

USO DA MODELAGEM COMPUTACIONAL PARA COMPARATIVO ENTRE ADIÇÃO DE DIFERENTES PERCENTUAIS DE BIODIESEL NO TRANSPORTE DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

USE OF COMPUTATIONAL MODELING TO COMPARE THE ADDITION OF DIFFERENT PERCENTAGES OF BIODIESEL IN URBAN SOLID WASTE TRANSPORTATION

Dr. Glauco Oliveira Rodrigues ¹
 Dr. Eugênio de Oliveira Simonetto ¹
 Dr. Roni Storti de Barros ¹
 Dr. Luiz Claudio Dalmolin ²
 Dr. Nilson Ribeiro Modro ²

Recebido em: 13/07/2019
 Aceito em: 25/07/2019

Glauco10@redes.ufsm.br

Resumo: Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) se configuram como uma problemática tanto no Brasil como em outras partes do mundo, exigindo que se pense em alternativas de como amenizar seus impactos negativos. No Brasil, a coleta e o transporte dos RSU é feita por meio de veículos movido a diesel. Neste contexto, foi formulada a seguinte hipótese: "A adição de maiores percentuais de biodiesel gerará maior economia financeira para a empresa, além de diminuir a geração de gás carbônico?" Assim, o objetivo deste estudo é comparar o impacto de adição de diferentes percentuais de biodiesel na composição do combustível de veículos de transporte de resíduos sólidos, levando-se em consideração a projeção de mistura de biodiesel do governo brasileiro, comparando cenários com 10%, 15% e 20% de biodiesel nessa composição. Esta comparação foi realizada por meio de simulação de um modelo computacional desenvolvido pelos pesquisadores baseado na metodologia proposta por Sterman (2000). Na definição das equações e suas relações do modelo de simulação, foi considerado um horizonte de tempo de dez anos. Os resultados revelam que, visto de uma perspectiva financeira, há uma grande diferença existente entre os diferentes percentuais de biodiesel na composição do combustível, demonstrando vantagens na utilização de biodiesel com maior percentual.

Palavras-chave: Biodiesel; Modelagem Computacional; Resíduos Sólidos Urbanos

Abstract: Urban Solid Waste (RSU) is a problem both in Brazil and in other parts of the world, requiring that we think of alternatives for mitigating their negative impacts. In Brazil, the collection and transportation of MSW is done by means of diesel-powered vehicles. In this context, the following hypothesis was formulated: "Will the addition of higher percentage of biodiesel generate greater financial savings for the company, in addition to reducing the generation of carbon dioxide?" Thus, the objective of this study is to compare the impact of adding different percentages of biodiesel in the fuel composition of solid waste transport vehicles, taking into account the Brazilian government's biodiesel blending projection,

¹ Universidade Federal de Santa Maria – UFSM – Santa Maria – Rio Grande do Sul – Brasil.

² Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC – Florianópolis – Santa Catarina – Brasil.

comparing scenarios with 10%, 15% and 20% of biodiesel in this composition. This comparison was carried out by means of simulation of a computational model developed by the researchers based on the methodology proposed by Sterman (2000). In the definition of the equations and their relations of the simulation model, a time horizon of ten years was considered. The results show that, from a financial perspective, there is a great difference between the different percentages of biodiesel in fuel composition, showing advantages in the use of biodiesel with higher percentage.

Keywords: Biodiesel; Computational modeling; Urban solid waste.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, apesar de suas diferenças regionais, a geração per capita de resíduos sólidos urbanos (RSU) aumentou em todas as regiões e boa parte destes resíduos não tem uma destinação sanitária e ambiental apropriada (IBGE, 2018). Destaca-se também que muitas vezes os resíduos urbanos são dispostos em céu aberto nos chamados lixões, e não na forma adequada e menos prejudicial, dos em aterros controlados, onde os resíduos são recobertos por terra, ou, nos aterros sanitários que, pelo modo de tratamento adotado, reduz os impactos ambientais e os danos à saúde humana oriundos do seu descarte (FROTA et al., 2015).

Resíduos sólidos urbanos têm recebido maior atenção em praticamente todo o mundo, sendo uma área de estudo em evolução. O tratamento dos resíduos sólidos também contribuem pela emissão de uma variedade de gases do efeito estufa, desde derivados do Carbono (como o Monóxido de Carbono, o Dióxido de Carbono e o Metano), passando pelos elementos causadores das chuvas ácidas, como o Enxofre, por exemplo, até os perigosos resíduos nucleares, que ainda continuam sendo dispostos no ambiente sem tratamento, em diversos países.

A coleta de resíduos sólidos é uma atividade contínua, principalmente em grandes centros, e tem como característica o uso de veículos movidos à diesel, causando danos ao meio ambiente, como os citados anteriormente. Visando diminuir esses danos, com o uso de uma energia mais limpa e renovável, o Governo do Brasil exige a mistura do Biodiesel ao diesel. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é o órgão que regulamenta o uso do biodiesel no óleo combustível em todo o Brasil. As leis atuais exigem que, a partir de 2018, o óleo diesel contenha 10% de biodiesel (sigla B10), sendo que em algumas regiões brasileiras, as frotas de caminhões já utilizam o blend B20 (20% biodiesel) como combustível (MIRANDA et al., 2018).

A utilização do biodiesel, considerado combustível renovável, com possíveis misturas com o diesel comercial (combustível de fontes não renováveis) teve sua origem motivada pela crise do abastecimento mundial nos períodos das guerras. A necessidade de inserção do biocombustível no mercado se faz necessária não somente para equilibrar a relação oferta e demanda, mas, também pela viabilidade ambiental quanto a redução de gases poluentes atmosféricos. O principal método de produção de biodiesel é o método da transesterificação que consiste na utilização de um tri glicerol que reage com um álcool na presença de um catalizador, que resulta no subproduto o glicerol e o éster metílico (biodiesel). Este combustível renovável pode ser usado nos motores de 4 tempos do ciclo diesel (MENDES, 2015).

