

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO UNIVERSITÁRIO NORTE DO ESPÍRITO SANTO
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

NAJARA BARROS DIAS

**MODELAGEM MATEMÁTICA VIA DINÂMICA DE SISTEMAS (DS) PARA IDENTIFICAÇÃO DE
PONTOS DE INTERVENÇÃO ESTRATÉGICA NO MERCADO BRASILEIRO DE BIODIESEL**

SÃO MATEUS

2020

NAJARA BARROS DIAS

MODELAGEM MATEMÁTICA VIA DINÂMICA DE SISTEMAS (DS) PARA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS DE INTERVENÇÃO ESTRATÉGICA NO MERCADO BRASILEIRO DE BIODIESEL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia (PPGEN) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Energia, na área de concentração em engenharia, tecnologia e gestão.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Rodrigo Randow de Freitas

SÃO MATEUS

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

B277 m Barros Dias, Najara, 1990-
Modelagem matemática via Dinâmica de Sistemas (DS) para identificação de pontos de intervenção estratégica no mercado brasileiro de biodiesel / Najara Barros Dias. - 2020.
99 f. : il.

Orientador: Rodrigo Randow de Freitas .
Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Universitário Norte do Espírito Santo.

1. Biodiesel. 2. Dinâmica de Sistemas. 3. Sustentabilidade Social. 4. Poluentes. 5. Matéria-prima. 6. Modelagem matemática. I. , Rodrigo Randow de Freitas. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Universitário Norte do Espírito Santo. III. Título.

CDU: 620.9

NAJARA BARROS DIAS

**MODELAGEM MATEMÁTICA VIA DINÂMICA DE SISTEMAS (DS)
PARA IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS DE INTERVENÇÃO
ESTRATÉGICA NO MERCADO BRASILEIRO BIODIESEL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Energia.

Aprovada em 29 de abril de 2020.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rodrigo Randow de Freitas
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. Daniel da Cunha Ribeiro
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Dr. Renato do Nascimento
Siqueira
Instituto Federal do Espírito Santo



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
RODRIGO RANDOW DE FREITAS - SIAPE 2943425
Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES
Em 04/05/2020 às 20:57

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/20316?tipoArquivo=O>



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por DANIEL DA CUNHA RIBEIRO - SIAPE 1956013 Departamento de Engenharia e Tecnologia - DET/CEUNES Em 05/05/2020 às 10:50

Para verificar as assinaturas e visualizar o documento original acesse o link:
<https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/20417?tipoArquivo=O>

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Criador de todas as coisas, Aquele que me concede força diariamente para batalhar por meus sonhos, Aquele que me protegeu durante todo esse tempo que me dediquei a elaboração dessa dissertação.

Agradeço aos meus pais e irmã, meus maiores incentivadores, amigos e apoiadores da minha educação e carreira profissional.

Ao meu sobrinho Francisco, presente que chegou em meados do curso e fez meus dias mais alegres.

A professora Gisele de Lorena Diniz Chaves, minha primeira orientadora, profissional de excelência, que segurou as minhas mãos e não me deixou desistir, encorajou e compartilhou seu vasto conhecimento.

Ao professor Rodrigo Randow de Freitas, segundo orientador e não menos importante, que com sua leveza, cuidado, parceria e experiência fez a caminhada ser mais doce.

Ao Vinícius, presente de Deus, que enxugou minhas lágrimas e amenizou a ansiedade.

Aos amigos que fiz durante a caminhada, em especial a Paula Schneider, Bárbara Zon e Vitória Fernandes.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, que subsidiou essa pesquisa.

Ao CEUNES/UFES, instituição que forneceu a estrutura para a realização desse sonho.

Aos professores que lecionaram na fase inicial do curso e àqueles que aceitaram o convite para compor a qualificação e defesa, obrigada pela paciência, conhecimento e dedicação.

RESUMO

Em decorrência do aumento do consumo de biocombustíveis nos últimos anos, reflexo direto da preocupação cada vez maior quanto a questões ambientais, o biodiesel, combustível renovável, pode ser produzido a partir de uma ampla gama de fontes, que por exemplo, incluem óleos vegetais comestíveis e não-comestíveis, óleo residual de fritura (ORF) e gorduras animais. Assim, o presente estudo teve como objetivo principal, avaliar a expansão do consumo de biodiesel no mercado brasileiro, relacionando a redução das emissões de poluentes no sistema e a sustentabilidade social, por meio da verificação do impacto dos programas de incentivo econômico e políticas existentes e da diversificação de matéria-prima. Nesse sentido, o método de Dinâmica de Sistemas (DS) foi utilizado, visto que ele permite analisar alterações em variáveis de um sistema que se comportam de forma diferente no tempo. Para isso, foi elaborado um modelo que represente adequadamente esse complexo setor. Inicialmente, as relações entre variáveis foram estruturadas por meio de um diagrama de causa e efeito e posteriormente elaborado um diagrama de estoque e fluxo. A partir dele, foram realizadas simulações divididas em 5 submodelos, utilizando de parâmetros específicos e em um horizonte decenal entre 2020-2029, visando avaliar o impacto na modificação do sistema no decorrer do tempo. Percebeu-se com as simulações, que o aumento do percentual de biocombustível, diminui a dependência do diesel de petróleo, mas para isso a capacidade de produção instalada brasileira precisa ser ampliada em todos os cenários simulados. O aumento do percentual de mistura pode refletir em aumento de adoção de veículos a diesel, conforme submodelo baseado na Difusão de Bass. No que tange a emissões, o Cenário B20, por exemplo, evita 17,1% de CO₂ em emissões em relação ao projetado pelo governo – B15 e 22,9% em relação ao cenário estagnado – B12. No que diz respeito a matéria-prima, aumentar o percentual de participação do ORF e gordura animal, faz reduzir os custos de produção de biodiesel e reduz o emprego na agricultura familiar proveniente do cultivo da soja. Desta forma, a presente dissertação contribuiu com um modelo base para análise de fatores que interferem no mercado de biodiesel no Brasil e por reduzir parte da lacuna encontrada na literatura.

Palavras-chave: Biodiesel. Dinâmica de Sistemas. Sustentabilidade Social. Matéria-Prima. Poluentes.

ABSTRACT

As a result of the increase in the consumption of biofuels in recent years, the direct reflection of the concern is growing in relation to environmental issues, the biodiesel, renewable fuel can be produced from a variety of sources including edible and non-edible vegetable oils, residual frying oil (RFO) and animal fats. Thus, the present study had as main objective, to evaluate the expansion of the consumption of biodiesel in the Brazilian market, relating the reduction of pollutant emissions in the system and the social sustainability, through the verification of the impact of the economic incentive programs and existing policies and diversification of raw materials. To accomplish this the System Dynamics (SD) method will be used, since it allows us to analyze changes in variables of a system that behave differently over time. A model that adequately represents this complex sector is being developed. From it will be carried out simulations in specific parameters to evaluate the impact in the modification of the system over time. For this, a model was elaborated that adequately represents this complex sector. Initially, the relationships between variables were structured using a cause and effect diagram and later a stock and flow diagram was prepared. From it, simulations were carried out divided into 5 submodels, using specific parameters and within a ten-year horizon between 2020-2029, to assess the impact on the modification of the system over time. The simulations were evaluated and it was noticed that the increase in the percentage of biofuel, decreases the dependence on petroleum diesel, but for this the Brazilian installed production capacity needs to be expanded in all simulated scenarios. The increase in the percentage of mixing may reflect an increase in the adoption of diesel vehicles, according to a sub-model based on the Bass Diffusion. With regard to emissions, Scenario B20, for example, avoids 17.1% of CO₂ in emissions in relation to that projected by the government - B15 and 22.9% in relation to the stagnant scenario - B12. With regard to raw materials, increasing the percentage of participation of the ORF and animal fat, reduces the costs of producing biodiesel and reduces employment in family farming from soybean cultivation. In this way, the present dissertation contributed with a base model for the analysis of factors that interfere in the biodiesel market in Brazil and for reducing part of the gap found in the literature.

Keywords: Biodiesel. System Dynamics. Social Sustainability. Feedstock. Production. Pollutants.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma para análise bibliométrica	18
Figura 2 - Usinas de biodiesel autorizadas para funcionamento no Brasil	31
Figura 3 - Relação causal.....	35
Figura 4 - Exemplo de um modelo de causa e efeito.....	36
Figura 5 - Ciclo de retroalimentação de modificação populacional	37
Figura 6 - Diagrama de estoque e fluxo e representação de componentes	37
Figura 7- Modelo de estoque e fluxo para crescimento populacional	38
Figura 8 - Relação entre matéria-prima e produção de biodiesel	45
Figura 9 - Relação entre consumo de biodiesel e produção de biodiesel.....	45
Figura 10 - Relação entre capacidade de produção e produção de biodiesel	46
Figura 11 - Relação entre consumo, dependência de combustíveis fósseis e emissão de poluentes	46
Figura 12 - Relação entre consumo, dependência de combustíveis fósseis e produção de biodiesel.....	46
Figura 13 - Relação entre uso da terra por agricultura familiar, consumo de biodiesel e políticas	47
Figura 14 - a) Relação entre uso da terra, matéria-prima e sustentabilidade social e (b) ciclo de equilíbrio entre uso intensivo da terra, uso da terra por agricultura familiar e matéria-prima.	48
Figura 15 - Relação entre incentivos, matéria-prima e capacidade de produção	48
Figura 16 - Relações existentes com o fator modificador tecnologia	49
Figura 17 - Influência da demanda por biodiesel em capacidade de produção, produção de biodiesel e demanda por diesel	49
Figura 18 - Relação entre custo, produção, capacidade de produção do biodiesel e matéria-prima	50
Figura 19 - Relação entre capacidade, produção e custo do biodiesel	50
Figura 20 - Diagrama de Causa e Efeito	51
Figura 21 – Diagrama de estoque e fluxo - submodelo A.....	52
Figura 22 – Diagrama de causa e efeito – Submodelo B	53
Figura 23 (a) – Modelo de causa e efeito – submodelo C	55
Figura 23 (b) – Modelo de estoque e fluxo- Submodelo C.....	55
Figura 24 – Modelo de estoque e fluxo – Submodelo D	56
Figura 25 – Modelo de estoque e fluxo – Submodelo E.....	57
Figura 26 – Modelo de estoque e fluxo proposto.....	59

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 (a) - Teste de condições extremas para Demanda	68
Gráfico 1 (b) - Produção de Biodiesel	68
Gráfico 2 - Teste de condições extremas para a emissão de CO ₂	69
Gráfico 3 – Comportamento variável Demanda para diversos <i>time step</i>	70
Gráfico 4 – Teste de reprodução comportamental para Demanda.....	70
Gráfico 5 – Comportamento da demanda de biodiesel	72
Gráfico 6 – Comportamento do consumo de diesel.....	73
Gráfico 7 – Relação entre produção e demanda de biodiesel	74
Gráfico 8 – Comportamento mercado potencial	76
Gráfico 9 – Adotantes potenciais 2019-2029	77
Gráfico 10 – Adotantes 2019-2029	77
Gráfico 11 – Geração de empregos horizonte decenal 2020-2029	78
Gráfico 12 – Geração de empregos horizonte decenal 2020-2029, aumentando percentual ORG e gordura animal.....	79
Gráfico 13 – Participação das matérias-primas segundo dado histórico	80
Gráfico 14 – Aumento do percentual de participação do ORF e gordura animal	80
Gráfico 15- Emissão de CO ₂ provenientes do diesel.....	81
Gráfico 16- Emissão de CO ₂ provenientes do biodiesel	82

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Métodos de produção de biodiesel sintetizando as vantagens e desvantagens de cada processo utilizado para obtenção do biodiesel.....	26
Quadro 2 – Síntese dos programas criados com o intuito de estabelecer o biodiesel no Brasil e suas funções respectivas	32
Quadro 3 - Testes de validação possíveis para DS	38
Quadro 4 – 24 testes propostos por Forrester e Senge (1980) e Sterman (2000), agrupados em categorias por Zagonel e Corbet (2006) segundo os objetivos da simulação.	40
Quadro 5 – Teste de validação de modelo DS	43

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais matérias-primas (em %) utilizadas para produção de biodiesel no Brasil	15
Tabela 2 - Levantamento de parâmetros estudados nos 10 artigos encontrados envolvendo DS e biodiesel	22
Tabela 3 - Produção de biodiesel puro em m ³ em todas as regiões brasileiras	30
Tabela 4 - Metodologia de Dinâmica de Sistemas - três etapas gerais: conceituação do problema, formulação de hipóteses dinâmicas, e em seguida, teste e análise.	34
Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo e parâmetros utilizados.....	63
Tabela 6 – Valores iniciais das variáveis de estoque.....	67
Tabela 7 – Condições extremante altas para a demanda de biodiesel	69
Tabela 8 – Teste de sensibilidade para demanda	70
Tabela 9 – Variação das taxas para os cenários simulados	71
Tabela 10 – Valor de segurança utilizado	72
Tabela 11 – Comportamento da variável aumento de capacidade.....	73
Tabela 12 – Taxas de ociosidade para todos os cenários	74
Tabela 13 – Gap para todos os percentuais de mistura	75
Tabela 14 – Comportamento da adoção por boca a boca e publicidade.....	76
Tabela 15 – Taxa de adoção 2020-2029	77
Tabela 16 – Geração de empregos no horizonte 2020-2029 para matérias-primas do biodiesel.....	79
Tabela 17 – Análise de custo no horizonte 2020-2029.....	81
Tabela 18 – Emissões de CO ₂ evitadas no horizonte 2020 -2029	82

LISTA DE SÍMBOLOS



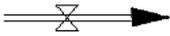
Somatório



Integral simples



Estoque



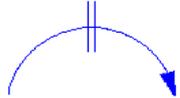
Fluxo



Variável externa às fronteiras de estudo



Relação entre variáveis (sem atraso de impacto)



Relação entre variáveis (com atraso de impacto)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Objetivos	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1 Aplicação De Dinâmica De Sistemas Na Análise Do Setor De Biodiesel.....	17
2.2 Biodiesel: Abordagens Do Setor	23
2.2.1 Social	23
2.2.2 Tecnológico	24
2.2.3 Econômico.....	26
2.2.4 Político	29
2.2.5 Ambiental.....	32
2.3 Método De Dinâmica De Sistemas	34
3 PROCEDIMENTO DE PESQUISA	41
3.1 Etapa 1 – Análise Bibliométrica.....	42
3.2 Etapa 2 - Construção Do Modelo De Dinâmica De Sistemas	42
3.3 Etapa 3 - Obtenção Dos Parâmetros	43
3.4 Etapa 4 - Testes	43
3.5 Etapa 5 - Simulação E Discussão Dos Resultados.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	45
4.1 Diagrama De Causa E Efeito.....	45
4.2 Diagrama De Estoque E Fluxo	51
4.2.1 Submodelo A: Produção	51
4.2.2 Submodelo B: Difusão Da Tecnologia	53
4.2.3 Submodelo C: Sustentabilidade Social	54
4.2.4 Submodelo D: Custo	56
4.2.5 Submodelo E: Emissão De CO ₂	57
4.3 Parâmetros Do Modelo	60
4.3.1 Submodelo A	60
4.3.2 Submodelo B	60
4.3.3 Submodelo C	61
4.3.4 Submodelo D.....	61
4.3.5 Submodelo E	62
4.4 Teste Do Modelo.....	68
4.5 Descrição Dos Cenários Simulados.....	71
4.5.1 Efeito Da Variação Percentual De Adição De Biodiesel Na Demanda E Produção	72
4.5.2 Efeito Da Variação Percentual De Adição De Biodiesel Na Difusão De Tecnologia	75
4.5.3 Efeito Da Variação Percentual De Participação Das Matérias-Primas Na Geração De Empregos.....	78
4.5.4 Efeito Da Variação Percentual De Participação Das Matérias-Primas Nos Custos	80
4.5.5 Efeito Da Variação Percentual De Adição De Biodiesel Na Emissão De CO ₂	81
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS.....	84
REFERÊNCIAS.....	84
Apêndice A	99

1 INTRODUÇÃO

A produção e o consumo de biocombustíveis têm atingido grau de crescimento acentuado nos últimos anos, resultado de incentivo político à diversificação da matriz energética. Nesse cenário, o uso do biodiesel pode representar uma opção viável para a suplementação ao óleo diesel (RIBEIRO et al., 2018). Por exemplo, com o lançamento da mistura B12, isto é, 12% de biodiesel adicionado ao diesel convencional, que foi aprovada pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) em outubro de 2018 e passou a ser vendido ao consumidor final em março de 2020 (ANP, 2020). Corroborando com essa dita expansão, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) registrou que o número de usinas de produção de biodiesel aumentou de 10 em 2008 para 51 em 2017 (ANP, 2019).

Importante mencionar que o consumo alternativo ao petróleo, surgiu por apresentar relativa vantagem quando se considera o aumento das preocupações ambientais nos últimos anos. Por exemplo, a utilização excessiva do diesel de petróleo pode acarretar em grave poluição ambiental (TAN et al., 2019). Assim, o biodiesel apresenta vantagens sobre esse combustível, caracterizando-se por ser biodegradável, não tóxico, possuir baixo teor de carbono, alta lubricidade e maior ponto de inflamação, quando comparado ao diesel, tornando-o bom substituto ao petróleo (ABUBAKAR; SRIRAMULA; RENTON, 2015; DHARMA et al., 2016; YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011). Também, por possuir propriedades semelhantes ao diesel, traz a possibilidade de fazer mistura com esse combustível fóssil em todas as proporções (PHAN; PHAN, 2008; YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011).

O biodiesel pode ser produzido a partir de uma variedade de fontes que incluem óleos vegetais comestíveis (canola, soja, girassol e palma), óleos vegetais não comestíveis, óleo residual de fritura (ORF), bem como gorduras animais (DHARMA et al., 2016). Outra matéria-prima explorada recentemente no Brasil são as microalgas (KHAN; SHIN; KIM, 2018; CÉSAR, 2019; FRANCO et al., 2013). No entanto, a produção de biodiesel enfrenta alguns desafios, como competição com fontes de alimentos, custo maior do que o diesel convencional e incertezas em oferta e demanda, que representam as forças de mercado (ABUBAKAR; SRIRAMULA; RENTON, 2015). Neste sentido, nos últimos anos, algumas políticas têm sido propostas para minimizar estes desafios no Brasil, por exemplo, a criação do Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), em dezembro de 2004, desenvolvendo regras, incentivos fiscais e subsídios para a produção e consumo em escala comercial (BRASIL, 2011). O programa visa introduzir o biodiesel na matriz energética de forma sustentável, permitindo a diversificação de fontes de energia; geração de emprego e renda; redução das disparidades regionais, diminuição da emissão de poluentes, redução dos gastos intrínsecos à redução dos males causados pela poluição e, por fim, uma regulamentação flexível, permitindo o uso de matérias-primas distintas (MDA, 2018). Como reflexo da criação do programa, a produção de biodiesel no Brasil, aumentou de 736 m³ para 3.419.838 m³ em menos de dez anos (DE OLIVEIRA; COELHO, 2017).

Outra ação no país visou incluir a sustentabilidade social como política de estado, através do Selo Combustível Social (SCS), um projeto que é também iniciativa do PNPB e inclui a

agricultura familiar na cadeia de fornecimento de biodiesel. Sendo que, as usinas de biodiesel adquirem matérias-primas oleaginosas de agricultores que participam do programa tendo como incentivo uma redução em seus impostos federais, além do direito de comercializar todo biodiesel via leilões da Agência Nacional de Petróleo e Gás (ANP), (BRASIL, 2011). Percebe-se com isso a presença marcante do governo como regulador da cadeia. Com suas intervenções limitando-se a dinâmica de mercado e a competitividade das usinas quanto a seleção de fornecedores. Já a venda garantida de todo o biodiesel produzido pelas usinas de SCS nos leilões do governo é o que motiva a continuidade do programa (RIBEIRO et al., 2018).

Apesar do grande potencial de diversificação de matérias-primas de oleaginosas, a soja ainda é a principal fonte que supre a cadeia brasileira de suprimentos de biodiesel (BONDARIK et al., 2018). Cita-se que em 2019, o uso da soja representou 68% da produção de biodiesel (Tabela 1) (ABIOVE, 2019).

Tabela 1 - Principais matérias-primas (em %) utilizadas para produção de biodiesel no Brasil

Matéria-prima	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Óleo de soja	82	81	75	73	75	77	77	70	70	68
Sebo de carne	14	14	18	21	21	19	17	17	16	14
Óleo de semente de algodão	3	3	4	3	2	2	1	0	1	1
Óleo de fritura usado	0	0	1	1	1	0	1	1	2	2
Matérias-primas diversas	0	0	0	0	0	0	1	1	2	3
Outros materiais gordurosos	1	2	2	3	2	2	4	12	10	12

Fonte: adaptado de ABIOVE, 2020.

Mesmo ao atribuir-se fatores favoráveis ao biodiesel, nota-se que o biocombustível de soja pode trazer consequências preocupantes à sustentabilidade da indústria, relacionadas ao uso intensivo da terra, entre outras formas de poluição (DE OLIVEIRA; COELHO, 2017). Além disso, a predominância da soja não atende aos objetivos do PNPB quanto à variabilidade de matérias-primas nem quanto à inserção social, pois concentra a produção nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país (ANP, 2019).

No que diz respeito ao fator econômico, as principais variáveis de sistemas que podem afetar a viabilidade econômica da produção de biodiesel é o valor da matéria-prima; a tecnologia e a capacidade da planta de operação (VAN KASTEREN; NISWORO, 2007). Nesse sentido, além de diversificar as matérias-primas, torna-se necessário também uma investigação profunda quanto às tecnologias utilizadas em cada etapa do seu processamento

(RACZ et al., 2018; MARCHETTI; MIGUEL; ERRAZU, 2008). Principalmente, avançar no sentido da implementação do uso e comercialização do biodiesel, o que vem motivando pesquisas sobre sua eficiência (JAHIRUL et al., 2012).

Para se alcançar o almejado equilíbrio na cadeia de produção de biodiesel brasileira, é imperativo atender certos quesitos distintos: (i) de cunho ambiental, avaliando o impacto no meio, proveniente de cada uma das principais matérias-primas utilizadas para a produção de biodiesel no país; (ii) econômico e tecnológico, ao avaliar o custo de cada processo necessário e a necessidade de repasse de preço acessível para o consumidor final; (iii) político e social, no sentido de envolver a comunidade e distribuir uniformemente essa participação no território nacional, incentivando a diversificação da matriz de suprimento, minimizando o monopólio da soja (ABRA, 2020).

Há a necessidade de se entender a possibilidade de se atingir objetivos econômicos, sociais, políticos, ambientais e tecnológicos, com o intuito de identificar pontos de intervenção estratégica que podem fortalecer a produção de biodiesel no Brasil, através do método de Dinâmica de Sistemas. Isso porque para atender aos objetivos anteriormente citados, é fundamental a formulação de um modelo capaz de conciliar diversas abordagens em um sistema. Além disso, este método permite avaliar as características de respostas sobre decisões tomadas em sistemas sociais, apontando o comportamento dado pela simulação do modelo, quando variáveis de impacto são alteradas com objetivo de estabelecer pontos de intervenção estratégica, visando fortalecimento ou melhoria de algum fator pré-estabelecido (STERMAN, 2000).

Importante mencionar que o resultado de uma decisão ou de uma alteração no sistema, nem sempre ocorre imediatamente. Desta forma, a Dinâmica de Sistemas (DS) auxilia na explicitação e estudos das diferentes dinâmicas temporais de resposta inerentes a qualquer sistema. Sendo uma ferramenta que faz jus a necessidade de análise complexa do setor, avaliando a modificação do sistema no decorrer do tempo, relacionando conceitos importantes como dinâmica, estruturas, sistema e comportamento, avaliando o impacto de decisões (STERMAN, 2000). Ela tem sido utilizada em diversas áreas de conhecimento, como física, biologia, ciências sociais, ecologia e ambiente industrial (FORRESTER, 1971), analisando cadeias de abastecimento na agricultura; economia (WIRJODIRDJO, B.; ASJARI, 2018); medicina, sociologia, planejamento militar e negócios (FERNANDES, 2001), abrangendo política ambiental, pública e energética (STERMAN, 2000).

Por fim, por meio do método exposto, sistemas complexos, tais como o de biodiesel, devem ser estudados e aprimorados utilizando a modelagem e simulação (STERMAN, 2000). Para o caso brasileiro, Vaccaro et al. (2018) realizaram uma modelagem qualitativa do setor de biodiesel, ou seja, uma relação de variáveis que interferem para sua produção, especificamente no Rio Grande do Sul. Entretanto, nenhum outro trabalho foi encontrado até 2019 que empregasse este método para avaliar a realidade brasileira. Portanto, o presente estudo visa aproveitar os benefícios analíticos deste método para verificar o impacto de diferentes políticas na produção de biodiesel no Brasil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a expansão da produção e do consumo de biodiesel no mercado brasileiro, relacionando a redução das emissões de poluentes no sistema, diversificação da matéria-prima e a sustentabilidade social, por meio de modelagem baseada em DS.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar, por meio de levantamento bibliográfico, as principais matérias-primas e custos produtivos aproximados envolvidos;
- Identificar a relação entre demanda de biodiesel e combustíveis fósseis orientada a produção;
- Estruturar um modelo de causa e efeito entre as variáveis de forma a refletir o impacto na utilização de matérias primas, produção e consumo;
- Estruturar e testar um modelo de estoque fluxo para quantificação da relação entre as variáveis pelo método de dinâmica de sistemas, de forma que se possa quantificar o impacto no consumo, emissão de poluentes no sistema e a sustentabilidade social;
- Obter parâmetros numéricos das variáveis de impacto analisadas com base em informações de órgãos oficiais;
- Testar o modelo e simular possibilidades de expansão da produção e consumo no mercado brasileiro, relacionando a redução de emissão de poluentes e sustentabilidade social, considerando alterações nas políticas existentes, e pela diversificação de matéria-prima no sistema.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aplicação de Dinâmica de Sistemas na Análise do Setor de Biodiesel

No sentido de identificar estudos que já utilizaram a dinâmica de sistemas no setor de biodiesel, foi realizada uma busca nas bases *Web of Science* e *Science Direct*. Na primeira, buscava-se verificar as pesquisas nos periódicos com maior impacto, mas como foram identificados poucos trabalhos, partiu-se para a segunda.

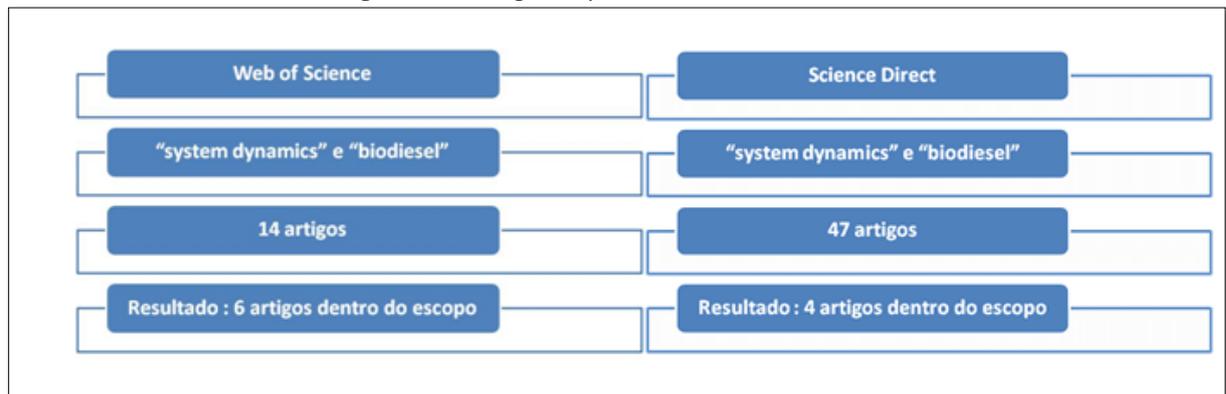
O *Science Direct* é uma base de publicação, que dispõe de artigos de aproximadamente 3800 revistas. São milhões de publicações de textos completos de artigos e livros de referência. (ELSEVIER, 2019). Enquanto a *plataforma Web of Science* apresenta índices regionais de citação, dados de patentes, índices de assuntos especializados e um índice de conjuntos de dados de pesquisa, totalizando mais de 33.000 periódicos. Pode ser utilizada para pesquisa de alta qualidade, pois, associa registros (CLARIVATE, 2019).

Na *Web of Science*, utilizou-se como filtro o termo “*system dynamics*” no título, “*biodiesel*” no tópico, reservando-se a documentos tipo artigo, compreendendo o intervalo de tempo

de 1945-2018. Foram encontrados 14 artigos que atenderam aos pré-requisitos estabelecidos na pesquisa, dos quais foram excluídos aqueles fora do escopo, restando 6.

Já na base da *Science Direct*, os termos utilizados para pesquisa e o horizonte de tempo foram os mesmos. Como mecanismo de pesquisa avançada, “*system dynamics*” foi selecionado para estar contido em palavras-chave, título ou resumo, enquanto o termo “*biodiesel*” poderia estar contido em qualquer parte do texto científico, ampliando as chances de obtenção de uma maior quantidade de artigos sobre o tema considerado objetivo de análise. Foram identificados 47 artigos limitando os documentos a artigos de pesquisa e revisão. Foram excluídos aqueles fora do contexto esperado ou repetidos, restando 4. Portanto, os 10 artigos filtrados foram analisados e tabelados conforme parâmetros pré-estabelecidos, tais como país de estudo, objetivo do trabalho, variáveis analisadas, cenários e a indicação da existência de equações e valores para simular o modelo. A Figura 1 detalha o procedimento de busca para análise bibliométrica.

Figura 1 – Fluxograma para análise bibliométrica



Fonte: Autores.

A seguir, os avanços no estudo do setor utilizando esta ferramenta serão descritos. Citemos inicialmente por exemplo, Musango et al. (2011) apontam que o biodiesel é um combustível que contribui substancialmente para o desenvolvimento sustentável em muitos países. No entanto, seu desenvolvimento, inclui interações entre atores, desenvolvedores de tecnologia, o governo, as comunidades e o ambiente natural.

Realizar uma análise cabal é importante para determinar os efeitos do desenvolvimento do biodiesel sobre a sustentabilidade em geral. Esse estudo é realizado através do modelo BIOTSA (Avaliação de Sustentabilidade da Tecnologia de Bioenergia), que aborda o gerenciamento da tecnologia e planejamento do biodiesel na Província do Cabo Oriental, na África do Sul, usando DS. Esse artigo foi desenvolvido, em um momento em que não havia produção comercial de biodiesel, somente projetos, visando por exemplo a utilização de canola como matéria-prima de produção.

O modelo BIOTSA foi construído com o objetivo de avaliar o efeito do desenvolvimento de produção de biodiesel em indicadores selecionados de sustentabilidade. No entanto, ele não captura todos os aspectos relacionados a esse desenvolvimento, devido a indisponibilidade de dados por causa da inexistência do mercado de biodiesel na África do Sul.

Musango et al. (2012) propõem alguns cenários para serem testados a partir do modelo de Avaliação da Sustentabilidade da Tecnologia de Bionergia (BIOTSA), analisando os resultados de um projeto de produção de biodiesel proposto em indicadores de sustentabilidade para a Província do Cabo Oriental da África do Sul. Esse estudo objetiva informar as decisões políticas e de tomada de decisão relativas à adequação da tecnologia de biodiesel para o desenvolvimento sustentável. O BIOTSA baseia-se na estrutura conceitual de uma abordagem de sistemas para Avaliação da Sustentabilidade Tecnológica (SATSA). Nesse artigo, os 11 submodelos de Musango et al. (2011) são representados em um diagrama causal. As análises de cenário foram consideradas racionais e representaram o potencial desenvolvimento de produção de biodiesel na Província do Cabo Oriental.

