta por usar o arco  $(i, j)$  ou 0 se não está na rota;

$y_k$ : variável binária com valor 1 quando veículo  $k$  é usado ou 0 caso contrário;

$c_{rod}$ : ( $c_{rod} \geq 0$ ): custo de rodagem (calculado pelo preço do combustível dividido pelo consumo urbano dos veículos);

$c_f$ : ( $c_f \geq 0$ ): custos fixos dos veículos (manutenção, seguro, IPVA, pneus, além do custo de aquisição do veículo descontado o valor residual (aos 120.000 km));

$c_{tot}$ : ( $c_{rod} + c_f = c_{tot}$ ,  $c_{tot} \geq 0$ ): soma do custo de rodagem com custos fixos;

$c_{mot}$ : ( $c_{mot} \geq 0$ ): custo de salário e benefícios do motorista;

$o_i$ : ( $o_i \geq 0$ , onde  $o_0 = o_{16} = 0$ ): quantidade de ROF oferecido em cada ponto;

$q$ : ( $q \geq 0$ ): capacidade do veículo  $k$  utilizado;

$vel_m$ : ( $vel_m \geq 0$ ): velocidade média do veículo  $k$  na cidade;

$t_{max}$ : tempo máximo de jornada de trabalho;

$v$ : tempo de serviço em cada ponto;

A função objetivo do problema se resume em minimizar a equação 1.

$$z = \sum_{k \in K} \sum_{(i, j) \in M} c_{tot} * M(i, j) * x_{ijk} + \sum_{k \in K} c_{mot} * y_k \quad (1)$$

Sujeito à

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{ijk} = 1, \forall i \in p \quad (2)$$

$$\sum_{i \in p} o_i \sum_{j \in N} x_{ijk} \leq (q * y_k), \forall k \in K \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \left( \frac{M(i, j)}{vel_m} + v \right) \leq t_{max}, \forall k \in K \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{ojk} = y_k, \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N} x_{ihj} - \sum_{j \in N} x_{hjk} = 0, \forall h \in p, \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} x_{i,16,k} = y_k, \forall k \in K \quad (7)$$

$$x_{ijk} = 0, \forall i, j \in p, \forall k \in K \quad (8)$$

$$x_{0,16,k} = 0 \quad (9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i, j \in N, \forall k \in K \quad (10)$$

$$y_k \in \{0,1\}, \forall k \in K \quad (11)$$

A função objetivo representa a minimização dos custos da coleta de ROF, envolvendo duas variáveis binárias:  $x_{ijk}$ , que representa a decisão do veículo  $k$  utilizar a rota dada ou não e  $y_k$ , que representa a decisão de utilizar o veículo  $k$  ou não.

A restrição (2) garante que apenas um veículo esteja naquela determinada rota e chegue ao ponto  $i$ . A restrição (3) garante que a quantidade de óleo recolhido no ponto  $i$  não exceda a capacidade do veículo  $k$  e a restrição (4) impede que o tempo de viagem do ponto  $i$  ao  $j$  mais o tempo de serviço no ponto pelo veículo  $k$  utilizado seja maior que o tempo máximo da jornada de trabalho. A restrição (5) afirma que o veículo  $k$  só sairá do depósito se for utilizado pelo problema de otimização. A restrição (6) garante que o veículo  $k$  cumpra a rota imposta a ele, ou seja, se a sua rota é  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$ , obrigatoriamente este deve ir ao ponto 1, sair do 1 e ir ao ponto 2 para então chegar até o 3. A restrição (7) garante que o veículo volte ao depósito ao final de sua rota. A restrição (8) impede que o veículo escolha o caminho da diagonal principal da matriz, que é composta por zeros. E a restrição (9) impede que o veículo  $k$  utilizado vá do depósito para o depósito.

Além destas restrições, outras três foram adicionadas. Uma impede que qualquer veículo utilizado faça uma rota com apenas um ponto de coleta e retorne ao depósito. A outra permite que apenas um veículo da frota utilize uma rota com apenas dois pontos de coleta. Estas restrições garantem que a frota não seja composta por inúmeros veículos que realizem rotas extremamente curtas, o que elevaria o custo de coleta do óleo. E a última impede que o veículo utilize rotas intermediárias, voltando ao depósito do decorrer de sua rota original.

De acordo com o modelo proposto, o problema calcula o número de veículos estritamente necessários à quantidade de óleo disponível, garantindo que nenhum veículo fique ocioso no pátio da empresa e/ou que a capacidade dos existentes seja aquém do necessário.