Segundo Mendes (2015), o conceito de Biodiesel adotado pela ANP, é de um combustível natural, usados em motores diesel, produzido através de fontes renováveis e que atende a especificações da Resolução ANP nº 14, de 11 de maio de 2011. Para a determinação do percentual de biodiesel em óleo diesel são empregadas as normas EN 14078 e ABNT NBR15568, que utilizam a espectroscopia na região do infravermelho. Este método baseia-se no fato de que as substâncias carboniladas, especificamente os ésteres, apresentam duas absorções características que possuem origem nos estiramentos da ligação, porém não existe um percentual padrão para ser adotado, podendo executar diferentes percentuais (COSTA et al, 2015)

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo comparar o impacto de adição de diferentes percentuais de biodiesel, levando em consideração a projeção de mistura de biodiesel do governo brasileiro, comparando cenários com adição de 10%, 15% e 20% de biodiesel no combustível de veículos de coleta de resíduos sólidos. Esta comparação foi realizada via simulação, a partir de um modelo computacional desenvolvido pelos pesquisadores. Pela facilidade de acesso aos dados esta pesquisa apenas irá estudar a coleta de resíduos sólidos.

Quanto à estrutura deste estudo, após esse capítulo introdutório apresenta-se o referencial teórico. Em seguida, consta o método de pesquisa adotado. Na sequência, segue a descrição do desenvolvimento do modelo e experimento e, posteriormente, encerra-se com as considerações finais acompanhada de recomendações para pesquisas futuras.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Para fins de construção do referencial teórico deste trabalho, primeiro, aborda-se a questão de Resíduos Sólidos Urbanos, após Biodiesel e por fim as definições sobre modelagem computacional.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

A questão dos resíduos sólidos no Brasil foi, durante muito tempo, colocada em segundo plano, sem a devida atenção. O intenso processo de urbanização associado à carência de investimentos na área do saneamento levou à proliferação de lixões pelo país. Com o agravamento dos problemas socioambientais, a temática do lixo foi colocada nas discussões sobre saneamento no final da década de 1980 (MONTAGNA , 2012).

Existem várias definições de resíduos sólidos. De acordo com o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB), resíduo sólido é todo e qualquer material resultante das atividades do ser humano na sociedade, e que é descartado (PROSAB, 2013). Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduos sólidos são materiais, substâncias, objetos ou bens descartados resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder, no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de

esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (PNRS, 2010).

Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), nos termos da Política Nacional de Resíduos Sólidos, englobam os resíduos domiciliares, isto é, aqueles originários de atividades domésticas em residências urbanas e os resíduos de limpeza urbana, quais sejam, os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas, bem como de outros serviços de limpeza urbana.

Quanto a sua classificação, há diversas maneiras de se proceder, as mais comuns são aquelas relacionadas a sua natureza física (secos ou molhados), composição química (orgânicos ou inorgânicos), origem (Resíduos domiciliares e Resíduos limpeza urbana/Resíduos Comerciais), quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente (CEMPRE, 2010).

De acordo com o Manual de Resíduos Sólidos (IBAMA, 2001) e com o Manual de Saneamento (BRASIL, 2006), as características dos resíduos variam em função de aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos, ou seja, variam de comunidade para comunidade de acordo com hábitos e costumes da população, bem como número de habitantes, poder aquisitivo e desenvolvimento local.

Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2018, os números referentes à geração de RSU revelam um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país, o que demonstra uma retomada no aumento em cerca de 1% em relação a 2016. O montante coletado em 2017 foi de 71,6 milhões de toneladas, registrando um índice de cobertura de coleta de 91,2% para o país, o que evidencia que 6,9 milhões de toneladas de resíduos não foram objeto de coleta e, conseqüentemente, tiveram destino impróprio. No tocante à disposição final dos RSU coletados, o Panorama não registrou avanços em relação ao cenário do ano anterior, mantendo praticamente a mesma proporção entre o que segue para locais adequados e inadequados, com cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, dispostos em aterros sanitários. O restante, que corresponde a 40,9% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, com danos diretos à saúde de milhões de pessoas. (ABRELPE, 2018).

Quanto a geração de RSU no Brasil a população apresentou um crescimento per capita de 0,48% na geração de resíduos, entre o ano de 2016 e 2017 a geração total dos resíduos aumentou 1%, atingindo cerca de 214 toneladas diárias no país. Analisando a coleta de RSU em 2017 cresceu em todas as regiões em comparação ao ano anterior, e manteve uma cobertura um pouco acima de 90%. A região Sudeste continua respondendo por cerca de 53% do total de resíduos coletados, e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta do país (ABRELPE, 2018). A tabela 1 apresenta a quantidade de RSU coletado por região.

Tabela 1: Quantidade de rsu coletado por regiões e Brasil - Adaptado de ABRELPE (2018)

REGIÕES	2016	2017
	RSU Total (t/dia)	RSU Total (t/dia)
Norte	12.500	12.705
Nordeste	43.555	43.871
Centro-Oeste	14.175	14.406
Sudeste	102.620	103.741
Sul	20.987	21.327
BRASIL	193.637	196.050

Os números mostram que mesmo com uma legislação mais restritiva e dos esforços empreendidos em todas as esferas governamentais, a destinação inadequada de RSU se faz presente em todas as regiões e estados brasileiros. Essas práticas habituais provocam, dentre outros impactos, a contaminação de solos e corpos d'água, assoreamento, enchentes, proliferação de vetores transmissores de doenças, emissões atmosféricas de gases causadores de efeito estufa, além de poluição visual, mau cheiro e indisponibilidade das áreas atingidas para fins econômicos (MONTAGNA, 2012).

Segundo Resol (2008), os esforços devem centrar-se nas quatro principais áreas de programas relacionados com os resíduos: (a) redução dos resíduos ao mínimo; (b) aumento ao máximo da reutilização e reciclagem ambientalmente saudáveis dos resíduos; (c) promoção do depósito e tratamento ambientalmente saudáveis dos resíduos; e (d) ampliação do alcance dos serviços que se ocupam dos resíduos. Essas áreas são relacionadas entre si, mas é preciso uma estrutura bem definida e projetada para o gerenciamento sustentável.

No Brasil, a coleta seletiva oficial normalmente tem sido realizada com caminhões e equipes coletoras. Para executá-la, o poder público utiliza a própria estrutura (caminhões e pessoal) ou a de empresas contratadas. Sob domínio público, tradicionalmente, a frota de veículo utilizada na coleta e transporte de recicláveis é movida a energia oriunda de combustível fóssil, especificamente por óleo diesel, cujo consumo contribui para aumentar a poluição atmosférica nos centros urbanos.

