

Um modelo computacional para análise da produção de biodiesel, a partir do óleo de cozinha, e uso na coleta de resíduos sólidos urbanos

A computational model for analysis of biodiesel production, derived from cooking oil, and use in collection of garbage

Glauco Oliveira Rodrigues¹ - Universidade Federal de Santa Maria - Programa de Pós-Graduação em Administração
Adriano Pereira² - Universidade Federal de Santa Maria - Programa de Pós-Graduação em Administração
Eugênio de Oliveira Simonetto³ - Universidade Federal de Santa Maria - Departamento de Ciências Administrativas
Marcelo Trevisan⁴ - Universidade Federal de Santa Maria - Departamento de Ciências Administrativas
Daniel Visentini de Barcelos⁵ - Universidade Federal de Santa Maria - Centro de Processamento de Dados

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de modelo computacional para o aproveitamento do óleo de cozinha usado, proveniente dos Restaurantes Universitários de uma Instituição de Ensino Superior (IES) pública federal, como matéria prima para a geração de biodiesel. Estimaram-se os impactos ambientais e econômicos de se utilizar este bicomcombustível em caminhões de coleta de Resíduos Sólidos Urbanos em cidades da região central do estado do Rio Grande do Sul. Para o desenvolvimento do modelo, utilizou-se o método de Dinâmica de Sistemas. O modelo foi implementado utilizando o *software* Vensim e, a partir de uma análise de cenário para um período de 10 anos, verificaram-se as possíveis reduções da poluição de recursos hídricos e da emissão de CO₂, bem como a economia financeira, resultante da substituição da compra de óleo diesel proveniente do petróleo pelo biocombustível gerado a partir do óleo. Concluiu-se que a geração de biodiesel para emprego em caminhões de coleta de resíduos pode ser um destino para o óleo de cozinha usado, evitando, assim, a poluição do ar e de recursos hídricos, e contribuindo para uma economia financeira.

Palavras-chave: Biodiesel. Modelagem Computacional. Sustentabilidade.

ABSTRACT

This paper proposes a computer model to reuse cooking oil, collected from restaurants of a public university, as a raw material to generate biodiesel. Both the environmental and economic impacts were analyzed when this biofuel was used in trash trucks in cities in the central region of Rio Grande do Sul state, in Brazil. The model was developed based on System Dynamics and it was implemented using Vensim software. Employing a 10-year scenario analysis, it proved possible to reduce water pollution and CO₂ emissions, as well as save costs, when using biodiesel instead of buying mineral diesel. We concluded that generating biodiesel to use as fuel for trash trucks could be a way to reuse cooking oil, preventing air and water pollution, as well as saving costs.

Keywords: Biodiesel. Computational modeling. Sustainability.

1. Av. Roraima, n.1000, prédio 74C, Camobi, Santa Maria, RS. CEP: 97105-900; glaucop10@redes.ufsm.br; 2. peradri@gmail.com; 3. eosimonetto@gmail.com; 4. marcelotrevisan@smail.ufsm.br; 5. daniel.visentini@gmail.com

RODRIGUES, G. O.; PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. O.; TREVISAN, M.; BARCELOS, D. V. Um modelo computacional para análise da produção de biodiesel, a partir do óleo de cozinha, e uso na coleta de resíduos sólidos urbanos. **GEPROS. Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Bauru, Ano 15, nº 1, jan-mar/2019, p. 189-209.

DOI: 10.15675/gepros.v14i1.2102

1. INTRODUÇÃO

As revoluções da qualidade, nos anos 1980, e da cadeia de suprimentos, nos anos 1990, trouxeram à tona a necessidade da integração de questões ambientais na gestão de organizações (SRIVASTAVA, 2007). O conceito de sustentabilidade vem sendo discutido há algum tempo (LÉLÉ, 1991) e, muitas vezes, é visto como um *slogan* (LÉLÉ, 1991; BANERJEE, 2003). Embora constantemente seja vista apenas voltada às questões ambientais, a sustentabilidade deve englobar, também, as dimensões sociais e econômicas (ROBINSON, 2004).

O Ciclo de Vida de um produto envolve todas as suas fases de existência, desde a extração de matérias primas ou transformação de recursos naturais, sua produção, transporte, até a deposição final do produto na natureza (ISO, 2006). O conceito de “Ciclo de Vida” amplia a visão sobre o processo de produção industrial, porque possibilita a melhoria do seu desempenho, tanto do ponto de vista econômico quanto do ambiental. A análise do ciclo de vida, por sua vez, é uma técnica que permite a determinação dos impactos ambientais relacionados a um produto, serviço ou atividade, ao longo do seu ciclo de vida, e que visa, também, à identificação de pontos de melhoria do desempenho ambiental nesse ciclo (XAVIER; CALDEIRA-PIRES, 2004).

A Logística Reversa (LR) foi definida, no Brasil, pela Lei 12305, e é um conjunto de ações para facilitar a coleta e recuperação de resíduos sólidos, a partir dos setores de negócio, possibilitando a reutilização em ciclos de produção, ou a destinação correta em relação ao meio ambiente; a LR é vista como um instrumento econômico e social (CORRÊA; XAVIER, 2013). Ainda segundo Corrêa e Xavier (2013), a LR é uma atividade complexa e busca retornar os produtos para a cadeia de suprimentos, quando possível; seu fluxo é o oposto do original, indo dos consumidores para os produtores.

O óleo vegetal é um potencial poluidor do meio ambiente (MENDES, 2015) quando não descartado de forma correta. Ele pode causar prejuízos, como a contaminação da água: por possuírem densidades diferentes, a mistura entre óleo de cozinha e água é heterogênea, e o óleo tende a emergir, podendo formar uma película sobre a água. Isso ocasiona a diminuição, ou o bloqueio, da troca de oxigênio com o ambiente, podendo resultar na morte dos seres vivos que habitam o local (por exemplo, um rio ou córrego). O descarte inadequado também pode impermeabilizar solos e entupir tubulações, prejudicando o escoamento e provocando inundações (OLIVEIRA, 2014).

Por outro lado, ao analisar-se o ciclo de vida do óleo de cozinha, percebe-se que ele pode ser reciclado, gerando produtos como sabão, detergentes, rações animais, além de biocombustíveis (OLIVEIRA; SOMMERLATTE, 2009).

Ou seja, através de técnicas de logística reversa, pode-se obter o óleo de lanchonetes, restaurantes, e até mesmo domicílios, para que ele seja utilizado como matéria prima de outros produtos, provendo um desenvolvimento mais sustentável, que evita a poluição das águas e diminui a necessidade de aquisição de outras matérias primas para a fabricação desses produtos.

Se, em 1985, o total de petróleo consumido em todo o mundo foi 2.807 milhões de toneladas, esse número passou para 3.928 milhões de toneladas em 2008, com uma taxa média de crescimento anual de quase 1,5%; estima-se, dessa forma, que as reservas mundiais garantam o consumo para apenas mais 42 anos (SILVA, 2011). Assim, buscam-se alternativas renováveis para substituir os combustíveis fósseis, como o biodiesel, que pode ser gerado a partir do óleo de cozinha. Parente (2003), Alberici e Pontes (2004), Cristoff (2007), Bilck et al. (2009) e Mendes (2015) afirmam que uma alternativa para novas fontes energéticas é a utilização dos óleos vegetais.