O *software* utilizado para a resolução do problema de otimização foi o Sistema de Modelagem Algébrica Geral (GAMS). O GAMS é um *software* projetado especificamente para modelagem de problemas de otimização linear, não-linear e misto com variáveis inteiras. O programa é especialmente útil para lidar com problemas grandes e complexos e a linguagem utilizada é bastante simples e acessível. Para análise dos resultados, um relatório de saída é gerado com uma listagem das características de cada caso.

Para resolução do problema de otimização, foi utilizado o CPLEX. Otimizadores CPLEX são desenvolvidos para solucionar grandes e difíceis problemas com a mínima intervenção do usuário.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados do caso base

Esta seção apresenta os resultados obtidos para o caso base com a aplicação do modelo de roteamento de veículos proposto para o recolhimento de ROF na cidade de Porto Alegre.

Para o estudo do caso base, foram utilizados valores de custos obtidos através de um levantamento feito nas áreas correspondentes. Para este caso, o veículo utilizado foi o FIAT Fiorino Furgão. Estes valores estão citados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores utilizados para cálculo do caso base.

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	VALOR
$p$	Nº de pontos de coleta	15
$q$	Capacidade do veículo (litros)	500
$c_{rod}$	Custo de rodagem (R\$/km)	0,28
$c_f$	Custos fixos do veículo (R\$/km)	0,3387
$c_{tot}$	Custos totais (R\$/km)	0,6187
$c_{mot}$	Custo por motorista (R\$)	1.200
$vel_m$	Velocidade média do veículo na cidade (km/h)	20
$t_{max}$	Tempo máximo de jornada de trabalho (horas)	10
$o_i$	Quantidade de óleo disponível no ponto $i$ (litros)	100
$v$	Tempo de serviço em cada ponto (minutos)	20

Para o cálculo do custo de rodagem, foi tomado como base o valor do litro da gasolina tipo comum no mês de abril de 2011, que era em média R\$ 2,80 e um consumo urbano do veículo Fiorino de 10 km/l conforme fabricante. O mesmo afirma que a capacidade do Fiorino é de 620 kg além do motorista, porém não é utilizada a capacidade máxima para que não haja desgaste acelerado do veículo. Já para o cálculo dos custos fixos, o valor utilizado como vida útil do veículo foi de 120.000 km.

O *software* GAMS calculou as rotas em aproximadamente 17 minutos. De acordo com os resultados obtidos, a melhor opção para este cenário seria a utilização de 3 veículos. As rotas 1 a 3 utilizadas pelos veículos estão representadas nas Figuras 4.1 a 4.3 respectivamente.

As rotas utilizadas pelos veículos 1, 2 e 3 estão descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Descrição das rotas utilizadas por cada Fiorino.

VEÍCULO	ROTA
1	0 → 8 → 11 → 10 → 7 → 6 → 16
2	0 → 5 → 3 → 1 → 2 → 4 → 16
3	0 → 15 → 14 → 13 → 12 → 9 → 16



Figura 4.1: Rota utilizada pelo veículo 1.



Figura 4.2: Rota utilizada pelo veículo 2.