Com o objetivo de emitir menos gases, o Ministério de Minas e Energia estabelece a adição do Biodiesel ao Diesel, atualmente o percentual de adição exigido é de 10%, devendo chegar em 15% em 2023 (LIS, 2018). O biodiesel pode ser extraído de fontes como mamona, dendê, girassol, babaçu, amendoim, pinhão manso e soja, sendo um combustível menos poluente do que o diesel tradicional, além de ser uma fonte renovável. No Brasil, cerca de 70% do biodiesel é produzido com soja (MME, 2018).

2.2 Biodiesel

O biodiesel é muitas vezes referido como "o combustível do futuro", porque é biodegradável e não-tóxico, com propriedades semelhantes ao diesel. Os biocombustíveis são derivados de recursos renováveis e usados como combustível para o transporte (Madheshiya e Vedrtnam, 2018). A pesquisa de Mendes (2015) apontou para a necessidade de novas fontes de energia como uma

alternativa ao uso de combustíveis fósseis. As emissões de gases, como CO, HC e SO_x, são extremamente prejudiciais e levam à necessidade de um combustível alternativo, mais seguro e econômico do que o diesel à base de petróleo (Ranjan et al., 2018). Os benefícios ambientais resultantes das emissões inerentes ao uso de biodiesel em motores, em oposição aos do diesel de petróleo, são evidentes. O biodiesel é livre de enxofre, não-tóxico, e biodegradável. Reduz a emissão de poluentes gasosos, reduz o aquecimento global, é economicamente competitivo e pode ser produzido por pequenas empresas (Miranda et al., 2018).

O Biodiesel surgiu a partir de uma invenção na exposição mundial que aconteceu em Paris no ano 1900. Na ocasião, o Dr. Rudolf Diesel apresentou aos presentes um motor diesel de injeção indireta utilizando óleo de amendoim como combustível (KNOTHE et al, 2006). Nesta época, segundo Tavares e Da Silva (2008), motores com esta característica eram alimentados por petróleo filtrado, óleos vegetais e até mesmo óleo de peixe. Dificuldades como acúmulo de resíduos gordurosos gerados pelo óleo vegetal levaram ao abandono dos estudos para produzir um combustível viável através de óleos vegetais (RODRIGUES et al., 2016).

Os estudos sobre o Biodiesel foram esquecidos até o momento onde os países tiveram que pensar no desenvolvimento de fontes alternativas de energia, que poderiam substituir, em parte ou totalmente, a primazia dos combustíveis fósseis (CARIOCA; ALMEIDA, 2011). O aumento do barril do petróleo em 1973 e 1979 viabilizou economicamente o desenvolvimento de uma nova fonte alternativa de combustível, como por exemplo o etanol (MENDES, 2015). Outro fator importante é o Protocolo de Kyoto, que tem como objetivo promover a redução sistemática na emissão de gases causadores do efeito estufa. A redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental e pelo fato de substituir o óleo diesel, tornam o Biodiesel como uma grande força do protocolo de Kyoto. Estudos comprovam que a utilização do Biodiesel apresentou grandes vantagens para a diminuição das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) (TAVARES; DA SILVA, 2008).

Uma variedade de óleos pode ser usada para produzir biodiesel. No entanto, a eficiência do rendimento da matéria-prima por unidade de área afetou a viabilidade de elevar a produção aos níveis industriais necessários para abastecer o mercado automotivo.

2.3 Modelagem Computacional

Modelagem Computacional é uma área de conhecimento multidisciplinar que trata da aplicação de modelos matemáticos e técnicas da computação à análise, compreensão e estudo da fenomenologia de problemas complexos em áreas tão abrangentes quanto às engenharias, ciências exatas, biológicas, humanas, economia e ciências. São representações incompletas e mais simples do que o objeto ou sistema em questão (Costa, 2004). Para Andrade et al (2006), a modelagem computacional é uma das ferramentas do pensamento sistêmico que adicionam aprendizado ao processo e por meio da mesma constroem-se micromundos do sistema real.

Para pesquisadores como Andrade (2006), Maani e Cavana (2000) entre outros, os modelos podem apresentar dois tipos de modelagem, distintamente chamados de soft e hard. A modelagem soft refere-se a abordagens conceituais que buscam maior realismo, pluralismo e uma intervenção mais

holística que a modelagem *hard*. Os conceitos *soft* e *hard* são também relacionados às ideias de qualitativo e quantitativo, respectivamente. Andrade diferencia as modelagens conforme a tabela 2.

Tabela 2: Principais distinções entre as abordagens *Hard* e *Soft* - Adaptado de Andrade (2006)

Critério	Abordagem <i>hard</i>	Abordagem <i>soft</i>
Definição do Problema	Vista como direta, unitária	Vista como problemática, pluralista
A organização	Assumida tacitamente	Requer negociação
O modelo	Uma representação do mundo real	Progresso pela aprendizagem
Resultado	Um produto ou recomendação	Progresso pela aprendizagem

Um modelo computacional é construído com basicamente quatro componentes: Estoques, fluxos, conectores e auxiliar. Eles serão detalhados na sessão a seguir.

2.3.1 Componentes do Modelo

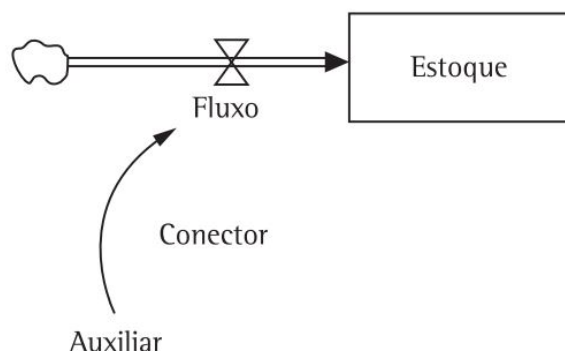
Os estoques são variáveis de estado e podem ser considerados como repositórios para acumular ou armazenar para outros elementos do sistema (DEATON; WINEBRAKE, 2000), tem como principal importância fornecer uma visão de como está o sistema em qualquer instante de tempo, mudanças nos estoques não são instantâneas, elas demandam certo tempo e ocorrem devido à ação dos fluxos.

Por sua vez, os fluxos, são variáveis de ação, elas podem aumentar ou diminuir o volume determinado no estoque. Produz crescimento ou redução dos estoques, o movimento de materiais e a informação dentro do sistema.