Espinoza et al. (2017) citam que os governos estão preocupados com a diversificação da matriz energética, desenvolvendo uma série de iniciativas e políticas ambientais. Nesse sentido, os biocombustíveis, representam uma parte significativa na diversificação de fontes, sendo necessário avaliar a sustentabilidade de seu mercado para investigar seus efeitos nos âmbitos nas dimensões econômica, tecnológica, social, política e ambiental.

Espinoza et al. (2017) propõem um modelo de dinâmica de sistemas para que os tomadores de decisão compreendam as influências entre as diferentes variáveis que descrevem o sistema e o impacto da política do governo de biodiesel na Colômbia. A metodologia de Dinâmica de Sistemas visa compreender o efeito das políticas desenvolvidas pelo governo colombiano desde 2008, nos diferentes componentes do sistema de mercado de biodiesel. As simulações mostraram que, apesar do preço do biodiesel, o consumo continuará crescendo. No que tange a sustentabilidade, enquanto o consumo obrigatório gera demanda e, portanto, estimula a indústria do biodiesel, os impactos no uso da terra e no mercado de óleo de palma também são significativos.

Barisa et al. (2015) apontam que os biocombustíveis deverão representar uma parte significativa da estratégia global no sentido de diversificar o provisão energético da Europa. O estudo é realizado para o setor de transporte rodoviário da Letônia. O foco principal deste artigo é uma tentativa de obter compreensão sobre o comportamento dinâmico de longo prazo do mercado de biodiesel nesse país. Os principais instrumentos e mecanismos de políticas implementados podem ser resumidos como: subsídios estatais em diferentes níveis e estágios; aumento de impostos sobre combustíveis fósseis e aumentar a parte do biodiesel na mistura de combustível para transporte. O estudo utiliza um modelo do setor de biodiesel para avaliar o potencial aumento do uso de biocombustível na Letônia e encontrar as estratégias políticas mais eficazes para alcançar as metas da política nacional de transporte.

O horizonte analisado é de 2012-2030 e foram desenvolvidos três cenários para análise: crescimento habitual; crescimento moderado e sustentável. Tem sido entendido que o cenário verde é essencial para alcançar a meta fixa de usar uma mistura de 10% de energia renovável no setor de transporte. Os resultados obtidos a partir da simulação atestam que é necessária a promoção da aceitação de biocombustíveis entre os usuários finais.

Rusiawan et al. (2015) preveem um modelo para a política de desenvolvimento urbano sustentável de Jacarta. Existe uma relação de causalidade entre crescimento econômico e emissão de CO₂. O alto crescimento da economia contribui para o rápido crescimento do número de motocicletas nesse país e por sua vez, provoca o aumento de emissão de poluentes, contribuindo como efeito negativo para o sistema econômico e bem estar da população.

Um Plano Nacional para Emissão de Gases, estabeleceu que Jakarta reduza sua emissão de CO₂ de 26 a 40% com foco no setor de transporte. Os resultados apontam que a intervenção com o desenvolvimento do espaço aberto verde iniciados em 2009 conseguiram reduzir as emissões de CO₂ em uma média de 14,29% ao ano durante o período de simulação de 2009 a 2029. O uso de energia renovável, tanto quanto 15% de biodiesel para substituir o combustível diesel pode reduzir as emissões de CO₂ em uma média de 2,63% ao ano ou 281.538,38 toneladas por ano durante o período de simulação até 2029.

Jonker et al. (2015) indicam que o governo instaurou uma política de mistura obrigatória para facilitar a adesão e o estabelecimento de um setor de biocombustíveis na África do Sul, visando uma economia de baixa emissão de carbono e ambientalmente sustentável. Um modelo de dinâmica do sistema foi elaborado para identificar os principais pontos de intervenção estratégica que poderiam fortalecer a produção de biocombustíveis.

A fase de construção de modelos resultou na construção de oito submodelos principais: produção de biocombustíveis, produção agrícola, gastos com biocombustíveis, finanças operacionais, lucratividade, alternativas à produção local, emprego e emissões. O horizonte temporal da simulação é de 2001 a 2040, em que os dados do censo de 2001 forneceram valores iniciais precisos para o modelo. Seis cenários foram identificados e usado como comparação para avaliar os impactos e efeitos do cumprimento da mistura obrigatória.

A Dinâmica de Sistemas foi usada com sucesso para a avaliação do projeto de estabelecimento de um setor de biocombustível e forneceu informações valiosas sobre os principais fatores impulsionadores e pontos de intervenção para avaliação de um sistema, direcionando para a produção do biocombustível localmente.

Vaccaro et al. (2010) descrevem um estudo que foi realizado por uma equipe de especialistas durante cinco meses. O objetivo da pesquisa foi modelar e compreender as relações entre os atores da cadeia produtiva do biodiesel no Rio Grande do Sul e analisar possíveis cenários futuros, considerando o ano de 2020 como horizonte. Com base em modelagem de causa e efeito, quatro diferentes cenários foram analisados qualitativamente, a fim de propor ações estratégicas para promover a sustentabilidade e a competitividade da cadeia.

No Brasil, o biodiesel para fins comerciais é produzido principalmente a partir de soja, canola, girassol e mamona. Um dos principais interesses do Governo Federal do Brasil na promoção da pesquisa e produção de biodiesel é reduzir a dependência nacional do petróleo e de sua cadeia de fornecimento. Diversas variáveis foram consideradas, considerando os

fatores-chave e os atores da cadeia produtiva do biodiesel. A análise da estrutura sistêmica permitiu identificar os efeitos de muitas variáveis sobre a sustentabilidade dos atores, inclusão social de pequenos agricultores e a necessidade de articulação de mecanismo de garantia de demanda e apoio à pesquisa e desenvolvimento. Esse estudo teve como objetivo discutir a necessidade de ações de benefício mútuo para os membros dessa cadeia produtiva e para a sociedade.

Vaccaro et al. (2018) indicam que o Rio Grande do Sul apresenta individualidades na composição do setor agrícola: a agricultura familiar e pequenas propriedades, que são fatores influentes nas cadeias produtivas de biocombustíveis. Aqui, uma análise sistêmica é realizada, através do modelo de causa e efeito, para analisar as inter-relações entre os atores dessa cadeia do etanol e o entendimento dos impactos de suas ações sobre a cadeia no médio e longo prazo. Os autores apontam que, no caso de desenvolvimento, as dimensões social, tecnológica, econômica, ecológica, política e legal sofrem alteração positiva, isto é, aumentam, ou mostram-se eficazes. O produto final deste processo é a harmonização das intenções estratégicas de cada participante da cadeia.

Azadeh e Vafa Arani (2016) estimam os parâmetros mais importantes na cadeia de suprimento de biodiesel em um dado horizonte de planejamento. Desta forma, os parâmetros estimados são utilizados como entradas de um modelo matemático utilizado em conjunto com DS para analisar o sistema. As energias renováveis são as melhores opções para todos os países para reduzir a dependência do petróleo, juntamente com a redução da poluição ambiental.

O gerenciamento da cadeia de suprimentos de biocombustíveis, desde as áreas de aquisição de biomassa até os mercados de consumo, é uma questão crítica devido ao ambiente complexo e incerto do problema. Em primeiro lugar, um modelo de Dinâmica de Sistemas é desenvolvido para simular os principais parâmetros da cadeia de fornecimento de biodiesel na União Europeia. A capacidade de produção de biodiesel, a demanda de biodiesel, o preço de mercado do biodiesel, a capacidade de produção de biomassa e o preço da biomassa são os principais produtos do modelo de DS. Uma abordagem é proposta para otimizar as variáveis de decisão da cadeia de suprimento de biodiesel em quatro cenários.

Schade e Wiesenthal (2010) investigam se uma análise baseada em modelos permite uma avaliação clara das políticas de biocombustíveis. Para este fim, uma avaliação de risco é aplicada ao modelo de biocombustível BioPOL, fazendo uso do método de simulação de Monte Carlo, que baseia-se na repetição de numerosas iterações de modelo com cada um deles usando um conjunto de parâmetros que é escolhido aleatoriamente a partir das distribuições de probabilidade subjacentes dos parâmetros mais influentes. Esse modelo é baseado em uma simulação ano a ano da produção de biocombustível, custo de produção e demanda de biocombustível até 2030, fornecendo resultados detalhados para os tipos de biocombustíveis considerados em relação à capacidade de produção e volumes, custos e produção de emissões de gases de efeito estufa.

Duas opções políticas foram avaliadas: uma política que presume não haver isenção de impostos para biocombustíveis e uma política que pressupõe uma redução de impostos de 30%. Os resultados mostram que a opção simplificada de política de “isenção fiscal” é apenas marginalmente preferível a uma opção de política de redução de impostos de 30% até 2020, quando se considera o custo e os benefícios da redução das emissões de gases de efeito estufa. Até 2030, no entanto, os resultados indicam uma clara preferência da opção de política isenção de impostos (Tabela 2).

Tabela 2 - Levantamento de parâmetros estudados nos 10 artigos encontrados envolvendo DS e biodiesel

Autor(es)	Local de Estudo	Ambiental	Tecnológico	Econômico	Político	Social
Schade e Wiesenthal (2010)	União Europeia	Não inseriu	Não inseriu	Inseriu	Inseriu	Não inseriu
Musango et al. (2011)	África do Sul	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Não inseriu	Inseriu
Musango et al. (2012)	África do Sul	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Não inseriu	Inseriu
Vaccaro et al. (2010)	Brasil (Rio Grandedo Sul)	Não inseriu	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Inseriu
Vaccaro et al. (2018)	Brasil (Rio Grande do Sul)	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Inseriu
Barisa et al. (2015)	Letônia	Inseriu	Não inseriu	Inseriu	Inseriu	Não inseriu
Jonker et al. (2015)	África do Sul	Inseriu	Não inseriu	Inseriu	Não inseriu	Inseriu
Rusiaw et al. (2015)	Indonésia	Inseriu	Inseriu	Não inseriu	Inseriu	Inseriu
Azadeh e Vafa Arani (2016)	Irã	Não inseriu	Inseriu	Inseriu	Não inseriu	Não inseriu
Espinoza et al. (2017)	Colômbia	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Inseriu	Inseriu
Total de inserções	-	7	7	9	6	7

Fonte: Autores.

Pode-se observar que o parâmetro mais utilizado é o econômico e o menos utilizado são parâmetros políticos. Além disso, apenas dois artigos envolveram todos os parâmetros considerados relevantes, um para a realidade brasileira e outro para a realidade colombiana. Para o Brasil foram encontrados dois artigos que utilizaram DS para o estudo do biodiesel, porém o estudo se restringiu ao estado do Rio Grande do Sul. Além disso, a observação feita foi somente de cunho qualitativo, ou seja, foi elaborado um modelo conceitual sobre o sistema. Sendo assim, através do estudo do estado da arte, percebe-se que pode ser realizada uma análise da viabilidade de se atingir os objetivos econômico, social, político, ambiental e tecnológico simultaneamente para todo o Brasil, aliando o qualitativo (diagrama causal) à simulação quantitativa (diagrama de estoque e fluxo).

2.2 Biodiesel: Abordagens do Setor

O biodiesel é composto por ésteres metílicos e etílicos de ácidos graxos que apresentam a opção de serem produzidos a partir de diversas fontes lipídicas, através de um processo conhecido como transesterificação. Na transesterificação, os lipídios reagem com um álcool de cadeia curta na presença de um catalisador ácido, básico ou enzimático (DAUD et al., 2015). O metanol é o álcool comumente utilizado no processo devido, em parte, a seu baixo custo (ZHANG et al, 2013). Um subproduto de interesse dessa reação é o glicerol, que pode ser usado na indústria cosmética e farmacêutica, por exemplo (DAUD et al., 2015). A transesterificação é o método mais utilizado para a produção de biodiesel.

O estudo da cadeia de produção de biodiesel brasileira envolve a conciliação de distintas abordagens de cunho ambiental, econômico, tecnológico, político e social. Esta seção abordará cada um destes aspectos separadamente, apesar de, na prática, estes elementos serem interconectados na forma de um sistema.

2.2.1 Social

A demanda global por energia leva a preocupação de cunho social, no que tange a segurança energética (VALENTE; IRIBARREN; DUFOUR, 2019). O consumo mundial de petróleo aumentou devido ao crescimento da população humana e industrialização, causando esgotamento de reservas de combustíveis fósseis e aumento do preço de petróleo (BANKOVÍ C-ILÍ; STAMENKOVÍ; VELJKOVÍ, 2012). Uma alternativa a esse combustível é o biodiesel, semelhante ao diesel, destacando-se por ser sustentável e renovável (PHAN; PHAN, 2008).

O biodiesel é proveniente de óleos vegetais e animais. No entanto, o consumo em larga escala de óleo comestível para geração de energia, pode levar a uma crise relacionada ao fornecimento de alimentos e ao desequilíbrio econômico (CANESIN et al., 2014; ZHANG et al., 2013), isto é, a utilização de óleos comestíveis pode acarretar preços mais altos dos alimentos e agravar a fome nos países em desenvolvimento (BALAT, 2011).

Ainda segundo Demirbas et al. (2016), cerca de 13% das reservas mundiais de óleo vegetal foram usadas para a produção de biodiesel em 2012. Khan et al. (2014) apontam por exemplo, que, na Malásia, as refinarias de biodiesel tornaram-se responsáveis pela escassez do óleo de palma que, conseqüentemente, sofreu aumento em 70% do seu valor.

No sentido de minimizar esta barreira, matérias-primas mais baratas e/ou não comestíveis, como o óleo de fritura, gorduras de frango, bovinas e de porco e óleo de algodão (ANP, 2019) têm sido empregadas para a produção de biodiesel, com o objetivo de amenizar a crise alimentar resultante da utilização de matérias-primas comestíveis, como óleo de soja, palma e milho (KOH; IDATY; GHAZI, 2011a; SU, 2013). Em todo o mundo, grande quantidade de plantas oleaginosas não comestíveis está disponível na natureza e são consideradas como promissoras para a produção de biodiesel (DEMIRBAS, 2009; PRAMANIK, 2003).

O desenvolvimento de regiões rurais ocorre por meio do fornecimento de emprego e renda. Esse alcance pode ser obtido com o cultivo de oleaginosas e produção de biocombustíveis. Com o fomento da produção de matéria-prima e biodiesel, há promoção da inclusão social de pequenos agricultores familiares. Naturalmente, muitos desses agricultores nunca haviam participado de um programa assim, e o Selo Combustível Social foi feito pra garantir a permanência deles no mercado de combustíveis do país. A participação dos agricultores familiares acontece produzindo sementes e mudas de oleaginosas, fornecendo os grãos para as indústrias processadoras; extraíndo o óleo vegetal do grão e organizando usinas próprias para a produção de biodiesel. Desta forma, o biodiesel acaba por fortalecer o cooperativismo familiar (MDA, 2019).

Outro elemento social envolvido com a produção de biodiesel é que a produção minimize a longo prazo a utilização de combustíveis fósseis com conseqüente redução da dependência por importação de petróleo e aumente a segurança por suprimento de energia (MOSER; 2009).

2.2.2 Tecnológico

O Brasil se destaca como potencial produtor de diversas espécies de oleaginosas que podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de biodiesel (CÉSAR et al., 2019). Entretanto, o alto preço da produção do biodiesel é a principal barreira ao seu uso comercial (AVHAD; MARCHETTI, 2015; BANKOVÍ C-ILÍ; STAMENKOVÍ; VELJKOVÍ, 2012; KISS; JOVANOVIĆ; BOŠKOVIĆ, 2010). Grande parte dos óleos não comestíveis contém um alto teor de ácidos graxos livres, resultando em aumento do custo de produção de biodiesel (LEUNG; WU; LEUNG, 2009).

Uma possibilidade para alcançar a redução de custos, seria a melhoria das tecnologias de produção para obtenção de satisfatória produtividade e rendimento, reduzindo o custo da matéria-prima e o custo de capital (APOSTOLAKOU et al., 2009; MULUGETTA, 2009). Para isso, é necessária a análise de produções alternativas, catalisadores, matéria-prima e tecnologias de purificação do biodiesel para identificar aquelas que são melhores no âmbito econômico (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018).

O uso de catalisadores mais baratos e tecnologias com entrada de energia mínima e reação de transesterificação mais rápida, bem como matéria-prima alternativa mais barata, poderão tornar o biodiesel mais competitivo (COLOMBO; ENDER; BARROS, 2017; OLKIEWICZ et al., 2016; REYERO; ARZAMENDI; GANDÍA, 2014).

Ao selecionar um determinado tipo de matéria-prima e configuração mais barato, precisa-se aliar a redução do custo e o investimento resultante de etapas acrescentadas ou tecnologias de pré-tratamento da matéria-prima de valor menor, a separação dos produtos e a melhoria de qualidade do produto de interesse, nesse caso, o biodiesel (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018).

A substituição de matérias-primas comestíveis por outras mais baratas como vegetais não comestíveis, óleo de fritura e gorduras animais representa uma alternativa para redução de custo com insumo (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018). No entanto, o problema encontrado aqui, diz respeito a quantidade de impurezas. Um teor maior de ácidos graxos livres e de água exige pré-tratamento e purificação quando é catalisado por álcali (CHEN et al., 2012).

A produção de biodiesel está passando por rápidas reformas tecnológicas nas indústrias e na academia. Desta forma, vários métodos estão disponíveis e podem ser adotados (ABBASZAADEH et al., 2012). As quatro formas principais de se produzir biodiesel são o uso direto e a mistura de óleos vegetais, microemulsões, craqueamento térmico (pirólise) e transesterificação (DEMIRBAS, 2007; VYAS; VERMA; SUBRAHMANYAM, 2009). Segundo Ma e Hanna (1999), um dos métodos mais comuns usados para reduzir a viscosidade do óleo na indústria de biodiesel é a transesterificação, que ocorre entre um óleo vegetal ou gordura animal e um álcool (metanol, etanol, butanol) na presença de um catalisador (homogêneo, heterogêneo) ou sem a aplicação de catalisadores.

No método de uso direto, o óleo vegetal bruto é misturado ou diluído com o óleo diesel para melhorar a viscosidade em motores de ignição (ABBASZAADEH et al., 2012; DAUD et al., 2015). Esse método só foi pesquisado extensivamente nas últimas duas décadas, mas foi experimentado por quase 100 anos (KOH; IDATY; GHAZI, 2011b). Porém, o uso direto de óleos vegetais têm sido considerado insatisfatório e impraticáveis para motores a diesel, pois, requerem modificações significativas no motor, devido a oxidação e polimerização decorrentes do armazenamento do óleo vegetal (DEMIRBAS, 2009). Ma e Hanna (1999) afirmaram que misturas de óleos não são práticas para motores. Apresentam alta viscosidade e composição ácida, por exemplo (DAUD et al., 2015).

Fukuda et al. (2001) apontam que a microemulsão representa um outro método, que é uma solução potencial para resolver o problema da alta viscosidade do óleo vegetal (ABBASZAADEH et al., 2012; DAUD et al., 2015). Combustíveis a base de microemulsões são denominados combustíveis híbridos, são fluidos estáveis com três componentes: uma fase oleosa, uma fase aquosa e um surfactante (ABBASZAADEH et al., 2012). Uma microemulsão é feita misturando óleo vegetal com solventes adequados. Os solventes estudados são metanol, etanol e 1-butanol. Porém, apesar de diminuir a viscosidade do óleo, esse processo pode resultar em depósitos de carbono e combustão incompleta (DAUD et al., 2015).

Segundo Mohan et al. (2006), a pirólise é a conversão de uma substância orgânica em outra, por meio de calor ou com o auxílio de um catalisador. Estudos apontaram que o biodiesel produzido por pirólise, isto é, o bio-óleo, é adequado para motores. Porém, nesse processo, materiais de baixo valor são produzidos devido a eliminação de oxigênio no processo (ABBASZAADEH et al., 2012). Propriedades como volatilidade incompleta e instabilidade são indesejáveis e restringem a aplicação do biodiesel (FRENCH; CZERNIK, 2009). O processo exige equipamentos caros, apesar de apresentar menor custo de processamento, simplicidade e menos desperdício (SINGH; SINGH, 2010).

A tecnologia mais comum de produção de biodiesel é a transesterificação de óleos com álcool que gera o biodiesel como principal produto e glicerina como subproduto (ABBASZAADEH et al., 2012; BARNWAL; SHARMA, 2005; DAUD et al., 2015). A seleção de um processo de transesterificação depende da quantidade de ácido graxo livre e do teor de água da matéria-prima. Entre todos os métodos atuais de transesterificação, a reação baseada em catalisadores homogêneos é um método comum e comercial. O principal motivo se deve ao fato de ser cineticamente mais rápido que a transesterificação catalisada heterogeneamente e ser economicamente viável. O alto consumo de energia e a dispendiosa separação do catalisador homogêneo da mistura da reação exigiram o desenvolvimento de catalisadores heterogêneos (ABBASZAADEH et al., 2012).

A reação de transesterificação catalisada por ácido heterogêneo é indicada como mais rentável para a produção de biodiesel de qualidade, a partir de matéria barata nos dias atuais. Isso devido a redução de etapas de processo produzem glicerol de alta pureza e permitem recuperação fácil do catalisador (AVHAD; MARCHETTI, 2015; JANAUN; ELLIS, 2010; KEE LAM; TEONG LEE; RAHMAN MOHAMED, 2010) (Quadro 1).

Quadro 1- Métodos de produção de biodiesel sintetizando as vantagens e desvantagens de cada processo utilizado para obtenção do biodiesel

Processo	Vantagens	Desvantagens
Uso direto do óleo vegetal	O processamento da matéria é mínimo.	Requer modificações significativas no motor devido a oxidação e polimerização decorrentes do armazenamento do óleo vegetal. O óleo apresenta alta viscosidade e composição ácida.
Microemulsão	Reduz a viscosidade do óleo.	Presença de depósitos de carbono e combustão incompleta.
Pirólise	Reduz a viscosidade do óleo, menor custo de processamento, simplicidade e menos desperdício.	Volatilidade incompleta e instabilidade. Requer equipamentos caros.
Transesterificação	Reduz a viscosidade do óleo. Glicerol é um subproduto de interesse para indústria.	Alto consumo de energia. Dispendiosa separação quando se utiliza catalisador homogêneo.

Fonte: Autores.

Independentemente do tipo de tecnologia, a matéria-prima absorve a maior parte do custo de produção de biodiesel (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018). A seleção do método de produção dependerá da qualidade e disponibilidade da matéria-prima e do tipo de processo desejado (GASHAW 2015; YUNUS KHAN et al., 2014).

2.2.3 Econômico

A notável volatilidade dos preços de combustíveis fósseis fez com que o biodiesel apresentasse potencial econômico, além de ter a vantagem de ser um combustível

renovável (TAN et al., 2019). A produção de biodiesel no Brasil alcançou 17,4 bilhões de litros entre 2005 e 2014, superando as metas estabelecidas pelo PNPB para o período, representando economia e redução de custos com a importação. Dados da ANP apontam desenvolvimento promissor quando fazem menção a mesma quantidade de produção em bilhões de litros em um período de somente 4 anos (2015-2018) (ANP, 2019).

Até o momento, o maior obstáculo na comercialização do biodiesel é o custo de produção. Cerca de 70-95% do custo total de produção do biodiesel é oriundo do custo de matéria-prima, isto é, óleos vegetais ou gorduras (sebo) animais (ZHANG et al., 2003; MARCHETTI; MIGUEL; ERRAZU, 2008). As matérias-primas são adquiridas por produtores que investem em uso de terra, irrigação e infraestrutura com o objetivo de fornecer o cultivado com qualidade requerida. Para obter essa matéria de excelência, investimentos são aplicados, tornando-o o produto final custoso (DE OLIVEIRA et al., 2019).

Desta forma, a utilização de materiais residuais pode ser útil para reduzir o custo da matéria-prima, tornando o processo econômico (SAHAR et al., 2018). O uso do ORF reduz bastante o custo do biodiesel, pois está disponível a um custo relativamente baixo. A redução do custo de matéria-prima precisa ser o primeiro passo para otimizar o custo total de fabricação. Além disso, o óleo de cozinha é facilmente encontrado em restaurantes, lanchonetes e cozinhas domésticas. As pesquisas apontam que o pré-tratamento ácido seguido por reação catalisada por base na presença de óleo de fritura, é um processo viável para a produção de biodiesel (SAHAR et al., 2018; AL-HAMAMRE; YAMIN, 2014). A transesterificação catalisada por base tem sido mais utilizada, devido a sua rápida taxa de reação (ZHANG et al., 2003).

No entanto, resultados experimentais ressaltam a importância de testar lotes individuais dessas matérias-primas antes da produção, devido ao fato de representarem uma matéria-prima muito heterogênea em termos de composição e propriedades, apresentando vários graus de aumento na saturação durante o uso de cozimento/fritura. Diferentes óleos vegetais são usados por diferentes instalações, sendo expostos a temperaturas e tempos específicos diferentes (KNOTHE; STEIDLEY, 2009).

Outra consideração a ser feita, diz respeito ao nível de ocupação das usinas de biodiesel com o alavancar dos biocombustíveis. Embora o aumento de produção seja bom, o índice de ociosidade do setor é considerável, visto que a capacidade instalada atingiu o patamar de 627.924 m³ em fevereiro de 2017 para atender uma demanda de produção acumulada em 255.361 m³ para o mesmo período (ANP, 2017). Não havendo aumento significativo, as plantas de biodiesel ficarão paradas.

Além da capacidade das plantas, outro elemento que interfere no custo de produção é o tipo de processo utilizado para obtenção do biodiesel. Marchetti et. al. (2008) realizaram cálculos aproximados de custo de produção de biodiesel através da transesterificação por meio de catalisador homogêneo e ácido; catalisador homogêneo e alcalino e catalisador heterogêneo (resinas sólidas). Para cálculo de economia de cada cenário, o tempo de vida do projeto foi estabelecido em 15 anos com um ano para a construção da usina. Presume-se

que a planta de processamento operasse em 100% da sua capacidade em todo o tempo e nenhum empréstimo financeiro foi levado em conta.

Observou-se que para catalisadores heterogêneos o processo aparece como mais rentável, pois apresenta menor custo de investimento de capital, devido a menor quantidade necessária de equipamentos envolvidos no processo. Para uma planta com capacidade de 36,036 toneladas por ano, o custo aproximado de equipamentos é de 1 milhão de dólares. Os custos operacionais foram bastante semelhantes, aproximadamente 18,5 milhões de dólares para os três processos. Em todos os casos, 76% a 80% do custo operacional está associado ao custo de matéria-prima. Ainda, segundo os autores, o glicerol, subproduto obtido na transesterificação, apresenta maior grau de pureza quando realizado com catalisador heterogêneo.

Para o método de pirólise, é um desafio de pesquisa otimizar o processo, maximizar a qualidade e a quantidade de produto, aliando a minimização de custos. A viabilidade econômica é o fator chave no desenvolvimento de pirólise comercial. O custo de produção é considerado alto e a tecnologia precisa avançar no sentido da implementação do uso e comercialização, o que vem motivando pesquisas sobre a eficiência da tecnologia da pirólise, comparada a outras tecnologias de conversão termoquímica (JAHIRUL et al., 2012).

Os processos de uso direto/mistura de óleos e a microemulsão são considerados simples (YUNUS KHAN et al., 2014), pois não alteram quimicamente a matéria-prima, apresentando viabilidade econômica (SALVI; PANWAR, 2012). No entanto, estudos adicionais são necessários para determinar o impacto a longo prazo no motor (PRAMANIK, 2003). Sabe-se então que o apoio às políticas e o aprendizado tecnológico continuam sendo essenciais para o alcance a paridade dos custos (JONG, 2017).

O apoio econômico para a implementação das políticas pode ser feito através de incentivos fiscais provenientes do governo federal. No Brasil, para estímulo de consumo e inserção do biodiesel no setor energético, o governo concedeu isenções e reduções nos impostos que incidem sobre esse combustível. A amenização de impostos acontece através de decretos. O Decreto nº 5298 de 06/12/2004, isenta o IPI (Imposto sobre Produtos Industrializados) e o Decreto nº 5457 de 06/06/2005, fornece renúncia fiscal para importação e comercialização do biodiesel (AGEITEC, 2019).

Além disso, em 2014 foi suspensa a incidência de contribuição PIS/PASEP e COFINS (Contribuição para o Financiamento de Seguridade Social) na aquisição de matérias-primas destinadas a produção de biodiesel, por pessoas jurídicas e/ou cooperativas que exerçam atividade agropecuária (AGEITEC, 2019). O CONFAZ (Conselho Nacional de Política Fazendária) renovou em abril de 2019 o convênio ICMS 113/06 que pontua em 12% a base de cálculo do imposto ICMS sobre operações relacionadas ao biodiesel puro. Esse convênio foi criado em outubro de 2006 e vem sendo renovado periodicamente (CONFAZ, 2019). Ele também autoriza a isenção de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) sobre operações internas com produtos vegetais destinados à produção de biodiesel. A essa

regra somente o Paraná não se tornou signatário entre todos os estados brasileiros (APROBIO, 2019).

Os dados de produção de biodiesel disponibilizados pela ANP apontam para estímulo ao crescimento industrial que pode ser proveniente dos incentivos fiscais estabelecidos pelo governo. Observa-se que em 2014, a produção de biodiesel em dezembro ficou em 315.448 m³. Enquanto que em dezembro de 2018, nota-se uma produção de 473.435 m³. A produção de biodiesel dos outros meses, para os anos de 2014 e 2018, permanecem em torno do mesmo valor que seus respectivos dados citados (ANP, 2019).

2.2.4 Político

Em 2017, a participação do biodiesel na matriz energética representou cerca de 3,3% do combustível utilizado no transporte (EPE, 2019). Esse dado indica que o biodiesel vem ganhando o mercado brasileiro nos últimos anos, quando se faz a comparação com Balanços Energéticos anteriores. Pelo fato de apresentar-se biodegradável e renovável, o governo iniciou o processo de incentivo através da criação do PROBIODIESEL, criado em 2002, com o objetivo de desenvolver tecnologias de produção e o mercado de consumo de biodiesel, além de estabelecer uma Rede Brasileira de Biodiesel (DELATORRE et al., 2011) e o Programa Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB), para incitar o desenvolvimento rural (FINCO; DOPPLER, 2010) e a inclusão social, por meio da interligação entre latifundiários e pequenos agricultores familiares (PAG POUSA; SANTOS; SUAREZ Ñ, 2007).

O governo brasileiro defendeu em 2002, uma plataforma de inclusão social e desenvolvimento econômico para regiões como Norte e Nordeste, e em 2004, propôs a regionalização da produção de biodiesel, apoiando a diversificação de matérias-primas através de insumos abundantes, como a mamona e a palma, presentes nas regiões Norte e Nordeste, através da criação do Selo Combustível, implantado pelo PNPB (DE OLIVEIRA et al., 2019).

O SCS foi criado pelo Decreto nº 5297, de dezembro de 2004, realizado pelo Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA) e concedido a produtores que comprem um percentual mínimo permitido de matérias-primas de pequenos agricultores (MDA, 2019). Por sua vez, os produtores de biodiesel, cujo volume representa 80% das usinas com o SCS (DE OLIVEIRA et al., 2019), têm prioridade para vender sua produção por meio de leilões públicos realizados pela Agência Nacional do Petróleo (ANP).