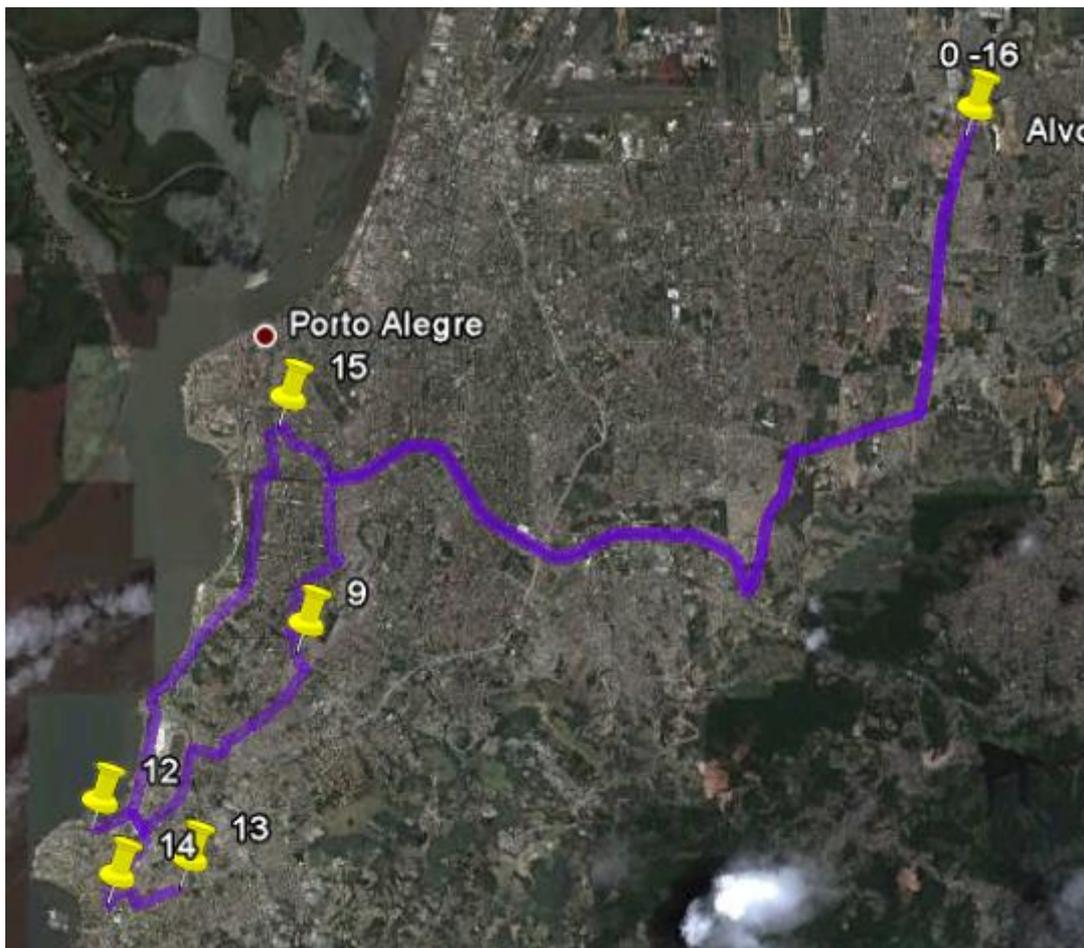


Figura 4.3: Rota utilizada pelo veículo 3.

Segundo o site Valor On Line (Valor On Line, 2011), a ANP concluiu um leilão no mês de maio último com um valor total por litro de biodiesel negociado de R\$ 2,2071. Para o caso base, o custo total por litro de óleo de fritura recolhido ficou em R\$ 2,4598, ficando 11,45% acima do valor do produto final.

#### 4.2. Variantes do cenário do caso base

Tendo em vista buscar um custo aceitável para a matéria-prima, mudanças no cenário foram realizadas. Optou-se por aumentar a quantidade de ROF por ponto de coleta de 100 para 200 litros, o que impossibilitou o uso do Fiorino pois este possui capacidade de 500 litros e, conforme já citado, há uma restrição para o programa que impede que o veículo faça rotas pequenas como, por exemplo, sair do depósito, ir a dois pontos e voltar para o depósito para mais de um veículo, pois isto acarretaria em inúmeras viagens pequenas a vários veículos, o que elevaria o custo logístico. Sem esta restrição, o programa geraria como resultado inúmeras rotas pequenas, o que acarretaria na aquisição de vários veículos, tornando o processo inviável.

Dentro do mesmo contexto, ou seja, mantendo-se os valores base de números de pontos de coleta (15), custo total do motorista (R\$ 1.200), velocidade média do veículo na cidade (20 km/h), quantidade de óleo por ponto de coleta (100 litros) e tempo de serviço em cada ponto (20 minutos), uma nova configuração foi testada com um veículo comercial de médio porte, um Mercedes-Benz Sprinter Furgão.

O Sprinter possui capacidade de 1400 litros, custo de rodagem de R\$ 0,25 /km, já que este é movido a diesel, que apresentou um valor por litro de R\$ 2,00 em abril de 2011, e, segundo o fabricante, o consumo médio urbano do veículo é de 8 km/l. em se tratando de custos fixos, o Sprinter apresenta um valor maior do que o Fiorino, R\$ 0,55 /km contra R\$ 0,3387, totalizando em custos R\$ 0,80 /km. Como tempo de vida útil, foram utilizados os mesmos 120.000 km.

Para esta configuração, o GAMS levou aproximadamente 5 minutos para realizar os cálculos. De acordo com os resultados, 2 veículos seriam o suficiente para o recolhimento dos ROF no quinze pontos. As rotas designadas aos veículos 1 e 2 estão ilustradas nas Figuras 4.4 e 4.5 respectivamente, e a descrição das rotas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Descrição das rotas 1 e 2 utilizadas pelo Sprinter.