O biodiesel, dessa forma, surge como uma fonte de energia alternativa e promissora, capaz não apenas de amenizar o alto custo do consumo de óleo diesel, mas também possibilitando a redução dos principais gases causadores do efeito estufa (ROCHA E CARRILHO, 2008), emitidos pela queima do combustível fóssil. De acordo com Donato (2008), a média anual de óleo utilizado por uma pessoa, tanto vegetal quanto animal, é de cerca de quatro litros por ano. Castellanelli et al. (2007) indicam que, devido à falta de informação, o óleo residual muitas vezes é despejado diretamente em pias e/ou vasos sanitários, indo para os sistemas de esgoto, o que pode levar aos problemas mencionados anteriormente, além de encarecer os processos das estações de tratamento da água.

O biodiesel é definido pelo Regulamento Técnico nº 45/2014 como um “combustível composto de alquil ésteres de ácidos carboxílicos de cadeia longa, produzido a partir da transesterificação e/ou esterificação de matérias graxas, de gorduras de origem vegetal ou animal” (ANP, 2014). Parente (2003) apud Abreu et al. (2012) indica que o biodiesel é um combustível renovável, biodegradável e ambientalmente correto, que pode substituir o óleo diesel mineral.

Diante deste contexto de possível descarte incorreto do óleo de cozinha, e seu potencial uso como matéria prima para o biodiesel (um combustível renovável), este artigo defende o reaproveitamento do óleo pós-uso dos Restaurantes Universitários de uma Instituição de Ensino Superior da região central do Rio Grande do Sul, para a geração do biocombustível. O biodiesel, produzido a partir de oleoginosas ou de resíduos de óleo, possui características químicas apropriadas, é benéfico ao ambiente, polui menos que o diesel mineral, é competitivo economicamente, auxilia na redução ao aquecimento global, entre outras vantagens (FERNANDES et al., 2008). Este combustível gerado poderia,

então, ser utilizado na coleta de Resíduos Sólidos de sete municípios da região central do Rio Grande do Sul.

Para mostrar a viabilidade da proposta, elaborou-se um modelo de simulação computacional para analisar os ganhos em questões ambientais e econômicas da utilização do biodiesel neste cenário. Com os resultados obtidos pelo modelo, pretende-se entregar aos gestores informações úteis ao processo decisório para o desenvolvimento de melhores práticas na reciclagem do óleo, de forma que um possível resíduo torna-se matéria prima para um novo produto.

O artigo está assim organizado: na seção 2 é apresentado o referencial teórico utilizado para desenvolvimento do estudo. A seção 3 traz o método de pesquisa, junto à hipótese dinâmica a ser verificada com o trabalho. Na seção 4 está detalhado o modelo computacional construído. Já a seção 5 apresenta o experimento e os resultados da simulação realizada. Por fim, as considerações finais são apresentadas na seção 6.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção, é apresentado um levantamento teórico sobre o objeto do artigo, em especial, abordam-se o biodiesel, trabalhos relacionados e a dinâmica de sistemas.

2.1. Biodiesel

O biodiesel, segundo Mendes (2015), é uma fonte de energia secular, levando-se em conta que o doutor Rudolf Diesel, em 1900, apresentou na feira de Paris um combustível gerado a partir do óleo de amendoim. Esta energia secular foi deixada de lado por muitos anos, até o momento em que os países começaram a estudar alternativas para uma energia mais limpa e duradoura, que por ventura pudesse substituir em parte, ou totalmente, o petróleo (CARIUCA; ALMEIDA, 2011).

Grandes movimentos mundiais tentam apresentar propostas para a diminuição da poluição ambiental, e este fato contribui para o biodiesel voltar ao mercado. A ANP define o biodiesel como combustível composto alquil ésteres de ácidos graxos de cadeia longa, derivados de óleos vegetais ou gorduras animais (BRASIL, 2008).

Do lado estratégico, Ferrari, Oliveira e Scabio (2005) entendem que o biodiesel pode ser uma fonte renovável capaz de substituir o óleo diesel e derivados do petróleo. Ele pode ser aditivo para combustível ou ser usado puro a 100%

(B100, onde o número indica a quantidade de biodiesel adicionada ao diesel mineral). Motores a diesel convencionais podem funcionar com até 20% de biodiesel misturado ao diesel mineral (B20). Países como França, Áustria e Alemanha já adotam esta estratégia.

Para estimular a produção de biodiesel no Brasil, o governo federal lançou em 2004 o Programa de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). O objetivo deste programa é estimular a produção de biodiesel de uma forma sustentável, promovendo a inclusão social e garantindo preços competitivos, qualidade e suprimento (MENDES, 2015).

Desde sua criação, o PNPB auxilia pesquisas a dosarem misturas de biodiesel ao composto mineral, buscando diminuir as perdas de rendimento do motor. Uma lei publicada no Diário Oficial da União no dia 24 de março de 2015 aumenta a mistura obrigatória do biodiesel no óleo diesel vendido no país para 8% até 2017; 9% até 2018; e 10% até 2019 (O GLOBO, 2016). O Conselho Nacional de Política Energética do Brasil afirma que o percentual poderá alcançar 15% nos anos seguintes, desde que os testes não apontem nenhuma dificuldade aos motores.

2.2. Trabalhos relacionados

Fernandes et al. (2008) trazem o uso do biodiesel, gerado a partir de óleo de fritura residual, como uma alternativa energética e de desenvolvimento socioeconômica. Além de expor as etapas da geração do combustível, explicando aspectos técnicos, os autores apresentam um conjunto de vantagens, com relações econômicas, sociais e ambientais. O trabalho menciona a possibilidade do uso de mão de obra dos coletores de materiais recicláveis e parcerias com fontes geradoras do óleo de fritura e potenciais consumidores do óleo, para a geração do biocombustível.

Silveira e Vieira (2014) discutem o emprego do uso do óleo residual de fritura na produção de biodiesel, salientando a importância da conscientização da população para a coleta e reciclagem do óleo residual. Barbosa e Pasqualetto (2008) discutem o uso do óleo residual como matéria prima para a geração do biodiesel, ressaltando que o óleo de fritura muitas vezes é desprezado ou mal aproveitado. Ainda, segundo os autores, é preciso criar uma estrutura organizada para a produção e distribuição do biocombustível para atingir potenciais mercados.