As variáveis auxiliares são componentes para a realização de operações algébricas, que processam informações a respeito dos estoques e fluxos ou representam fontes de informação externas ao sistema (BLOIS E SOUZA, 2008). Existem os auxiliares que também podem modificar outras variáveis auxiliares, são muitos utilizados para modelar as informações e não o fluxo físico, podendo alterar instantaneamente sem atrasos (COVER, 1996).

Por fim, existem os conectores que são os que representam as inter-relações entre todos os componentes, ou seja, são essas interligações que ligam os componentes que formam a expressão matemática (STRAUSS, 2010). Possuem função de links de informação que descrevem a relação entre estoques, fluxos e auxiliares. A Figura 1 demonstra cada um dos componentes de um modelo de Dinâmica de Sistemas.

Figura 1: Componentes do modelo - Simonetto e Lobler (2013)



A próxima sessão apresenta o método utilizado para a realização desta pesquisa.

3. MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia utilizada neste trabalho é baseada em Stermann (2000), para o autor a modelagem nunca está isolada do contexto organizacional, ela sempre está incorporada em uma organização e em um contexto social. Antes de o modelador executar o processo de modelagem o mesmo deve obter acesso à organização e identificar o problema existente.

Para ser eficaz, o processo de modelagem deve ser focado nas necessidades pelo qual a pesquisa será executada, a modelagem é feita para ajudar a organização, não para o benefício do modelador. O contexto da organização e o problema do mundo real determinam a natureza do modelo, e o processo de modelagem deve ser consistente com as capacidades e metas da própria organização.

A modelagem é inerentemente criativa e individual. Os modeladores têm diferentes estilos e abordagens. No entanto, todos os modeladores de sucesso seguem um processo disciplinado que envolve as seguintes atividades: (1) articular o problema a ser abordado, (2) formular uma hipótese ou teoria dinâmica sobre a causas do problema, (3) formular um modelo de simulação para testar a hipótese dinâmica, (4) testar o modelo até que o mesmo esteja adequado para resolver o problema, é adequado para o seu propósito, e (5) projetar e avaliar políticas para melhoria do modelo.

3.1 Formulação de Hipótese Dinâmica

Segundo Silva (2006), a hipótese dinâmica visa trabalhar a teoria do problema, analisando o seu comportamento e observando quais as variáveis fazem parte do sistema. O objetivo dessa etapa é formular uma hipótese que explique a dinâmica como consequência da estrutura interna do sistema por meio da interação entre as variáveis e os agentes representados no modelo, incluindo regras de decisão (STRAUS, 2010). Assim, a hipótese dinâmica do modelo de systems dynamics deste trabalho é definida a seguir, como sendo: “A adição de maiores percentuais de biodiesel gerará maior economia financeira para a empresa, além de diminuir a geração de gás carbônico”.

4. DESENVOLVIMENTO DO MODELO

Melquiades (2015) salienta que tanto a coleta como o transporte dos RSU é um problema crítico em boa parte das cidades do Brasil. Conforme Souza e Guadagnin (2009), as etapas de coleta e transporte dependem entre 60% e 80% em termos de custos globais quando se trata do gerenciamento dos resíduos. Nesta pesquisa foi simulada a logística de transporte dos RSU, prospectando a geração de RSU a partir da variação da população conforme dados coletados na plataforma online do IBGE (IBGE, 2019), analisando os impactos causados pela inserção de biodiesel nos caminhões coletores dos resíduos sólidos urbanos no horizonte temporal de dez anos de simulação. O modelo deve reagir a diferentes fatores, tais como: o crescimento populacional, a média de geração de resíduos sólidos urbanos per capita e o custo do transporte.

Para a construção dos submodelos foi necessário aprofundar o conhecimento acerca da área do modal rodoviário e também da área de gestão de resíduos urbanos. O consumo dos caminhões levou em conta a tonelada carregada diária além da distância percorrida, cujos dados foram coletados em relatórios como ANTT (2013), Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores [ANFAVEA] (2014), (MMA, 2014), Petrobras (2018), e ainda, diretamente no banco de dados da empresa responsável pela coleta dos RSU na região aqui considerada para fins de análise. Os valores referentes às coletas internas e o envio até Santa Maria/RS (único aterro sanitário licenciado da região) estão expostos no Quadro 1.

Quadro 1: Dados da coleta mensal - Empresa responsável coleta dos RSU na região estudada (2018).

Cidade	Nº. Coletas	Envio Aterro	Diesel Gasto	Coleta Interna	Diesel Gasto
Agudo	6 por semana	3403.2 km	1361.28 litros	500 km	200 litros
Cacequi	6 por semana	5952 km	2380.80 litros	480 km	192 litros
Restinga Seca	6 por semana	2827.2 km	1130.88 litros	493.4 km	197.36 litros
São Francisco	6 por semana	6672 km	2668.80 litros	515.6 km	206.24 litros
Faxinal	3 por semana	1406.4 km	562.56 litros	133.6 km	53.44 litros
Mata	3 por semana	1992 km	796.80 litros	109.8 km	43.92 litros
São Martinho	2 por semana	472 km	188.80 litros	42.8 km	17.12 litros
Total	N/C	19321.6	9089.92	2275.2	910.08

As coletas normalmente são realizadas de segunda a sábado para os municípios de 10.000 habitantes ou mais. As cidades de Agudo, Cacequi, Restinga Seca e São Francisco enquadram-se neste modelo de coleta. Os municípios de 5 (cinco) até 10.000 (dez mil) habitantes possuem coleta 3 (três) vezes na semana; no caso, os municípios de Faxinal do Soturno e Mata. São Martinho da Serra possui o recolhimento do lixo urbano duas vezes na semana, já que possui uma população inferior a

5.000 (cinco mil) habitantes. A coleta é trazida para Santa Maria, onde se localiza o único aterro sanitário licenciado da região. Os municípios focados neste estudo não possuem transbordo e nem triagem. Apenas poucos municípios possuem coleta seletiva e nessas a coleta é realizada de forma muito desorganizada e muito ineficiente.