VEÍCULO	ROTA
1	0 → 3 → 2 → 1 → 9 → 15 → 14 → 12 → 13 → 11 → 10 → 8 → 7 → 6 → 16
2	0 → 5 → 4 → 16



Figura 4.4: Rota utilizada pelo veículo 1.

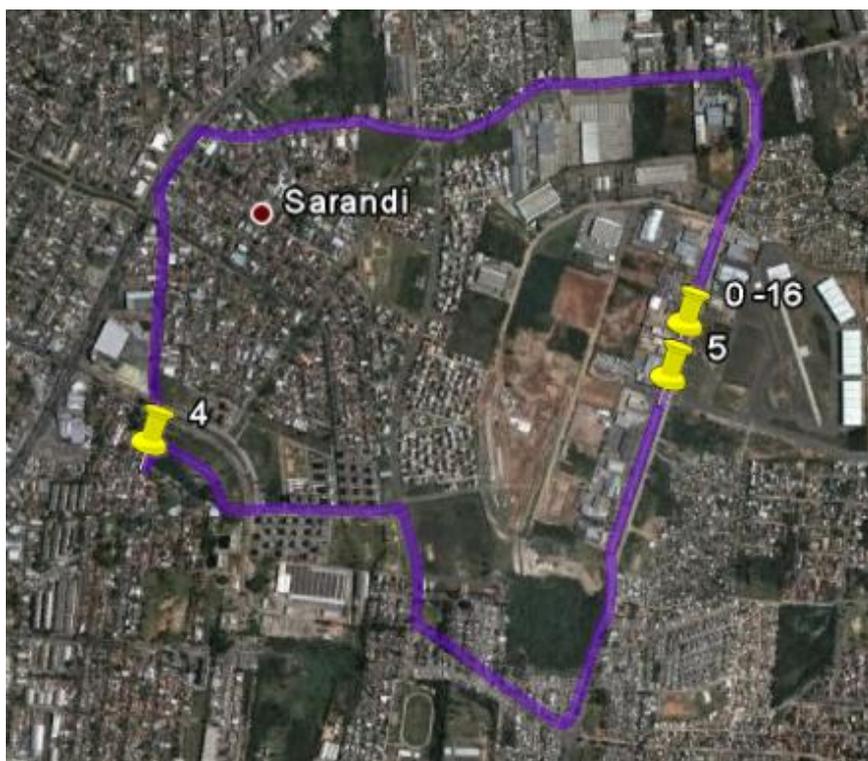


Figura 4.5: Rota utilizada pelo veículo 2.

De acordo com o resultado gerado pelo *software*, o custo por litro de ROF recolhido é de R\$ 1,6515, ficando 25,17% abaixo do preço de venda do biodiesel. Isso se dá pela necessidade de aquisição de um veículo a menos. Segundo a Revista Biodiesel (Revista Biodiesel, 2011), 80% do custo de produção do biodiesel são de matérias-primas.

Na Tabela 4.4, segue uma comparação entre os custos e os resultados obtidos pelos veículos Fiorino e Sprinter.

Tabela 4.4: Comparação entre Fiorino e Sprinter.

PARÂMETROS	FIORINO	SPRINTER
Capacidade	500 l	1400 l
Custo de rodagem	R\$ 0,28 /km	R\$ 0,25 /km
Custos Fixos	R\$ 0,3387 /km	R\$ 0,55 /km
Custo total	R\$ 0,6187 /km	R\$ 0,80 /km
Nº de veículos	3	2
Nº de rotas	3	2
Custo de coleta de ROF	R\$ 2,4598 /l	R\$ 1,6515 /l

Na busca pelo resultado de menores valores para os custos de coleta, mais modificações de cenários foram realizadas. Variações de velocidade média do veículo (entre 10 e 30 km/h), tempo máximo de jornada de trabalho (entre 6 e 10 horas), tempo de serviço em cada ponto (entre 10 e 20 minutos) e quantidade de ROF em cada ponto (100, 300 e 400). Para os três primeiros parâmetros, os valores por litro recolhido não eram alterados, ou seja, estes parâmetros não são muito relevantes para a otimização do processo. Ou as alterações eram compatíveis para a realização das coletas e o programa apresentava resultados, ou, em um tempo máximo de jornada muito baixa, por exemplo, o programa não convergia. Já para as alterações na quantidade de resíduos disponíveis em cada ponto, os resultados foram satisfatórios.