Já no trabalho de Rabelo e Ferreira (2008), as viabilidades sociais, econômicas e ambientais da coleta seletiva de óleos residuais pós-uso são abordadas, em um foco de aproveitamento industrial. Dentre as alternativas de reciclagem do óleo de fritura apresentadas no trabalho está o biodiesel. Outro trabalho

que discute o uso do óleo residual na produção de biodiesel é o de Santos e Silva (2016). Os autores ratificam as vantagens do uso do óleo residual para a criação de um combustível renovável, evitando danos ao meio ambiente (como a poluição do solo e da água), além de possibilitar a criação de empregos no setor produtivo e permitir a produção do biodiesel sem a necessidade de cultivo de culturas destinadas à produção de biocombustíveis, colaborando com a segurança alimentar.

2.3. Dinâmica de sistemas

Jay Forrester, em 1950, desenvolveu a metodologia de Dinâmica de Sistemas, tornando possível estudar o comportamento dos sistemas em relação ao passar do tempo, ou seja, trata-se de uma metodologia que permite a avaliação das consequências de suas decisões em um horizonte temporal futuro (DAELLENBACH; MCNICKLE, 2005).

Dois componentes principais definem a estrutura de modelos em Dinâmica de Sistemas: os estoques e os fluxos. Os estoques referem-se às variáveis do modelo que são acumuladas no sistema, e os fluxos são as decisões ou políticas do sistema. Feedback são as relações de causa e efeito dos componentes presentes no modelo, e estão sujeitos às defasagens temporais no sistema em análise. Ford (2009) define a Dinâmica de Sistemas como um método que combina fluxos e estoques em uma estrutura computacional a ser simulada.

Múltiplos autores utilizam-se desta metodologia para a análise de questões relacionadas ao meio ambiente e à sustentabilidade, dentre os quais pode-se citar os estudos de Sufian e Bala (2007); Abeliotis et al. (2009); Dyson e Chang (2005); Kum et al. (2005) e Simonetto (2014).

A utilização desta metodologia, neste trabalho, foi motivada pelo objetivo de avaliar, em um horizonte futuro de tempo, as possibilidades de benefícios ambientais e econômicos da geração de biodiesel a partir do óleo dos Restaurantes Universitários da IES e sua transformação em biodiesel, que será utilizado na coleta de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de sete municípios da região central do Rio Grande do Sul.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento desta pesquisa baseou-se na metodologia de Dinâmica de Sistemas e na metodologia apresentada por Law (2015), que se constitui de quatro etapas: (i) estudos exploratórios em publicações científicas e relatórios

técnicos, entrevistas com *stakeholders* e observações do ambiente onde os dados são coletados; a partir desses dados, o problema de pesquisa foi especificado e estruturado; (2) desenvolvimento da solução, pela construção de modelos formais capazes de representar o problema; (3) implementação computacional da solução, neste caso, utilizando-se o simulador Vensim (VENTANA SYSTEMS, 2016); e (4) verificação e validação (v&v) da solução, através de testes em laboratório; para a validação do modelo, foi simulado um experimento utilizando dois cenários (otimista e atual) para comparação.

A construção do modelo computacional baseou-se em dados de uma empresa privada de coleta de RSU da região central do Rio Grande do Sul e de uma Instituição de Ensino Superior parceira do estudo. Todavia, ressalta-se que o modelo pode ser aplicado e estendido a outros casos, desde que especificidades sejam adicionadas e tratadas corretamente. A escolha da IES e da empresa privada deu-se por conveniência, e pelo interesse em examinar o impacto das análises propostas neste estudo.

Os dados primários para as entradas do modelo foram coletados na Instituição e também na empresa, que serviu de análise para o desenvolvimento e validação. Os dados com relação ao biodiesel e ao diesel foram buscados em pesquisas nas bases de dados do governo federal brasileiro, além de artigos científicos.

3.1. Hipótese dinâmica

A hipótese dinâmica busca trabalhar a teoria do problema, analisando o seu comportamento e observando quais as variáveis fazem parte do sistema (SILVA, 2006). Busca-se, portanto, uma hipótese para explicar a dinâmica como consequência da estrutura do sistema, por meio da interação das variáveis dos agentes do modelo (STRAUSS, 2010). A hipótese dinâmica do modelo desenvolvido neste trabalho é:

O acréscimo de biodiesel, gerado a partir de óleo de cozinha reprocessado, ao combustível de caminhões de coleta de resíduos sólidos gera uma otimização desta atividade, com a economia de recursos econômicos e redução de poluição de água e menor emissão de CO₂. Esta hipótese pode ser verificada com o uso da modelagem matemática.

3.2. Caracterizações do ambiente de coleta de resíduos

Este estudo tem como foco estudar a coleta de lixos da região central do Rio Grande do Sul: Agudo (16.722 habitantes), Cacequi (13.676 habitantes), Faxinal do Soturno (6.672 habitantes), Mata (5.111 habitantes), Restinga Seca (15.849 habitantes), São Francisco (19.254 habitantes) e São Martinho da Serra (3.201 habitantes), dados do IBGE (2010).

A coleta de resíduos sólidos da região é realizada por 7 caminhões de lixo, que possuem um rendimento em média de 2,5 quilômetros por litro. Cada município possui um caminhão responsável pela coleta. O recolhimento do lixo acontece de forma diferenciada, com base na quantidade de habitantes de cada local. A coleta é trazida para Santa Maria, onde se localiza o único aterro sanitário licenciado da região. Os municípios abordados neste estudo não possuem transbordo e nem triagem.

4. O MODELO DE SIMULAÇÃO

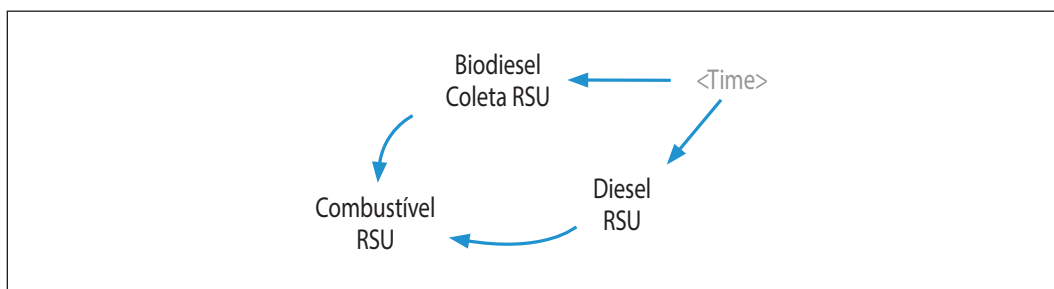
Para verificar os benefícios da reciclagem do óleo residual dos Restaurantes Universitários de uma Instituição de Ensino Superior para produção de biodiesel, e sua utilização como combustível de caminhões que realizam a coleta de RSU na região da IES, um modelo computacional foi construído. O objetivo do modelo consiste em estimar, através de simulação: (i) a potencial redução da poluição de água, devido à reciclagem do óleo de cozinha e não despejo em redes pluviais; (ii) a diminuição da geração de CO₂, pelo acréscimo de biodiesel na mistura com o óleo diesel mineral utilizado como combustível nos caminhões da coleta; e (iii) a economia financeira ocasionada pelo uso do biodiesel em substituição à parte do óleo mineral. Dessa forma, seguindo a Dinâmica de Sistemas, busca-se prever os benefícios da proposta do artigo em um horizonte de tempo definido pelo usuário/gestor. Neste trabalho, os cenários foram simulados para um período de 10 anos.