A comercialização do biodiesel no Brasil é realizada através de leilões públicos, promovidos pela ANP, por meio de diretrizes estabelecidas pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Estes leilões oferecem suporte econômico à cadeia produtiva do biodiesel, criando condições graduais para obtenção de consolidação do setor e funcionam como estratégia transparente de comercialização. Pelo fato de ser público, são conhecidos todos os volumes transacionados e seus fornecedores, assim como o preço. Não podem ser parciais em

relação ao porte do produtor do biodiesel e devem assegurar a participação da agricultura familiar (BRASIL, 2011).

Inicialmente, o projeto visava a inclusão social de agricultores matriculados no Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), bem como a regionalização da produção e utilização de outras matérias primas além da soja, desenvolvimento econômico, criação de empregos, amenização ou isenção de tributos federais, como PIS, PASEP e COFINS que são imbuídos no biodiesel comercial e acesso a melhores taxas de financiamento (MDA, 2005; DE OLIVEIRA et al., 2019).

As regiões Norte e Nordeste apresentam maiores taxas de pobreza e a implementação do SCS possuía a função de corrigir o baixo nível de inclusão social nessas regiões economicamente mais desfavorecidas do país. Porém, grandes produtores do Sul e Centro-Oeste já estavam sob controle do mercado de soja e em melhores condições para tirar maior proveito do biodiesel (CÉSAR et al., 2014). O SCS tornou-se um programa de boas intenções, porém com erros (DE OLIVEIRA et al., 2019), pois os produtores da região Sul e Centro-Oeste foram aqueles que mais se beneficiaram (KAMIMURA; OLIVEIRA; BURANI, 2011) (Tabela 3).

Tabela 3 - Produção de biodiesel puro em m³ em todas as regiões brasileiras

Região/ Ano	2006	2007	2015	2016	2017	2018	2019
Centro-Oeste	10.121	125.808	1.748.407	1.646.828	1.896.284	2.215.712	2.439.480
Sul	100	42.708	1.512.484	1.556.690	1.762.185	2.198.946	2.396.868
Sudeste	21.562	37.023	295.436	254.259	334.058	457.702	499.415
Nordeste	34.798	172.200	314.717	304.605	290.945	376.338	454.326
Norte	2.421	26.589	66.225	38.958	7.821	101.339	108.280
Brasil	69.002	404.329	3.937.269	3.801.339	4.291.294	5.350.036	5.899.482

Fonte: Adaptado de ANP, 2019.

Pode-se aferir, observando a Tabela 3, que nos anos de 2006 e 2007, a produção de biodiesel destacou-se na região Nordeste e em 2007 começou a crescer na região Centro-Oeste. Observa-se que a visão do SCS estava se cumprindo nesse período. Entretanto, nos anos posteriores, a produção avançou consideravelmente somente nas regiões Sul e Centro-Oeste.

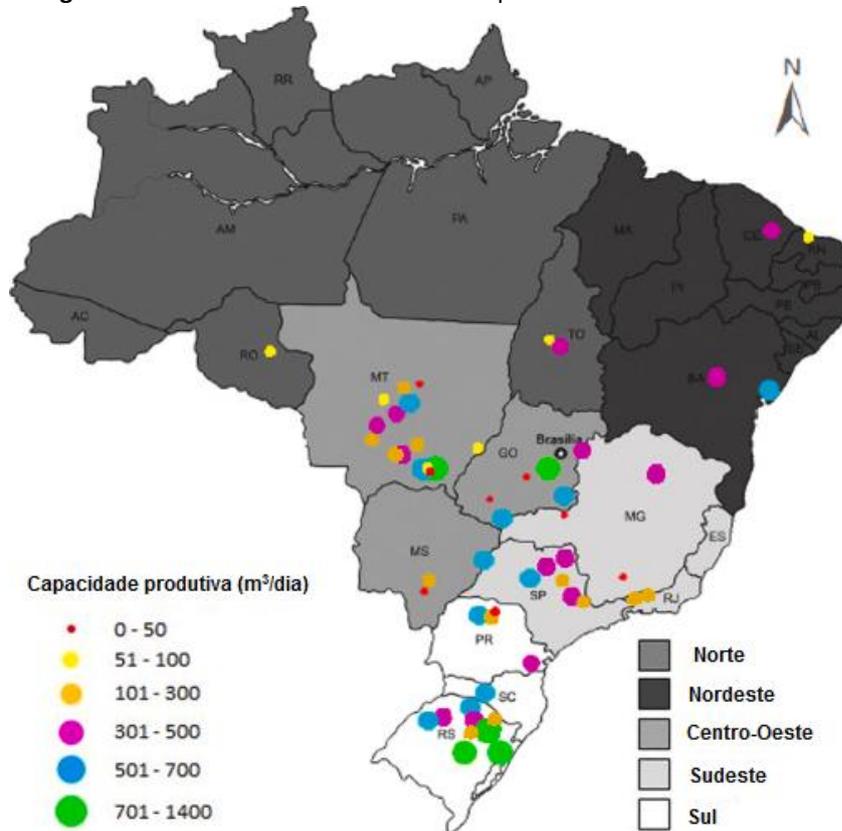
O SCS conseguiu alcançar a isenção de impostos federais e acesso a boas taxas de financiamento. A inclusão social, desenvolvimento econômico de comunidades locais, empregos e melhoria de renda de trabalhadores rurais, necessitam ser observados e realinhados (DE OLIVEIRA et al., 2019).

Hall et al. (2011) apontam o programa SCS como fracasso. Relatam que o Brasil ainda é altamente dependente da soja, representando uma média de 67% das matérias-primas usadas (ABIOVE, 2019). Desta forma, outras oleaginosas acabam por não se tornar uma matéria-prima alternativa, excluindo a premissa de um mercado equitativo, pregado pelo governo (IPEA, 2019). Kamimura, Oliveira e Burani (2011), apresentam algumas causas para o fracasso do SCS:

1. Elevados custos logísticos e de colheita;
2. Baixo grau de escolaridade e falta de conhecimento técnico de trabalhadores;
3. Pouca utilização de máquinas para agricultura, irrigação e fertilizantes;
4. Ausência de preços competitivos para o biodiesel em comparação com a produção de outras culturas;
5. Dificuldade de acesso ao financiamento devido a burocracia;
6. Falta de organização em associações e cooperativas;
7. Grandes agricultores monopolizam o mercado.

O desequilíbrio e os visíveis erros que não deviam ser esperados após a implantação do SCS, continuam sendo atestados quando se observa o número diminuto e a localização de unidades produtoras de biodiesel autorizadas para operação no Brasil (Figura 2).

Figura 2 - Usinas de biodiesel autorizadas para funcionamento no Brasil



Fonte: Adaptado de De Oliveira, 2019.

A partir da análise dos fracassos do SCS, ações podem ser desenvolvidas para cumprir com as premissas estabelecidas inicialmente. Percebe-se a necessidade do país desenvolver políticas que incentivem a diversificação de matérias-primas; promover a organização de cooperativas de modo que os custos com maquinários e colheita possam ser amenizados com o uso compartilhado; favorecer a participação de pequenos agricultores no processo de produção da matéria e do produto biodiesel, fornecendo periodicamente cursos de atualização para mantê-los trabalhando no mercado. Quanto ao financiamento, a dificuldade de acesso pode ser dirimida com a diminuição de burocracia e um limite de crédito acessível a pagamento e suficiente para desenvolvimento de um pequeno agricultor.

A RenovaBio também é um programa recente incorporado às políticas de biocombustível no Brasil, instituída pela Lei nº 13.576/2017, com a finalidade de promover adequada expansão de biocombustíveis na matriz energética, assegurar a previsibilidade para o mercado de combustíveis, para estimular ganhos de eficiência energética e redução de gases responsáveis pelo efeito estufa (ANP, 2020).

Muitas expectativas são colocadas na RenovaBio, pelo fato do Brasil ser um país com potencial para liderar o mercado mundial de biocombustíveis (COSTA; FERREIRA, 2018) (Quadro 2).

Quadro 2 – Síntese dos programas criados com o intuito de estabelecer o biodiesel no Brasil e suas funções respectivas.

Programa	Ano	Função	Feedback
PROBODIESEL	2002	Viabilização das tecnologias de adoção do etanol e de óleos vegetais no diesel.	Não apresentou êxito, o que justificou a criação do PNPB posteriormente.
Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)	2004	Introduzir o biodiesel na matriz energética com enfoque na inclusão social e desenvolvimento regional.	Precisa avançar no incentivo a produção de biodiesel de diversas fontes e regiões.
Selo Combustível Social (SCS)	2004	Certificado concedido a produtores de biodiesel que adquirem percentuais de matéria-prima de agricultores familiares.	Deficiência em atingir maior quantidade de pequenos produtores de matéria-prima no país.
RenovaBio	2016	Expandir a produção de biocombustíveis no Brasil.	Precisa avançar no incentivo a produção de biodiesel de diversas fontes e regiões.

Fonte: Autores.

2.2.5 Ambiental

A utilização excessiva do diesel de petróleo resultou em grave poluição ambiental. O biodiesel é uma fonte renovável de combustível no ramo de transportes. Ele é alternativo ao diesel convencional, mais seguro para manuseio, apresenta benefícios quanto a ação lubrificante (GEBREMARIAM; MARCHETTI, 2018) e pode ser sintetizado a partir de lipídeos renováveis, como óleos vegetais virgens, óleos vegetais não comestíveis, óleos residuais e gorduras animais (TAN et al., 2019). Por ser renovável, o biodiesel tornou-se um potencial combustível alternativo.

Ele pode ser considerado como recurso renovável (GHELICHI; SAIDI-MEHRABAD; PISHVAEE, 2018) devido à baixa emissão de poluentes e quando proveniente de óleos comestíveis, a baixa poluição é ainda compensada pelo plantio de vegetais que fornecem o óleo virgem para produção do combustível e absorvem o dióxido de carbono presente no meio (CO₂) (TRAN et al., 2016). Entretanto, a produção de biodiesel a partir de óleos virgens tem sido criticada devido o desmatamento causado ao plantar campos de culturas não comestíveis para extrair óleos (CORDERO-RAVELO; SCHALLENBERG-RODRIGUEZ, 2018). Pensando a respeito da matéria-prima mais utilizada no momento para a produção do biodiesel, a soja, sabe-se que seu cultivo tem se estendido para a Amazônia (SAUER, 2018).

Consequentemente, houve um aumento das taxas de desmatamento nos anos posteriores a 2014, devido a alta demanda por terra e recursos naturais (BENATTI, 2003). Segundo Milani et al. (2008), o desmatamento é um grande problema e 1,2 milhões de hectares de florestas foram convertidas em plantações de soja. Além do desmatamento por plantio, ocorrem danos pela ocupação mecanizada e altos níveis de contaminação dos rios e nascentes (BENATTI, 2003). Por outro lado, Hecht (2011) cita que a produção de soja envolve menos de 7% do território da Amazônia, ou seja, o cultivo da soja não é o principal fator motivador do desmatamento da região. Essa questão coloca em discussão a atribuição de sustentabilidade ao biodiesel. Por isso, a necessidade de diversificação da matriz com outras matérias-primas.

No que tange ao custo da matéria-prima, o óleo residual de fritura (ORF) é barato e é uma alternativa de suprimento em substituição a soja (ENWEREMADU; MBARAWA, 2009 ; KNOTHE; STEIDLEY, 2009; MATH; PREM KUMAR; CHETTY, 2010). Anualmente, um volume significativo de ORF é descartado na rede esgoto, criando sérios problemas em estações de tratamento de águas residuais. Consequentemente, a produção de biodiesel pode ser uma solução para o problema de destinação desse tipo de material (CORDERO-RAVELO; SCHALLENBERG-RODRIGUEZ, 2018).

Ao se tratar de óleo residual de fritura (ORF), a produção de biodiesel a partir dessa matéria, aproveita aquilo que antes seria descartado no meio ambiente (TRAN et al., 2016), podendo minimizar as críticas ao biodiesel. O ORF representa uma alternativa ambiental satisfatória, pois é dada uma melhor destinação ao resíduo, que pode ser coletado em residência, indústria e comércio, minimizando a contaminação ao meio ambiente (DELATORRE, 2011). No que diz respeito à sustentabilidade, a produção de biodiesel a partir de resíduos deve ser preferida, pois não demanda diretamente grandes espaços de terra, uso de agrotóxicos, água para irrigação e competição com alimentos (FOZER et al., 2017).

No que tange ao produto biodiesel, esse apresenta teor insignificante de enxofre e aromáticos. Desta forma, a tendência é que produza menos fumaça e partículas durante a combustão, isto é, há baixa emissão de gases de escape e toxicidade (BANKOVÍ C-ILÍ; STAMENKOVÍ; VELJKOVÍ, 2012). Portanto, poluentes nocivos como monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre e hidrocarbonetos não-queimados sofrem minimização em sua emissão (LEE et al., 2014; THANH et al., 2009).

Comparando o diesel comum ao biodiesel, os resíduos atmosféricos prejudiciais ao meio ambiente são reduzidos em 68% para hidrocarbonetos não-queimados, 44% para monóxido de carbono, 100% para óxido de enxofre e 40% para partículas (TALEBIAN-KIAKALAEH; AMIN; MAZAHARI, 2013). É válido apontar que o teor de enxofre contribui para a formação de óxidos sulfurosos (SO_x) e ácido sulfúrico (H_2SO_4), responsáveis pela chuva ácida, que traz consequências sérias ao solo e a saúde humana (VASCONCELOS et al., 2009). A produção de biodiesel fortaleceu a parte integrante renovável da matriz energética brasileira, auxiliando na redução de emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa (CÉSAR et al., 2014).

Entretanto, o real auxílio na redução de gases poluentes proveniente do biodiesel, precisa ser avaliado através do completo ciclo de vida. A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método para avaliar os potenciais impactos ambientais e abordar os aspectos de sustentabilidade de um produto ao longo do seu ciclo de vida (LIU et al., 2018). É necessário também, que haja uma investigação exaustiva das tecnologias utilizadas em cada processamento, para identificar que fase dentro da cadeia de produção têm maior impacto ambiental e trabalhar cientificamente, no sentido de atenuá-las (RACZ; FOZER; NAGY, 2018).

2.3 Método de Dinâmica de Sistemas

A metodologia de Dinâmica de Sistemas (DS), criada por Jay Forrester na década de 1950, tem sido utilizada para avaliar os ambientes organizacionais complexos ou sistemas ao longo do tempo (FORRESTER, 1961; RICHARDSON; OTTO, 2007). Para isso, considerando interações grandes e complexas, a simulação computacional se mostra como a única maneira de testá-las. Além de trazer alguns benefícios: redução do tempo para verificação dos resultados, possibilidade de experimentação, visualização prática, dentre outros (REIBSTEIN; CHUSSIL, 1999). Desta forma, a DS auxilia na compreensão de sistemas complexos, por meio de modelagem transparente de estruturas de sistemas (STERMAN, 2000), prevendo tendências futuras, de acordo com certos parâmetros que são difíceis de estimar (XU; LI, 2011).

O modelo DS abrange mudanças dinâmicas, *feedback*, atraso e outros constituintes de um sistema, caracterizando-se por quantificação, controlabilidade e assim por diante (LI et al., 2015). Para que um modelo possa ser desenvolvido, torna-se necessário definir os problemas carentes de resolução (STERMAN, 2000). Essa metodologia permite então desafiar as premissas de um modelo e experimentar diferentes cenários (GÜNERALP; SETO, 2008; STERMAN 2000) (Tabela 4).

Tabela 4 - Metodologia de Dinâmica de Sistemas: três etapas gerais: conceituação do problema, formulação de hipóteses dinâmicas, e em seguida, teste e análise.

Articular o problema e contextualizar	Formular as hipóteses	Testar e analisar
1 - Definição das dimensões que serão analisadas	4 - Definição das variáveis	6 - Teste do modelo
2 - Determinação das variáveis para cada dimensão	5 - Desenvolvimento do modelo	7 - Análise da simulação
3 - Construção do diagrama causal		

Fonte: Adaptado de Espinoza et al., 2017.

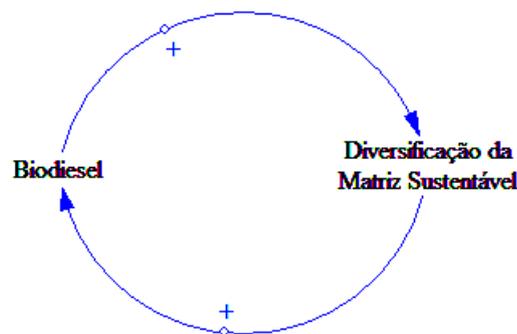
A DS oferece ferramentas qualitativas aliadas a simulações quantitativas (NABAVI; DANIELL; NAJAFI, 2017). A qualitativa permite compreender as inter-relações do sistema, inicia-se com a identificação do sistema e dos seus limites, e as variáveis de entrada e saída (GHISOLFI et al., 2017; NABAVI; DANIELL; NAJAFI, 2017). Após a identificação das limitações e do objeto

de estudo, é construído um modelo que representará a relação causal entre as variáveis (GEORGIADIS; VLACHOS, 2004).

Na abordagem quantitativa, há a função de simular, possibilitando o teste de situações hipotéticas. A simulação computacional a partir do Diagrama de Estoque e Fluxo permite desenvolver o modelo, configurando equações diferenciais numericamente resolvidas por meio de softwares especializados (BESIOU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012; GHISOLFI et al., 2017).

Essas abordagens são realizadas em conjunto, com o intuito de representar um modelo próximo a realidade (NAIM; TOWILL, 1994). As relações causais são utilizadas para explicar o relacionamento entre duas variáveis, a causa e o seu efeito. A representação ocorre por meio de setas e um sinal. Essas relações podem ser positivas ou negativas (AMARAL, 2012). A relação positiva significa que, se a causa aumentar, o efeito aumenta e se a causa diminuir, o efeito diminui. A relação negativa significa que se a causa diminuir, o efeito aumenta e se a causa aumentar, o efeito diminui (STERMAN, 2000) (Figura 3).

Figura 3 - Relação causal

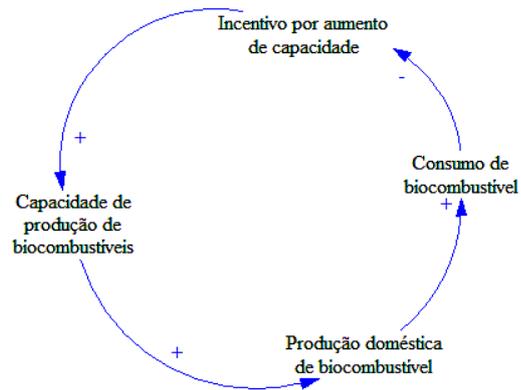


Fonte: Autores.

A Figura 2 aponta que o aumento da causa "biodiesel" provoca aumento no efeito, isto é, aumenta de forma diretamente proporcional a "diversificação da matriz sustentável". O mesmo ocorre quando a "diversificação da matriz sustentável" torna-se causa, isto é, observa-se um aumento diretamente proporcional do efeito "biodiesel".

Os autores Wisenthal e Shade (2011) por meio de um modelo DS, perceberam que é fornecida uma avaliação clara de política de biocombustíveis, conforme modelo de causa e efeito apresentado na Figura 3. Existe um nexos causal de um elemento para outro. Cada seta indica influência de um elemento no outro. Em um caso em que dois elementos vinculados em uma interação de causa e efeito mudam na mesma direção, o link tem polaridade positiva. Para quaisquer dois elementos vinculados que tenham relação alterada na direção oposta, existirá um link de polaridade negativa (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016) (Figura 4).

Figura 4 - Exemplo de um modelo de causa e efeito



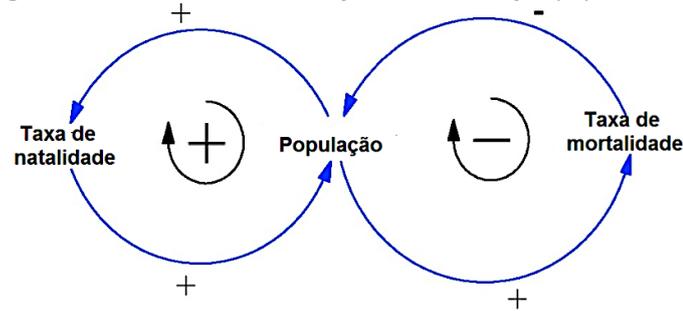
Fonte: Adaptado de Wisenthal e Shade (2011).

Na Figura 4, observa-se no ciclo que a alteração do comportamento da “capacidade de produção de combustíveis” reflete de maneira diretamente proporcional na “produção doméstica de biocombustível”, que por sua vez também provoca alteração diretamente proporcional no “consumo de biocombustível”. Um aumento da causa “consumo de biocombustível” produz efeito em “incentivo por aumento de capacidade” inversamente proporcional. Da mesma forma, uma alteração da causa “incentivo por aumento de capacidade” resulta em alteração diretamente proporcional da “capacidade de produção de biocombustíveis”. Aqui é válido citar que o sinal positivo não significa aumento do efeito e sim comportamento diretamente proporcional em relação a causa. Significa dizer que se a causa diminui, o efeito diminui; por exemplo. Enquanto que o sinal negativo reflete comportamento inversamente proporcional, isto é, se a causa diminui, o efeito aumenta e vice-versa.

Existem três elementos principais da DS, incluindo ciclos de *feedback*, variáveis e equação (VAFA-ARANI et al., 2014). O ciclo de *feedback* é definido como uma cadeia fechada de causas e efeitos. A Figura 5 é um exemplo de um ciclo de retroalimentação de modificação populacional. Nele, a população é influenciada por duas variáveis, taxa de mortalidade e taxa de natalidade. Quando a taxa de mortalidade aumenta, a população diminui. Quando a taxa de natalidade aumenta, a população aumenta. A esquerda do diagrama há um loop de feedback positivo e a direita há um loop de feedback negativo (TRAPPEY et al, 2012).

Quando conectores relacionam variáveis, um ciclo completo recebe um sinal. Um *loop* positivo ou de auto reforço acontece quando existe um número de setas com polaridades iguais, isto é, um aumento na variável inicial provoca através do ciclo um aumento final na mesma variável. Um loop negativo ocorre quando há polaridade desigual de setas, ou seja, um aumento em uma determinada variável inicial afeta o ciclo no sentido de diminuir o valor da mesma variável (SUKHOLTHAMAN; SHARP, 2016). A determinação da polaridade (positiva ou negativa) funciona independente das variáveis existentes no ciclo e de qual seja a variável escolhida como inicial para análise (STERMAN, 2000).

Figura 5 - Ciclo de retroalimentação de modificação populacional



Fonte: Adaptado de Trappey et al., 2012.

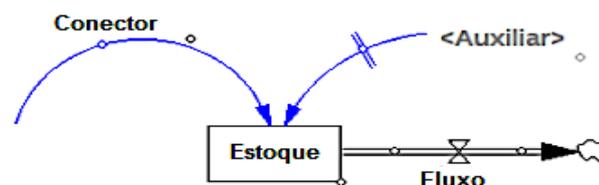
Existem três tipos principais de variáveis em um loop de *feedback*: variável estoque, taxa e auxiliar. Os estoques representam variáveis de estudo e podem ser considerados repositório, no qual algo é acumulado, armazenado e passado para outros elementos do sistema (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

A variável taxa representa um fluxo durante um período de tempo contínuo (TRAPPEY et al., 2012), enquanto que as variáveis auxiliares formulam os dados para definir equações dos fluxos, estoques e outros auxiliares (MORECROFT, 2015). Já os conectores inter-relacionam todos os componentes do sistema, formando uma expressão matemática (DEATON; WINEBRAKE, 2000).

Os atrasos também podem ser representados por meio de dois traços paralelos, interceptando uma seta específica e significa que pode ocorrer um efeito a longo prazo quando uma ação é tomada (Figura 6) (STERMAN, 2000). A duração média de um *delay* ou atraso depende do problema abordado e deve ser investigada por meio de coleta de dados. Além disso, seu objetivo é realizar ações corretivas, fazendo com que sejam implementadas mesmo após o sistema ter atingido sua meta (STERMAN, 2000).

Os três tipos de variáveis citados anteriormente são ligados por equações com a forma de integral e diferencial, por exemplo (TAN et al., 2018). A Figura 6 representa os componentes de um diagrama estoque e fluxo, onde as variáveis de estoque são simbolizadas por retângulos, as variáveis de fluxo são simbolizadas por válvulas e os conectores são representados por setas simples, indicando os elos de causa e efeito dentro da estrutura do modelo (SUFIAN; BALA, 2006).

Figura 6 - Diagrama de estoque e fluxo e representação de componentes

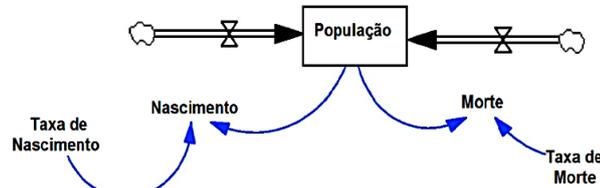


Fonte: Autores.

Já na Figura 7 é apontado um modelo simples para simular o crescimento populacional de uma cidade através do diagrama de estoque e fluxo (TRAPPEY et al. 2012). Nela, a população mudará com o tempo e é definida como variável de estoque. As variáveis nascimento e

morte são definidas como variáveis de taxa. As taxas de nascimento e morte são as variáveis auxiliares.

Figura 7 - Modelo de estoque e fluxo para crescimento populacional



Fonte: Adaptado de Trappey et al., 2017.

Matematicamente, os estoques podem ser representados pela Equação (1), onde *Entrada(s)* representa o fluxo de entrada em qualquer momento (*s*) entre o tempo inicial (t_0) e o tempo atual (t). A *Saída(s)* representa o fluxo de saída no mesmo intervalo de tempo (STERMAN, 2000).

$$\text{Estoque}(t) = \int_{t_0}^t [\text{Entrada}(s) - \text{Saída}(s)] ds + \text{Estoque}_{t_0} \quad (1)$$

A principal regra de operacionalidade é que a modificação de uma unidade dentro do sistema leva a mudança de outra unidade e a modificação desta última causará um impacto na antiga, por meio de uma série de entregas (ZHANG et al., 2003).

Na modelagem de Dinâmica de Sistemas, a verificação do comportamento de uma simulação depende do objetivo do modelo e consiste em um processo iterativo de construção de confiança na utilidade do modelo. Os testes objetivam analisar se o modelo reproduz o mundo real suficientemente bem para o propósito declarado (SENGE; FORRESTER, 1980) e se é confiável quanto a colocar em inferências baseadas em modelos sobre o sistema real (BARLAS, 1996).

Os testes são realizados através de diversas simulações com valores de variáveis diferentes, verificando-se aquelas que são mais importantes para a otimização do sistema (RICHARDSON, 2009). Desta forma, são realizados uma quantidade de testes bem definidos para auxiliar na verificação da utilidade do modelo, sendo incluídos testes estruturais e comportamentais (BARLAS, 1996) (Quadro 3).

Quadro 3 - Testes de validação possíveis para DS.

(continua)

Teste	Objetivo do Teste
1- Adequação da Fronteira	Analisar o comportamento do modelo quando seu limite é alterado.
2 - Avaliação da Estrutura	Analisar se o modelo apresenta conformidade com as leis básicas da física e se as regras de decisão capturam o comportamento adequado dos componentes do sistema.
3 - Consistência dimensional	Verificar a consistência dimensional de todas as equações e se as unidades de medidas de todas as variáveis estão corretas.
4 - Avaliação dos parâmetros	Analisar a consistência e se há representatividade com o mundo real.

Quadro 3 - Testes de validação possíveis para DS.

(conclusão)

Teste	Objetivo do Teste
5 - Condições extremas	Analisar o comportamento do modelo quando exposto a choques e parâmetros extremos.
6 - Erro de Integração	Verificar se os resultados são sensíveis à escolha do intervalo de tempo de simulação ou do método de integração.
7 - Reprodução do Comportamento	Observar se o modelo reproduz o comportamento de interesse no sistema.
8 - Anomalia do Comportamento	Analisar se a exclusão ou alteração das suposições resultam em comportamento atípico.
9 - Membro de família	Verificar se o modelo reproduz o comportamento observado em outras instâncias no mesmo sistema.
10 - Comportamento inesperado	Verificar se o modelo gera comportamento não conhecido anteriormente.
11- Análise de sensibilidade	Verificar o comportamento quando há incertezas no parâmetro, condições iniciais e limites do modelo.
12 - Melhoria do sistema	Observar se o processo de modelagem melhora o sistema

Fonte: Adaptado de Sterman, 2000.

Esses testes auxiliam na resposta a perguntas sobre propósito e limite, sobre a estrutura física e de tomada de decisão, além da análise de sensibilidade do modelo, isto é, há uma comparação do modelo com os modos de referência. Essa fase só se encerra quando o modelo está de acordo com o seu propósito (STERMAN, 2000).

Verifica-se que há diversas abordagens de modelagem e nem todos os testes dispostos na literatura são utilizados. Zagonel e Corbet (2006) fizeram um reagrupamento de testes em cinco categorias, com o intuito de facilitar a identificação do subconjunto de testes mais apropriado para cada objetivo da modelagem: mapeamento do sistema, modelagem quantitativa, teste de hipóteses, análise de incertezas e previsão e otimização.

O mapeamento do sistema relaciona-se com Diagrama de Causa e Efeito (DCE), Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF) ou qualquer forma de organização dos elementos que formam o sistema, com a finalidade de identificar as principais interações causais. A modelagem quantitativa diz respeito a formulação e simulação do modelo, tendo foco na compreensão das estruturas de estoque e fluxo, sendo aplicada na representação de sistemas quantificáveis, caracterizando-se por ser analítico. A modelagem de testes de hipóteses é focada no problema, é dedutivo, verificando se uma estrutura específica de *feedback* é capaz de produzir um comportamento particular (FORRESTER, 1961). A análise de incerteza mostra que os comportamentos das variáveis de interesse não mudam significativamente se os parâmetros forem variados dentro de intervalos razoáveis ou se mudanças justificáveis são realizadas dentro dos limites do modelo (ZAGONEL; CORBET, 2006).

A categoria previsão e otimização refere-se à previsão de padrões futuros de comportamento, mudanças nesses padrões e previsão de eventos. Na previsão, os parâmetros são alterados em intervalos razoáveis com o fim de analisar os resultados possíveis de uma variável em um determinado momento (Quadro 4).

Quadro 4 – 24 testes propostos por Forrester e Senge (1980) e Sterman (2000), agrupados em categorias por Zagonel e Corbet (2006) segundo os objetivos da simulação.

Mapeamento do Sistema	Modelagem Quantitativa	Teste de Hipóteses	Análise de Incertezas	Previsão e Otimização	
Validação visual	Conservação Física	Teste qualitativo de comportamento-problema	Análise de sensibilidade quantitativa	Correspondência de comportamento	
Validação das regras de decisão	Consistência dimensional	Adequação de limites (problema de endogeneidade)	Análise de sensibilidade política	Previsão de comportamento	
	Erro de Integração	Validade das regras de decisão (foco político)	Adequação de limites implicações políticas)	Previsão de comportamento alterado	
	Teste de condições extremas	Avaliação de comportamentos inesperados	Categoria do Teste		
	Avaliação de parâmetros	Análise de sensibilidade do comportamento			
	Reprodução de comportamentos básicos	Teste de condições extremas (foco no comportamento do modelo)			Básico
	Teste endógeno de reprodução de comportamentos	Testes de anomalia de comportamento (testes de suposições alteradas)			Intermediário
	Teste de adequação de limites	Membro da família (generabilidade)			Avançado

Fonte: Adaptado de Zagonel e Cobert (2006).