Utilizando o veículo Sprinter e mantendo-se os valores dos parâmetros do caso base, à exceção da quantidade de ROF por ponto (300 litros), o custo da coleta do óleo por litro foi de R\$ 1,0960, 50,34% abaixo do preço final do biodiesel, mesmo sendo necessária a utilização de quatro veículos. Aumentando a quantidade para 400 litros por ponto, o valor cai para R\$ 1,0266 /l, 53,49% abaixo do valor de venda do biocombustível, utilizando cinco veículos. Para 500 litros por ponto de coleta, o programa barra nas restrições e ocorre o mesmo problema de quando tenta-se aumentar a quantidade de 100 para 200 litros por ponto utilizando o Fiorino.

Outra maneira de minimizar os custos de coleta seria, com a diminuição da carga horária, diminuir o custo de cada motorista. Considerando a hipótese de um motorista receber R\$ 1.000 de vencimentos (salário e benefícios), o valor mais baixo encontrado por litro coletado, para uma carga horária de 6 horas, velocidade média de 20 km/h, tempo de serviço em cada ponto de 30 minutos (devido ao grande volume) e 400 litros por ponto de coleta, utilizando o Sprinter, foi de R\$ 0,8599, 61,04% abaixo do preço do produto final. Para o Fiorino com o mesmo cenário, apenas recolhendo 100 litros por ponto com tempo de serviço de 20 minutos em cada ponto, o custo ficou em R\$ 2,0615, ficando apenas 6,60% abaixo do preço do biocombustível.

A Tabela 4.5 traz um resumo de alguns cenários elaborados para a realização dos cálculos pelo modelo desenvolvido.

Tabela 4.5: Tabela resumo dos cenários utilizados nos cálculos.

CENÁRIO	1	2	3	4	5	6
Veículo	Fiorino	Sprinter	Sprinter	Sprinter	Sprinter	Fiorino
q (litros)	500	1400	1400	1400	1400	500
o <sub>i</sub> (litros)	100	100	300	400	400	100
c <sub>rod</sub> (R\$/km)	0,28	0,25	0,25	0,25	0,25	0,28
c <sub>f</sub> (R\$/km)	0,3387	0,55	0,55	0,55	0,55	0,3387
c <sub>tot</sub> (R\$/km)	0,6187	0,80	0,80	0,80	0,80	0,6187
c <sub>mot</sub> (R\$)	1.200	1.200	1.200	1.200	1.000	1.000
vel <sub>m</sub> (km/h)	20	20	20	20	20	20
t <sub>max</sub> (horas)	10	10	10	10	6	6
v (minutos)	20	20	20	20	30	20
Nº Veículos	3	2	4	5	5	3
Custo (R\$/l)	2,4598	1,6515	1,0960	1,0266	0,8599	2,0615

A Figura 4.6 faz uma comparação entre o valor de venda final do biodiesel e o custo por litro obtido em cada cenário. A mesma traz ainda uma linha indicando o valor referente a 80% do valor de venda do biocombustível. Segundo o site Valor On Line, este percentual é o que a matéria-prima representa no custo de produção de biodiesel.

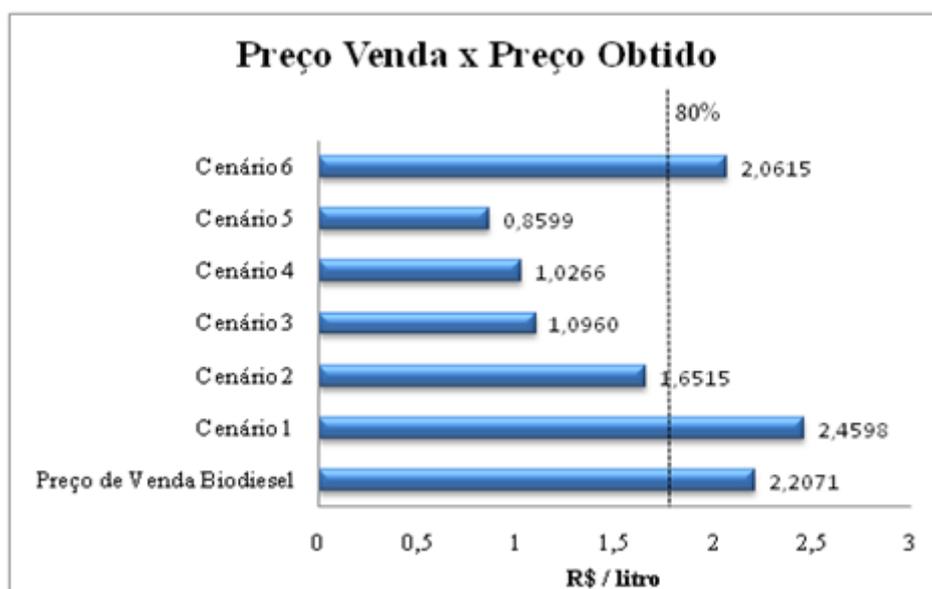


Figura 4.6: Comparação entre preço de venda do biodiesel e o preço obtido na matéria-prima.