Para simular o comportamento da variável que comporta a população da região estudada, é necessário compreender a quantidade de nascimento e de mortes anuais. Para amparar os dados inseridos nestas duas taxas foi utilizada a plataforma de projeções do IBGE. As projeções das taxas que envolvem o tamanho da População do Brasil e das Unidades da Federação são elaboradas com base nas informações sobre as componentes da dinâmica demográfica oriundas dos censos demográficos, das pesquisas domiciliares por amostragem e dos registros administrativos de nascimentos e óbitos investigados pelo IBGE. Dadas as transformações ocorridas na dinâmica populacional, as projeções são monitoradas continuamente e passam por revisões periódicas, tanto para a incorporação de novas informações, quando são detectadas alterações nas hipóteses previstas para as componentes, quanto para a atualização de sua metodologia de cálculo, estando esses aprimoramentos devidamente explicitados nos respectivos relatórios metodológicos. Os valores da projeção das taxas que influenciam os habitantes estão expostos no quadro 2.

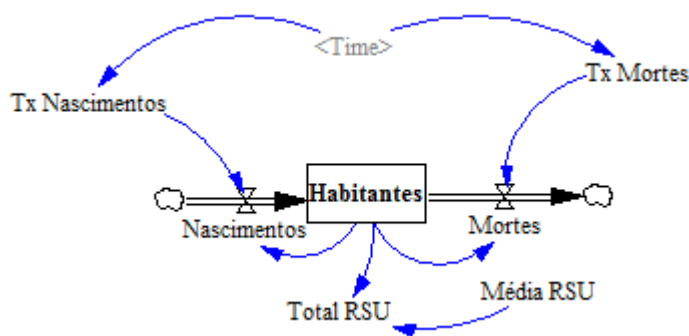
Quadro 2: Taxas relativas a cada 1000 pessoas - Elaborado pelos autores a partir dos dados do IBGE (2019).

Ano	Taxa	
	Nascimento	Mortalidade
0	12,34	7,27
1	12,20	7,36
2	12,03	7,45
3	11,85	7,54
4	11,67	7,65
5	11,50	7,76
6	11,33	7,87
7	11,16	7,99
8	11	8,12
9	10,84	8,26
10	10,70	8,4

O primeiro submodelo desenvolvido (Figura 2) representa a lógica para a geração da população e conseqüentemente o montante de resíduo gerado anual. Para a definição das variáveis do submodelo foram utilizados trabalhos acadêmicos e governamentais da área de resíduos sólidos, mais especificamente, ABRELPE (2018), Ministério do Meio Ambiente (2018) e IBGE (2019). As

variáveis selecionadas, bem como suas inter-relações com outras variáveis, as quais influenciam nos valores totais de geração e disposição final dos resíduos sólidos urbanos, são: A tx nascimentos e tx mortes influenciam diretamente os fluxos de entrada e saída da variável de estoque (Habitantes) da região estudada. Foi utilizada no modelo a taxa de crescimento natural ou vegetativo (total de nascimentos – total de mortes) a qual corresponde à única forma possível de crescimento ou redução da população mundial. A quantidade média de resíduos (Media RSU) gerada por cada habitante multiplicada pelos habitantes da região resulta na quantidade total de resíduos (Total RSU).

Figura 2: Submodelo População - Autores (2018).



Para a configuração do submodelo responsável por representar a lógica do consumo energético para o transporte dos resíduos sólidos foram utilizados dados de relatórios da ANTT (2013) e do Ministério do Meio Ambiente (MMA 2014). Cabe frisar que no modal rodoviário existem vários tipos de caminhões com tamanho e capacidades diferentes. Deste modo, nesta pesquisa os caminhões responsáveis pela coleta dos RSU são classificados como caminhões leves, pois segundo o relatório do Ministério do Meio Ambiente [MMA] (2014), os caminhões com capacidade de carregar entre 6 e 10 toneladas se enquadram nesta nomenclatura.

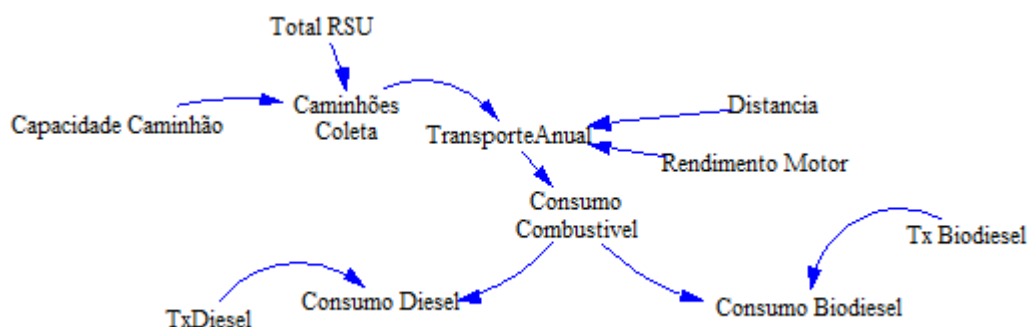
A variável auxiliar CaminhõesColeta possui em sua entrada duas variáveis auxiliares (TotalRsu e CapacidadeCaminhão), com o objetivo de acrescentar caminhões conforme a quantidade de habitantes cresça e conseqüentemente sua geração de RSU per capita seja maior, habilitando o submodelo a simular sem um número fixo de caminhões.

O transporte é mensurado na variável TransporteAnual onde é calculado o consumo de combustível pelos caminhões, através da multiplicação da variável CaminhõesColeta pela variável auxiliar (Distancia) que armazena a quantidade de quilômetros percorrida pelos caminhões. O resultado desta é novamente multiplicado pela quantidade de quilômetros que cada caminhão consome por litro (Rendimento Motor), resultando na quantidade de litros de combustível consumido, este valor anual é armazenado na variável auxiliar (ConsumoCombustível).

Por determinação da ANP (2018) o diesel já possui em sua composição 10% de biodiesel e neste artigo será simulada a composição do diesel com 15% e 20% de biodiesel. Para separar o consumo de diesel e biodiesel na coleta, o submodelo apresenta duas variáveis responsáveis por

controlar a porcentagem exata de cada tipo de combustível (TxDiesel e TxBiodiesel) que quando multiplicada pelas variáveis ConsumoDiesel e ConsumoBiodiesel resultará na quantidade (em litros) do consumo de cada combustível. A figura 3 apresenta o submodelo descrito acima.