Por motivos de organização, o modelo construído foi dividido em dois submodelos: o submodelo Coleta dos Resíduos, e o submodelo Alimentação dos Universitários. As variáveis do modelo de simulação foram definidas com base em trabalhos acadêmicos e governamentais da área de resíduos: BNDES (2004), CONAMA (2011), Mendes (2016), Oliveira e Filho (2014), Simonetto et al. (2014), Rizzetti et al. (2016) e Zucatto, Welle e Silva (2013). Nas subseções a seguir, discutem-se os submodelos e o modelo completo construído.

4.1. Submodelo coleta dos resíduos

O submodelo Coleta dos Resíduos tem por finalidade simular o comportamento relativo ao consumo de combustível das coletas anuais dos municípios estudados. A variável auxiliar BiodieselColetaRSU tem o propósito de armazenar a quantidade de biodiesel gasta anualmente pelos caminhões na coleta de RSU. Já a quantidade de diesel mineral gasta na coleta, por ano, é armazenada na variável auxiliar DieselRSU. Ambas são conectadas pela variável *shadow time*, que permite variar seus valores na projeção de tempo. A interação entre estas 3 variáveis é responsável por alimentar a variável de estoque CombustívelRSU, que armazena a quantidade total de combustível gasta durante a coleta, e é composta pela soma das variáveis DieselRSU e BiodieselColetaRSU. A Figura 1 apresenta o Diagrama de Dinâmica de Sistemas do submodelo Coleta dos Resíduos.

Figura 1 - Submodelo Coleta dos Resíduos.



Fonte: Autores (2017).

4.2. Submodelo alimentação dos universitários

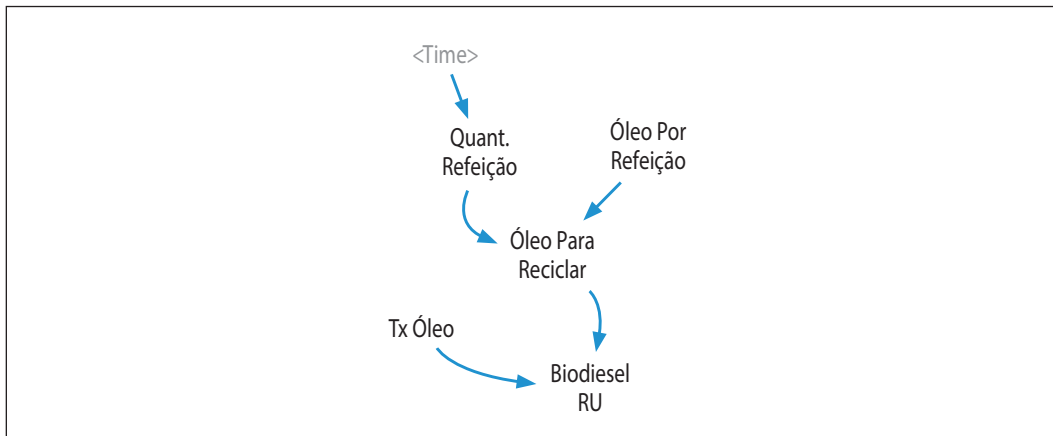
O submodelo Alimentação dos Universitários busca calcular a quantidade total de biodiesel que pode ser gerada a partir da reciclagem do óleo residual dos Restaurantes Universitários da IES estudada. Ele utiliza as seguintes variáveis auxiliares: (i) Quant.Refeição, que indica o número de refeições servidas por ano; (ii) ÓleoPorRefeição, que informa a quantidade de óleo residual de cada refeição; (iii) ÓleoParaReciclar, que calcula a quantidade de óleo disponível para reciclagem, a partir do produto das outras duas variáveis; (iv) TxÓleo, que traz a taxa de aproveitamento do óleo para a geração do biodiesel; e (v) a variável de estoque BiodieselRU, que armazena a quantidade de biodiesel gera-

do a partir da reciclagem do óleo, ou seja, é construída a partir do produto da quantidade de óleo (ÓleoParaReciclar) pela taxa de aproveitamento (TxÓleo).

Com base em Santos (2009), definiu-se que a taxa de aproveitamento do óleo de cozinha para a produção de biodiesel é 80%, ou seja, para cada 1 litro de óleo residual disponível, são gerados 800ml de biodiesel.

A variável dinâmica responsável por armazenar a quantidade de refeições servidas é diretamente afetada por variações nos números de alunos e servidores presentes na instituição. Baseado em dados internos da instituição, o crescimento no número de refeições foi estimado em 5000 refeições ano. A quantidade de óleo por refeição foi mantida constante, em 0,00411 litro por refeição. A Figura 2 representa o submodelo Alimentação dos Universitários.

Figura 2 - Submodelo Alimentação dos Universitários.

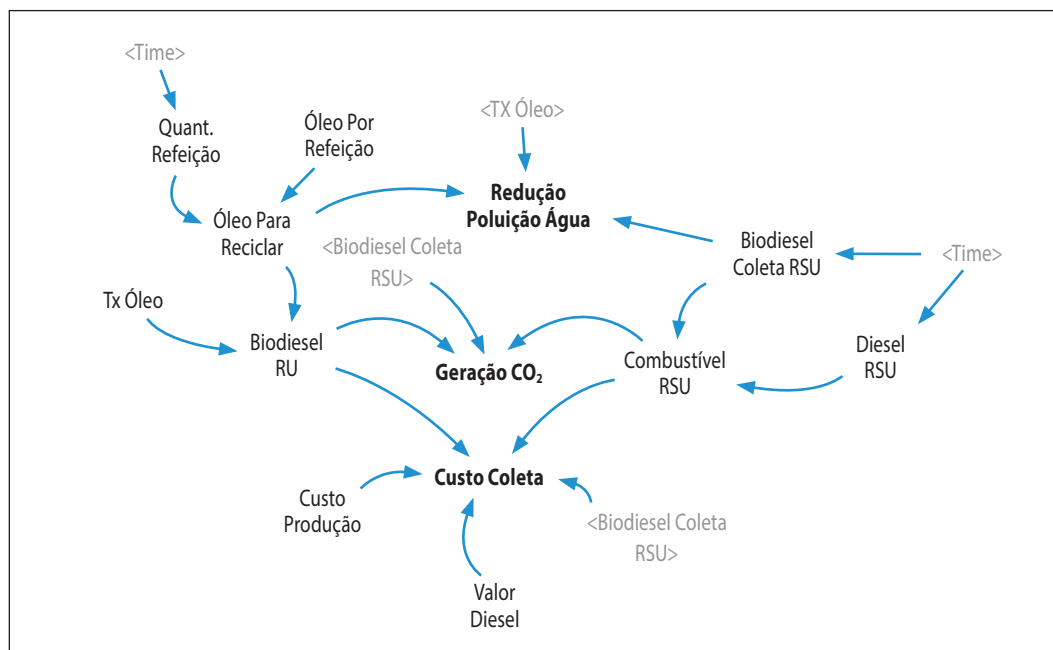


Fonte: Autores (2017).