## 5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi propor um método para desenvolver uma avaliação econômica do recolhimento de resíduos de óleo de fritura para a utilização deste como matéria-prima na produção de biodiesel. Com isto, milhares de litros de óleo de cozinha usados deixam de ser despejados nas redes de esgoto todos os dias, evitando com que milhões de litros de água sejam contaminados. O presente trabalho traz ainda exemplos de outros resíduos que podem ser utilizados na produção de energia, impedindo que sejam descartados na natureza, causando danos muitas vezes irreversíveis à mesma.

Um modelo de programação matemática para roteamento de veículos foi implementado e testado baseado no trabalho de Araújo, Hamacher e Scavarda (2010). O modelo proposto foi aplicado para a determinação de uma frota e utilização da mesma na coleta de ROF em quinze dos cento e quarenta e nove pontos de recolhimento de óleo de cozinha usado administrados pelo DMLU da cidade de Porto Alegre, gerando como resultado, o custo em reais por litro de óleo de fritura recolhido.

Para a configuração do caso base utilizando o veículo Fiorino, a pesquisa encontrou um custo de R\$ 2,4598 por litro coletado, ficando 11,45% acima do preço já do produto final praticado no último leilão da ANP, que foi de R\$ 2,2071 por litro de biodiesel, tornando o processo inviável. Utilizando a mesma configuração, trocando apenas o veículo de pequeno para médio porte (Sprinter), o resultado obtido por litro de ROF coletado foi de R\$ 1,6515, o que representa 74,83% do valor final do biocombustível. Segundo fontes, a utilização de outras matérias-primas para a produção de biodiesel como óleos vegetais representa 80% do custo do produto final.

Algumas alterações de cenários foram feitas como variações de velocidade média do veículo, tempo máximo de jornada de trabalho diária e tempo de realização do serviço por ponto. Nenhuma mudança de valor foi percebida. Somente com adição na quantidade de ROF por ponto de coleta obteve-se valores menores. Mantendo-se a configuração base e utilizando o Sprinter, para 300 litros de ROF em cada ponto o custo da coleta caiu para R\$ 1,0960, 50,34% abaixo do preço do final do biocombustível. Já para 400 litros, o preço ficou em R\$ 1,0266 por litro, o que representa 46,51% do preço final do litro do biodiesel. O melhor cenário foi obtido com a redução dos vencimentos do motorista, de R\$ 1.200 para R\$ 1.000,

já que a carga horária diária foi reduzida de 10 horas para 6. O valor obtido foi de R\$ 0,8599 por litro para o Sprinter, 38,96% do valor final do produto, garantindo a viabilidade econômica do processo. Já para o Fiorino, o valor foi de R\$ 2,0615, ficando apenas 6,60% abaixo do preço de venda do biodiesel.

## 5.2. Sugestões de trabalhos futuros

Para o presente trabalho foram utilizados apenas quinze pontos de coleta de ROF para a realização dos cálculos. O mesmo poderia ser aplicado a mais pontos, bastando apenas as distâncias entre os pontos serem adicionadas à matriz de distâncias presente no modelo desenvolvido. Com isto, o modelo poderia ser usado com uma realidade mais exata do cenário de Porto Alegre, ou a quaisquer municípios ou regiões metropolitanas.

Outra sugestão seria a elaboração completa de cenários de produção de biodiesel, desde a coleta de ROF até a produção de biodiesel, considerando outros custos como as demais matérias-primas, custos de produção e valores de impostos.

Inúmeras são as sugestões para elaboração de cenários ou mesmo alterações do modelo proposto. Uma delas seria propor um método onde o veículo retornasse ao depósito para descarregar e após voltasse à rua para cumprir outra rota, e não apenas comprar um veículo destinado para cada rota. Outras como: tornar a capacidade do veículo a ser otimizada; utilizar frotas mistas, ou seja, veículos de pequeno e médio porte ao mesmo tempo e também tornar o consumo como uma função da quantidade de óleo transportado e da velocidade do veículo são propostas que melhorariam o processo ou o tornaria mais perto de cenários reais. Estas hipóteses não foram consideradas para este estudo devido à complexidade, porém, seriam formas de diminuir o preço da coleta.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agência Nacional do Petróleo, [www.anp.gov.br](http://www.anp.gov.br), acesso em: abril de 2011.