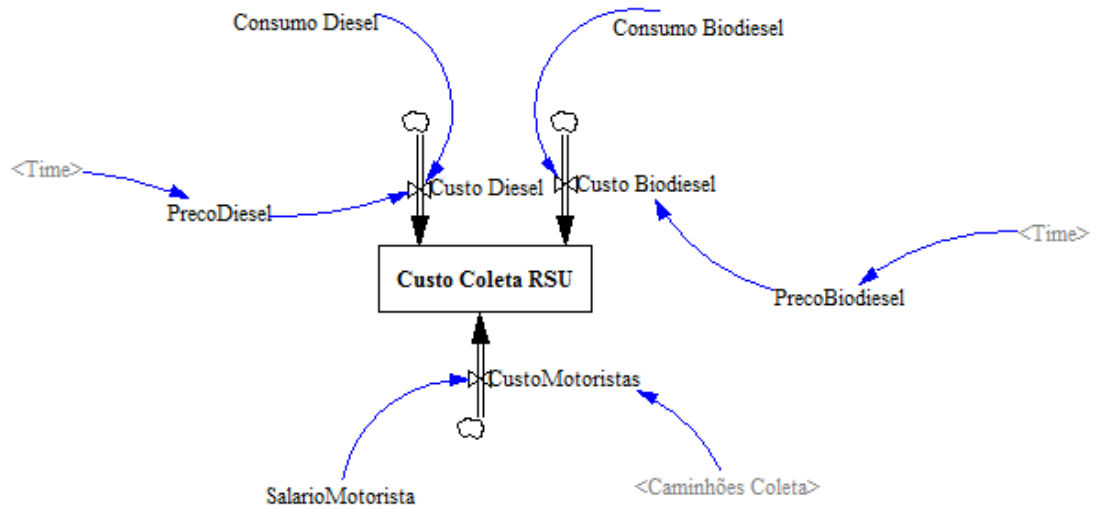
Figura 3: Submodelo Consumo Combustível - Autores (2018).



Esse submodelo (Figura 3) tem por finalidade observar o impacto financeiro relativo à utilização de diferentes porções de biodiesel na coleta, provendo aos gestores da área os benefícios da utilização de biodiesel na coleta. As variáveis auxiliares PreçoBiodiesel , PreçoDiesel , ConsumoBiodiesel e ConsumoDiesel são responsáveis por armazenar o custo do combustível nos 10 anos modelados, seus dados são armazenado nas variáveis de fluxo CustoDiesel e CustoBiodiesel. A Shadow Variable (CaminhõesColeta) combinada com a variável auxiliar SalárioMotorista é responsável por armazenar o custo dos profissionais que executam o transporte do RSU esse valor é armazenado no fluxo CustoMotorista.

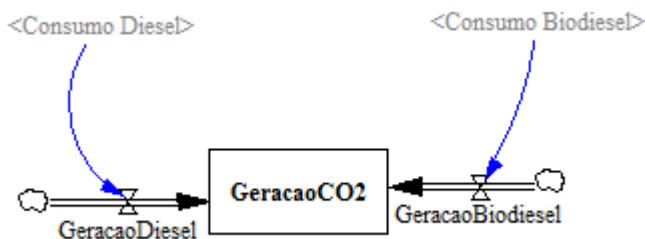
A variável de estoque central deste submodelo (CustoOperação) tem por função apresentar o custo da operação através da soma dos custos que envolvem a coleta, conforme apresentado anteriormente. Através do software Vensim é possível visualizar a variação do custo em dez anos. Essas interações estão expostas na figura 4.

Figura 4: Submodelo Custo - Autores (2018).



Para analisar o impacto ambiental gerado pela coleta de lixo nos municípios estudados, criou-se o submodelo GeracaoCO2, representado na figura 5, cujo objetivo é comparar a redução da geração de CO2 pelos veículos coletores utilizando biodiesel. A variável de estoque GeracaoCO2 armazena a interação entre as variáveis de fluxo (GeracaoBiodiesel e GeracaoDiesel), ambas as variáveis são alimentadas por variáveis já existentes em outros submodelos (Shadow Variables).

Figura 5: emissão de CO2 - Autores (2018).



O modelo de equações segue exposto no Quadro 3, cujas equações foram inseridas no software Vensim e são responsáveis pelos resultados da simulação do modelo computacional desenvolvido.

Quadro 3: Modelo de equações - Autores (2018).

- (1) $Nascimentos = Habitantes * Tx \text{ Nascimentos}$
- (2) $Mortes = Habitantes * Tx \text{ Mortes}$
- (3) $Habitantes = Nascimentos - Mortes$
- (4) $Total \text{ RSU} = Habitantes * Média \text{ RSU}$
- (5) $Caminhões \text{ Coleta} = Total \text{ RSU} / Capacidade \text{ Caminhão}$
- (6) $Transporte \text{ Anual} = ((Caminhões \text{ Coleta} * Distância) / Rendimento \text{ Motor}) * (365/3)$
- (7) $Consumo \text{ Diesel} = Consumo \text{ Combustível} * Tx \text{ Diesel}$
- (8) $Consumo \text{ Biodiesel} = Consumo \text{ Combustível} * Tx \text{ Biodiesel}$
- (9) $Custo \text{ Diesel} = Consumo \text{ Diesel} * Preço \text{ Diesel}$
- (10) $Custo \text{ Biodiesel} = Consumo \text{ Biodiesel} * Preço \text{ Biodiesel}$
- (11) $Custo \text{ Motoristas} = Salário \text{ Motorista} * Caminhões \text{ Coleta}$
- (12) $Custo \text{ Coleta RSU} = Custo \text{ Biodiesel} + Custo \text{ Diesel} + Custo \text{ Motoristas}$
- (13) $Geracao \text{ CO2} = Geracao \text{ Biodiesel} + Geracao \text{ Diesel}$

A equações 1, 2, 3 e 4 são componentes do submodelo População. Por sua vez, o submodelo Consumo Combustível, para representar sua lógica matemática, utiliza as equações 5 até 8. Para viabilizar o submodelo Custo, visando simular a questão financeira do artigo, foram desenvolvidas as equações 9, 10, 11 e 12. Por fim a equação 13 é responsável por representar a Análise Ambiental do estudo.

Para a simulação do modelo gerou-se três cenários com o objetivo de comparar o cenário atual da coleta dos resíduos, onde é utilizado diesel com uma mistura de 10% de biodiesel, com duas propostas criadas pelos modeladores. O primeiro cenário propõe o cenário atual com 10%, o segundo cenário a adição de 15% de biodiesel, enquanto o terceiro cenário apresenta a proposta de acrescentar 20% de biodiesel. A tabela abaixo detalha a porcentagem de cada combustível.