4.3. O Modelo de simulação

O modelo completo integra os dois submodelos anteriormente descritos, junto às variáveis responsáveis por: (i) calcular a potencial redução da poluição da água (ReduçãoPoluiçãoÁgua), devido ao não descarte incorreto do óleo; (ii) estimar a quantidade de gás CO₂ emitido pelos caminhões da coleta (GeraçãoCO₂), que tende a diminuir com o acréscimo do biodiesel; e (iii) prever o valor total da coleta (CustoColeta), através do preço gasto para a compra do diesel necessário para a realização da coleta, quantidade esta que também deve diminuir, em virtude do acréscimo do biocombustível. A Figura 3 apresenta o modelo computacional completo, construído com o *software* VENSIM-PLE.

Figura 3 - Modelo de Computação Desenvolvido.



*Modelo gerado através do software VENSIM-PLE.

Fonte: Autores (2017).

Segundo dados da resolução do CONAMA (2011), é permitido até 50 mg/l de óleos vegetais e gorduras animais nos efluentes. A densidade indicada pela ANVISA para o óleo de cozinha é de 0,920. A partir destes dados, pode-se calcular o impacto ambiental causado por litro de óleo descartado de forma indevida no ambiente, em relação à poluição da água. Daí, tem-se que cada litro de óleo precisa de 18.400 litros de água para dispersão.

Como não há custo na obtenção da matéria prima (óleo de cozinha), utilizou-se como valor da produção de 1 litro de biodiesel puro o valor de R\$ 1,05, referente aos produtos e processos químicos necessários para a transformação do óleo em combustível (RIZZETTI, et. al 2016). O diesel comum emite 2.669 kg de CO₂ por litro queimado, já o diesel B5, com 5% de biodiesel, apresenta uma redução de poluição de 3,75% em relação ao diesel mineral puro, enquanto que o combustível com 20% de biodiesel (B20) tem uma redução de 15,28% (RIZZETTI et al., 2016). Por outro lado, ainda segundo os autores, o diesel B20 aumenta o consumo do motor em 6%. Esses valores foram considerados na construção do modelo. O preço do diesel mineral utilizado foi mantido constante, em R\$ 2,99.

Com base nestas informações, pode-se definir as equações utilizadas para gerar as variáveis GeraçãoCO₂ e ReduçãoPoluiçãoÁgua. O valor da variável GeraçãoCO₂ é obtido através do produto da quantidade de biodiesel gerado e a quantidade de emissão de CO₂ por litro de diesel comum (2,66 kg/CO₂) pela redução estimada do biodiesel (15%). O cálculo é realizado em duas etapas, inicialmente calcula-se a geração do combustível atual e subtrai-se do combustível proposto. Já a variável ReduçãoPoluiçãoÁgua é definida pelo produto da quantidade de óleo residual (potencial poluidor) pela quantidade, em litros, de água necessária para sua dispersão (18.400 litros de água para cada litro de óleo residual). A Figura 4 sintetiza as principais equações das variáveis do modelo.

Figura 4 - Modelo de equações.

$$\begin{aligned} \text{ÓleoParaReciclar} &= \text{QuantRefeição} * \text{ÓleoPorRefeição} \\ \text{BiodieselRU} &= \text{Óleo Para Reciclar} * \text{Tx Óleo} \\ \text{CombustívelRSU} &= \text{BiodieselColetaRSU} + \text{Diesel RSU} \\ \text{GeraçãoCO}_2 &= ((\text{CombustívelRSU} - \text{BiodieselColetaRSU}) * 2.669) - ((\text{BiodieselRU} + \text{BiodieselColetaRSU}) * \\ & (2.669 * 0.85)) \\ \text{ReduçãoPoluiçãoÁgua} &= (\text{ÓleoParaReciclar} + (\text{BiodieselColetaRSU}/\text{Tx Óleo})) * 18400 \\ \text{CustoColeta} &= ((\text{Biodiesel Coleta RSU} + \text{BiodieselRU}) * \text{Custo Produção}) + ((\text{Combustível RSU} - \text{Biodiesel} \\ & \text{Coleta RSU}) * \text{Valor Diesel}) \end{aligned}$$

Fonte: Autores (2017).

5. EXPERIMENTO E RESULTADOS

Para a realização da simulação, foram projetados dois cenários, um definido como Cenário Atual, que representa a coleta sem o acréscimo do biodiesel, e outro chamado Cenário Positivo, que inclui o biodiesel gerado do óleo residual das refeições dos restaurantes universitários, como combustível dos caminhões de coleta, substituindo parte do diesel mineral. No Cenário Positivo, a quantidade de biodiesel utilizada foi incrementada gradativamente, dos atuais 7%, até chegar em 15% no último ano da simulação.

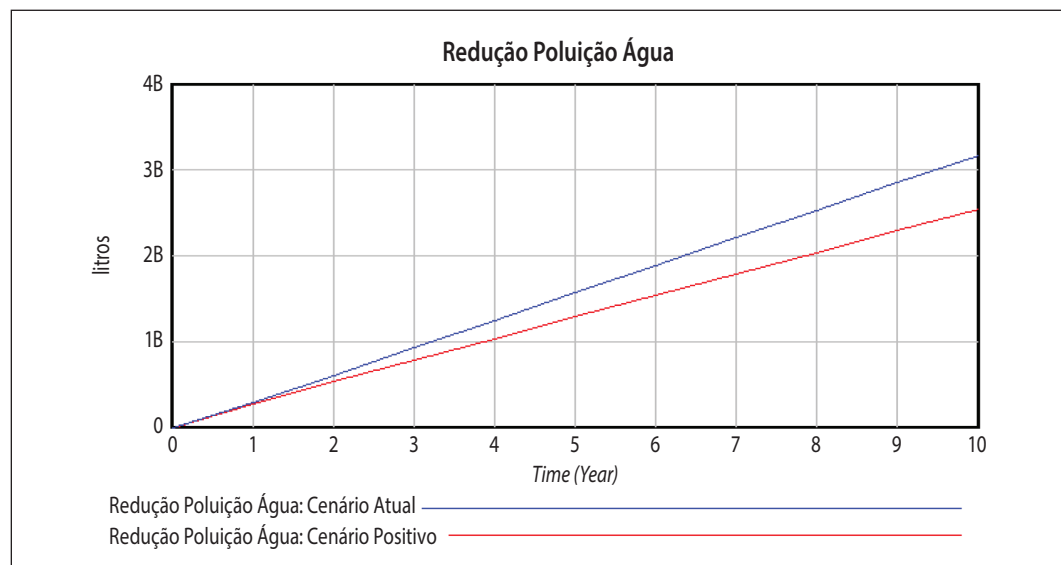
A partir da determinação dos dois cenários para a experimentação do modelo, as simulações foram executadas no simulador Vensim (VENSIM-PLE, 2016) em um computador com processador Intel Core i3 e 4 Gb de memória RAM. O tempo de execução da simulação foi na ordem de centésimos de segundos. O horizonte de tempo simulado no experimento foi de 10 (dez) anos, porém a configuração dessa variável fica a cargo do projetista/usuário, pois a mesma depende da análise a ser feita.