ARAÚJO, V.K.W.S, HAMACHER, S., SCAVARDA, L.F. *Economic assessment of biodiesel production from waste frying oils*. Bioresource Technology, v. 101, p. 4415–4422, 2010.

BITTI, M.T., PERAZZINI, H., SILVÉRIO, R.J.R. *Avaliação preliminar do aproveitamento da casca de coco verde para co-geração de energia: um estudo de caso*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA EM INICIAÇÃO CIENTÍFICA. 8., 2009. Uberlândia. *Anais...* Uberlândia. 2009. 6 p.

BOUKIS, I., VASSILAKOS, N., KONTOPOULOS, G., KARELLAS, S. *Policy plan for the use of biomass and biofuels in Greece. Part II: Logistics and economic investigation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, p. 703-720, 2009.

CAIXETA, G. *Estudo de cenário de produção de biodiesel*. 2009. 139 f. Dissertação (Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Ciências). Instituto de Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2009.

CLEMENTE, Q.K. *Gestão de frotas de veículos rodoviários*. 2008. 19 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão Industrial, Dispositivos e Redes de Sistemas Logísticos). Instituto Superior Técnico. Universidade Técnica de Lisboa. 2008.

COELHO, S.T. *Geração de Energia a partir do Biogás gerado por Resíduos Urbanos e Rurais. Potencial e Viabilidade Econômica*. In: Congresso Brasileiro sobre Eficiência Energética e Co-geração de Energia. 5. 2008. São Paulo. *Anais...* São Paulo, Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2008, 27 p.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, [www.cetesb.sp.gov.br](http://www.cetesb.sp.gov.br), acesso em: maio de 2011.

COSTA NETO, P.R. et al. *Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em frituras*. Química Nova, v. 23, 531–537, 2000.

Departamento Municipal de Limpeza Urbana, [www.portoalegre.rs.gov.br/dmlu](http://www.portoalegre.rs.gov.br/dmlu), acesso em: novembro de 2010.

EL SABAGH, S.M., KEERA, S.T., TAMAN, A.R. *The characterization of biodiesel fuel from waste frying oil*. Energy Sources, v.33, p. 401-409, 2011.

FANGRUI, M., HANNA, M.A. *Biodiesel production: a review*. Bioresource Technology, v. 70, p. 1-15, 1999.

FELIZARDO, P. et al. *Production of biodiesel from waste frying oils*. Waste Management, v. 26, p. 487–494, 2006.

FIAT, [www.fiat.com.br](http://www.fiat.com.br), acesso em: abril de 2011.

Google, [www.google.com.br/maps](http://www.google.com.br/maps), acesso em: novembro de 2010.

HENRIQUES, R.M., OLIVEIRA, L.B., COSTA, A.O. *Geração de energia com resíduos sólidos urbanos: análise custo benefício*. In: Encontro Nacional da ECO ECO. 5. 2003. Caxias do Sul. *Anais...* Caxias do Sul, Sociedade Brasileira de Economia Ecológica, 2003, 25 p.

MAYER, F.D. et al. *Viabilidade de geração de energia através da casca de arroz: um estudo de caso*. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 27., 2007. Foz do Iguaçu. *Anais...* Foz do Iguaçu. 2007. 9 p.

Mercedes-Benz, [www.mercedesbenz.com.br](http://www.mercedesbenz.com.br), acesso em: abril de 2011.

MITTELBAACH, M., TRITTHART, P. *Diesel fuel derived from vegetable oils. III. Emission tests using methyl esters of used frying oil*. Oil Chem. Soc., v. 65, 1185–1187. 1988.

Portal do Biodiesel, [www.biodiesel.gov.br](http://www.biodiesel.gov.br), acesso em: abril de 2011.

Reportagem Canal Rural:

<http://mediacenter.clicrbs.com.br/templates/player.aspx?uf=1&contentID=132971&channel=99>, publicada em 20 de agosto de 2010.

Revista Biodiesel, [www.biodieselrevista.com](http://www.biodieselrevista.com), acesso em: maio de 2011.

Revista Valor On Line, [www.valoronline.com.br](http://www.valoronline.com.br), acesso em: junho de 2011.