Tabela 3: Cenários - Autores (2019).

	Quantidade Diesel (%)	Quantidade Biodiesel (%)
Cenário Atual	90	10
Cenário Mediano	85	15
Cenário Otimista	80	20

A próxima sessão apresenta o experimento dos submodelos.

5. EXPERIMENTO DOS SUBMODELOS COMPUTACIONAIS

A primeira análise a ser desenvolvida com o uso do modelo refere-se à quantidade de habitantes na região estudada, assim, no ano zero ou ano inicial da simulação, era de 80.729 pessoas e no ano seguinte (ano 1) há um acréscimo de 3.326 pessoas. Nos dez anos simulados houve uma variação média de aproximadamente 3,84% chegando em 108.781 habitantes no ano 10. Sabendo a possível população da região e considerando a média da geração de RSU per capita,

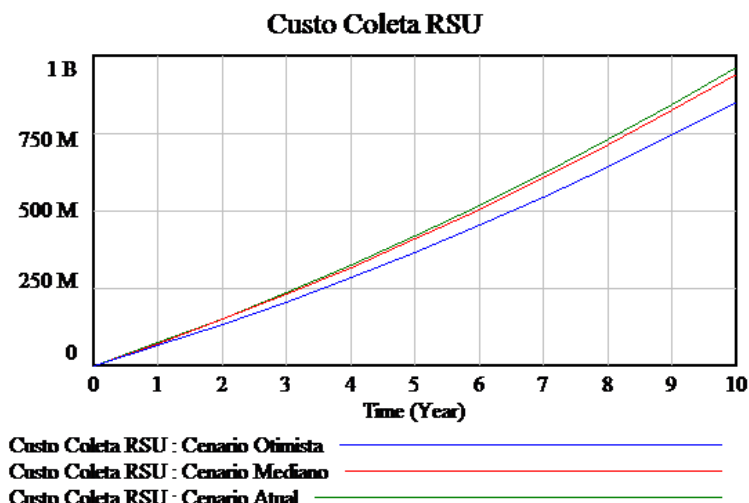
tornou-se possível estimar a geração de lixo per capita durante onze anos. Sendo assim, no ano 0 (zero) já será produzido cerca de 30.644 toneladas de lixo, chegando em 41.293 toneladas no ano 10, tendo uma média de geração de RSU por ano de aproximadamente 35.000 toneladas. Verifica-se no Quadro 4 a projeção do crescimento populacional nos dez anos de análise além da geração de RSU da região estudada.

Quadro 4: Habitantes e RSU - Autores (2018).

Ano	Habitantes	Resíduo Sólido Urbano
0	80.729	30.644
1	84.055	31.907
2	87.527	33.225
3	90.643	34.408
4	93.679	35.560
5	96.668	36.695
6	99.490	37.766
7	102.117	38.763
8	104.598	39.705
9	106.836	40.554
10	108.781	41.293

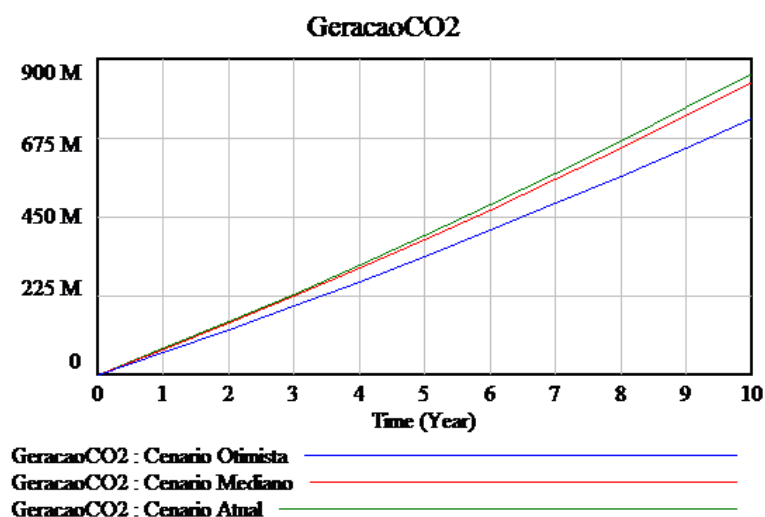
O custo para transportar o resíduo urbano projetado no Quadro 4 está representado na Figura 6, onde se comparou os cenários com utilização de três diferentes concentrações de biodiesel no combustível baseado em diesel. O Cenário Atual – que representa a coleta com 10% de biodiesel – é o transporte mais caro: chegando a custar R\$ 96 milhões ao ano, totalizando no ano 10 cerca de R\$ 962 milhões. O cenário com melhor desempenho financeiro é o Cenário Otimista, que economizará cerca de R\$ 11 milhões ao ano se comparado ao cenário com pior rendimento financeiro. Caso seja aplicado o cenário otimista, a empresa gastará em torno de R\$ 848.778 milhões. O Cenário mediano também apresentará uma economia quando comparado ao Cenário Atual podendo gerar, aproximadamente, R\$ 2,2 milhões ao ano, podendo gastar com o transporte do resíduo até R\$ 940.068 milhões.

Figura 6: Custo Coleta RSU – Autores (2019)



A poluição do ar é um dos maiores problemas ambientais no mundo, sendo um fator preocupante tanto para a atualidade como para as próximas gerações (Instituto Estadual do Ambiente [INEA], 2012). Diante disso, a segunda análise do modelo é referente à emissão do dióxido de carbono (CO₂) resultante da combustão completa do carbono. A figura 7 apresenta a simulação realizada, na qual percebe-se que o Cenário Otimista é o que possui o menor índice de emissão de CO₂, totalizando em dez anos aqui simulados, aproximadamente, 728 toneladas. Isso representa 129 toneladas a menos que o cenário com o maior índice de emissão (Cenário Atual), pois no ano 10 emitirá até 857 toneladas de CO₂. O Cenário Modal também apresenta menor emissão de CO₂ quando comparado ao Cenário Atual, ele emitirá aproximadamente 831 toneladas, cerca de 26 toneladas a menos que o Cenário Atual.