O modelo desenvolvido proporciona diversas análises. Foram selecionadas as que aparentam ser mais relevantes para os autores e *stakeholders* da IES e gestores da empresa de coleta de RSU: avaliação do custo total da coleta de resíduos, geração de CO₂ provenientes dos caminhões responsáveis pela coleta e poluição da água gerada a partir do mal descarte do óleo de cozinha pós-uso.

É importante ressaltar que o modelo é aberto a novas configurações, logo, toda e qualquer análise do tipo *what if* é de simples e fácil utilização, pois quando da modificação nos valores das taxas e variáveis, novos resultados são gerados para análise dos usuários.

A primeira análise desenvolvida com o modelo refere-se à comparação da quantidade (em litros) de água que poderão ser preservados a partir do não descarte incorreto do óleo de cozinha. No horizonte de 10 anos simulados, nota-se que o Cenário Positivo possui um potencial de redução maior que o Cenário Atual. A diferença entre os dois cenários chega a aproximadamente 437 mil litros de água por ano, o resultado mostra que ao fim de 10 anos a diferença chega à aproximadamente 37%. A variação está exposta na Figura 5.

Figura 5 - Redução da Poluição da Água.



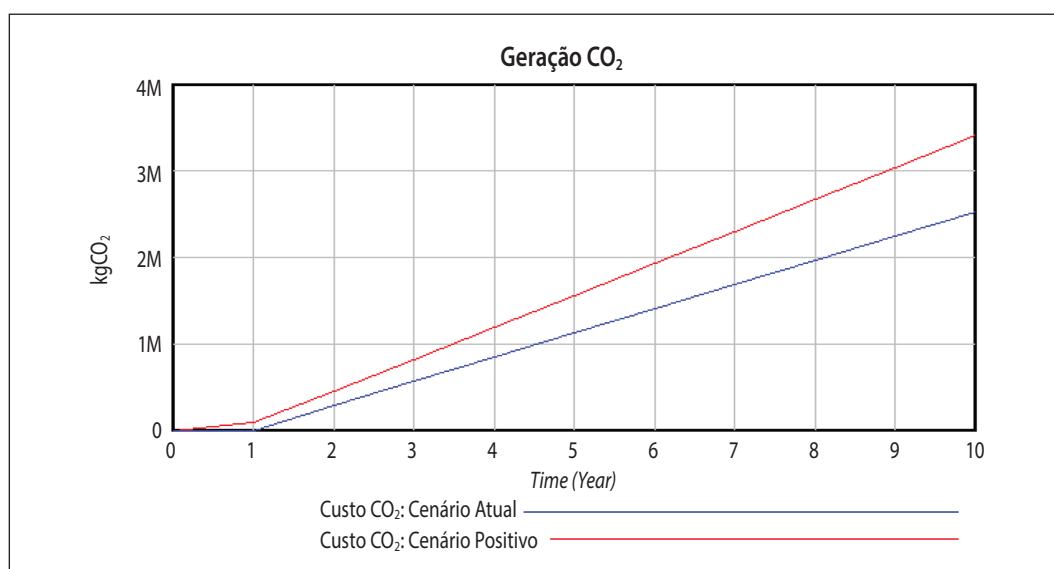
*Modelo gerado através do *software* VENSIM-PLE.

Fonte: Autores (2017).

Outra análise realizada também refere-se ao impacto ambiental causado pela utilização de diesel mineral na coleta de Resíduos Sólidos Urbanos. Nova-

mente, o Cenário Positivo apresenta um potencial menos denegridor ao meio ambiente quando comparado ao Cenário Atual. Na simulação de 10 anos, o Cenário Positivo apresenta uma redução na geração de CO₂ de aproximadamente 319 mil kg de CO₂ ao ano, podendo ser capaz de reduzir em até 18% a geração de CO₂ no ano 10 (comparando a capacidade de geração de CO₂ do Cenário Atual). O aumento desta diferença está claramente apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Geração CO₂.



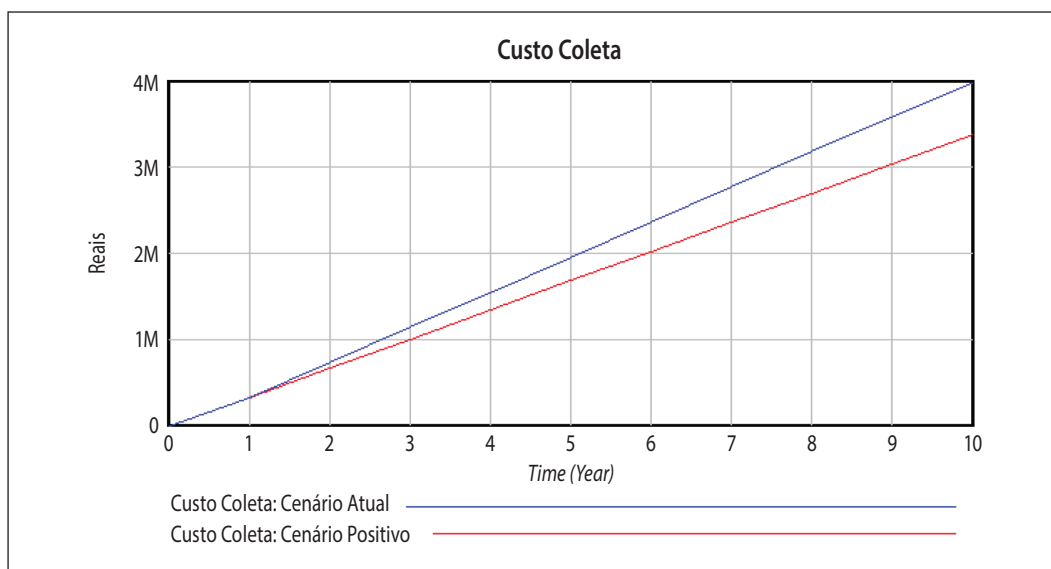
*Modelo gerado através do *software* VENSIM-PLE.

Fonte: Autores (2017).