RIBEIRO, L.A. *Gestão dos resíduos sólidos urbanos com geração de energia: o Projeto Ecoparque de Porto Alegre*. 2008. 100 f. Dissertação (Pós-Graduação em Administração como requisito parcial para a obtenção de título de Mestre em Administração). Escola de Administração. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2008.

SABUDAK, T., YILDIZ, M. *Biodiesel production from waste frying oils and its quality control*. Waste Management, v. 30, p. 799-803, 2010.

SEBRAE, Cartilha Biodiesel, 61 p., 2007.

SEBRAE. Cartilha Uso de resíduos e dejetos como fonte de energia renovável. 69 p., 2008.

SILVA, L.L. *Estudos de óleos residuais oriundos de processo de fritura e qualificação desses para processo de obtenção de monoésteres (Biodiesel)*. 2008. 65 f. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Química como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química). Unidade Acadêmica Centro de Tecnologia. Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2008.

SILVEIRA, M.S. *Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em salvador – BA*. 2008. 164 f. Dissertação (Pós-Graduação em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – Ênfase em Produção Limpa). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Bahia, 2008.

STEPHEN, J.D., MABEE, W.E., SADDLER, J.N. *Biomass logistics as a determinant of second-generation biofuel facility scale, location and technology selection*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v. 4, p. 503-518, 2010.

XAVIER, D.J.C. et al. *O beneficiamento do açaí no projeto modelo de Negócio de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas na Amazônia – NERAM*. *Scielo Proceedings*. 2006.

WILLUMSEN, H.C. *Energy recovery from landfill gas in Denmark and Worldwide*. LGF Consult, Denmark, 9 p., 1999.

ZAHER, F. *Utilization of used frying oil as diesel engine fuel*. *Energy Source*, v. 25, 819–826. 2003.

## Apêndice 1

Matriz de distâncias utilizada pelo GAMS para a realização dos cálculos.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	13,3	9,5	7,1	2,8	0,16	8,4	13	14,9	18	24,8	30,3	22,2	22,8	23,3	15,7	0
1	13,9	0	5,1	7,1	11,9	13	6	5,1	12,6	5,3	17,8	22,6	9,8	11,1	12,4	3,4	13,9
2	9,9	5	0	3,6	6,7	9,6	7,3	8,4	16	9,4	22,4	27,2	13,8	15	16,3	6,6	9,9
3	7,8	8,6	4,9	0	3,1	6	4,9	10,4	13,2	12,9	23,5	28,9	15,6	18,1	20,7	11	7,8
4	3,5	10,4	6,7	4,9	0	2,9	7,2	11,9	13,6	14,8	23,7	29,1	19,3	20,6	21,8	12,8	3,5
5	2,4	13,1	9,2	7,6	2,7	0	8,3	12,9	14,6	17,4	24,7	30,1	23,2	21,6	23,6	16,7	2,4
6	9,3	6,7	7	5,8	7,3	8,4	0	5	8,3	9,4	18,4	23,8	15,1	13,7	15,9	9	9,3
7	16,6	5,1	8,6	9,5	11,6	12,7	4,1	0	8,3	5,8	13,5	20,8	11,5	10	12	6,3	16,6
8	17,1	12,2	14,5	13,7	13,5	14,7	8,3	8,3	0	10,4	9,2	15,5	14,8	12,2	14,3	13	17,1
9	19,4	4,7	9,2	11,2	14,3	17,7	9,2	5,9	10,4	0	15	18,8	5,5	5,6	7,2	4,5	19,4
10	25,6	17,4	22	24	23,6	24,8	18,2	13,5	9,2	15	0	9,1	15,5	12,9	14,7	18,2	25,6
11	32,5	22,3	27,3	28,8	29	30,2	23,8	20,8	15,5	18,8	8,8	0	17,9	15,5	14,8	23	32,5
12	24	9,6	14,3	16,6	20,8	21,9	13,5	10,1	14,7	6,4	15,3	18,1	0	2,6	4	8	24
13	22,1	10,2	15,3	16,8	19,3	20,5	12,1	8,7	12,1	5,6	12,7	15,5	2,7	0	2	8,9	22,1
14	23,7	11,6	16,2	18,1	21,8	23	14,6	10,6	14,1	6,8	14,8	15,7	3,4	1,9	0	10	23,7
15	16,8	3,8	6,8	10,2	13,1	15,9	8,9	6,5	13	4,4	18,2	23	7,7	9,3	10,2	0	16,8
16	0	13,3	9,5	7,1	2,8	0,16	8,4	13	14,9	18	24,8	30,3	22,2	22,8	23,3	15,7	0