Figura 7: GeracaoCO2 – Autores (2019)



Observa-se pelas simulações geradas neste trabalho que há uma grande diferença em termos financeiros e ambientais entre os cenários propostos. Isso demonstra a importância de utilizar combustíveis mais sustentáveis na coleta e transporte dos Resíduos Sólidos.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As questões dos RSUs se tornaram um problema tanto no Brasil como em outras partes do mundo e, além de gastos financeiros significativos, deve-se considerar os danos ambientais causados pela coleta, já que os caminhões coletores queimam toneladas de combustível oriundo do petróleo. Consequentemente, isso exige que se busque meios de amenizar esses problemas, buscando alternativas para reduzir, tanto os impactos negativos financeiros, como os impactos ambientais oriundos dos RSUs.

Deste modo, considerando a proposta deste artigo e dentre as análises realizadas, verificou-se nos dez anos simulados que o número de habitantes na região considerada para fins de estudo atinge um total de 108.781 no final do período de simulação. A partir disso, tornou-se possível fazer uma estimativa da geração de lixo per capita no período, onde se constatou que a média de geração de RSU por ano será de aproximadamente 35.000 toneladas.

Quanto aos cenários simulados, observou-se que o cenário Otimista obteve o melhor desempenho financeiro – economizando cerca de R\$ 110 milhões de reais – se comparado com o que apresentou o pior rendimento em termos financeiros (cenário atual). Ademais, investigando a parte ambiental, averiguou-se que o Cenário Otimista é o que apresentou o menor índice de emissão de CO₂ no período simulado – aproximadamente, 728 toneladas – um total de 129 toneladas a menos no comparativo com o cenário com o maior índice de emissão. Por fim, a partir da pesquisa realizada é notável, visto de uma perspectiva financeira, que há uma grande diferença existente entre o percentual atual, que é de 10%, e a proposta otimista de 20%.

Ao finalizar este estudo, espera-se que o mesmo tenha contribuído para que os gestores e os governantes busquem novas opções diante do problema enfrentado com os RSUs e, ao mesmo tempo, consigam encontrar meios de usufruir das vantagens proporcionadas pelo biodiesel como alternativa de combustível. Visando a continuidade deste estudo, como recomendação para futura pesquisa, indica-se uma investigação que contemple a parte ambiental, levando em conta os benefícios que poderiam ser alcançados com a utilização de outros meios para o transporte dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil-2017, Brasília, Maio 2018.

ANDRADE, A.L. Pensamento Sistêmico: caderno de campo: o desafio da mudança sustentada nas organizações e na sociedade. Porto Alegre, Bookman, 2006.

ANFAVEA – Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Anuário da Indústria Automobilística Brasileira. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/anuario.html>>. Acesso em: mai. 2019.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim Anual de Preços 2018: preços do petróleo, gás natural e combustíveis nos mercados nacional e internacional. Rio de Janeiro: ANP, 2018.

ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres. Acompanhamento das concessões ferroviárias: relatório anual. Brasília: Ministério dos Transportes, 2013.

BLOIS, D.H. SOUZA, J.C. Cenários Prospectivos e a Dinâmica de Sistemas: proposta de um modelo para o setor calçadista. Revista de Administração de Empresas, vol 48, n3, 2008

BRASIL, 2006. Fundação Nacional de Saúde. Manual de saneamento. 3. ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

CARIOCA, J.O.B.; ALMEIDA, M.F.L. Desenvolvimento da química verde no Brasil. Revista de Química Industrial, v.79, n.730, p. 3-8, 2011.

COSTA, R. ; KHALIL, T. ; DOS SANTOS, A. ; ANDRADE, D. ; D'AVILA, L. Determinação do teor de biodiesel em diesel empregando o ensaio colorimétrico do ácido hidroxâmico , Quím. Nova vol.38 no.4 São Paulo May 2015

DEATON, M. L.; WINEBRAKE, J. J. Dynamic Modelling of Environmental Systems.Springer-Verlag, 2000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Taxas brutas em 2018: Brasil em síntese. 2018. Disponível em: <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/populacao/taxas-brutas-de-natalidade.html>>. Acesso em: mai. 2019.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Taxas brutas em 2016: Brasil em síntese. 2019. Disponível em: <<https://brasilemsintese.ibge.gov.br/populacao/taxas-brutas-de-natalidade.html>>. Acesso em: mai. 2019.

KNOTHE, G;KRAHL, J.;GERPEN,J.V. Manual de biodiesel. São Paulo. Edgard Blucher,2006.

LIS, L, Lei aumenta percentual de biodiesel no óleo diesel. Disponível em: <http://g1.globo.com/economia/noticia/2016/03/lei-aumenta-percentual-de-biodiesel-no-oleo-diesel.html>, acesso em mar de 2019, 2016.

MADHESHIYA, A. K.; VEDRTNAM, A. Energy-exergy analysis of biodiesel fuels produced from waste cooking oil and mustard oil. Fuel, v. 214, p. 386-408, 2018. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.11.060.

MELQUIADES, J. A. R. Modelagem para a roteirização do processo de coleta e transporte dos resíduos sólidos urbanos. 2015. 158 f. Tese (Doutorado em Transportes) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Tecnologia – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

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

MMA – Ministério do Meio Ambiente. Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?pg=71044&m=&t1=&t2=&t3=&t4=&ar=&ps=&cachebust=1402513929715>>. Acesso: jun. 2019.

MIRANDA, A. C..Analysis of the costs and logistics of biodiesel production from used cooking oil in the metropolitan region of Campinas (Brazil). Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 88, p. 373-379, 2018.

MONTAGNA, A. Curso de Capacitação/Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos: planejamento e gestão. Florianópolis: AEQUO, 2012.

RANJAN, A.; et al. Experimental investigation on effect of MgO nanoparticles on cold flow properties, performance, emission and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel. Fuel, v. 220, p. 780-791, 2018.

SILVA, E.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,Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2006.

SIMONETTO, E. DE O. ; LOBLER, M. L. Simulação computacional para avaliação de cenários sobre a reciclagem de resíduos sólidos urbanos e o seu impacto na economia de energia. Anais do IX Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação. Universidade FUMEC, 2013.

TAVARES, B.M.; DA SILVA. S.R.R. Biodiesel: fonte de combustível limpo atuando como rica contribuição estratégica, social e ecológica na região de Lins, Monografia apresentada ao Centro Universitário Católico Salesiano Auxilium – UNISALESIANO, Lins-SP, para graduação em Administração, 2008.