Para analisar os benefícios financeiros que podem ser obtidos com a utilização do biodiesel gerado a partir da reciclagem do óleo pós-uso da IES, comparou-se o ganho atual, obtido da venda do óleo como resíduo, com a economia de combustível comprado ao utilizar este óleo junto ao diesel dos motores dos caminhões de coleta. Levou-se em conta o preço dos combustíveis utilizados na coleta dos Resíduos (Diesel e Biodiesel) apresentados na base de dados da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, cuja última atualização data de junho de 2016. Ao final da modelagem, os resultados apontam o Cenário Positivo como o mais econômico. Apenas no primeiro ano de coleta o custo será maior que o Cenário Atual, com uma diferença de aproximadamente 3 mil reais, valor quase nulo quando comparado ao total

gasto na coleta nos 10 anos simulados. A proposta de utilização do óleo dos Restaurantes Universitários da IES para a composição de biodiesel reduziria em aproximadamente R\$ 307 mil por ano na coleta dos 7 municípios da região central do estado do Rio Grande do Sul, o que representa 14% de economia ao final da simulação (ano 10). A Figura 7 apresenta a variação do custo da coleta nos 10 anos simulados.

Figura 7 - Custo Coleta.



*Modelo gerado através do *software* VENSIM-PLE.

Fonte: Autores (2017).

De modo a facilitar o entendimento das análises relativas ao quantitativo desta simulação e todos os benefícios gerados, a Tabela 1 apresenta o total relativo a cada grupo de classificação ao final do tempo simulado (10 anos).

Tabela 1 - Resultados sumarizados nos cenários analisados.

	Cenário Atual	Cenário Positivo
Redução Poluição Água (em litros)	12.648.907	17.387.134
Geração de CO ₂ (Quilogramas)	17.289.806	14.098.390
Custo total da Coleta (em Reais)	21.580.059	18.507.420

Fonte: Autores (2017).

Ao final do estudo, foi realizada uma consulta com especialista, o qual procedeu a validação do modelo e certificou a modelagem realizada.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O foco do estudo apresentado na pesquisa foi o desenvolvimento, verificação, validação e experimento de um modelo de simulação computacional para avaliação de cenários para o reaproveitamento do óleo de cozinha pós-uso, utilizado nas cozinhas dos Restaurantes Universitários de uma IES, onde não existe a política de reaproveitamento de óleos vegetais, para a geração de biodiesel e aplicação como combustível em caminhões de coleta de RSU. A hipótese apresentada no método de pesquisa foi confirmada, tendo em vista que o reaproveitamento do óleo diminui o custo e os danos ambientais gerados pelo mau descarte, assim, podendo gerar ganho financeiro, bem como reduzir a quantidade de CO₂ liberada na atmosfera e contribuir para a não poluição da água.

Alguns produtos, quando mal descartados após seu uso, podem trazer grandes problemas ambientais, porém, se bem utilizados, podem voltar para a cadeia de suprimentos como matéria prima. Este é o caso do óleo de cozinha, que pode contaminar os recursos hídricos, causando uma série de problemas, quando mal despejado, mas ser usado como fonte geradora do biodiesel. As Universidades, em especial, devem ser exemplos para questões de desenvolvimento sustentável. Nesse sentido, este trabalho defende o uso do óleo utilizado nos Restaurantes Universitários de uma Instituição de Ensino Superior da região central do RS como matéria prima para produção de biodiesel, de modo que este combustível seja utilizado em caminhões de recolhimento de RSU de cidades da região.

Neste trabalho, foi proposto um modelo computacional, que confrontou o cenário atual com um cenário otimista, de acréscimo de biodiesel ao diesel mineral utilizado como combustível desses caminhões, analisando-se uma perspectiva de 10 anos futuros. Os resultados apresentados foram obtidos através de simulações feitas utilizando o *software* Vensim. A partir deles, verificou-se a redução do impacto ambiental em relação à poluição da água, pelo óleo mal descartado, e do ar, pela queima do diesel mineral, ratificando a aplicação da solução proposta.

Como limitações do trabalho têm-se a simplificação da realidade, inerente dos modelos de simulação, uma vez que é preciso selecionar as variáveis de maior impacto para a construção do modelo abstrato. Além disso, a produção do biodiesel pode contaminar a água com hidróxido de sódio e glicerina, prin-

principalmente se o processo for amador, situação que não foi considerada neste modelo. A necessidade de predição de valores das variáveis para os anos futuros dos cenários avaliados também limita o trabalho. Como continuidade da pesquisa, espera-se estudar a aplicação do biodiesel em outros casos, verificar a produção a partir de outras fontes de óleo, e considerar a possível poluição da água na geração do biocombustível.

REFERÊNCIAS

ABELIOTIS, K.; KARAISSKOU, K.; TOGIA, A.; LASARIDI, K. Decision Support Systems in Solid Waste Management: A Case Study at the National and Local Level in Greece. **Global NEST Journal**, v. 11, n. 2, p. 117-126, 2009.

ABREU, Y. V.; OLIVEIRA, H. R.; LEAL, J. E. C. **Biodiesel no Brasil em Três Hiatos: Selo Combustível Social, Empresas e Leilões. 2005 a 2012.** Málaga, Espanha: Eumed.net, Universidad de Málaga, 2012, 214p.

ALBERICI, R. M.; PONTES, F. F. F. Reciclagem de Óleo Comestível Usado Através da Fabricação de Sabão. **Revista Engenharia Ambiental**, v. 1, n. 1, p. 74-76, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. ANP. **Resolução ANP número 45.** 2014. Disponível em: <<https://www legisweb.com.br/legislacao/?id=274064>>. Acesso em 05 mai 2017.

BANERJEE, S. B. Who Sustains Whose Development? Sustainable Development and the Reinvention of Nature. **Organization Studies**, v. 24, n. 1. 2003

BARBOSA, G. N.; PASQUALETTO, A. **Aproveitamento do Óleo Residual de Fritura na Produção de Biodiesel.** Universidade Católica de Goiás. 2007. Disponível em: <<http://professor.pucgoias.edu.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/7074/material/APROVEITAMENTO%20DE%20C3%93LEO%20RESIDUAL%20DE%20FRITURA%20NA%20PRODU%20C3%87%20C3%83O%20DE%20BIODIESEL.pdf>>. Acesso em: 05 mai 2017.

BILCK, A. P.; DA SILVA, D. L. D.; COSTA, G. A. N.; DE TOLEDO BENASSI, V.; GARCIA, S. Aproveitamento de Subprodutos: Restaurantes de Londrina. **Revista em Agronegócios e Meio Ambiente**, v. 2, n. 1, p. 87-104, 2009.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO. BNDS. **Nova diretoria do BNDES lança programa do biodiesel**, 2004. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/>>. Acesso em: 05 dez. 2015.

BRASIL. **Resolução ANP nº 7, de 19 de março de 2008**. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/legislacao/comercializacao/juridico_legislacao/res_7_comercializacao_biodiesel.pdf>. Acesso em 05 dez. 2015.

CASTELLANELLI, C; MELLO, C. I; RUPPENTHAL, J. E; HOFFMANN, R. **Óleos comestíveis: o rótulo das embalagens como ferramenta informativa**. In: ENCONTRO DE SUSTENTABILIDADE EM PROJETO DO VALE DO ITAJAÍ. 1, 2007. Disponível em: <<http://www.ensus.com.br/1poster/%D3leos%20Comest%EDveis%20-%20O%20R%F3tulo%20das%20Embalagens%20como%20Ferramenta%20I.pdf>>. Acesso em 02 abr.2016.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO-AMBIENTE. CONAMA. **Resolução N°430**, Brasília. 2011. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em 02 abr.2016.