A partir de testado, o modelo pode ser solucionado. Naim e Towill (1994) apontam que existem três possíveis técnicas para a solução de um modelo: análise estatística, teoria de controle e simulação computacional. A seleção da técnica depende da complexidade do modelo matemático e da disponibilidade de dados da análise.

A análise estatística depende da disponibilidade de dados relevantes e suficientes. Técnicas como tendências, suavização, análise de alcance, auto correlação e correlação cruzada podem ser aplicadas, permitindo a identificação de características subjacentes nos dados, como tendências a curto ou longo prazo, variação cíclica e eventos significativos.

A teoria de controle envolve desenvolver um modelo matemático da função de Transformada de Laplace, usada para determinar o desempenho do objeto de estudo e pode ser representada no domínio do tempo ou de frequência. Esta técnica é mais utilizada quando se necessita de resultados mais precisos, como nos casos dos processos químicos e elétricos.

A técnica de simulação computacional é aplicada como formulação de modelo em um Diagrama de Estoque e Fluxo, por meio da configuração de equações diferenciais que representam relações causais. Essas equações são desenvolvidas através de técnicas numéricas de integração em softwares especializados, como Vensim e Stella. Esta técnica é empregada para auxiliar a tomada de decisão, principalmente.

A representação por meio do DEF envolve a técnica de simulação computacional, necessita de precisão nas relações entre as variáveis dos sistemas, induzindo a evolução do entendimento dos mesmos. Os modelos são baseados em equações diferenciais ordinárias não-lineares, formuladas geralmente em tempo contínuo. O comportamento dos modelos é computado numericamente em um processo conhecido como integração numérica (STERMAN, 2000). Estruturado o sistema no simulador, o tomador de decisão possui um modelo que gera diferentes cenários futuros do sistema analisado (SENGE, 2006). Várias simulações são realizadas, alterando valores de variáveis. A partir disso, pode-se verificar

quais são as mais relevantes para a otimização do sistema (RICHARDSON, 2009) ou para obter um comportamento desejado.

A confecção do modelo é realizada com auxílio de software. A simulação é realizada a partir da seleção dos métodos de integração que estão disponíveis para utilização nas equações que são desenvolvidas no diagrama de estoque e fluxo. O software Vensim disponibiliza dois tipos de métodos de integração numérica: Euler e Runge-Kutta. O método de Euler é de primeira ordem, cuja aproximação se dá por uma reta e é um pequeno passo de integração (BRITO; AMARAL, 2012). Uma análise mais detalhada de dados aponta erro local, ou seja, a diferença entre solução exata e aproximada é maior nesse método. No método de Runge-Kutta, busca-se melhor estimativa da derivada com a avaliação da função em mais pontos no intervalo (STERZA; BRANDI, 2016). Esse é considerado um aperfeiçoamento do método de Euler, com melhor estimativa da derivada da função (VALLE, 2012). O método de quarta ordem de Runge-Kutta é um dos mais utilizados para obtenção de soluções aproximadas de valor inicial. Faz avaliações da função a cada passo. Atinge uma precisão bem melhor que o método de Euler, porém, utiliza uma maior capacidade computacional, sendo mais lento para chegar ao ponto final.

Portanto, o método de Euler apresenta-se mais simples e rápido, enquanto o Runge-Kutta é mais preciso, demandando maior tempo computacional. Após estruturado o sistema no simulador, o tomador de decisão possui um modelo que gera diferentes cenários futuros do sistema verificado (SENGE, 2006).

Para representação de sistemas reais, os modelos passam por interações, questionamentos, testes e refinamento. A simulação oferece benefícios como: redução de tempo para verificação de resultados; custo-benefício quando comparado a outras técnicas, possibilidade de experimentação, visualização prática, dentre outros (REIBSTEIN; CHUSSIL, 1999). As etapas metodológicas para atender o objetivo deste trabalho utilizando a dinâmica de sistemas pela simulação computacional será apresentada a seguir.

3 PROCEDIMENTO DE PESQUISA

Esse estudo apresenta objetivo exploratório com abordagem quantitativa, pois tudo é quantificado visando a promoção de dados confiáveis, utilizando dados numéricos (FERNANDES; GOMES, 2003). Sendo que proporciona como procedimento técnico, uma simulação, consistindo em avaliar tecnicamente alguns objetos (FONTELLES, 2009). É também de natureza aplicada, pelo fato de trabalhar com interesses locais e verdades, visando a solução de problemas pontuais. Por fim, no que diz respeito ao método, classifica-se como hipotético-dedutivo, pois parte de pressupostos e testa a validade desses (GIL, 2002).

O procedimento de pesquisa se dividiu em 5 etapas que serão exploradas nas seções a seguir. Sendo elas: a análise bibliométrica, construção do modelo de Dinâmica de sistemas, obtenção dos parâmetros, testes, simulação e discussão dos resultados.

3.1 Etapa 1 – Análise Bibliométrica

Nessa etapa ocorreu a realização de busca documental e bibliográfica no que diz respeito ao tema pretendido, buscando identificar um problema e contextualizá-lo. Foi possível assim identificar as principais matérias-primas (ANP, 2020) no processo de produção de biodiesel e custos aproximados envolvidos em cada transformação. Além da relação entre a demanda de biodiesel e combustíveis fósseis que orienta a produção de biodiesel. Desta forma, a partir de pesquisa a respeito da participação do biodiesel na matriz energética brasileira e materiais envolvendo a análise do uso desse combustível e as implicações políticas, ambientais, sociais, tecnológicas e econômicas existentes, percebe-se a complexidade envolvida e a utilização de Dinâmica de Sistemas como método para exploração e desenvolvimento de um modelo apropriado (STERMAN, 2000).

A utilização das palavras-chave “*dynamic systems*” e “*biodiesel*”, nos bancos de dados *Science Direct* e *Web of Science*, permitiu perceber por meio de refino que para o Brasil, foram publicados dois artigos que utilizaram DS para o estudo do biodiesel, porém o estudo se restringiu ao estado do Rio Grande do Sul (VACCARO *et al.*, 2018). Além disso, a observação feita foi somente de cunho qualitativo, ou seja, foi elaborado um modelo conceitual sobre o sistema (GEORGIADIS, VLACHOS, 2004).

Adicionalmente, a revisão bibliográfica permitiu identificar uma lacuna no que diz respeito ao uso da ferramenta DS para estudar quantitativamente o setor de biodiesel brasileiro.

3.2 Etapa 2 - Construção do Modelo de Dinâmica de Sistemas

Nesta etapa, fez-se o levantamento de todos os aspectos e fatores que exercem influência no sistema e a identificação da relação causa e efeito entre as variáveis identificadas (STERMAN, 2000). O diagrama de causa e efeito desenvolvido relacionará no decurso do tempo, os fatores econômicos, tecnológicos, sociais, políticos e ambientais simultaneamente.

A abordagem em todos os âmbitos citados em forma de relação servirá de embasamento para a construção do diagrama de estoque e fluxo com posterior equacionamento, refletindo o cenário brasileiro.

Para equacionar as variáveis, torna-se necessário traduzir as variáveis relacionadas que acumulem alterações realizadas no percurso temporal (estoques) e variáveis que influenciem essas alterações (fluxos e variáveis auxiliares). Aqui, o desenvolvimento de equações algébricas que aproximem da realidade, o comportamento das variáveis com o passar do tempo, é de suma importância. No entanto, antes de efetuar a simulação, o modelo necessita ser validado e testes são aplicados no modelo (STERMAN, 2000).

3.3 Etapa 3 - Obtenção dos Parâmetros

Nessa etapa ocorreu a obtenção dos parâmetros (STERMAN, 2000) envolvendo o setor de biodiesel no Brasil; a coleta de dados históricos envolvendo economia e políticas implementadas.

Os dados importantes para obtenção dos parâmetros foram captados em documentos oficiais disponibilizados por órgãos responsáveis pelo setor energético brasileiro, tais como a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais (ABIOVE) e em artigos que tratem do desenvolvimento do biodiesel no país e no mundo, nos últimos anos.

3.4 Etapa 4 - Testes

A literatura apresenta muitos testes que podem ser usados como validação do modelo DS, conforme descrito na Seção 4. Os 4 principais testes foram utilizados: consistência dimensional, condições extremas, erros de integração e reprodução comportamental (ARDI; LEISTEN, 2016; MORECROFT, 2015; BESIQU; GEORGIADIS; VAN WASSENHOVE, 2012; DAS; DUTTA, 2013; QUDRAT-ULLAH; SEONG, 2010) (Quadro 5).

Quadro 5 – Teste de validação de modelo DS.

Teste	Questões	Procedimentos
Consistência Dimensional	Cada equação no modelo corresponde dimensionalmente ao sistema real?	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Realizar análise dimensional por meio do software de simulação por DS; ✓ Inspeccionar as equações do modelo para os parâmetros suspeitos.
Condições Extremas	Cada equação faz sentido mesmo quando suas entradas assumem valores extremos? O modelo responde plausivelmente quando submetido a políticas extremas, choques e parâmetros?	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inspeccionar cada equação; ✓ Testar a resposta a valores extremos de cada entrada, de forma isolada ou combinada; ✓ Submeter o modelo a grandes choques e condições extremas;
Erro de Integração	Os resultados são sensíveis à escolha do tempo ou do método de integração numérica?	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Cortar o intervalo de tempo ao meio e testar as mudanças de comportamento; ✓ Usar métodos de integração diferentes e testar as mudanças no comportamento;
Reprodução Comportamental	O modelo reproduz o comportamento de interesse no sistema?	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Calcular medidas estatísticas de correspondência entre modelo e dados; ✓ Examinar a resposta do modelo para testar entradas, choques e ruídos.

Fonte: Adaptado de Sterman, 2000.

Os testes de consistência dimensional permitiram inspeccionar todas as equações do modelo, fornecendo sua validade estrutural. Os testes de condições extremas verificaram o comportamento do modelo sob políticas extremas (GHISOLFI et al., 2017). Enquanto que os

testes de erro de integração foram realizados delimitando pela metade o passo de tempo da simulação, até o momento em que os resultados obtidos não sejam mais sensíveis a essa alteração, considerando a precisão desejada (GHISOLFI et al., 2017; STERMAN, 2000).

Para os testes de erro de integração, utilizou-se o método de Euler, devido ao fato de ser simples e adequado para sistemas em que os erros estão nas condições iniciais e/ou parâmetros (STERMAN, 2000). Além disso, a escolha pelo método é justificada pelas equações obtidas no modelo proposto, que foram em sua totalidade de primeira ordem.

O teste de reprodução comportamental garantiu uma adequação a comportamentos reais (STERMAN, 2000).

Durante uma simulação, a compreensão é melhorada por meio de testes e reflexões. Um comportamento passado pode ser interpretado, testa-se teorias e hipóteses, explica-se um comportamento problema ou surpresa, analisando-o também no futuro (GHISOLFI et al., 2017). A DS avaliará as consequências das decisões tomadas (ARDI; LEISTEN, 2016).

3.5 Etapa 5 - Simulação e Discussão dos Resultados

Ao concluir a etapa de testes, dar-se início a simulação, considerando os fatores atuais no que tange a capacidade do setor. Os dados obtidos para os parâmetros são utilizados como entrada nessa etapa. A confecção de diagramas de causa e efeito, estoque e fluxo, validação e simulação, serão realizadas com o uso do software Vensim PLE (*Personal Learning Edition*), em versão gratuita oferecida pela empresa Ventana Systems, destinado para uso pessoal e educacional (VENTANA SYSTEMS, 2019). Esse software apresenta os dois métodos de integração numérica existentes: Euler e Runge-Kutta, permitindo a análise e estudo cabais de sistemas complexos.

O Software STELLA também representa uma solução poderosa para a construção de modelos e fornece uma funcionalidade eficiente para a construção da interface dos mesmos (TAN et al., 2018). É um dos pacotes de software em DS mais conhecidos, é flexível e permite uma modelagem dinâmica realista (MARZOUK; AZAB, 2017). No entanto, não é livre, isto é, não está disponível para acesso gratuito. Desta forma, para a elaboração e simulação do modelo proposto nesse trabalho, todas as etapas foram realizadas no software Vensim PLE.

A partir de um cenário base, isto é, com dados recentes inseridos, foram propostas as possibilidades de expansão da participação do biodiesel na matriz energética brasileira, envolvendo objetivos econômicos, sociais, políticos e ambientais, resultante, por exemplo, do aumento da utilização de outras matérias-primas para produção. Isso, visando comparar o cenário atual com o desenvolvimento do setor em um ou mais períodos de tempo pré-estabelecido.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diagrama de Causa e Efeito

Como exposto anteriormente, o Diagrama de Causa e Efeito (DCE) ao fornecer melhor visualização e compreensão do sistema estudado (STERMAN, 2000; MORECROFT, 2015), aponta o DCE para o sistema que representa a participação do biodiesel no mercado brasileiro, por meio do aumento da utilização de outras matérias-primas (Figura 8).

Figura 8 - Relação entre matéria-prima e produção de biodiesel



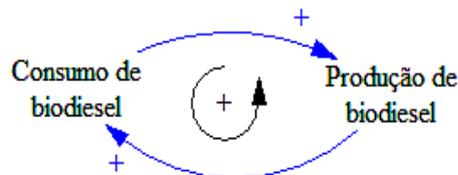
Fonte: Autores.

O diagrama de causa e efeito apresenta a influência de variáveis no sistema estudado através de ciclos. Nele, as variáveis matéria-prima e produção de biodiesel expõem relação direta e proporcional. A chegada da mistura B10, isto é, 10% de biodiesel adicionado ao diesel convencional, passou a ser vendido ao consumidor final em março de 2018 (ANP, 2018).

Observa-se que a disponibilidade de matéria-prima garante o aumento da produção de biodiesel e conseqüentemente, uma maior produção de biodiesel faz crescer a necessidade por ingredientes, conforme apresentado na Figura 9. Isso cria um ciclo chamado de reforço, em que um aumento em uma variável inicial deste ciclo retorna em aumento dela ao final. Os ciclos de *feedback* representados como positivos, apontam a existência de uma curva exponencial, numa variável que pode estar crescendo ou diminuindo (STERMAN, 2009).

A produção de biodiesel no Brasil alcançou 17,4 bilhões de litros entre 2005 e 2014, cumprindo com as metas estabelecidas pelo PNPB para o período e dados da ANP apontam desenvolvimento promissor quando fazem menção a mesma quantidade de produção em bilhões de litros em um período de somente 4 anos (2015-2018), (ANP, 2018). Portanto, o consumo de biodiesel também possui caráter diretamente proporcional com sua produção (Figura 9).

Figura 9 - Relação entre consumo de biodiesel e produção de biodiesel

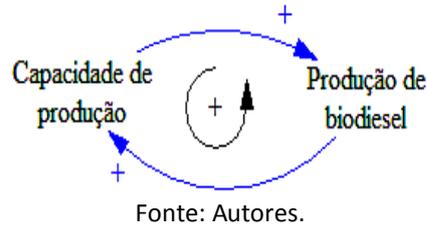


Fonte: Autores.

Em decorrência desse ciclo Consumo-Produção, o número de usinas aumentou de 10 em 2008 para 51 em 2017 (ANP, 2019). Então, as variáveis capacidade de produção e produção

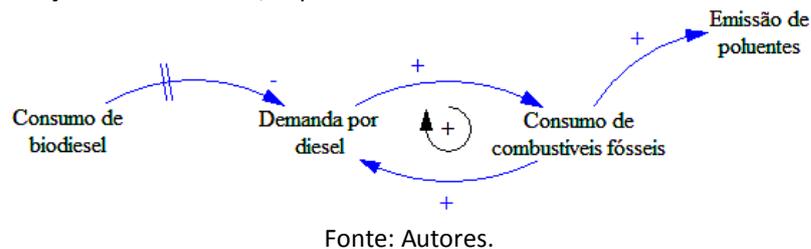
de biodiesel também se reforçam, isto é, o aumento ou diminuição da produção de biodiesel provoca respectivo e direto aumento ou diminuição na capacidade de produção e vice-versa (Figura 10).

Figura 10 - Relação entre capacidade de produção e produção de biodiesel



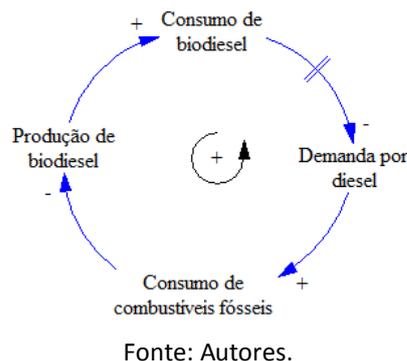
Importante mencionar que o consumo de biodiesel diminui a dependência por combustíveis fósseis, que está ligada intimamente e proporcionalmente à emissão de poluentes nocivos ao meio ambiente (TAN *et al.*, 2019). O ciclo de reforço na Figura 11, indica que o aumento da dependência por combustíveis fósseis resulta em aumento do consumo do mesmo, resultando em maior emissão de poluentes. A variável emissão de poluentes comporta-se como fator indicador, isto é, oferece resposta às modificações realizadas sistema.

Figura 11 - Relação entre consumo, dependência de combustíveis fósseis e emissão de poluentes



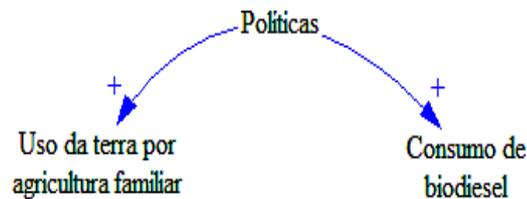
Considerando que o aumento do consumo mundial de petróleo, atrelado ao crescimento populacional e industrialização, causa inevitavelmente um esgotamento de reservas de combustíveis fósseis e aumento do preço de petróleo (BANKOVÍ C-ILÍ; STAMENKOVÍ; VELJKOVÍ, 2012), o biodiesel representa uma alternativa (PHAN; PHAN, 2008). O aumento do consumo de combustíveis fósseis está ligado de forma inversamente proporcional à produção de biodiesel, isto significa que a diminuição no consumo de combustíveis fósseis acarreta em aumento na produção de biodiesel, caso não ocorra diminuição na demanda total por combustíveis. A Figura 12 aponta isso através de um ciclo de reforço a dependência entre as variáveis citadas.

Figura 12 - Relação entre consumo, dependência de combustíveis fósseis e produção de biodiesel



No Brasil, políticas como o Programa Nacional do Biodiesel e o Selo Combustível Social puderam auxiliar no estímulo ao consumo. O Programa Nacional de Produção de Biodiesel (PNPB) incentivou o desenvolvimento rural (FINCO; DOPPLER, 2010) e a inclusão social, por meio da interligação entre latifundiários e pequenos agricultores familiares (PAG POUSA; SANTOS; SUAREZ, 2007). A criação do Selo Combustível Social, propôs a regionalização da produção de biodiesel, apoiando a diversificação de matérias-primas (DE OLIVEIRA et al., 2019). Portanto, as políticas públicas são um fator modificador e de entrada, pois favorecem de forma diretamente proporcional o consumo de biodiesel e o uso da terra por agricultura familiar (Figura 13).

Figura 13 - Relação entre uso da terra por agricultura familiar, consumo de biodiesel e políticas



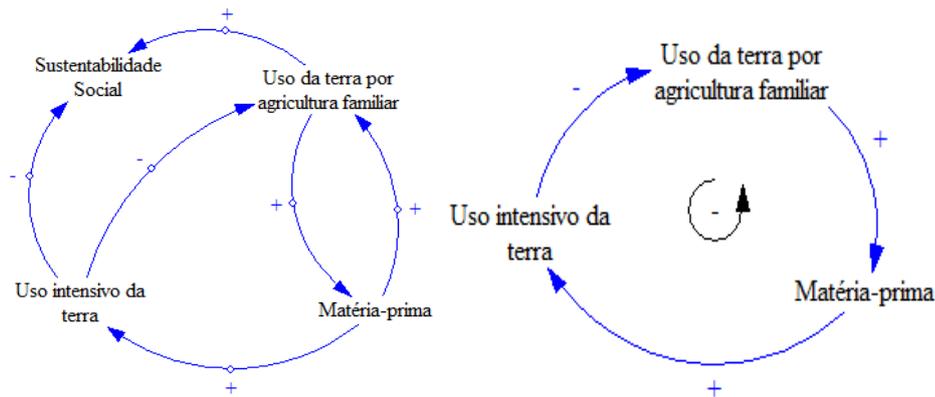
Fonte: Autores.

A agricultura familiar gera emprego e renda e fortalece o âmbito social (DE OLIVEIRA et al., 2019). Como o biodiesel acaba por fortalecer o cooperativismo familiar (MDA, 2019), a sustentabilidade social é afetada diretamente pelo uso da terra por agricultura familiar e de forma inversamente proporcional pelo uso intensivo da terra. Ela será utilizada como uma variável indicador, que será avaliada em função da alteração de parâmetros do sistema.

Já quanto à matéria-prima, variável de entrada, ela influi diretamente no uso da terra por agricultura familiar e por uso intensivo (Figura 14). Em outras palavras, o aumento/diminuição do uso de matéria-prima implica respectivamente no aumento/diminuição do uso da terra, seja no âmbito familiar, por meio da participação dos agricultores familiares, produzindo sementes e mudas de oleaginosas, fornecendo os grãos para as indústrias processadoras (MDA, 2019) ou de forma intensiva no que diz respeito à produção de biodiesel a partir de óleos virgens devido ao desmatamento causado ao plantar campos de culturas não comestíveis para extrair óleos (CORDERO-RAVELO; SCHALLENBERG-RODRIGUEZ, 2018).

O uso intensivo da terra é inversamente proporcional ao uso por agricultura familiar, ou seja, o aumento do uso intensivo da terra resulta em diminuição do uso da terra por agricultura familiar. Grandes agricultores acabam por monopolizar o mercado (KAMIMURA; OLIVEIRA; BURANI, 2011) (Figura 14 b).

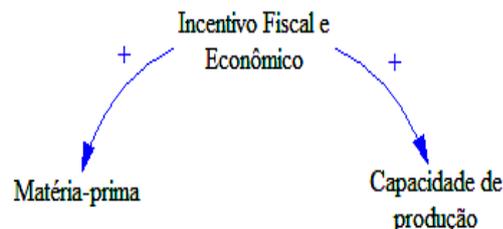
Figura 14 - a) Relação entre uso da terra, matéria-prima e sustentabilidade social e (b) ciclo de equilíbrio entre uso intensivo da terra, uso da terra por agricultura familiar e matéria-prima



Fonte: Autores.

As disparidades regionais podem ser amenizadas pelos incentivos ao consumo do biodiesel. Com isso, a capacidade de produção de matérias primas e da produção de biodiesel são aumentadas, favorecendo a industrialização de regiões como Norte e Nordeste brasileiros (DE OLIVEIRA et al., 2019). Essa justificativa é atestada quando se nota que o aumento do incentivo fiscal e econômico influi diretamente na capacidade de produção e na matéria-prima utilizada para produção de biodiesel (Figura 15). O apoio a políticas pode ser feito através de incentivos fiscais provenientes do governo federal. O governo brasileiro, através de decretos, concedeu isenções e reduções nos impostos que incidem sobre o biodiesel, tais como o IPI; PIS/PASEP e CONFINS (AGEITEC, 2019).

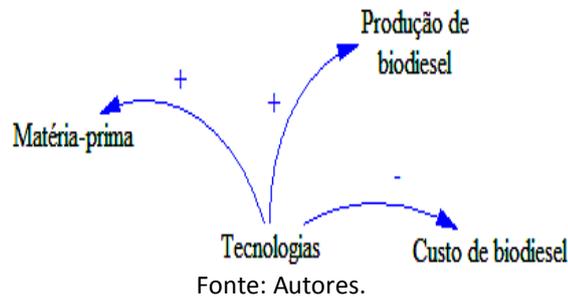
Figura 15 - Relação entre incentivos, matéria-prima e capacidade de produção



Fonte: Autores.

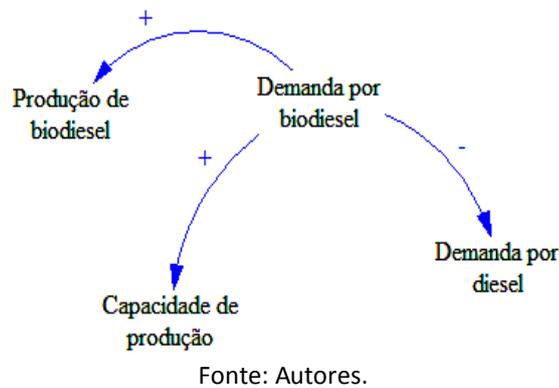
A variável tecnologia, fator de entrada no sistema, está ligada a matéria-prima, produção e custo de biodiesel (Figura 16). O aumento ou diversificação da tecnologia diminui os custos de biodiesel e favorece diretamente a utilização de mais matéria-prima e aumento da produção de biodiesel. A investigação e otimização de novas tecnologias pode fornecer viabilidade ao processo (FOZER et al., 2017). O alcance de redução de custos é possível por meio da melhoria das tecnologias de produção para obtenção de satisfatória produtividade e rendimento, reduzindo o custo ou diversificando a matéria-prima (APOSTOLAKOU et al., 2009; MULUGETTA, 2009). Segundo Jahirul et al. (2012), a variável tecnologia precisa ser analisada no sentido de melhorar a eficiência do processo, pois, processos eficientes aumentam o rendimento de produção. A eficiência será analisada numa seção futura, quando for esboçado e estudado o diagrama de estoque e fluxo.

Figura 16 - Relações existentes com o fator modificador tecnologia



Estimular a demanda no setor de biodiesel tem recebido notável atenção, sendo que isso influencia diretamente o setor de produção de biodiesel (BARISA et. al, 2015) (Figura 17). Também, o uso do biodiesel representa suplementação ou substituição do óleo diesel, respectivamente (RIBEIRO et al., 2018).

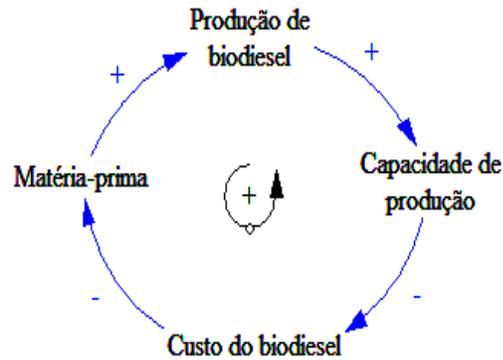
Figura 17 - Influência da demanda por biodiesel em capacidade de produção, produção de biodiesel e demanda por diesel



No que tange ao fator econômico, a diminuição do custo de biodiesel estimula o aumento do uso ou diversificação da matéria-prima. O alto preço da produção do biodiesel é a principal barreira ao seu uso comercial (AVHAD; MARCHETTI, 2015; BANKOVÍ C-ILÍ; STAMENKOVÍ; VELJKOVÍ, 2012; KISS; JOVANOVIĆ; BOŠKOVIĆ, 2010). O aumento do uso da matéria-prima provocará de forma diretamente proporcional o aumento da produção de biodiesel. A produção de biodiesel, sendo analisada com o par capacidade de produção, permite perceber que também há ligação direta, isto é, o aumento de produção de biodiesel influi no aumento da capacidade de produção. Estudos apontam que a capacidade acumulada de produção de biodiesel atingiu o patamar de 7,9 bilhões de litros para atender uma demanda de 2,9 bilhões de litros em 2013 (DE OLIVEIRA; COELHO, 2017).

A capacidade das plantas é um elemento que interfere no custo de produção. O aumento na capacidade de produção resulta em diminuição do custo de biodiesel, pois essas estão ligadas de forma inversamente proporcional. Na ausência de choque positivo de demanda, as plantas de biodiesel ficarão paradas, estimulando custos mais altos para o biodiesel, visando compensar o período de ociosidade (DE OLIVEIRA; COELHO, 2017). Obtém-se um ciclo de *feedback* positivo ou de reforço (Figura 18).

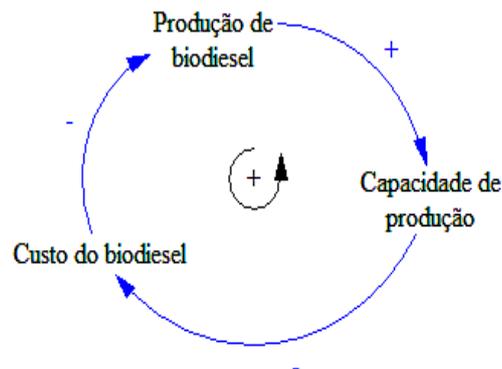
Figura 18 - Relação entre custo, produção, capacidade de produção do biodiesel e matéria-prima



Fonte: Autores.

A variável produção de biodiesel também produz um *feedback* de reforço com as variáveis capacidade de produção e custo de biodiesel (Figura 19). Produção de biodiesel e capacidade de produção estão conectadas de forma diretamente proporcional, enquanto a capacidade de produção e custo de biodiesel formam um par interligado de forma inversamente proporcional. O par de variáveis custo de biodiesel e produção de biodiesel são inversamente proporcionais, isto é um aumento no custo do biodiesel influencia a diminuição da produção de biodiesel, o que é verificado por autores que atribuem o alto valor de produção do biodiesel como principal barreira ao seu uso comercial (AVHAD; MARCHETTI, 2015; BANKOVÍ C-ILÍ; STAMENKOVÍ; VELJKOVÍ, 2012; KISS; JOVANOVIĆ; BOŠKOVIĆ, 2010).

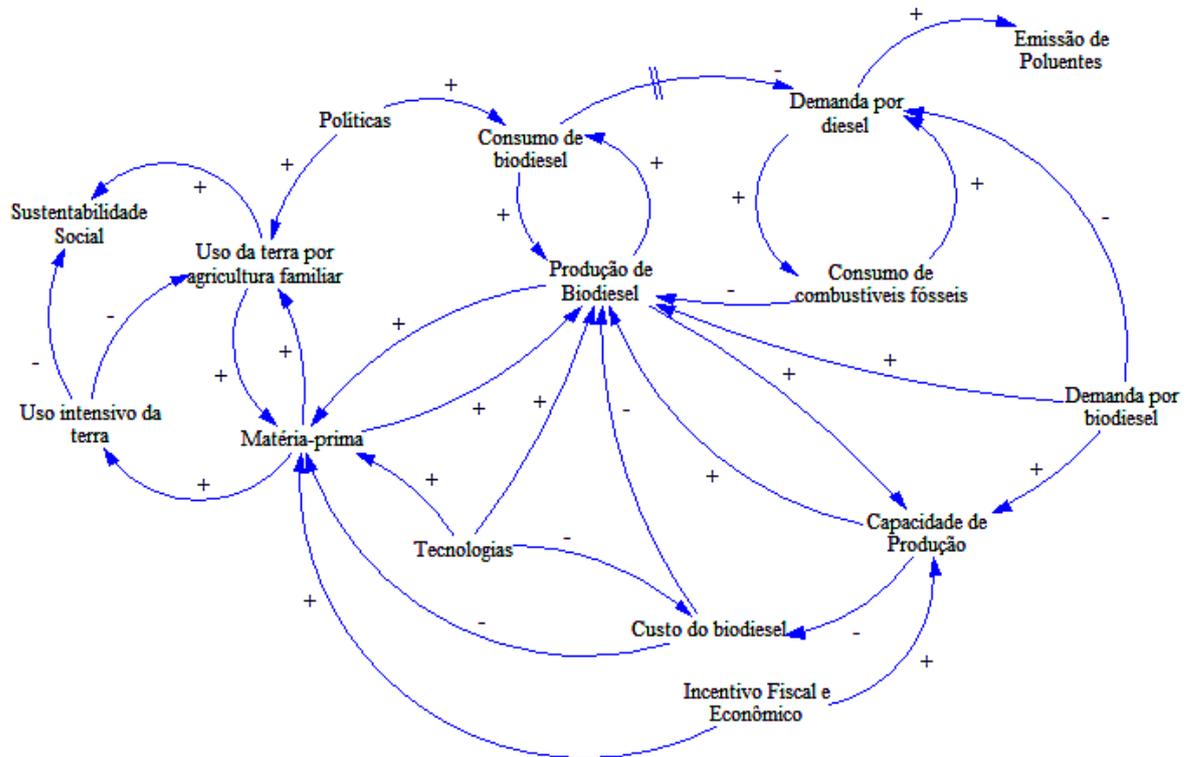
Figura 19 - Relação entre capacidade, produção e custo do biodiesel



Fonte: Autores.

Através da análise detalhada da influência exercida por cada variável pertencente ao sistema, percebe-se o diagrama de causa e efeito envolvendo todos os ciclos abordados (Figura 20). Por meio do DCE são especificadas as variáveis que serão inseridas no modelo que será simulado, estabelecendo as fronteiras do sistema (STERMAN, 2000; MORECROFT, 2015).

Figura 20 - Diagrama de Causa e Efeito



Fonte: Autores.

4.2 Diagrama de Estoque e Fluxo

A partir das relações descritas anteriormente, foi possível elaborar um DEF, que se tornou base para equacionamento de variáveis e inserção de parâmetros. Sendo que, para melhor compreensão do modelo, o DEF será apresentado em 5 submodelos.

4.2.1 Submodelo A: produção

Esse submodelo regula a produção a partir da demanda de produção de biodiesel e capacidade produtiva. Nele são calculados os seguintes estoques: demanda (Demanda de biodiesel ou Consumo projetado obrigatório), a capacidade instalada de produção de biodiesel no país (Capacidade instalada de produção) e a quantidade de biodiesel resultante da diferença entre a produção e consumo (Biodiesel).

Os estoques integram seus fluxos de entrada e saída ao longo do tempo. O estoque de Demanda biodiesel ou consumo projetado obrigatório (DemB) acumula essa variação no decorrer do tempo, somado à Demanda atual ($Demanda_0$), como evidenciado pela Equação 2:

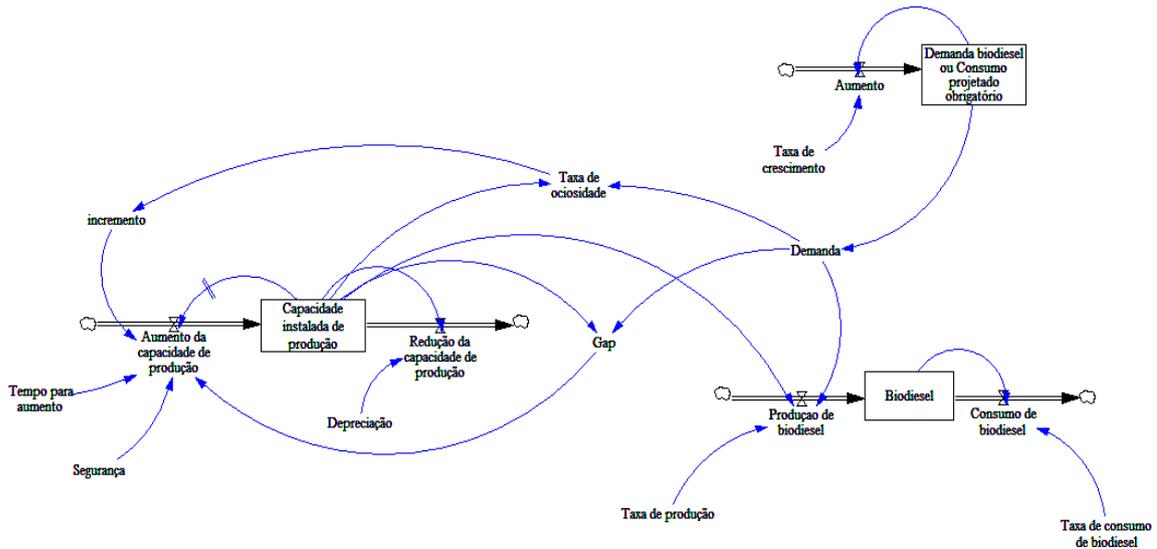
$$DemB = \int_{t_0}^t (Aumento) dt + Demanda_0 \quad (2)$$

A variação ao decorrer do tempo ocorre por meio do fluxo de aumento anual da demanda. A variável Aumento que se refere ao aumento da demanda de biodiesel (AumDB) depende da variável auxiliar Taxa de crescimento, conforme Equação 3:

$$AumDB = Taxa\ de\ crescimento * DemB \quad (3)$$

A Figura 21 retrata a representação do Diagrama de Estoque Fluxo para o submodelo.

Figura 21 – Diagrama de estoque e fluxo - submodelo A



Fonte: Autores.

O estoque Biodiesel, pode ser representado pela Equação 4, onde integra-se a diferença entre os fluxos de entrada e saída, isto é, a Produção de biodiesel (ProdB) e o Consumo de biodiesel (ConsB). A essa diferença, soma-se a quantidade de Biodiesel inicial ($Biodiesel_0$).

$$Biodiesel = \int_{t_0}^t (ProdB - ConsB) dt + Biodiesel_0 \quad (4)$$

A ProdB é resultado do produto do estoque Biodiesel pela Taxa de produção, conforme Equação 5:

$$ProdB = Biodiesel * (Taxa\ de\ produção) \quad (5)$$

O ConsB refere-se ao estoque Biodiesel multiplicado pela Taxa de consumo de biodiesel anual, apresentado pela Equação 6:

$$ConsB = Biodiesel * Taxa\ de\ consumo\ de\ biodiesel \quad (6)$$

O estoque de Capacidade de produção (C_p) pode ser representado pela Equação 7, onde integra-se a diferença entre o aumento anual da capacidade de produção ($AumC_p$) e a redução dessa mesma capacidade ($RedC_p$), causada principalmente pela depreciação (Dep). A essa diferença, soma-se a Capacidade de produção atual ($Capacidade\ atual_0$).

$$C_p = \int_{t_0}^t (AumC_p - RedC_p) dt + Capacidade\ atual_0 \quad (7)$$

O $AumCp$ depende da Taxa de ociosidade em percentual (TOc), apresentada como variável auxiliar e inserida numa função de atraso de primeira ordem (*Delay 1*), em função de Tempo para aumento (T), conforme Equação 8.

$$AumCp = DELAY1(incremento * segurança * (Cp + Gap), T) \quad (8)$$

Onde, segundo Equação 9:

$$Gap = Demanda - Cp \quad (9)$$

O $AumCP$ somente ocorrerá com condição para TOc menor que 20%. Quando a TOc for maior que 20%, o incremento retornará valor 0 (zero), isto é, o aumento não ocorrerá, conforme Equação 10:

$$incremento = IF THEN ELSE(TOc < 0.2, 1, 0) \quad (10)$$

Caso o aumento ocorra, existirá um valor para a variável segurança que atenderá ao especificado, isto é, tornará a taxa de ociosidade no percentual adequado. O valor para segurança será apresentado nos cenários de simulação.

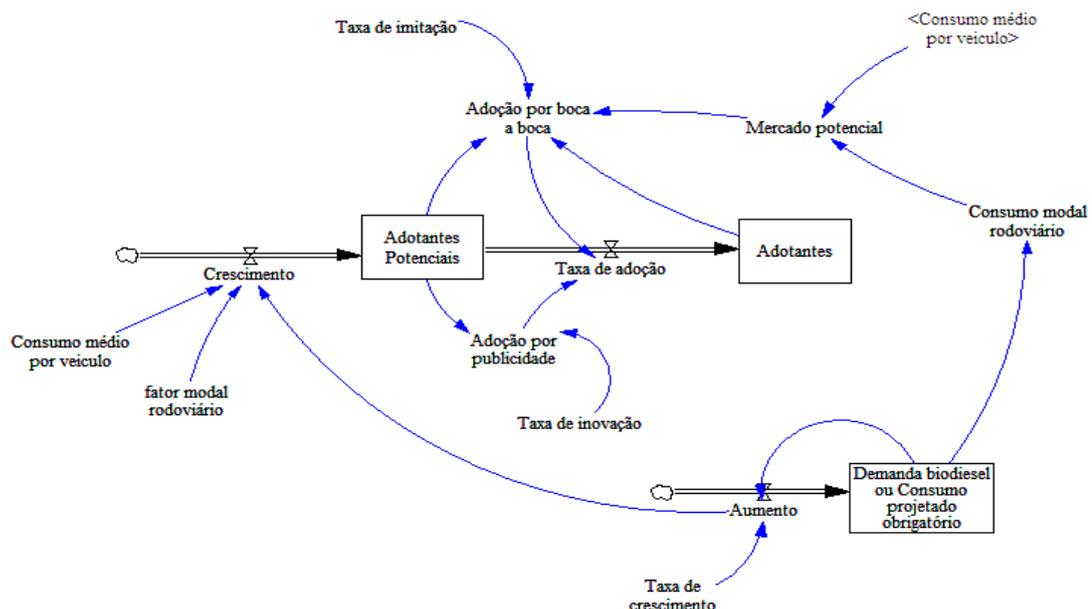
A $RedCp$ é resultado do produto da Capacidade de produção (Cp) pela Depreciação (Dep), apresentado pela Equação 11.

$$RedCp = Capacidade de produção * Depreciação \quad (11)$$

4.2.2 Submodelo B: difusão da tecnologia

No submodelo para estudo da difusão de tecnologia (Figura 22), dimensionado segundo o modelo de Difusão de Bass no DEF, estão contidos os estoques Adotantes (Adt), Adotantes Potenciais (AdtP) e Demanda biodiesel ou Consumo projetado obrigatório (DemB).

Figura 22 – Diagrama de causa e efeito – Submodelo B



Fonte: Autores.

O estoque Adotantes (Adt) faz referência ao acúmulo da variável de fluxo Taxa de adoção ao longo do tempo, somado aos adotantes iniciais (Adt₀), conforme Equação 12:

$$Adt = \int_{t_0}^t (Taxa \ de \ adoção) dt + Adt_0 \quad (12)$$

Conforme Equação 13, a variável Taxa de adoção é resultado de:

$$Taxa \ de \ Adoção = Adoção \ por \ publicidade + Adoção \ por \ boca \ a \ boca \quad (13)$$

Onde:

$$Adoção \ por \ publicidade = taxa \ de \ inovação * AdtP \quad (14)$$

$$Adoção \ por \ boca \ a \ boca = taxa \ de \ imitação * AdtP * (Adt / Mercado \ potencial) \quad (15)$$

O estoque Adotantes potenciais (AdtP) acumula a variação no decorrer do tempo, resultante da diferença entre a Taxa de adoção e o Crescimento somado à Adotantes Potenciais inicial (AdtP₀), como evidenciado pela Equação 16.

$$AdtP = \int_{t_0}^t (Taxa \ de \ adoção - Crescimento) dt + AdtP_0 \quad (16)$$

A Equação 17 apresenta a variável fluxo Crescimento como a razão do Aumento da demanda de biodiesel (AumDB) pelo consumo médio de biodiesel por veículo. Isso significa dizer que o Crescimento é direcionado pelo AumDB

$$Crescimento = AumDB / consumo \ médio \ de \ biodiesel \ por \ veículo \quad (17)$$

A variável Mercado potencial (MPot) é direcionada pela demanda de biodiesel resultante do modal rodoviário (Equação 18):

$$MPot = Consumo \ modal \ rodoviário / Consumo \ médio \ por \ veículo \quad (18)$$

Onde (Equação 19):

$$Consumo \ modal \ rodoviário = 0.78 * DemB \quad (19)$$

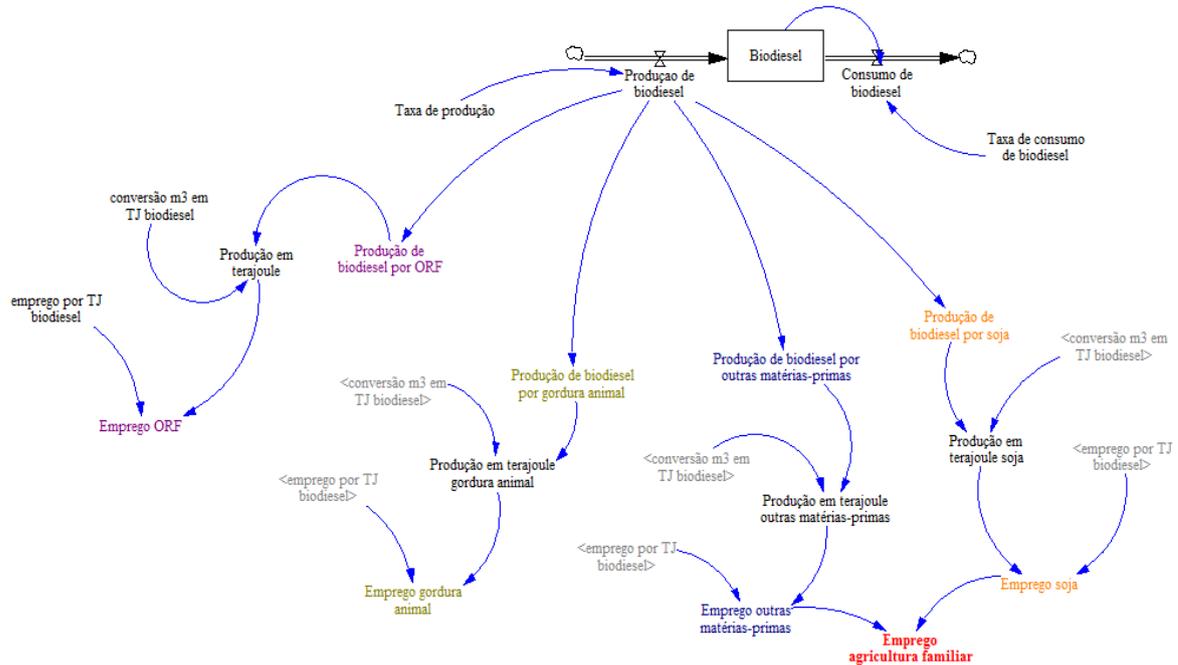
As taxas de imitação e inovação e o fator modal rodoviário, são parâmetros e serão apresentados na seção 4.4.

4.2.3 Submodelo C: sustentabilidade social

Nesse submodelo a sustentabilidade social será medida pelo emprego. Nele, se analisa a participação de cada matéria-prima na produção de biodiesel para geração de empregos (Figura 23 (a)), comparando com a sustentabilidade para o diesel puro ou mineral (Figura 23 (b)).

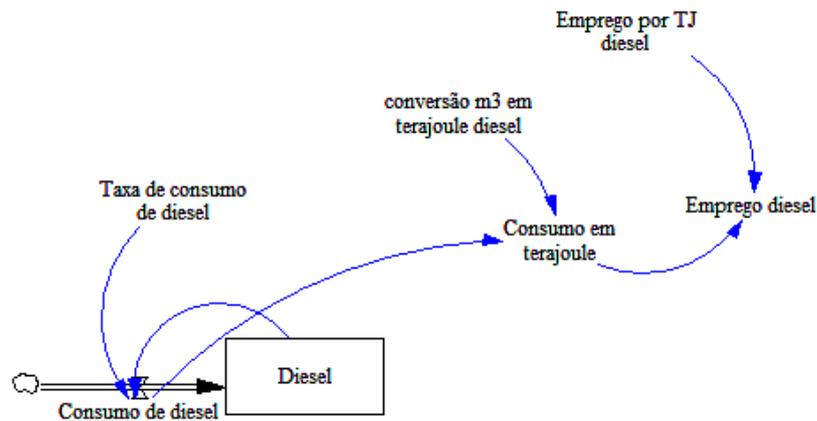
O modelo apresenta a participação do óleo residual de fritura (ORF), gordura animal, soja e “outras matérias-primas”. Cada uma delas possui uma taxa percentual de participação na produção de biodiesel. Essas taxas serão especificadas na seção 4.4, na obtenção de parâmetros juntamente com o fator de emprego por terajoule (TJ) de biodiesel e a conversão de m³ para TJ.

Figura 23 (a) – Modelo de causa e efeito – submodelo C



Fonte: Autores.

Figura 23 (b) – Modelo de estoque e fluxo- Submodelo C



Fonte: Autores.

O emprego por matéria-prima é resultado da conversão da produção por matéria-prima de m^3/ano para terajoules/ m^3 (TJ/ m^3) e produto do resultado da conversão pelo fator de emprego (Equação 20):

$$\text{Emprego soja} = \text{Emprego por TJ biodiesel} * \text{Produção em terajoule soja} \quad (20)$$

Para encontrar a quantidade de emprego na agricultura familiar gerado por ano, bastou-se multiplicar a participação percentual da geração de emprego na agricultura familiar pelo resultado da soma do emprego de outras matérias-primas (omp) com emprego proveniente da soja (Equação 21):

$$\text{Emprego agricultura familiar} = (\text{Emprego omp} + \text{Emprego soja}) * 0.36 \quad (21)$$

O equacionamento é análogo para as outras matérias-primas estudadas. Para realizar a comparação dos empregos gerados no diesel e biodiesel, se analisa nesse submodelo o emprego por TJ de diesel (Figura 22(b)). O emprego por matéria-prima para o diesel é resultado da conversão do consumo de diesel em m^3 /ano para terajoules/ m^3 (TJ/ m^3) e produto do resultado da conversão pelo fator de emprego, conforme evidenciado pela Equação 22:

$$\text{Emprego diesel} = \text{consumo diesel em terajoule} * \text{emprego por TJ diesel} \quad (22)$$

4.2.4 Submodelo D: custo

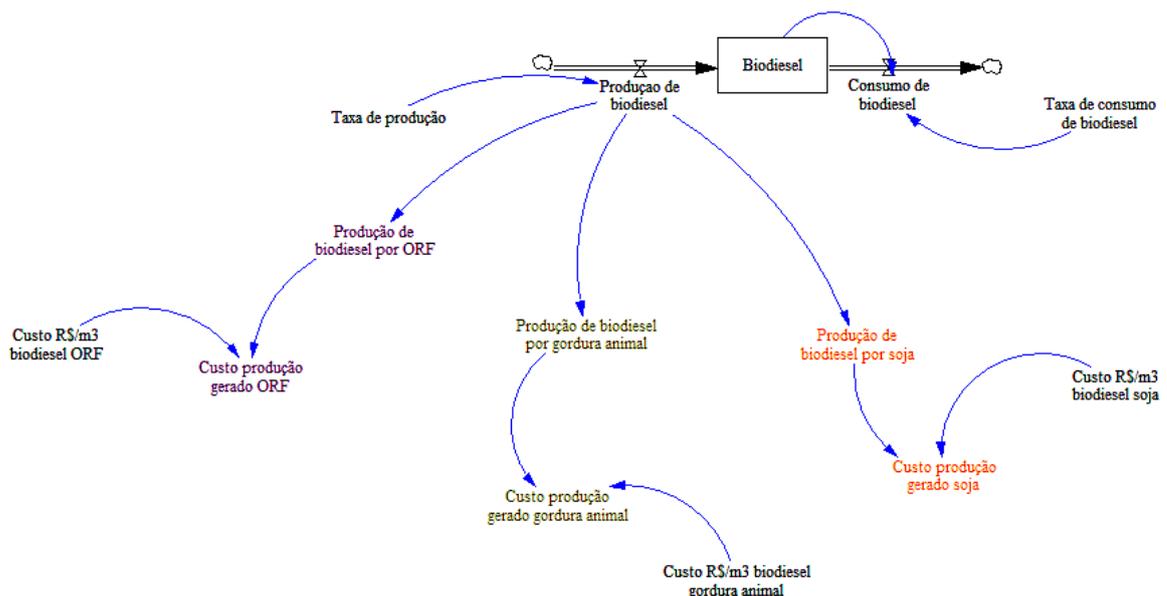
O submodelo D (Figura 24) faz menção aos custos de produção por matéria-prima. Nele será possível estudar a influência de cada matéria nos custos de produção. Sendo que, as variáveis custo (R\$/ m^3), são parâmetros inerentes a cada matéria-prima e que serão especificados no próxima seção.

O submodelo apresenta o estudo de custo envolvendo a participação do óleo residual de fritura (ORF), gordura animal e soja. Cada uma delas possui uma taxa percentual de participação na produção de biodiesel. Tendo um custo por matéria-prima é resultado do produto da produção por matéria-prima pelo custo de produção por m^3 , também para cada matéria, conforme evidenciado pela Equação 23:

$$\text{Custo de produção gerado soja} = \text{Produção de biodiesel por soja} * \text{Custo R\$/m}^3 \text{ biodiesel soja} \quad (23)$$

O equacionamento é análogo para os outros custos por matéria-prima abordados.

Figura 24 – Modelo de estoque e fluxo – Submodelo D.

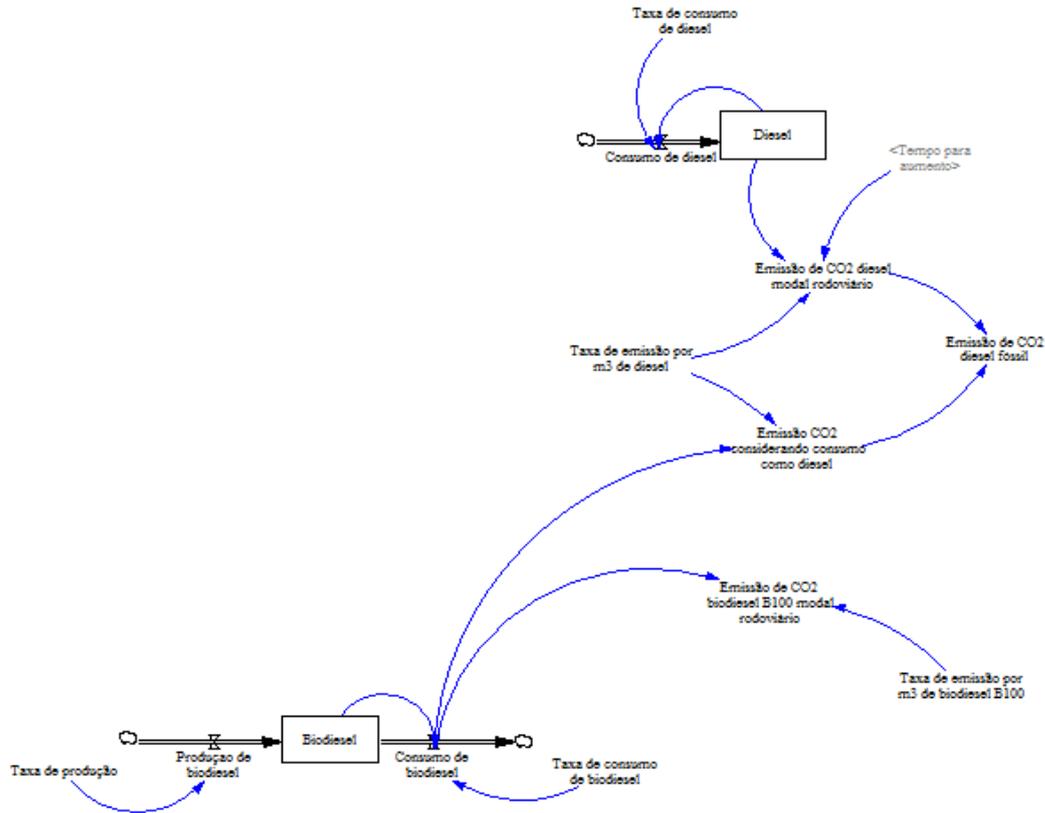


Fonte: Autores.

4.2.5 Submodelo E: emissão de CO₂

Esse submodelo analisa as emissões de CO₂ no modal rodoviário (Figura 25), proveniente do combustível diesel em mistura com biodiesel.

Figura 25 – Modelo de estoque e fluxo – Submodelo E.



Fonte: Autores.

O estoque CO₂ diz respeito ao acúmulo da emissão de CO₂ ao longo do tempo, somado a Emissão de CO₂ inicial (Emissão₀), apresentado pela Equação 24.

$$CO_2 = \int_{t_0}^t (Emissão\ de\ CO_2) dt + Emissão_0 \quad (24)$$

As emissões de CO₂ para diesel e biodiesel, são resultado do produto da taxa de emissão pelo consumo (Equações 25 e 26):

$$Emissão\ de\ CO_2\ diesel\ modal\ rodoviário = ConsD * Taxa\ de\ emissão\ por\ m^3\ de\ diesel \quad (25)$$

$$Emissão\ de\ CO_2\ B100\ modal\ rodoviário = 0.78 * ConsB * Taxa\ de\ emissão\ por\ m^3\ de\ biodiesel\ B100 \quad (26)$$

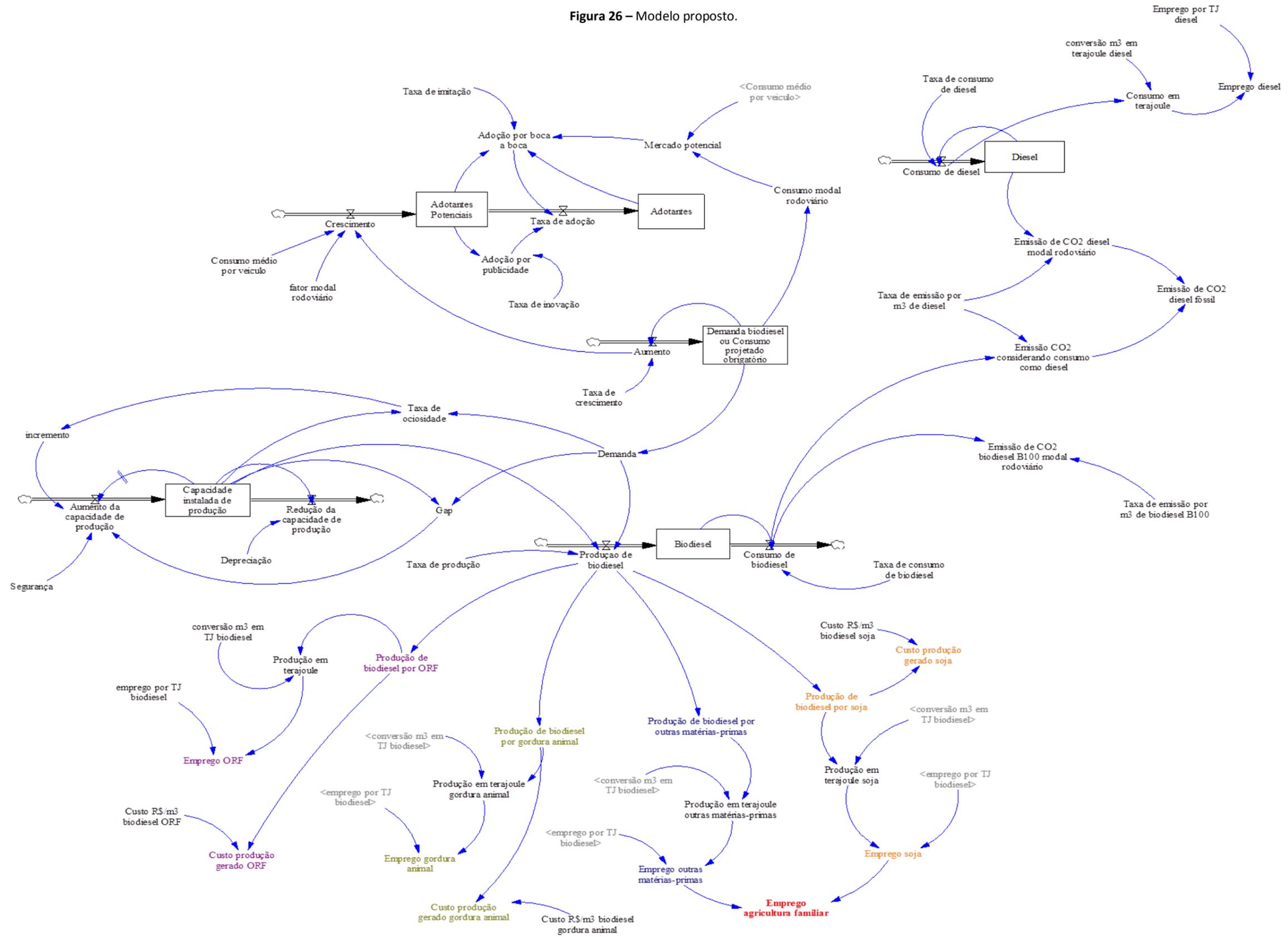
Para fins de cálculos sobre a quantidade de emissão de CO₂ evitada. As equações 27 e 28 foram utilizadas:

$$Emissão\ de\ CO_2\ considerando\ consumo\ como\ diesel = 0.78 * Consumo\ de\ biodiesel * Taxa\ de\ emissão\ por\ m^3\ de\ diesel \quad (27)$$

$$\textit{Emissão de CO}_2 \textit{ diesel fóssil} = \textit{Emissão CO}_2 \textit{ considerando consumo como diesel} + \textit{Emissão de CO}_2 \textit{ diesel modal rodoviário} \quad (28)$$

As relações existentes entre os submodelos A, B, C, D e E citados, são constatadas na Figura 26.

Figura 26 – Modelo proposto.



Fonte: Autores.

4.3 Parâmetros e Condições Iniciais do Modelo

Neste capítulo será explanado a forma de obtenção dos dados considerados valores de estoques iniciais e variáveis auxiliares que foram utilizados para testes do modelo e simulação dos cenários.

4.3.1 Submodelo A

No que diz respeito à capacidade de produção, o dado inserido para capacidade de produção inicial, que refere-se à capacidade instalada para produção de biodiesel no ano de 2019, foi retirado Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, criado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), com o objetivo de indicar, sob a ótica do governo da expansão do setor de energia no horizonte até 2029 (EPE, 2020). A taxa de crescimento da demanda também representa uma projeção estabelecida pelo PDE 2029.

A depreciação, variável auxiliar que influencia na redução da capacidade de produção é resultado da inserção do tempo de vida útil dos equipamentos, equivalente à 10 anos (SOUZA; COELHO; SANTOS, 2007; SARMENTO, 2010; PETROBRAS, 2019) em uma usina de biodiesel, conforme Equações 19 e 20.

$$Depreciação = \frac{100\%}{vida\ útil} \quad (19)$$

$$Depreciação = \frac{100\%}{10} = 10\% \text{ ano ou } 0.1 \quad (20)$$

O estoque inicial de biodiesel e demanda de biodiesel ou consumo projetado obrigatório, foi extraído das informações do mercado, divulgadas periodicamente pela Agência Nacional de Petróleo (ANP) com competência ano de 2019 (ANP, 2020).

4.3.2 Submodelo B

No submodelo de difusão de tecnologia, as taxas de adoção e imitação representam parâmetros estimados na literatura científica (MAHAJAN; MULLER; BASS, 1995), observados até mesmo para embasamento de estudos e projeções da EPE no mercado de minigeração distribuída (EPE, 2020).

O valor inicial de adotantes diz respeito ao número de veículos rodoviários a diesel que compuseram a frota circulante em 2019 (Sindipeças, 2019). No valor inicial para estoque Adotantes potenciais, considerou-se estável o crescimento anual de veículos a diesel, como 10% da frota circulante, conforme relatórios para a frota de anos anteriores e subtraiu-se, portanto, a frota de veículos a diesel projetada para 2020 pela frota em 2019 (Sindipeças, 2019).