CORRÊA, H. L.; XAVIER, L. H. Concepts, design and implementation of Reverse Logistics Systems for sustainable supply chains in Brazil. **Journal of Operations and Supply Chain Management**, v. 6, n. 1. 2013

CRISTOFF, P. **Produção de biodiesel a partir do óleo residual de fritura comercial estudo de caso**. 2007. 83f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

DAELLENBACH, H. G.; MCNICKLE, D. C. **Decision making through systems thinking**. Palgrave Macmillan, 2005.

DONATO, V. **Logística Verde**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna Ltda, 2008. 256 p.

DYSON, B.; CHANG, N. B. Forecasting municipal solid waste generation in a fast-growing urban region with system dynamics modeling. **Waste Management**, v. 25, n. 7, p. 669- 679, 2005.

FERRARI, R. A; OLIVEIRA, V. S; SCABIO, A. Biodiesel de soja: taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 19-23, 2005.

FORD, A. **Modeling the Environment**. Island Press, 2009.

FERNANDES, R. K. M.; PINTO, J. M. B.; MEDEIROS, O. M.; PEREIRA, C. A. Biodiesel a partir de Óleo Residual de Fritura: Alternativa Energética e Desenvolvimento Sócio-Ambiental. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28, 2008. **Anais...** ENEGEP, 2008.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14040**. Genebra, Suíça. 2006. Disponível em: <<https://www.iso.org/standard/37456.html>>. Acesso em: 05 dez. 2015.

KUM, V.; SHARP, A.; HARNPORNCHAI, N. A System Dynamics Study of Solid Waste Recovery Policies in Phnom Penh City. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF THE SYSTEM DYNAMICS SOCIETY, 23, 2005. **Anais... Proceeding SSDs.**, Boston, 2005.

LAW, A. M. **Simulation Modeling and Analysis**. 5Ed., McGraw-Hill, 2015.

LÉLÉ, S. M. Sustainable Development: A Critical Review. **World Development**, v. 19, n. 6. 1991.

MENDES, P. A. S. **Sustentabilidade na produção e uso do biodiesel**. Curitiba. Annris. 2015.

O GLOBO, **Lei aumenta percentual de biodiesel no óleo diesel**, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/noticia/2016/03/lei-aumenta-percentual-de-biodiesel-no-oleo-diesel.html>>. Acesso em: 05 mai 2016.

OLIVEIRA, G. S.; FILHO, R. D. O. Análise do consumo de combustível de ônibus urbano. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 18, 2014. **Anais... ANPET**, 2014.

OLIVEIRA, B. M. G; SOMMERLATTE, B. R. **Plano de Gerenciamento Integrado do Resíduo óleo de cozinha**, 2009. Disponível em: <http://www.projeto-reciclar.ufv.br/docs/cartilha/pgi_oleo_cozinha.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2015.

PARENTE, E. J. S. **Biodiesel: Uma aventura tecnológica num País engraçado**, 2003. 66 p. Disponível em: <<http://www.balcom.org.br:8080/trade/upload/1189381129469503743.pdf>>. Acesso em: 17 de abr. 2016.

RABELO, R. A.; FERREIRA, O. M. **Coleta Seletiva de Óleo Residual de Fritura para Aproveitamento Industrial**. 2008. Disponível em : <<https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/7639/DISCONZI%2C%20%20GRACIELA%20SCHMIDT.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 de abr. 2016.

ROCHA, B. S. O; CARRILHO, D. L. Utilização do biodiesel como forma de reduzir a emissão de CO₂, e os custos com óleo diesel. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, 46, 2008. **Anais... Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil**, 2008.

SANTOS, R. S. **Gerenciamento de resíduos: coleta de óleo de cozinha**, 2009. Disponível em: <<http://www.poslogistica.com/web/TCC/2009-2/tcc-268.pdf>>. Acesso em: 12 de maio de 2015.

SANTOS, M. X.; SILVA, J. G. F. Aproveitamento do óleo residual de fritura na produção de biodiesel. **Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental**, v. 33, n. 1, p. 299-306, 2016.

SILVA, E. C. P. **O impacto da gestão do tamanho da força policial na taxa de violência em Curitiba: Uma abordagem qualitativa sob o referencial da dinâmica de sistemas**. 2006, 105f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.

SILVEIRA, D. A.; VIEIRA, G. E. G. Emprego do Óleo Residual de Fritura na Produção de Biodiesel. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 20, 2014. **Anais...** Florianópolis/SC. 2014.

SILVA, T. A. R. **Biodiesel de Óleo Residual: Produção Através da Transesterificação por Metanólise e Etanólise Básica, Caracterização Físico-Química e Otimização das Condições Reacionais**. 2011. 157f. Tese (Doutorado em Química) - Programa de Pós-Graduação Multi-Institucional, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2011.

SIMONETTO, E. O. Simulation computer to evaluate scenarios of solid waste – an approach using systems dynamics. **International Journal of Environment and Sustainable Development**, v. 13, n. 4, p. 339-353, 2014.

SIMONETTO, E. O.; RODRIGUES, G. O.; DALMOLIN, L. C.; MODRO, N. R. Use of system dynamics to evaluate scenarios of solid waste recycling. **Revista GEINTEC: Gestão, Inovação e Tecnologias**, v. 4, p. 910-924, 2014.

SRIVASTAVA, S. K Green supply-chain management: A state-of-the-art literature review. **International Journal of Management Reviews**, v. 9, n. 1, 2007.

STRAUSS, L. M. **Um modelo em dinâmica de sistemas para o ensino superior**. 2010. 110f. Tese (Doutorado em Administração) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, 2010.

SUFIAN, M. A.; BALA B. K. Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. **Waste Management**, v. 27, p. 858-868, 2007.

RIZZETTI, T. A.; SIMONETTO, E. O.; RODRIGUES, G. O.; GIL, R. Uso de dinâmica de sistemas para avaliação de cenários de reaproveitamento de óleo de cozinha na produção de biodiesel em uma IES pública. **S & G. Sistemas & Gestão**, v. 11, p. 112-119, 2016.

ROBINSON, J. Squaring the circle? Some thoughts on the idea of sustainable development. **Ecological Economics**, v. 48, 2004.

VENTANA SYSTEMS. **Vensim Simulation Software**. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>. Acesso em: 12 fev. 2016.

XAVIER, J. H. V.; CALDEIRA-PIRES, A. Uso Potencial da Metodologia de Análise de Ciclo de Vida (ACV) para a Caracterização de Impactos Ambientais na Agricultura. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 21, n. 2, p. 311-341. 2004.

ZUCATTO, L. C.; WELLE, I.; SILVA, T. N. D. Cadeia reversa do óleo de cozinha: coordenação, estrutura e aspectos relacionais. **RAE – Revista de Administração de Empresas**, v. 53, n. 5, 2013.