O consumo médio de veículos foi calculado utilizando a razão do consumo de biodiesel no modal rodoviário em m³ para o ano de 2019 (EPE, 2019), pelo número de veículos

rodoviários a diesel circulantes referente ao ano de 2019 (Sindipecas, 2019). O consumo de biodiesel no modal rodoviário para o ano de 2019, foi projetado por regressão linear, por meio da ferramenta *Solver* disponível no Excel a partir de dados históricos extraídos do Balanço Energético Nacional (BEN) 2019, com competência ano de 2018. Esse relatório é elaborado pela EPE em periodicidade anual e divulga extensa pesquisa e contabilidade relativas à oferta e consumo de energia no Brasil.

O fator modal rodoviário é resultado da razão do consumo de biodiesel do modal rodoviário pelo quantidade de biodiesel produzida, ambos em 2019 (ANP, 2020).

4.3.3 Submodelo C

Nesse submodelo que relaciona a produção de biodiesel com as matérias-primas e estuda a sustentabilidade social por meio do emprego, as taxas de produção por matéria-prima representam percentuais de participação de cada matéria-prima na produção de biodiesel para o ano de 2019 e divulgado em documento oficial elaborados pela Coordenadoria de Economia e Estatística da ABIOVE em parceria com a ANP, (ABIOVE, 2020).

Com o intuito de encontrar um fator de emprego para análise da sustentabilidade, foram extraídos dados de emprego no setor de biodiesel. A *International Renewable Energy Agency* (IRENA), divulga anualmente, por meio de relatório, informações sociais a respeito do setor de biocombustíveis no mundo inteiro. Desta forma, se extraiu a quantidade de empregos relacionados ao biodiesel nos relatórios desde 2014.

Os dados de emprego, encontrados por ano foram divididos pela produção de biodiesel em Terajoule (TJ), para obtenção de um fator de emprego. Ocorreu a conversão, pois foi possível notar que as produções científicas estudam o emprego no setor de combustíveis e biocombustíveis associando-o a terajoules de energia e não m^3 (IRENA, 2020). Os cálculos detalhados, bem como os fatores de conversão utilizados para converter a produção em m^3 para TJ, estão disponibilizados no Apêndice A.

Após efetuar o cálculo da razão do emprego pela produção em TJ para cada ano no intervalo de 2014-2018, e estimar por regressão linear a quantidade de emprego para 2019, foi realizada uma média aritmética para definição de um fator de emprego aproximado no setor de biodiesel.

O fator de emprego para o diesel (CUNHA, 2011) e o percentual de emprego na agricultura familiar (MUR, 2019) foram encontrados bem definidos na literatura, sendo somente incluídos no diagrama.

4.3.4 Submodelo D

A partir dos dados oficiais de produção e percentual de participação das matérias-primas, os custos aproximados de produção de biodiesel por matéria-prima foram extraídos de estudos

de viabilidade econômica presentes na literatura científica (ARAUJO; HAMACHER; SCAVARDA, 2010; CAVALCANTE, 2018).

Os percentuais aplicados para o ORF e gordura animal no cenário de diversificação, advém do estudo da real possibilidade de aumento. Para o ORF, por meio de estudos de viabilidade, a literatura cita a possibilidade de aumentar sua participação em até 13% (ARAUJO *et al.*, 2013).

Para a gordura animal, destacando o sebo bovino que compõe em torno de 80% (ABRA, 2018) das gorduras para a produção, uma análise de comportamento histórico, permitiu aproximar um novo percentual de participação. Em 2015 a participação da gordura animal na produção de combustível renovável, chegou a 21% (ANP, 2020). Nesse mesmo ano, o abate de bovinos foi de 30,64 milhões de cabeças (IBGE, 2020).

Como o rendimento de sebo para cada cabeça bovina é de aproximadamente 23 kg, o sebo nesse ano chegou a 704.720 toneladas (URIBE; ALBERCONI; TAVARES, 2014), sendo pouco mais de 675000 toneladas voltadas somente para o biodiesel (VARÃO *et al.*, 2017). No entanto, em 2019, o abate chegou a 32,44 milhões de cabeças de gado (IBGE, 2020), rendendo 746.120 toneladas de sebo, quantidade 6% superior. Ao visualizar a participação da gordura animal para esse ano, se observou uma participação inferior, de somente 14%. Isso quer dizer, que o potencial de produção com o sebo bovino não foi aproveitado. Visto o potencial de aumento da participação de sebo depender do número de abates, o cenário simulará uma participação um pouco maior que o já obtido historicamente: 25% da gordura animal.

4.3.5 Submodelo E

O consumo inicial de diesel no modal rodoviário, foi extraído do Balanço Energético Nacional (BEN) 2019, que detalha a oferta e a demanda por fonte de energia, com competência ano de 2018. E o valor para 2019, também foi estimado, assim como para o biodiesel, utilizando regressão linear.

A taxa de consumo de diesel representa uma projeção estabelecida pelo Plano Decenal de Expansão de Energia 2029, criado pela (EPE), com o objetivo de indicar, sob a ótica do governo da expansão do setor de energia no horizonte até 2029 (EPE, 2019).

As taxas de emissão de CO₂ para biodiesel puro e diesel mineral foram retiradas do Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, emitido pela Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) (ANTT, 2013). A Tabela 5 traz todos os parâmetros utilizados e não descritos nessa seção.

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo e parâmetros utilizados

(continua)

Tipo	Variável	=	Equação	Unidade
Estoque	Adotantes	=	$\int_t^{t_0} (Taxa\ de\ adoção)dt + Adotantes_0$	veiculo
	Adotantes Potenciais	=	$\int_t^{t_0} (Crescimento - Taxa\ de\ adoção)dt + Adotantes\ Potenciais_0$	veiculo
	Demanda Biodiesel ou Consumo obrigatório	=	$\int_t^{t_0} (Aumento)dt + Demanda\ Biodiesel\ ou\ Consumo\ obrigatório_0$	m ³
	Capacidade instalada de produção	=	$\int_t^{t_0} (Aumento\ da\ capacidade\ de\ produção - Redução\ da\ capacidade\ de\ produção)dt + Capacidade\ instalada\ de\ produção_0$	m ³
	Biodiesel	=	$\int_t^{t_0} (Produção\ de\ biodiesel - Consumo\ de\ biodiesel)dt + Biodiesel_0$	m ³
	Diesel	=	$\int_t^{t_0} (Consumo\ de\ diesel)dt + Diesel_0$	m ³
Fluxo	Aumento da capacidade de produção	=	DELAY1((incremento*Segurança*(Capacidade instalada de produção+Gap)) , Tempo para aumento)	m ³ /ano
	Redução da capacidade de produção	=	Capacidade instalada de produção*Depreciação	m ³ /ano

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo e parâmetros utilizados

(continua)

Tipo	Variável		Equação	Unidade
Fluxo	Aumento	=	Taxa de crescimento*Demanda biodiesel ou Consumo projetado obrigatório	m ³ /ano
	Produção de biodiesel	=	IF THEN ELSE(Capacidade instalada de produção>=Demanda, Demanda*Taxa de produção de biodiesel , Capacidade instalada de produção*Taxa de produção de biodiesel)	m ³ /ano
	Consumo de biodiesel	=	Biodiesel*Taxa de consumo de biodiesel	m ³ /ano
	Consumo de diesel	=	Diesel*Taxa de consumo de diesel	m ³ /ano
	Taxa de adoção	=	Adoção por publicidade+Adoção por boca a boca	veiculo/ano
	Crescimento	=	Aumento/Consumo médio por veiculo	veiculo/ano
Auxiliar	Adoção por boca a boca	=	Taxa de imitação*Adotantes Potenciais*(Adotantes/Mercado potencial)	veiculo/ano
	Adoção por publicidade	=	Taxa de inovação*Adotantes Potenciais	veiculo/ano
	Taxa de imitação	=	0.5	1/ano
	Taxa de inovação	=	0.01	1/ano
	Tempo para aumento	=	1	ano
	Gap	=	Demanda-Capacidade instalada de produção	m ³
	Taxa de ociosidade	=	1-Demanda/Capacidade instalada de produção	Dmnl
	Mercado Potencial	=	Consumo modal rodoviário/Consumo médio por veiculo	veiculo
	Produção de biodiesel por ORF	=	0.02*Produção de biodiesel	m ³ /ano
	Produção de biodiesel por gordura animal	=	0.14*Produção de biodiesel	m ³ /ano

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo e parâmetros utilizados

(continua)

Tipo	Variável		Equação	Unidade
Auxiliar	Produção de biodiesel por outras matérias-primas	=	0.16*Produção de biodiesel	m ³ /ano
	Produção de biodiesel por soja	=	0.68*Produção de biodiesel	m ³ /ano
	Consumo médio por veículo	=	1	m ³ /veículo
	Fator modal rodoviário	=	0.78	Dmnl
	incremento	=	IF THEN ELSE(Taxa de ociosidade<0.2 , 1 , 0)	Dmnl
	Segurança	=	0.365	1/ano
	Depreciação	=	0.1	1/ano
	Demanda	=	Demanda biodiesel ou Consumo projetado obrigatório	m ³
	Taxa de produção de biodiesel	=	1	Dmnl
	Taxa de consumo de biodiesel	=	1	Dmnl
	Emissão de CO ₂ diesel modal rodoviário	=	(Consumo de diesel*Taxa de emissão por m ³ de diesel)/Tempo para aumento	kgCO ₂ /m ³
	Emissão CO ₂ considerando consumo como diesel	=	Consumo de biodiesel*Taxa de emissão por m ³ de diesel	kgCO ₂ /ano
	Emissão de CO ₂ biodiesel puro (B100) modal rodoviário	=	0.78*Consumo de biodiesel*Taxa de emissão por m ³ de biodiesel B100	kgCO ₂ /ano
	Emissão de CO ₂ diesel fóssil	=	Emissão CO ₂ considerando consumo como diesel+Emissão de CO ₂ diesel modal rodoviário	kgCO ₂ /ano

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo e parâmetros utilizados

Tipo	Variável	=	Equação	Unidade
Auxiliar	Taxa de emissão por m ³ de biodiesel B100	=	2431	kgCO ₂ /m ³
	Taxa de emissão por m ³ de diesel	=	2603	kgCO ₂ /m ³
	conversão m ³ em TJ biodiesel	=	0.0331	TJ/m ³
	emprego por TJ biodiesel	=	1.36	emprego/TJ
	Custo R\$/m ³ biodiesel ORF	=	1210	R\$/m ³
	Produção em terajoule ORF	=	Produção de biodiesel por ORF*conversão m ³ em TJ biodiesel	TJ/ano
	Emprego ORF	=	emprego por TJ biodiesel*Produção em terajoule ORF	emprego/ano
	Custo produção gerado ORF	=	"Custo R\$/m ³ biodiesel ORF"*Produção de biodiesel por ORF	R\$/ano
	Produção em terajoule gordura animal	=	conversão m ³ em TJ biodiesel*Produção de biodiesel por gordura animal	TJ/ano
	Emprego gordura animal	=	emprego por TJ biodiesel*Produção em terajoule gordura animal	emprego/ano
	Custo produção gerado gordura animal	=	"Custo R\$/m ³ biodiesel gordura animal"*Produção de biodiesel por gordura animal	R\$/ano
	Custo R\$/m ³ biodiesel gordura animal	=	1160	R\$/m ³
	Produção em terajoule outras matérias-primas	=	conversão m ³ em TJ biodiesel*"Produção de biodiesel por outras matérias-primas"	TJ/ano

(continua)

Tabela 5 – Equacionamento das variáveis do modelo e parâmetros utilizados

Tipo	Variável		Equação	(conclusão) Unidade
Auxiliar	Emprego outras matérias-primas	=	emprego por TJ biodiesel*"Produção em terajoule outras matérias-primas"	emprego/ano
	Emprego agricultura familiar	=	("Emprego outras matérias-primas"+Emprego soja)*0.36	emprego/ano
	Produção em terajoule soja	=	conversão m3 em TJ biodiesel*Produção de biodiesel por soja	TJ/ano
	Emprego soja	=	emprego por TJ biodiesel*Produção em terajoule soja	emprego/ano
	Custo R\$/m ³ biodiesel soja	=	1590	R\$/m ³
	Custo produção gerado soja	=	Produção de biodiesel por soja*"Custo R\$/m ³ biodiesel soja"	R\$/ano

Fonte: Autores.

A Tabela 6 detalha os valores iniciais de todas as variáveis estoques contidas no modelo.

Tabela 6 – Valores iniciais das variáveis de estoque.

Tipo	Variável	Valor inicial	Unidade
Estoque	Adotantes potenciais ³	1,3E+05	veiculo
	Adotantes ³	4.602E+06	veiculo
	Biodiesel ¹	5.9E+06	m ³
	Diesel ²	4.283E+07	m ³
	Capacidade de produção instalada ²	9.032E+06	m ³
	Demanda Biodiesel ou Consumo obrigatório ¹	5.9E+06	m ³

Fonte: ¹ (ANP,2020); ² (EPE,2019); ³ (SINDIPEÇAS, 2019).

4.4 Teste do Modelo

Conforme apontado na seção 3.4 desse trabalho e segundo Sterman (2000), o modelo DEF deve ser submetido a pelo menos 4 testes: Consistência Dimensional, Condições Extremas, Erro de Integração e Reprodução Comportamental.

O teste Consistência Dimensional se baseia na verificação direta e sistemática de todas as equações e variáveis, com a finalidade de averiguar as unidades utilizadas e a paridade das relações entre as variáveis. Importante ressaltar que o modelo não realizaria nenhuma simulação, caso as relações entre suas variáveis estivessem inadequadas. Esse teste foi realizado por meio da ferramenta checagem de unidades (*units check*) e checagem do modelo (*check model*), oferecidas pelo próprio software *Vensim PLE*.

O segundo teste tem o objetivo de levar o modelo a condições extremas, ou seja, analisar a total falta ou excesso de determinada variável. Para executá-lo foram selecionadas as seguintes variáveis: taxa de crescimento, taxas de produção de biodiesel e consumo de biodiesel. O objetivo foi testar o comportamento do modelo para valores nulos ou extremamente altos.

Em primeira instância foi atribuído o valor 0 (zero) para a taxa de crescimento e se observou o comportamento da Demanda e Produção de biodiesel. Foi possível perceber que o estoque da Demanda de Biodiesel ou Consumo projetado obrigatório manteve o valor do estoque inicial para todos os anos simulados, isto é, se não há crescimento, o valor da demanda não sofre alteração, tampouco a produção de biodiesel irá variar, pois a demanda permanece inalterada para os anos seguintes.

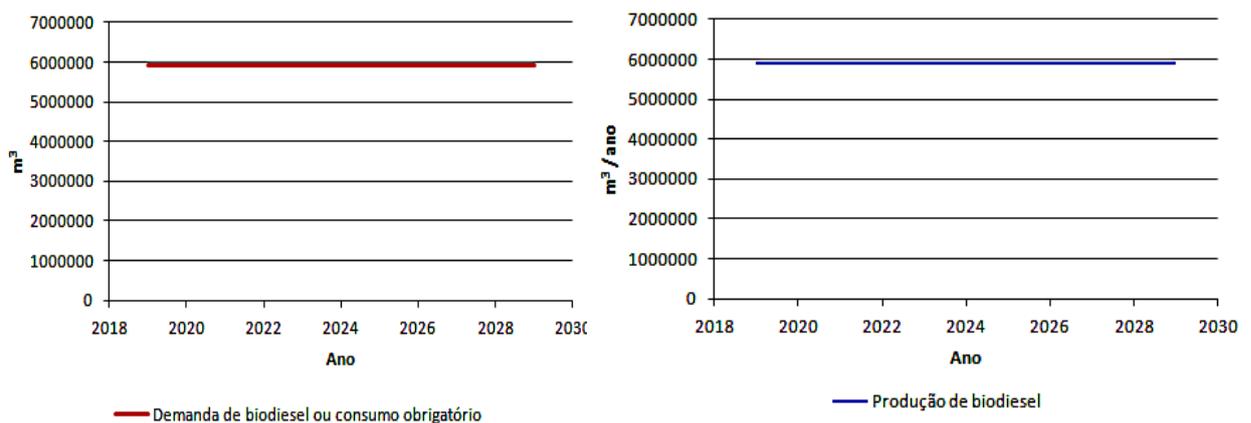


Gráfico 1 – (a) Teste de condições extremas para Demanda e (b) Produção de Biodiesel

Fonte: Autores.

As taxas de consumo de biodiesel e diesel também receberam o valor 0 (zero) (Gráfico 2).

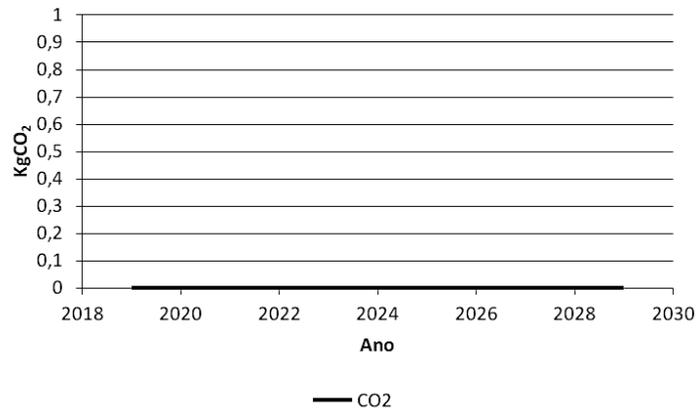


Gráfico 2 - Teste de condições extremas para a emissão de CO₂.
Fonte: Autores.

Foi possível a percepção de que a quantidade de CO₂ permanece com valor 0 (zero) para todos os anos simulados, quando se zera as taxas de consumo dos combustíveis. Para avaliar o modelo em condições extremamente altas, atribui-se o valor de 100% para a taxa de crescimento e se observou o comportamento de estoque da demanda (Tabela 7). Assim, pode-se dizer que o modelo apresentou respostas esperadas para o teste de condições extremas.

Tabela 7 – Condições extremamente altas para a demanda de biodiesel

Ano	Demanda biodiesel (m ³)
2019	5.9E+06
2020	1.18E+07
2021	2.36E+07
2022	4.72E+07
2023	9.44E+07
2024	1.88E+08
2025	3.77E+08
2026	7.55E+08
2027	1.51E+09
2028	3.02E+09
2029	6.04E+09

Fonte: Autores.

O terceiro teste compreende a análise de sensibilidade dos resultados no que tange a variação dos passos de tempo de simulação (*time step*). Essa variação pode ser realizada ao dividir sistematicamente o *time step* por dois.

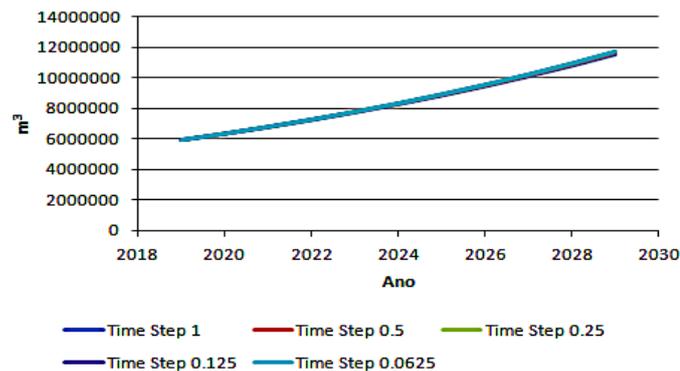
A Tabela 8 apresenta, por exemplo, os valores de saída para a variável Demanda de produção.

Tabela 8 – Teste de sensibilidade para demanda

Ano	Demanda (m ³)	Demanda (%)	Time step (anos)
	1,1250E+07	1,0000	1
	1,1388E+07	1,0112	0.5
2029	1,1461E+07	1,0170	0.25
	1,1498E+07	1,0200	0.125
	1,1516E+07	1,0215	0.0625

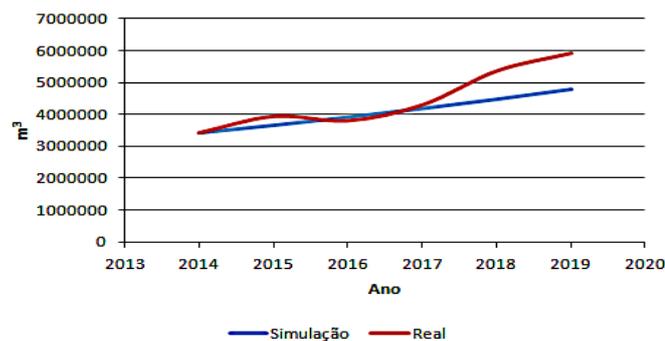
Fonte: Autores.

Apesar de apresentarem resultados distintos, o comportamento da variável Demanda se altera pouco, independentemente do intervalo de tempo (Gráfico 3), isto é, o modelo apresenta um comportamento realista para diferentes valores de tempo e, por isso, optou-se pelo *time step* de 1 ano.

**Gráfico 3 – Comportamento variável Demanda para diversos *time step***

Fonte: Autores.

O quarto teste verifica a aderência de comportamento do modelo quando inseridos dados do passado (Gráfico 4). Pode-se visualizar a diferença entre o real, que se refere a demanda retirada do Balanço Energético Nacional (EPE, 2019) e a simulação no horizonte simulado, devido as mudanças de percentual de mistura implantadas no decorrer do período. Contudo, o comportamento nos dois casos reflete o aumento da demanda.

**Gráfico 4 – Teste de reprodução comportamental para Demanda**

Fonte: Autores.

4.5 Descrição dos Cenários Simulados

A partir do modelo testado, parametrizado e com apoio de dados passados, foi possível a elaboração de cenários analíticos. Essa seção apresenta os 5 submodelos conforme divisão realizada no fragmento 4.3 desse trabalho. Os cenários utilizados para simulação serão:

- **Cenário estagnado:** o comportamento da mistura se mantém até o ano de 2029 conforme a mistura autorizada atualmente pela ANP, ou seja, adição de 12% de biodiesel ao diesel.
- **Cenário Base:** o crescimento da mistura se manterá conforme o projetado pelo governo em seu PDE, isto é, adição de 15% de biodiesel ao diesel até o fim do horizonte decenal 2020-2029.
- **Cenário Otimista:** o comportamento da mistura chegará a 20% de adição de biodiesel ao diesel durante o período decenal.

Para simulação dos cenários citados, as taxas de consumo de diesel e crescimento da demanda de biodiesel variaram conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Variação das taxas para os cenários simulados.

Submodelo A	B12	B15	B20
	(%)	(%)	(%)
Taxa de consumo de diesel	2,9	2,6	1,3
Taxa de crescimento	5,6	6,9	10,2

Fonte: EPE, 2019.

O submodelo A observará a variação na demanda, produção e capacidade instalada para todos os cenários. Esse submodelo objetiva averiguar o impacto nas variações de mistura em todas as variáveis citadas. Essas alterações percentuais são visualizadas a partir das mudanças nas taxas de crescimento de demanda de biodiesel e consumo de diesel.

O submodelo B permitirá entender o comportamento da difusão da tecnologia, por meio de veículos, isto é, o impacto da alteração na taxa de crescimento da demanda de biodiesel na quantidade de veículos adotados no horizonte decenal para os cenários pessimista, base e otimista.

O submodelo C analisará a sustentabilidade social por meio de empregos, permitindo entender a geração de empregos no âmbito geral do mercado de biodiesel, e também na agricultura familiar, permitindo realizar uma comparação com a geração também no que tange ao diesel. O resultado será observado para todos o cenário base projetado pelo governo – B15.

O submodelo D investigará o impacto dos custos na produção de biodiesel a partir das matérias-primas utilizadas. Além disso, se simulará um horizonte decenal sugerindo maior

diversificação da matéria-prima. Para isso, os percentuais de participação da soja, ORF e gordura animal, foram variados somente no cenário B15.

O submodelo E analisará o comportamento da emissão de CO₂, um dos grandes responsáveis pelo efeito estufa; em relação ao aumento da mistura no diesel. A exploração dos resultados se restringe a emissão no modal rodoviário e os resultados serão simulados para todos os cenários: pessimista, base e otimista.

Aqui é válido salientar que o modelo foi simulado por completo e os submodelos foram analisados posteriormente. Não ocorreu simulação fragmentada por submodelos.

4.5.1 Efeito da variação percentual de adição de biodiesel na demanda e produção

Nesse submodelo, somente os valores das taxas de crescimento do biodiesel e diesel foram alterados para cada cenário, segundo o especificado pela EPE para cada mistura de biodiesel. Para obter o valor da variável segurança, o modelo do cenário base foi simulado várias vezes, alterando o valor da variável de forma a obter o valor da capacidade instalada, conforme projetado pelo governo, para o ano de 2029 (Tabela 10).

Tabela 10 – Valor de segurança utilizado

Segurança	Capacidade instalada de produção (m ³)
0.35	1.32 x 10 ⁷
0.36	1,36 x 10 ⁷
0.365	1.37 x 10⁷
0.37	1.38 x 10 ⁷

Fonte: Autores.

Para análise dos resultados, os cenários B12 e B20 foram comparados com o cenário base. O Gráfico 5 analisa o comportamento para a demanda de biodiesel ao aumentar-se a mistura de biodiesel ao diesel.

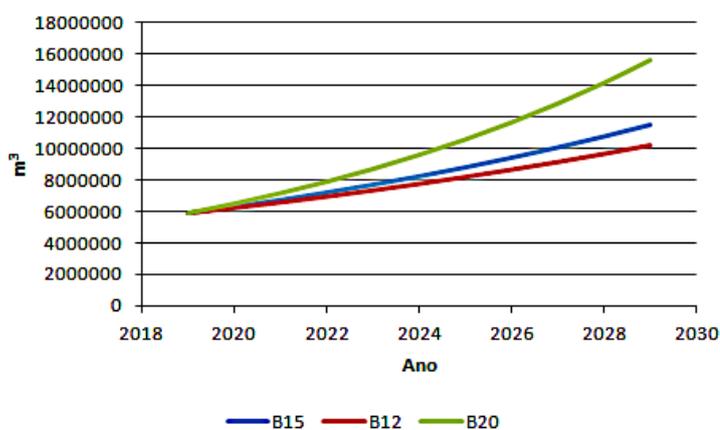


Gráfico 5 – Comportamento da demanda de biodiesel

Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se notar que a demanda de biodiesel aumenta com consequente aumento do percentual de biodiesel na mistura. Isso significa dizer, que ao se aumentar a demanda de biodiesel, o consumo de diesel diminui (Gráfico 6).

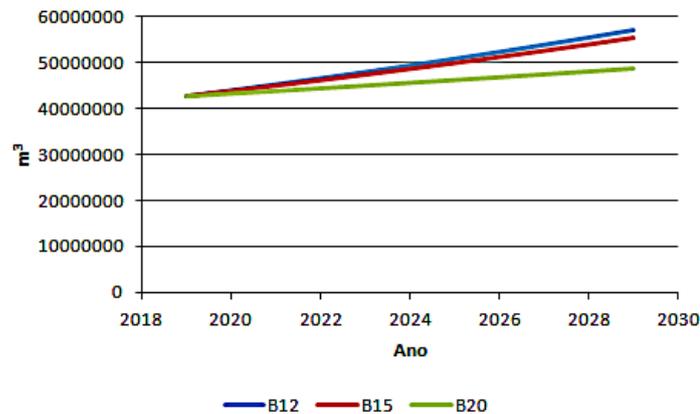


Gráfico 6 – Comportamento do consumo de diesel
Fonte: Autores.

Analisando o comportamento da variável aumento de capacidade (Tabela 11), constata-se que conforme o PDE 2029 (EPE, 2020), para todos os cenários, o aumento só ocorrerá em 2022, isto é, a capacidade instalada em 2019, atende a demanda até o ano de 2021, para todas as misturas de biodiesel. A partir de então, no horizonte decenal, ocorrerá um déficit na capacidade de produção, que deve ser suprido com investimento em plantas de produção de biodiesel.

Tabela 11 – Comportamento da variável aumento de capacidade

Ano	B12 (m ³ /ano)	B15 (m ³ /ano)	B20 (m ³ /ano)
2020	0	0	0
2021	0	0	0
2022	2,40E+06	2,46E+06	2,62E+06
2023	2,54E+06	2,63E+06	2,88E+06
2024	2,68E+06	2,81E+06	3,18E+06
2025	0	3,01E+06	3,50E+06
2026	0	0	3,86E+06
2027	3,15E+06	0	0
2028	3,33E+06	3,67E+06	0
2029	3,52E+06	3,93E+06	5,16E+06
Total	1,76E+07	1,85E+07	2,12E+07

Fonte: Autores.

Ao averiguar o comportamento do aumento no final de 2029, o cenário B20 resulta em um aumento de capacidade 14,5%, maior do que o cenário base B15. Ainda segundo o PDE 2029, a produção de biodiesel deve obedecer a taxa de ociosidade ou sobre capacidade de 20%. Desta forma, o modelo foi simulado para que o aumento ocorra a partir de ociosidade

menor que o valor estipulado de 20% de ociosidade. O aumento de capacidade não ocorre instantaneamente, seguindo o planejamento de pelo menos 1 (um) ano para ocorrência (*Delay 1*). A Tabela 12 aponta as taxas de ociosidade para todos os percentuais de mistura.

Tabela 12 – Taxas de ociosidade para os cenários e horizonte temporal selecionado.

Ano	B12	B15	B20
2019	0,34677	0,34677	0,34677
2020	0,23354	0,2241	0,20015
2021	0,10069	0,07841	0,02063
2022	-0,05519	-0,09465	-0,19918
2023	0,11895	0,08132	-0,01874
2024	0,22759	0,19083	0,09275
2025	0,30105	0,26463	0,16719
2026	0,17989	0,31707	0,21949
2027	0,03774	0,18883	0,25756
2028	0,17561	0,03651	0,09093
2029	0,26532	0,16193	-0,11311

Fonte: Autores.

Para o ano de 2022, se averigua uma taxa de ociosidade negativa, ou seja, nesse ano, a demanda é superior a capacidade para todos os cenários. Desta forma, a produção de biodiesel só obedecerá a capacidade disponível. O Gráfico 7 aponta esse comportamento, utilizando como exemplo o cenário B15.

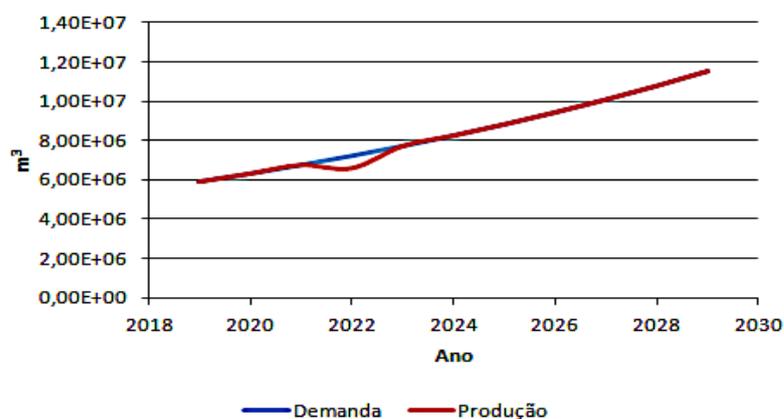


Gráfico 7 – Relação entre produção e demanda de biodiesel

Fonte: Autores.

Analisando essa diferença entre a demanda e a capacidade, ao coletar o valor do Gap para o ano de 2022 (Tabela 13), observa-se que para os cenários B12 e B15, as demandas podem ser supridas com aumento de capacidade obtido por gestão de tempo e mão-de-obra.

Tabela 13 – Gap para todos os percentuais de mistura

Ano	B12 (m ³ /ano)	B15 (m ³ /ano)	B20 (m ³ /ano)
2020	-1,90E+06	-1,82E+06	-1,63E+06
2021	-7,37E+05	-5,74E+05	-1,51E+05
2022	3,63E+05	6,23E+05	1,31E+06
2023	-9,91E+05	-6,82E+05	1,60E+05
2024	-2,28E+06	-1,94E+06	-9,80E+05
2025	-3,52E+06	-3,17E+06	-2,12E+06
2026	-1,90E+06	-4,37E+06	-3,27E+06
2027	-3,58E+05	-2,34E+06	-4,45E+06
2028	-2,05E+06	-4,08E+05	-1,41E+06
2029	-3,67E+06	-2,22E+06	1,58E+06

Fonte: Autores.

O aumento de capacidade não significa somente construção de novas usinas, isto é, uma unidade pode passar por otimização do processo de produção. Em determinadas situações, a capacidade produtiva pode ser aumentada por meio de utilização de horas extras. No entanto, em situações como essa, é possível obter um aumento de capacidade produtiva apenas por um delimitado período (ASSUNÇÃO; FERREIRA, 2019).

Para o cenário B20, a demanda aparece maior que a capacidade instalada em 3 momentos (2022, 2023 e 2029). Além disso, o Gap possui valor considerável. Desta forma, a variável segurança não pode ser a mesma que a utilizada para os cenários B12 e B15. Nesse sentido, incentivos e investimento para aumento de capacidade física, em termos de aumento de aquisição de máquinas e equipamentos e instalação de usinas devem ser maiores (CAVALCANTE FILHO, BUAINAIN, BENALTTI, 2019).

4.5.2 Efeito da variação percentual de adição de biodiesel na difusão de tecnologia

No submodelo B, ocorreu a análise da difusão da tecnologia, que nesse estudo envolve o setor rodoviário, maior modal consumidor do biodiesel, conforme Balanço Energético Nacional 2019 (EPE, 2020). Analisou-se o comportamento da adoção da tecnologia em relação ao aumento da mistura de biodiesel. A observação dos resultados se dará visualizando a quantidade de veículos no horizonte decenal.

A elaboração desse fragmento baseou-se na Difusão de Bass, sem considerar o mercado potencial constante, isto é, aqui o comportamento do mercado é dinâmico e crescente, seguindo a taxa de crescimento do setor projetada para cada mistura. O Gráfico 8 atesta a variação de mercado, demonstrando o comportamento para o cenário projetado pelo governo.

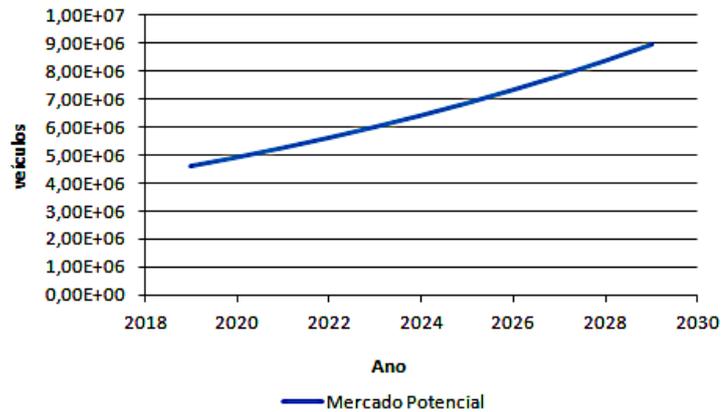


Gráfico 8 – Comportamento mercado potencial
Fonte: Autores.

Segundo o cenário anterior, a frota a diesel parte de 4,59 milhões de veículos em 2019 e chegará ao potencial de aproximadamente 8,97 milhões de veículos em 2029. O modelo de Bass considera uma hipótese comportamental, assumindo que durante a difusão do uso de novos produtos, dois tipos de adeptos determinarão como a demanda irá crescer: aqueles indivíduos que irão adotar por inovação, e os imitadores. Para adoção por inovação, não se aceita interferência direta de outros consumidores, mas pode-se receber influência por outros meios. Enquanto os ditos “imitadores” são influenciados pela pressão social no meio em que estão inseridos (FIGUEIREDO, 2009).

Sabe-se que a adição de biodiesel é considerada obrigatória e alcança todo o modal rodoviário (SBQ, 2020). O consumidor não possui a oportunidade de escolher se vai abastecer a diesel com ou sem biodiesel. Porém, esse submodelo visa analisar o aumento de adoção de tecnologia, por meio da inserção de novos veículos na frota circulante a diesel.

Os consumidores por inovação e os imitadores são influenciados por taxas, de inovação e imitação, respectivamente. Após a simulação, percebe-se que os valores de adoção aumentam com o tempo e que a adoção por imitação possui maior influência sob o sistema (Tabela 14).

Tabela 14 – Comportamento da adoção por boca a boca e publicidade

Adoção por boca a boca			
(veiculo/ano)			
	B12	B15	B20
2020	1,54E+05	1,80E+05	2,44E+05
2029	3,87E+05	5,22E+05	9,66E+05
Adoção por publicidade			
(veiculo/ano)			
2020	3,22E+03	3,82E+03	5,33E+03
2029	8,53E+03	1,19E+04	2,37E+04

Fonte: Autores.

Os Gráficos 9 e 10 observam os adotantes potenciais e a quantidade de adotantes alcançados no período compreendido entre 2020 a 2029, a partir de dados iniciais inserido e referentes ao ano de 2019, isto é, a quantidade de adotantes em relação ao aumento de mistura.

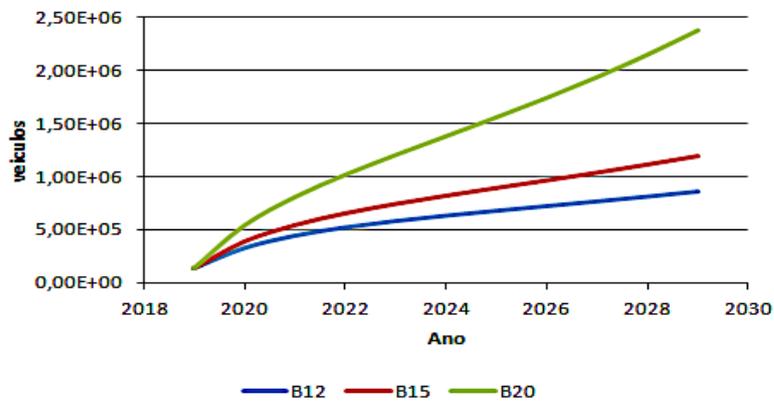


Gráfico 9 – Adotantes potenciais 2019-2029

Fonte: Autores.

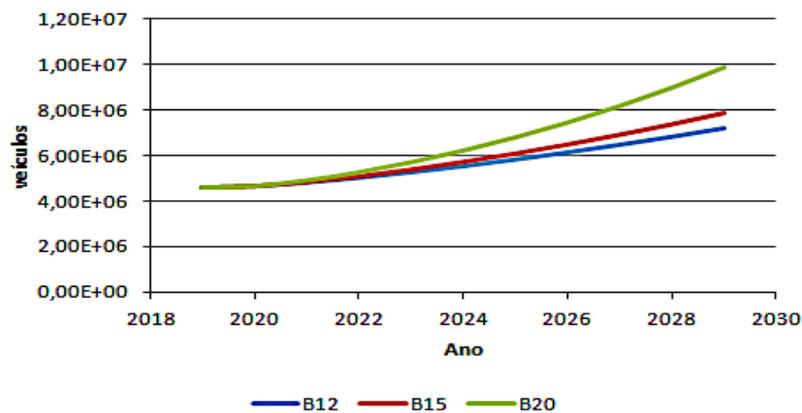


Gráfico 10 – Adotantes 2019-2029

Fonte: Autores.

É possível a percepção de que o aumento do percentual de mistura, acarreta em maior número de adotantes, isso porque a taxa de adoção também aumenta de forma diretamente proporcional ao aumento da mistura (Tabela 15).

Tabela 15 – Taxa de adoção 2020-2029

(continua)

	Taxa de adoção (veículos/ano)		
	B12	B15	B20
2020	1,57E+05	1,84E+05	2,50E+05
2021	2,09E+05	2,52E+05	3,59E+05
2022	2,43E+05	2,99E+05	4,42E+05
2023	2,70E+05	3,37E+05	5,15E+05
2024	2,92E+05	3,70E+05	5,85E+05
2025	3,13E+05	4,02E+05	6,56E+05

Tabela 15 – Taxa de adoção 2020-2029

(conclusão)

	Taxa de adoção (veículos/ano)		
	B12	B15	B20
2026	3,33E+05	4,33E+05	7,30E+05
2027	3,53E+05	4,66E+05	8,10E+05
2028	3,74E+05	4,99E+05	8,96E+05
2029	3,95E+05	5,34E+05	9,90E+05

Fonte: Autores.

Para o cenário base B15, a quantidade de adotantes chega ao fim do horizonte decenal com 7,89 milhões de veículos. No cenário B12, se nota uma diminuição 8,9% menor em relação ao B15, enquanto o B20 apresenta quantidade de veículos 25,4% maior em comparação ao cenário base.

4.5.3 Efeito da variação percentual de participação das matérias-primas na geração de empregos

Esse submodelo representa o comportamento da geração de empregos no mercado de diesel e biodiesel. No que tange ao biodiesel, se analisou também o envolvimento da agricultura familiar. O cenário B15 foi simulado mantendo o percentual de participação das matérias-primas segundo dados históricos e também sugerindo aumento percentual na participação do ORF e gordura animal.

Segundo o Gráfico 11, a soja, principal matéria-prima na cadeia produtiva de biocombustível, possui maior geração de empregos, logo acima do diesel. O diesel se mantém em boa posição, em virtude da alta demanda desse combustível para o setor de abastecimento, mesmo que possua um fator de emprego inferior ao biodiesel. Aliada a outras matérias-primas vegetais, estimulam a agricultura familiar promovem a redução da desigualdade, a geração da renda e a manutenção da tradição cultural (MAD, 2020).

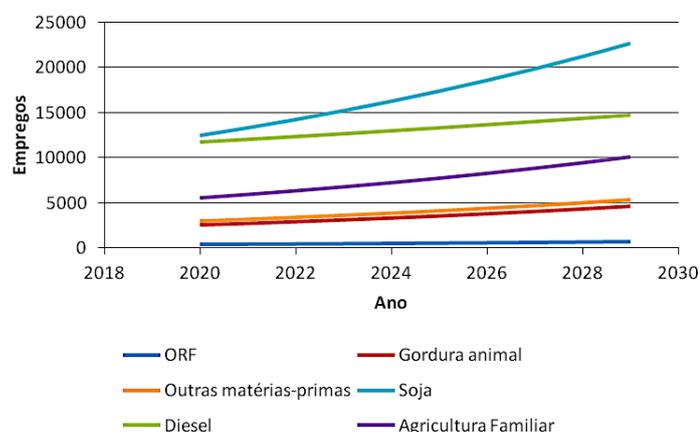


Gráfico 11 – Geração de empregos horizonte decenal 2020-2029

Fonte: Autores.

O cenário proposto com crescimento da participação do ORF e gordura animal (Gráfico 12), permite a percepção de que a soja deixa de gerar maior quantidade de empregos e consequentemente, influencia a queda da agricultura familiar, afinal, como já citado nesse trabalho, estudos apontam que 36% de todo o emprego gerado na soja e outras matérias-primas vegetais seja proveniente da agricultura familiar. Isso significa dizer que, se há redução da soja no mercado de produção de biodiesel, a agricultura familiar é impactada, isso se o aumento da participação de outras matérias-primas vegetais não ocorrer, de modo a estimular pequenos agricultores. Entretanto, enquanto há perda de emprego na matéria-prima soja, se percebe aumento da geração de empregos no aproveitamento de resíduos como ORF e gordura animal.

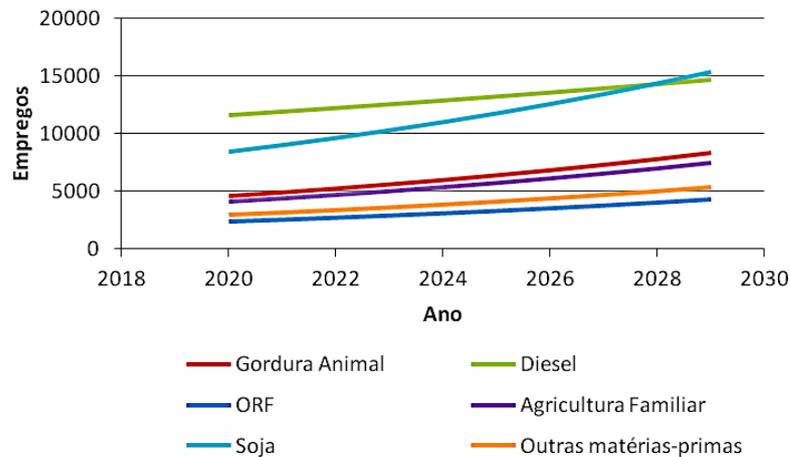


Gráfico 12 – Geração de empregos horizonte decenal 2020-2029, aumentando percentual ORF e gordura animal

Fonte: Autores.

Nos gráficos 11 e 12, se nota que o emprego para diesel permanece o mesmo, em virtude de o cenário ter sido simulado com embasamento na mistura B15, projetada pelo governo no seu último Plano Decenal. Obviamente, que ocorrerá a diminuição da sustentabilidade social indicada por emprego para o diesel, ao aumentar o percentual de mistura de biodiesel. Assim, para melhor visualização dos resultados gerados com a simulação, a Tabela 16, especifica o total de empregos, gerados no horizonte decenal 2020-2029 antes e após o crescimento percentual de matérias-primas consideradas residuais.

Tabela 16 – Geração de empregos no horizonte 2020-2029 para matérias-primas do biodiesel

Cenário	ORF	Gordura Animal	Outras matérias	Soja	Agricultura Familiar	Diesel
B15						
Estagnação	5040	35281	40321	171365	76207	142768
Crescimento	32760	63001	40321	115923	56248	142768

Fonte: Autores.

4.5.4 Efeito da variação percentual de participação das matérias-primas nos custos

Nesse submodelo, foi investigado o impacto dos custos na produção de biodiesel a partir das matérias-primas utilizadas. Além disso, foi simulado um horizonte decenal sugerindo maior diversificação da matéria-prima. Para isso, os percentuais de participação da soja, ORF e gordura animal, foram variados somente no cenário base projetado pelo governo – B15.

O Gráfico 13 é resultado da simulação permitindo visualizar o comportamento de maior participação do óleo de soja, conforme 2019 e anos anteriores. Segundo o cenário base, é possível observar o protagonismo do óleo de soja, chegando em 2029 com aproximadamente 7,8 milhões de m³ de participação na produção, contra 229.963 m³ de ORF e 1,6 milhões de m³ de biodiesel proveniente de gordura animal.

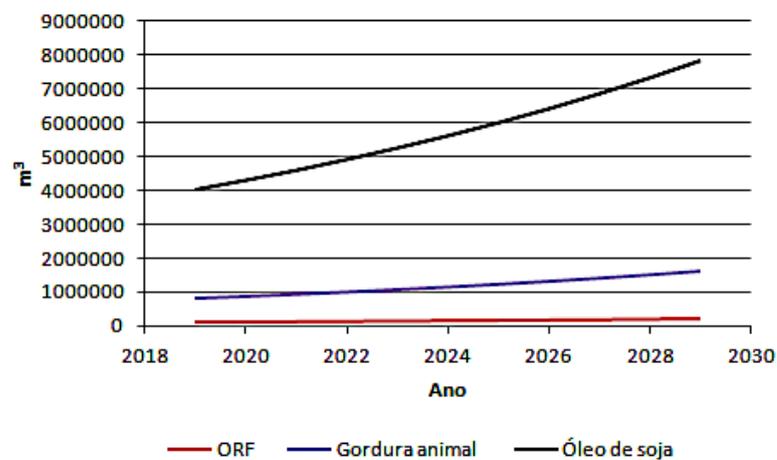


Gráfico 13 – Participação das matérias-primas segundo dado histórico
Fonte: Autores.

Enquanto o Gráfico 14, é resultado da diversificação proposta para a matriz renovável, reduzindo a participação do óleo de soja a 46%. Segundo o cenário base diversificado, em 2029, a participação do ORF será de aproximadamente 1,5 milhões de m³ e gordura animal em torno de 2,9 milhões de m³.

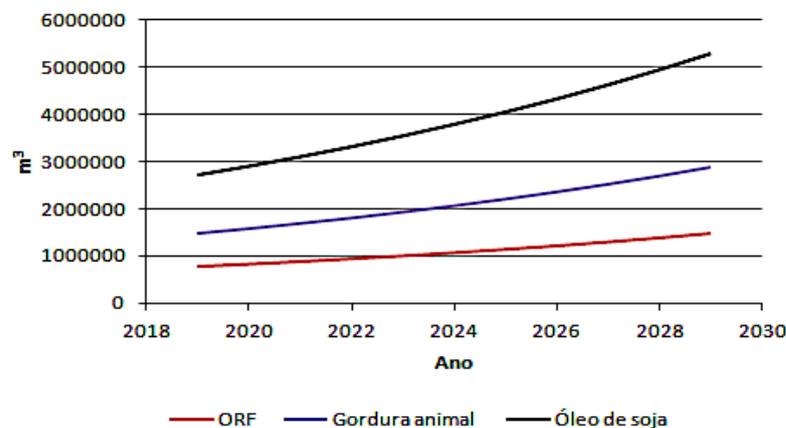


Gráfico 14 – Aumento do percentual de participação do ORF e gordura animal
Fonte: Autores.

Notadamente, diversificar a matéria-prima para a produção de biodiesel, traz diversos benefícios. Por exemplo, a gordura animal e o ORF, que não fazem parte da cadeia

alimentar, são de baixo custo e podem ser utilizados de modo a reduzir problemas ambientais provenientes de descarte irregular no meio ambiente (CUNHA Jr. *et al.*, 2013; ARAÚJO; HAMACHER; SCAVARDA, 2010).

O principal interesse na crescente produção da soja, não é somente a produção de óleo. A sua cadeia produtiva inclui a soja em grão, o farelo e o óleo. Portanto, a diminuição de sua participação na cadeia produtiva de biodiesel, não trará maiores prejuízos, pois o óleo é somente um subproduto do farelo, podendo ser exportado, como até mesmo já ocorre (CAVALCANTE, 2018). Claro, considerando que exista demanda externa para tal. Assim, por meio dos dados obtidos, houve a possibilidade de averiguar o impacto do custo para cada produção e o resultado obtido a partir da diversificação (Tabela 17).

Tabela 17 – Análise de custo no horizonte 2020 -2029

Matéria - prima	Custo (R\$)	
	Cenário Base sem crescimento da diversificação	Cenário Base após crescimento da diversificação
ORF	2,10E+9	1,46E+10
Gordura animal	1,41E+10	2,52E+10
Óleo de soja	9,38E+10	6,34E+10
Total	1,10E+11	1,03E+11

Fonte: Autores.

O aumento dos percentuais de participação do ORF e gordura animal geram uma redução de 6,4% nos custos de produção. Válido mencionar que conforme Tabela 14, a redução dos custo é na ordem de bilhões de reais.

4.5.5 Efeito da variação percentual de adição de biodiesel na emissão de CO₂

No submodelo E, se analisou o comportamento da emissão de CO₂, um dos grandes responsáveis pelo efeito estufa; em relação ao aumento da mistura no diesel (Gráficos 15 e 16).

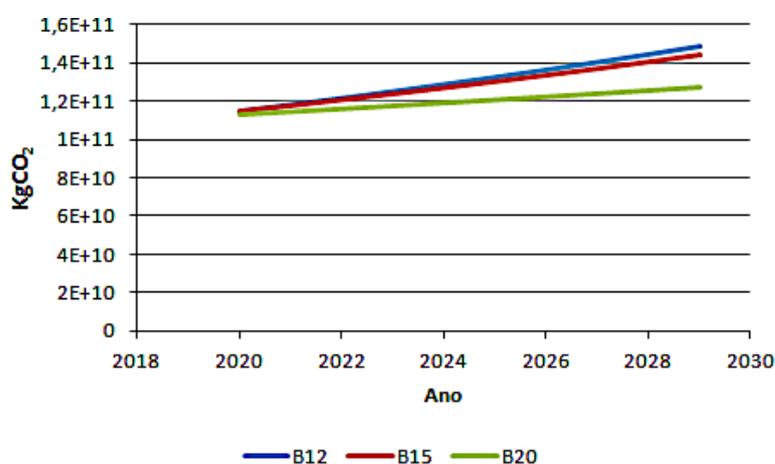


Gráfico 15- Emissão de CO₂ provenientes do diesel

Fonte: Autores.

A exploração dos resultados se restringe a emissão no modal rodoviário e considera que toda demanda do biocombustível seja satisfeita com a produção. Percebeu-se, que a elevação do percentual de mistura, diminui as emissões de CO₂ provenientes do diesel (Gráfico 15). E conseqüentemente, as emissões de biodiesel crescem diretamente ao percentual de mistura (Gráfico 16).

Esse resultado ocorreu segundo o esperado, pois esse combustível apresenta vantagens sobre o diesel, caracterizando-se por ser biodegradável, possuir baixo teor de carbono, tornando-se bom substituto ao petróleo (ABUBAKAR; SRIRAMULA; RENTON, 2015; DHARMA *et al.*, 2016; YUSUF; KAMARUDIN; YAAKUB, 2011). O Gráfico 16 aponta as emissões para cada cenário, supondo que todo o biocombustível produzido para cada cenário, tenha taxa de emissão de CO₂ do biodiesel puro (B100) para fins de análise.

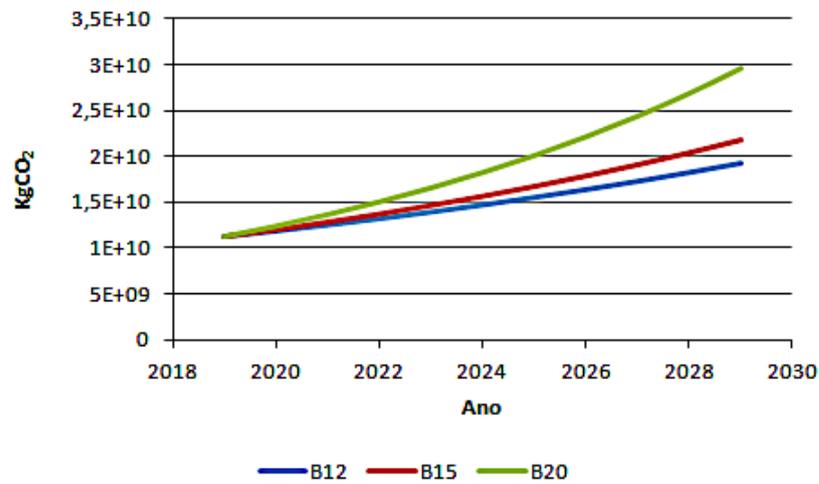


Gráfico 16- Emissão de CO₂ provenientes do biodiesel.
Fonte: Autores.

No horizonte decenal, emissões de CO₂ são evitadas, na ordem de bilhões de quilos ou milhões de toneladas (Tabela 18). Esse resultado atende ao objetivo da Renovabio, que aponta como meta a descarbonização para o setor de combustíveis, no que tange ao seu uso (ANP, 2020). O Cenário B20, por exemplo, evita 17,1% de CO₂ em emissões em relação ao projetado pelo governo – B15 e 22,9% em relação ao cenário estagnado – B12.

Tabela 18 – Emissões de CO₂ evitadas no horizonte 2020 -2029

Emissão de CO ₂ evitada (KgCO ₂)		
B12	B15	B20
1,08E+10	1,16E+10	1,4E+10

Fonte: Autores.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, há um esforço conjunto em termos mundiais para que as nações consigam alcançar um desenvolvimento sustentável. Assim, o biodiesel, representa uma alternativa ao petróleo e surgiu por apresentar relativa vantagem quando se considera o aumento das preocupações ambientais. Desta forma, a abordagem de dinâmica de sistemas, se mostrou uma importante ferramenta para formulações e planejamentos voltados ao estudo desse setor complexo.

Por meio da discussão teórica realizada foi possível entender como as variáveis demanda, produção de biodiesel, capacidade instalada, emissão de CO₂, mercado potencial e matérias-primas se relacionam no Brasil de maneira sistêmica e temporal. Após vasta busca na literatura disponível, percebeu-se a existência de uma considerada lacuna científica que aborde essas relações, principalmente no caso do Brasil. Nesse contexto, acredita-se que esse trabalho contribui para a literatura de modo a complementar o conhecimento difundido.

Abordou-se aqui que a utilização do biodiesel no Brasil foi fomentada por políticas públicas que estimularam sua produção e consumo. Sendo que, os resultados das simulações do setor para os próximos 10 anos, mostraram que a diminuição da ociosidade na capacidade instalada é minimizada com novos mandatos de mistura, que por sua vez, farão com que a demanda por biodiesel aumente e, conseqüentemente diminua a dependência do diesel, que atualmente é importado para compor todo o consumo obrigatório no Brasil. Entretanto, a implantação de novas misturas, depende diretamente de investimentos em aumento de capacidade de produção.

Ao analisar a difusão de tecnologia, isto é, o crescimento do produto biodiesel, por meio da adoção de veículos para compor a frota a diesel, utilizando modelo semelhante ao de Difusão de Bass, que representa uma generalização empírica, se percebeu que o aumento do percentual de mistura, pode estimular o crescimento da frota circulante a diesel. Essa conclusão é baseada somente no critério de influência de inovação e imitação, excluindo o fator preço, por exemplo.

No que diz respeito às emissões, o biodiesel representa uma alternativa ambientalmente correta, por proporcionar a redução da emissão do CO₂, em relação aos combustíveis derivados de petróleo. Esse resultado foi possível ao comparar a emissão proveniente do Biodiesel B100 e do diesel no modal rodoviário.

Ao averiguar a sustentabilidade social, se observou que o diesel, apesar de apresentar fator de emprego inferior, ainda gera maior quantidade de empregos, em virtude da maior demanda do mercado brasileiro. Porém, o biodiesel contribui ao fomentar o desenvolvimento regional, gerando renda no campo por meio da agricultura familiar e reduzindo a importação de diesel e sua participação pode ser ainda mais positiva, ao aumentar o percentual de mistura.

Ao simular um crescimento percentual de óleo residual de fritura e gordura animal, percebeu-se que o emprego na agricultura familiar sofreu diminuição. Essa regressão advinda por diminuição da soja, pode ser realinhada com outras matérias-primas vegetais que já compõe a matriz de produção, estimulando a participação de todas as regiões do Brasil, atendendo ao critério de diversificação regional, defendido pelo PNPB. Adicionalmente, empregos são gerados na coleta e aproveitamento de resíduos como o ORF e gordura animal.

No que tange aos custos produtivos, concluiu-se que o ORF e gordura animal, mais especificamente o sebo bovino, apresentaram menores custos de produção. A utilização dessas matérias-primas, principalmente no que diz respeito ao ORF, além de auxiliarem no quesito ambiental, econômico e regional, não proporcionam exposição a eventuais quebras de safra. Para estímulo a variação de matéria-prima, políticas de incentivo devem ser criadas, pois a coleta de ORF no país ainda é incipiente. Existe ainda a oportunidade de pesquisas com o objetivo de propor redes de logística reversa viáveis operacional e economicamente, e impulsionando aspectos sociais como associações.

Desta forma, a presente dissertação contribuiu com um modelo base para análise de fatores que interferem no mercado de biodiesel no Brasil e por reduzir parte da lacuna encontrada na literatura.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Considera-se que o modelo de Dinâmica de Sistemas criado pode ser implementado em outros países e os resultados podem ser comparados com o trabalho atual. Além disso, analisar a viabilidade de se avaliar o efeito econômico do desmatamento de regiões para cultivo da soja, considerada até o momento a principal matéria-prima para produção do biodiesel. Desmata-se para expandir a economia, mas os custos para amenizar as consequências socioambientais podem não compensar ao se utilizar uma matéria-prima considerada não residual.

REFERÊNCIAS

ABBASZADEH, A.; GHOBADIAN, B.; OMIDKHAH, M. R.; NAJAFI, G. Current biodiesel production technologies: A comparative review. **Energy Conversion and Management**, ago. 2012. v. 63, p. 138–148.

ABIOVE. **Estatísticas**. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2020. Disponível em: < <http://abiove.org.br/estatisticas/>>. Acesso em: 15 maio 2019.

_____. **BIODIESEL: PRODUÇÃO POR TIPO DE MATÉRIA-PRIMA**. Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais, 2020. Disponível em: <

<http://abiove.org.br/estatisticas/biodiesel-producao-por-tipo-de-materia-prima/> . Acesso em: 10 fev. 2020.

ABRA. **ANUÁRIO ABRA: SETOR DE RECICLAGEM ANIMAL**. Associação Brasileira de Reciclagem Animal, 2018. Disponível em: < https://abra.ind.br/wp-content/uploads/2019/08/anuario_abra_2018.pdf >

ABUBAKAR, U.; SRIRAMULA, S.; RENTON, N. C. Stochastic techno-economic considerations in biodiesel production. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, out. 2015. v.9, p. 1-11.

AGEITEC. Incentivos Fiscais. Agência Embrapa de Informação Tecnológica, 2019. Disponível em: <<https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/agroenergia/arvore/CONT000g8st49lo02wx5ok0u5nfpmh8k3374.html>> . Acesso em: 12 jun. 2019.

AL-HAMAMRE, Z.; YAMIN, J. Parametric study of the alkali catalyzed transesterification of waste frying oil for biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, 2014. v. 79, p. 246-254.

AMARAL, J. A. A. **Desvendando sistemas**. Disponível em < <http://issuu.com/profjoaoarantes/docs/desvendandosistemasebook> >. Acesso em: 15. abr. 2019. v. 6, p. 2015, 2012.

ANP. **Óleo diesel brasileiro passa a conter mínimo de 12% de biodiesel**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/noticias/5633-oleo-diesel-brasileiro-passa-conter-minimo-12-biodiesel>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

_____. **RenovaBio**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/renovabio>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

_____. **Informações de Mercado**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2020. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis/biodiesel/informacoes-de-mercado>>. Acesso em: 23 jun. 2019.

_____. **Anuário Estatístico 2019**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2019. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/anuario-estatistico/5237-anuario-estatistico-2019#Se%C3%A7%C3%A3o%204>>. Acesso em: 29 jun. 2019.

_____. **Boletim Mensal do Biodiesel**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/publicacoes/boletins-anp/2386-boletim-mensal-do-biodiesel> >. Acesso em: 05 abr. 2019.

ANEEL. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível

em:<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_fatoresdeconversao_indice.pdf>. Acesso em 13 maio 2020.

ANTT. **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários**. Agência Nacional de Transportes Terrestres, 2013. Disponível em:<http://www.antt.gov.br/backend/galeria/arquivos/inventario_de_emissoes_por_veiculos_rodoviarios_2013.pdf>. Acesso em 10 fev. 2020.

APOSTOLAKOU, A. A.; KOOKOS, I. K.; MARAZIOTI, C.; ANGELOPOULOS, K.C. Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils. **Fuel Processing Technology**, abr. 2009. v. 90, p. 1023-1031.

APROBIO. **CONFAZ PRORROGA REGRA QUE REDUZ ICMS DO BIODIESEL**. Associação dos Produtores de Biodiesel do Brasil, 2019. Disponível em: <<https://aprobio.com.br/2019/04/10/confaz-prorroga-regra-que-reduz-icms-do-biodiesel/>>. Acesso em: 18 maio 2019.

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

ARAÚJO, C. D. M. de; ANDRADE, C. C. de; SILVA, E. de S.; DUPAS, F. A. Biodiesel production from used cooking oil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 7, 2013, p. 445-452.

ARDI, R.; LEISTEN, R. Assessing the role of informal sector in WEEE management systems: A System Dynamics approach. **Waste Management**, 2016. v. 57, p. 3-16.

ASSUNÇÃO, M. da C.; FERREIRA, D. L. ANÁLISE DE CAPACIDADE POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL: UM ESTUDO DE CASO EM UMA INDÚSTRIA DE CABOS E CONDUTORES ELÉTRICOS. **Produção em foco**, nov. 2019. v. 02, p. 74-89.

AVHAD, M. R.; MARCHETTI, J. M. A review on recent advancement in catalytic materials for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, maio. 2015. v. 50, p. 696-718.

AZADEH, A.; VAFA ARANI, H. Biodiesel supply chain optimization via a hybrid system dynamics-mathematical programming approach. **Renewable Energy**, ago. 2016. v. 93, p. 383-403, 2016.

BALAT, M. Potential alternatives to edible oils for biodiesel production - A review of current work. **Energy Conversion and Management**, 2011. v. 52, p. 1479-1492.

BANKOVÍ C-ILÍ, I. B.; STAMENKOVÍ, O. S.; VELJKOVÍ, V. B. Biodiesel production from non-edible plant oils. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2012. v. 16, p. 3621-3647.

BARISA, A.; ROMAGNOLI F.; BLUMBERGA, A.; BLUMBERGA, D. Future biodiesel policy designs and consumption patterns in Latvia: A system dynamics model. **Journal of Cleaner Production**, fev. 2015. v. 88, p. 71-82.

BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, 1996. v. 12, n. 3, p. 183–210.

BARNWAL, B. K.; SHARMA, M. P. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2005. v. 9, p. 363-378.

BENATTI, J. H. **A soja na Amazônia e o ordenamento territorial**. Anais do seminário: A geopolítica da soja na Amazônia. Museu Paraense Emílio Goeldi, 2003, Belém.

BESIOU, M.; GEORGIADIS, P.; VAN WASSENHOVE, L. N. Official recycling and scavengers: Symbiotic or conflicting? **European Journal of Operational Research**, 2012. v. 218, p. 563–576.

BONDARIK, R; PILATTI, L. A.; HORST, D. J. UMA VISÃO GERAL SOBRE O POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL. **INTERCIÊNCIA**, out. 2018. v. 43, n. 10, p. 680-688.

BRASIL. **Biodiesel**. Governo do Brasil, 2011. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/noticias/infraestrutura/2011/11/biodiesel>>. Acesso em: 05 mar. 2019.

BRITO, L. G.; AMARAL, T. R. de. **Método de Euler e Runge-Kutta para solução de Equações diferenciais ordinárias**. In: Congresso de Matemática Aplicada e Computacional, pp. 17-19, 2012, Nordeste, CMAC.

CANESIN, E. A.; OLIVEIRA, C. C. de.; MATSUSHITA, M.; DIAS, L. F.; PERDÃO, M. R.; SOUZA, N. E. De. Characterization of residual oils for biodiesel production. **Electronic Journal of Biotechnology**, 2014. v. 17, p. 39-45.

CAVALCANTE, K. S. dos R. **PRODUÇÃO DE BIODIESEL NO BRASIL: VANTAGENS E DESVANTAGENS DO ÓLEO DE SOJA E SEBO BOVINO**. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Federal de Tocantins. Palmas, p. 111, 2018.

CAVALCANTE FILHO, P. G.; BUAINAIN, A. M.; BENATTI, G. S. de S. A cadeia produtiva agroindustrial do biodiesel no Brasil: um estudo sobre sua estrutura e caracterização. **DRd - Desenvolvimento Regional em debate**, 2019, v. 9, p. 772-799.

CÉSAR, A. S. Da.; CONEJERO, M. A.; RIBEIRO, E. C. B.; BATALHA, M. O. Competitiveness analysis of "social soybeans" in biodiesel production in Brazil. **Renewable Energy**, 2019. v. 133, p. 1147-1157.

CONFAZ. **CONVÊNIO ICMS 113/06**. Conselho Nacional de Política Fazendária, 2019. Disponível em: <https://www.confaz.fazenda.gov.br/legislacao/convenios/2006/CV113_06>. Acesso em: 18 maio 2019.

CHEN, K.-S.; LIN, Y.-C.; HSU, K.-H.; WANG, H.-K. Improving biodiesel yields from waste cooking oil by using sodium methoxide and a microwave heating system. **Energy**, 2012. v. 38,

p. 151–156.

CHOOPOJCHAROEN, T.; MAGZARI, A. **Mathematics behind System Dynamics: An Interactive Qualifying Project Report**. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute, 2012. Projeto de Graduação.

CLARIVATE ANALYTICS. **Web of Science**. Disponível em: <<https://clarivate.com/products/web-of-science/>>. Acesso em :08 nov. 2018.

COLOMBO, K.; ENDER, L.; BARROS, A. A. C. The study of biodiesel production using CaO as a heterogeneous catalytic reaction. **Egyptian Journal of Petroleum**, 2017. v. 26. p. 341-349.

CORDERO-RAVELO, V.; SCHALLENBERG-RODRIGUEZ, J. Biodiesel production as a solution to waste cooking oil (WCO) disposal. Will any type of WCO do for a transesterification process? A quality assessment. **Journal of Environmental Management**, 2018. v. 228, p. 117-129.

COSTA, G. C. B.; FERREIRA, M. de O. **Dificuldades na produção de biocombustíveis no Brasil**. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, pp. 1-7, 2018, Juazeiro, SOBER.

CUNHA, M. P. da. **Avaliação socioeconômica e ambiental de rotas de produção de biodiesel no Brasil, baseada em análise de insumo-produto**. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, p. 264, 2011.

CUNHA Jr., A.; FEDDERN, V.; DE PRÁ, M. C.; HIGARASHI, M. M.; DE ABREU, P.G.; COLDEBELLA, A. Synthesis and characterization of ethylic biodiesel from animal fat wastes. **Fuel**, v. 105, 228-234.

DAS, D.; DUTTA, P. A system dynamics framework for integrated reverse supply chain with three way recovery and product exchange policy. **Computers & Industrial Engineering**, 2013. v. 66, p. 720-733.

DAUD, N. M.; ABDULLAH, S. R. S.; HASAN, H. A.; YAAKOB Z. Production of biodiesel and its wastewater treatment technologies: A review. **Process Safety and Environmental Protection**, 2015. v. 94, n. 5, p. 487–508.

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

DELATORRE, A. B.; RODRIGUES, P.; AGUIAR, C.; ANDRADE, V.; ARÊDES, A.; PEREZ, V. Produção de biodiesel: considerações sobre as diferentes matérias-primas e rotas tecnológicas de processos. **Perspect Online**, 2011. v.1, p. 21–47.

DE OLIVEIRA, F. C.; LOPES, T. S. A.; PARENTE, V.; BERMANN, C.; COELHO, S. T. The Brazilian social fuel stamp program: Few strikes, many bloopers and stumbles. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019. v. 102, p. 121-128.

DE OLIVEIRA, F. C.; COELHO, S. T. History, evolution, and environmental impact of biodiesel in Brazil: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017. v. 75, p. 168-179.

DEMIRBAS, A. Importance of biodiesel as transportation fuel. **Energy Policy**, 2007, v. 35, p. 4661–4670.

DEMIRBAS, A. Potential Resources of Non-edible Oils for Biodiesel. **Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy**, out. 2009. v. 4, n. 3, p. 310-314.

DEMIRBAS, A.; BAFAIL, A.; AHMAD, W.; SHEIKH, M. Biodiesel production from non-edible plant oils. **Energy Exploration & Exploitation**, 2016. v. 34, n.2, p. 290-318.

DHARMA, S. ONG, H.; MASJUKI, H.; SEBAYANG, A.; SILITONGA, A. An overview of engine durability and compatibility using biodiesel - bioethanol - diesel blends in compression-ignition engines. **Energy Conversion and Management**, 2016. v. 128, p. 66-81.

ELSEVIER. **O que é ScienceDirect?** Disponível em: < <https://www.elsevier.com/pt-br/solutions/sciencedirect>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

ENWEREMADU, C. C.; MBARAWA, M. M. Technical aspects of production and analysis of biodiesel from used cooking oil-A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009. v. 13, p. 2205-2224.

EPE. **Balanco Energético Nacional 2018**. Empresa de Pesquisa Energética, 2019. Disponível em: < <http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acesso em 05 mar. 2019.

_____. **Modelo de Mercado da Micro e Minigeração Distribuída (4MD): Metodologia - Versão PDE 2029**. Empresa de Pesquisa Energética, 2020. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-488/NT_Metodologia_4MD_PDE_2029.pdf>. Acesso em: 03 mar. 2020.

ESPINOZA, A.; BAUTISTA, S.; NARVÁEZ, P. C.; ALFARO, M.; CAMARGO, M. Sustainability assessment to support governmental biodiesel policy in Colombia: A system dynamics model. **Journal of Cleaner Production**, jan. 2017. v. 141, p. 1145–1163.

FERNANDES, A. C. **“Dinâmica de Sistemas e Business Dynamics: tratando a complexidade no ambiente de negócios”**. In: Encontro Nacional de Engenharia de Produção, pp. 1-8, 2001, Salvador, Enegep.

FERNANDES L. A.; GOMES, J. M. M. Relatório de pesquisa nas Ciências Sociais: Características e modalidades de investigação. **ConTexto**, 2003. v. 3, n. 4, p. 1-23.

FIGUEIREDO, J. C. B. Estudo da difusão da tecnologia móvel celular no Brasil: uma abordagem com o uso de Dinâmica de Sistemas. **Prod. [online]**, 2009, vol.19, n.1, pp.230-245.

FINCO, M. V. A.; DOPPLER, W. The Brazilian biodiesel program and family farmers: what is

the social inclusion reality in the Brazilian savannah? **Pesquisa Agropecuária Tropical**, dez. 2010. v. 40, n. 4, p. 430–438.

FONTELLES, M. J.; SIMÕES, M. G.; FARIAS, S. H.; FONTELLES, R. G. S.. Scientific research methodology: Guidelines for elaboration of a research protocol. **Revista Paraense de Medicina**, 2009. v. 23, n. 3. p. 1-8.

FORRESTER, J. W. Counterintuitive Behavior of Social Systems. **SIMULATION**, 1971. v.16, n. 2, p. 61-76.

FOZER, D; SZIRAKY, F. Z.; RACZ, L.; NAGY, T.; TARJANI, A. J.; TOTH, A. J.; HAAZ, E.; BENKO, T.; MIZSEY, P.. Life cycle, PESTLE and Multi-Criteria Decision Analysis of CCS process alternatives. **Journal of Cleaner Production**, mar. 2017, v. 147, p. 75–85.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. Cambridge, U.K.: Productivity Press, 1961.

FRANCO, A. L. C.; LÔBO, I. P.; CRUZ, R. S. da. ; TEIXEIRA, C. M. L. L.; NETO, J. A. De. A.; MENEZES, R. S. BIODIESEL DE MICROALGAS: AVANÇOS E DESAFIOS. **Quim. Nova**, 2013. v.36, n. 3, p. 437- 448.

FRENCH, R.; CZERNIK, S. Catalytic pyrolysis of biomass for biofuels production. **Fuel Processing Technology**, 2009. v. 91, p. 25–32.

FUKUDA, H.; KONDO, A.; NODA, H. Biodiesel Fuel Production by Transesterification of Oils. **JOURNAL OF BIOSCIENCE AND BIOENGINEERING**, 2001. v. 92, n. 5, p. 405-416.

GASHAW, A.; GETACHEW, T.; TESHITA, A. A review on biodiesel production as alternative fuel. **J. For. Prod. Ind.**, 2015. v.4, p. 80-85.

GEBREMARIAM, S. N.; MARCHETTI, J. M. Economics of biodiesel production: Review. **Energy Conversion and Management**, 2018. v. 168, p. 75-85.

GEORGIADIS, P.; VLACHOS, D. The effect of environmental parameters on product recovery. **European Journal of Operational Research**, 2004. v. 157, p. 449-464.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GHELICHI, Z.; SAIDI-MEHRABAD, M.; PISHVAEE, S. A stochastic programming approach toward optimal design and planning of an integrated green biodiesel supply chain network under uncertainty: A case study. **Energy**, 2018. v. 156, p. 661-687.

GHISOLFI, V.; CHAVES, G. L. D. de; SIMAN, R. R.; XAVIER, L. H. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Management**, fev. 2017. v. 60, p. 14-31.

GÜNERALP, B.; SETO, K. C. Environmental impacts of urban growth from an integrated dynamic perspective: A case study of Shenzhen, South China. **Global Environmental Change**, 2008. v. 18, p. 720-735.

HALL, J.; MATOS, S.; SILVESTRE, B.; MARTIN, M. Managing technological and social uncertainties of innovation: The evolution of Brazilian energy and agriculture. **Technological Forecasting & Social Change**, 2011. v. 78. p. 1147-1157.

HECHT, S. B. Forests lost and found in tropical Latin America: the wordland "green revolution". **J. Peasant Stud**, 2011. v. 41, n. 5, p. 877-909.

IBGE. **Indicadores IBGE: estatística da produção pecuária**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2020. Disponível em: < <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=72380&view=detalhes>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

IPEA. **ESTATUTO DO INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA**. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA, 2019. Disponível em: < http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/170613_estatuto_ipea_2016.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2019.

IRENA. **Renewable Energy Employment by Country**. INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY, 2020. Disponível em: < <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Benefits/Renewable-Energy-Employment-by-Country>>. Acesso em: 15 fev. 2020.

JAHIRUL, M.; RASUL, M. G.; CHOWDHURY, A. A.; ASHWATH N. Biofuels Production through Biomass Pyrolysis - A Technological Review. **Energies**, nov. 2012, v. 5, n. 12, p. 4952–5001.

JANAUN, J.; ELLIS, N. Perspectives on biodiesel as a sustainable fuel. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010. v. 14, p. 1312-1320.

JONG, P. de; DARGAVILLE, R.; SILVER J.; UTEMBE S.; KIPERSTOK A.; TORRES E. A. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast electricity grid. **Applied Energy**, 2017. v. 195, p. 538-555.

JONKER, W. D. Biofuel Implications of a Green Economy Transition in the Western Cape Province of South Africa: A System Dynamics Modelling Approach to Biofuel. **Journal of Energy in Southern Africa**, 2015. v. 28, n. 1, p. 1-137.

KAMIMURA, A.; OLIVEIRA, A. DE; BURANI, G. F. Brazilian Family Farming Agriculture in the Biodiesel Production: A Portrait of Regional Possibilities. **Low Carbon Economy**, mar. 2011. v. 02, n. 01, p. 7–14.

KEE LAM, M.; TEONG LEE, K.; RAHMAN MOHAMED, A. Homogeneous, heterogeneous and enzymatic catalysis for transesterification of high free fatty acid oil (waste cooking oil) to biodiesel: A review. **Biotechnology Advances**, 2010. v. 28, p. 500–518.

KISS, F. E.; JOVANOVIĆ, M.; BOŠKOVIĆ, G. C. Economic and ecological aspects of biodiesel production over homogeneous and heterogeneous catalysts. **Fuel Processing Technology**, 2010. v. 91, p. 1316–1320.

KHAN, M. I.; SHIN, J. H.; KIM, J. D. The promising future of microalgae: current status challenges, and optimization of a sustainable and renewable industry for biofuels, feed, and

other products. **Microbial Cell Factories**, 2018, v. 17, p. 1-21.

KHAN, T. M. Y.; ATABANI, A. E.; BADRUDDIN, I. A.; BADARUDIN, A.; KHAYOON, M. S.; TRIWAHYONO, S. Recent scenario and technologies to utilize non-edible oils for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014. v. 37, p. 840–851.

KNOTHE, G.; STEIDLEY, K. R. A comparison of used cooking oils: A very heterogeneous feedstock for biodiesel. **Bioresource Technology**, 2009. v. 100, p. 5796–580.

KOH, M. Y.; IDATY, T.; GHAZI, M. A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011a. v. 15, p. 2240–2251.

KOH, M. Y.; IDATY, T.; GHAZI, M. A review of biodiesel production from *Jatropha curcas* L. oil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2011 b. v. 15, p. 2240–2251.

LEE, K. T.; LIM, S.; PANG, Y. L.; ONG, H. C.; CHONG, W. T.; . Integration of reactive extraction with supercritical fluids for process intensification of biodiesel production: Prospects and recent advances. **Progress in Energy and Combustion Science**, dez. 2014. v. 45, p. 54–78.

LEUNG, D. Y. C.; WU, X.; LEUNG, M. K. H. A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. **Applied Energy**, 2009. v. 87, p. 1083-1095.

LI, F.; DONG, S.; LI, S.; LI, Z.; LI, Y. Measurement and scenario simulation of effect of urbanisation on regional CO₂ emissions based on UEC-SD model: A case study in Liaoning Province, China. **Chinese Geographical Science**, jun. 2015, v. 25, n. 3, p. 350–360.

LIU, H.; HUANG, Y.; YUAN, H.; YIN, X.; WU, C. Life cycle assessment of biofuels in China: Status and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** , 2018. v. 97. p. 301-322.

MA, F.; HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Tecnology**, 1999. v. 70. p. 1-15.

MARCHETTI, J. M.; MIGUEL, V. U.; ERRAZU, A. F. Techno-economic study of different alternatives for biodiesel production. **FUEL PROCESSING TECHNOLOGY**, 2008. v. 89, p. 740-748.

MAHAJAN, V.; MULLER, E. M.; BASS, F. M. Difusion of new products: Empirical generalizations and managerail uses. **Marketing Science**, 1995, v. 14, n.3, part 2 of 2, p. 79-88.

MATH, M. C.; PREM KUMAR, S.; CHETTY, S. V. Technologies for biodiesel production from used cooking oil - A review. **Energy for Sustainable Development**, 2010. v. 14, p. 339-345.

MDA. **O que é o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB)?** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018. Disponível em: < <http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-biodiesel/o-que-%C3%A9-o-programa-nacional-de-produ%C3%A7%C3%A3o-e-uso-do-biodiesel-pnpb>>. Acesso em: 21 mar. 2019.

_____. **O que é a agricultura familiar?** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2020. Disponível em: <<http://vitrine.mda.gov.br/o-que-e-a-agricultura-familiar>>. Acesso em : 01 abr. 2020.

_____. **Cooperativismo.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2019. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-biodiesel/cooperativismo>>. Acesso em: 03 jun. 2019.

_____. **O Selo Combustível Social.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2019. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/sitemda/secretaria/saf-biodiesel/o-selo-combust%C3%ADvel-social>>. Acesso em: 05 jun. 2019.

_____. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel: inclusão social e desenvolvimento territorial, 2005.** Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2005. Disponível em: <http://www.mda.gov.br/sitemda/sites/sitemda/files/user_arquivos_64/Biodiesel_Book_final_Low_Completo.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2019.

MILANI, A., MONTEIRO, M., PIMENTEL, S.; Glass, V. **O Brasil dos Agrocombustíveis: os impactos das lavouras sobre a Terra, o Meio e a Sociedade.** Soja Mamona. 2008. 58p.

MOHAN, D.; PITTMAN, C.; STEELE, P. H. Pyrolysis of Wood/ Biomass for Bio-oil: A Critical Review. **Energy & Fuels**, 2006. v. 20, n. 3, p. 848-889.

MORECROFT, J. D. W. **Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach.** Second edition ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc, 2015.

MOSER, B. R. Biodiesel production, properties, and feedstocks. **In Vitro Cell Dev. Biol. Plant**, mar. 2009. v. 45, p. 229–266.

MARZOUK, M.; AZAB, S. Analyzing sustainability in low-income housing projects using system dynamics. **Energy and Buildings**, jan. 2017. v. 134, p. 143-153.

MULUGETTA, Y. Evaluating the economics of biodiesel in Africa. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2009. v. 13, p. 1592- 1598.

MUR, D. C. C. **Evolução e sustentabilidade do Programa de Biodiesel: um estudo comparativo entre o Brasil e a Colômbia.** Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) - Universidade de Brasília. Brasília, p. 191, 2019.

MUSANGO, J. K.; BRENT, A. C.; AMIGUN, B.; PRETORIUS, L.; MÜLLER, H. Technology sustainability assessment of biodiesel development in South Africa: A system dynamics approach. **Energy**, 2011.v. 36, n. 12, p. 6922–6940.

MUSANGO, J. K.; BRENT, A. C.; AMIGUN, B.; PRETORIUS, L.; MÜLLER, H.. A system dynamics approach to technology sustainability assessment: The case of biodiesel developments in South Africa. **Technovation**, 2012. v. 32, n. 11, p. 639–651.

NABAVI, E.; DANIELL, K. A.; NAJAFI, H. Boundary matters: the potential of system dynamics to support sustainability? **Journal of Cleaner Production**, JAN. 2017. v. 140, p. 312–323.

NAIM, M. M.; TOWILL, D. R. Establishing a Framework for Effective Materials Logistics Management. **The International Journal of Logistics Management**, jan. 1994. v. 5, n. 1, p. 81–88.

OLKIEWICZ, M.; TORRES, C. M.; JIMÉNEZ, L.; FONT, J.; BENGEOA, C. Scale-up and economic analysis of biodiesel production from municipal primary sewage sludge. **Bioresource Technology**, 2016. v. 214, p. 122-131.

PAG POUSA, G.; SANTOS, L.; SUAREZ Ñ, P. A. History and policy of biodiesel in Brazil. **Energy Policy**, 2007. v. 35, p. 5393–5398.

PETROBRÁS BIOCMBUSTÍVEL S.A. **Controlada de Petróleo Brasileiro S.A.** Disponível em:<<https://petrobras.com.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=8A19357668CECA4D0169C52BE42262D2>> Acesso em 15 dez. 2019.

PHAN, A. N.; PHAN, T. M. Biodiesel production from waste cooking oils. **Fuel**, dez. 2008. v. 87, p. 3490- 3496.

PRAMANIK, K. Properties and use of jatropha curcas oil and diesel fuel blends in compression ignition engine. **Renewable Energy**, fev. 2003. v. 28, p. 239-248.

QUDRAT-ULLAH, H.; SEONG, B. S. How to do structural validity of a system dynamics type simulation model: The case of an energy policy model. **Energy Policy**, maio. 2010. v. 38, n. 5, p. 2216–2224.

RACZ, L.; FOZER, D.; NAGY, T. Extensive comparison of biodiesel production alternatives with life cycle, PESTLE and multi-criteria decision analyses. **Clean Technologies and Environmental Policy**, nov. 2018, v. 20, n. 9, p. 2013–2024.

REIBSTEIN, D. J.; CHUSSIL, M. J. **Primeiro a lição, depois o teste: usando simulações para analisar e desenvolver estratégias competitivas**. DAY, George S.; REIBSTEIN, D. A dinâmica da estratégia competitiva. Rio de Janeiro: Campus, 1999.

REYERO, I.; ARZAMENDI, G.; GANDÍA, L. M. Heterogenization of the biodiesel synthesis catalysis: CaO and novel calcium compounds as transesterification catalysts. **Chemical Engineering Research and Design**, 2014. v. 92, p. 1519–1530.

RIBEIRO, E. C. B.; MOREIRA, A. C.; FERREIRA, L. M. D. F.; CÉSAR, A. S. da. Biodiesel and social inclusion: An analysis of institutional pressures between biodiesel plants and family farmers in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 2018, v. 204, p. 726–734.

RICHARSON, G. P. System dynamics, the basic elements of. **Complex Systems in Finance and Econometrics**, 2009. [s.d], p. 856–862.

RICHARDSON, G. P.; OTTO, P. Applications of system dynamics in marketing: Editorial. **Journal of Business Research**, 2008. v. 61, p. 1099-1101.

RUSIAWAN, W.; TJIPTOHERIJANTO, P.; SUGANDA, E.; DARMAJANTI, L. System Dynamics Modeling for Urban Economic Growth and CO₂ Emission: A Case Study of Jakarta, Indonesia. **Procedia Environmental Sciences**, 2015. v. 28, p. 330–340.

SAHAR, S. S.; IQBAL, J.; ULLAH, J.; BHATII, H. N.; NOUREN, S.; REHMAN, H.; NISAR, J.; IQBAL, M. Biodiesel production from waste cooking oil: An efficient technique to convert waste into biodiesel. **Sustainable Cities and Society**, 2018. v. 41, p. 220-226.

SALVI, B. L.; PANWAR, N. L. Biodiesel resources and production technologies - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, ago. 2012. v. 16, n. 6, p. 3680 - 3689.

SARMENTO, P. **Viabilidade econômica da produção de biodiesel na região sudeste de Mato Grosso**. Dissertação (Pós-graduação em Ciências) – USP. São Paulo, p.118. 2010.

SAUER, S. Soy expansion into the agricultural frontiers of the Brazilian Amazon: The agribusiness economy and its social and environmental conflicts. **Land Use Policy**, 2018. v. 79, p. 326-338.

SBQ. **Todo o óleo diesel para transportes recebe a adição de biodiesel no Brasil?** Superintendência de Biocombustíveis e de Qualidade de Produtos. Disponível em: <<https://esic.cgu.gov.br/sistema/Pedido/DetalhePedido.aspx?id=9lOfa28o9wM=>. Acesso em: 17 fev. 2020.

SCHADE, B.; WIESENTHAL, T. Biofuels: A model based assessment under uncertainty applying the Monte Carlo method. **Journal of Policy Modeling**, 2010. v. 33, p. 92-126.

SENGE, P. M.; FORRESTER, J. W. Tests for building confidence in system dynamics models. **System dynamics, TIMS studies in management sciences**, 1980. v. 14, p. 209–228.

SINGH, S. P.; SINGH, D. Biodiesel production through the use of different sources and characterization of oils and their esters as the substitute of diesel: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2010. v. 14. p. 200-216.

SINDIPEÇAS. **Relatório da frota circulante**. Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores, 2019. Disponível em: <https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante_Maio_2019.pdf> Acesso em: 10 fev. 2020.

SOUZA, A. P. F. de; COELHO, T. M.; SANTOS, R. E. dos. **Estudo da viabilidade de implantação de uma microusina produtora de biodiesel na microrregião de Campo Mourão- PR**. In: V IPCC - Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar. 2007.

STERMAN, J. D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. Nachdr. ed. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

STERZA, R. de L.; BRANDI, A. C. Comparação entre métodos numéricos: Runge-Kutta de quarta ordem e previsor-corretor. **Revista Eletrônica Paulista de Matemática**, dez. 2016. v. 7, p. 12-22.

SU, C.-H. Recoverable and reusable hydrochloric acid used as a homogeneous catalyst for biodiesel production. **Applied Energy**, 2013. v. 104, p. 503–509.

SUFIAN, M. A.; BALA, B. K. Modeling of urban solid waste management system: The case of Dhaka city. **Waste Management**, 2006. v. 27. p. 858-868.

SUKHOLTHAMAN, P.; SHARP, A. A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. **Waste Management**, 2016. v. 52. p. 50-61.

TALEBIAN-KIAKALAEH, A.; AMIN, N. A. S.; MAZAHERI, H. A review on novel processes of biodiesel production from waste cooking oil. **Applied Energy**, 2013. v. 104, p. 683-710.

TAN, S. X.; LIM, S.; ONG, H. C.; PANG, Y. L. State of the art review on development of ultrasound-assisted catalytic transesterification process for biodiesel production. **Fuel**, 2019. v. 235, p. 886-907.

TAN, Y.; JIAO, L.; SHUAI, C.; SHEN, L. A system dynamics model for simulating urban sustainability performance: A China case study. **Journal of Cleaner Production**, out. 2018. v. 199, p. 1107–1115.

THANH, L. T.; OKITSU, K.; SADANAGA, Y.; TAKENAKA, N.; MAEDA, Y.; BANDOW, H. Ultrasound-assisted production of biodiesel fuel from vegetable oils in a small scale circulation process. **Bioresource Technology**, 2009. v. 101, p. 639–645.

TRAN, T. T. V.; KAIPROMMARAT, S.; KONJPARAKAL, S.; REUBROYCHAROEN, P.; GUAN, G.; NGUYEN, M. H.; SAMART, C. Green biodiesel production from waste cooking oil using an environmentally benign acid catalyst. **Waste Management**, 2016. v. 52, p. 367-374.

TRAPPEY, A. J. C. et al. The analysis of renewable energy policies for the Taiwan Penghu island administrative region. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, jan. 2012. v. 16, n. 1, p. 958–965.

URIBE, R. A. M.; ALBERCONI, C. H.; TAVARES, B. A. **PRODUÇÃO DE BODIESEL A PARTIR DO SEBO BOVINO: VIABILIDADE ECONÔMICA E MÉTODOS DE PRODUÇÃO**. In: Congresso Nacional de Excelência em Gestão, Rio de Janeiro, p. 1- 19, 2014, CNEG.

VACCARO, G. L. R.; POHLMANN, C.; LIMA, A. C.; SANTOS, M. S. Dos.; SOUZA, C. B. De.; AZEVEDO, D. Prospective scenarios for the biodiesel chain of a Brazilian state. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, maio. 2010. v. 14, n. 4, p. 1263–1272.

VACCARO, G. L. R.; LONGHI, A.; MOUTINHO, M. H. C.; SCAVARDA, A.; LOPES, C. M.; REIS, A. N. Dos.; NUNES, F.; AZEVEDO, D. Interrelationship among actors in ethanol production chain as a competitive and sustainable factor: The case of associative production and family-farming

in southern Brazil. **Journal of Cleaner Production**, 2018. v. 196, p. 1239–1255.

VAFA-ARANI, H.; JAHANI, S.; DASHTI, H.; HEYDARI, J.; MOAZEN, S. A system dynamics modeling for urban air pollution: A case study of Tehran, Iran. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, ago. 2014. v. 31, p. 21–36.

VALENTE, A.; IRIBARREN, D.; DUFOUR, J. How do methodological choices affect the carbon footprint of microalgal biodiesel? A harmonised life cycle assessment. **Journal of Cleaner Production**, 2019. v. 207. p. 560-568.

VALLE, K. N. F. **Métodos numéricos de Euler e Runge-Kutta**. 2012. 40 f. Monografia (Especialização) - Programa de Pós-graduação em Matemática Para Professores Com Ênfase em Cálculo, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

VAN KASTEREN, J. M. N.; NISWORO, A. P. A process model to estimate the cost of industrial scale biodiesel production from waste cooking oil by supercritical transesterification. **Resources, Conservation and Recycling**, 2007. v. 50, p. 442–458.

VARÃO, L. H. R., SILVA, T. A. L.; ZAMORA, H. D. Z.; PASQUINI, D. Vantagens e limitações do sebo bovino enquanto matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. **HOLOS**, 2017, v. 07, p. 39-54.

VASCONCELOS, L. C. S. Da; NASCIMENTO, A. Q. Do; MOREIRA, M.C.; ZAMPARONI, C. A. G. P. A CHUVA ÁCIDA E A CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA NO ENSINO MÉDIO ACID RAIN AND GEOGRAPHIC CLIMATOLOGY IN MEDIUM SCHOOL. **Geo UERJ**, 2009. v. 2, n. 19, p. 44-78.

VENTANA SYSTEMS. **Free Downloads**, 2019. Disponível em: <<http://vensim.com/free-download/>>. Acesso em: 02 fev. 2019.

VYAS, A. P.; VERMA, J. L.; SUBRAHMANYAM, N. A review on FAME production processes. **Fuel**, 2009. v. 89, p. 1-9.

WIRJODIRDJO, B.; ASJARI, H. Y. Policy impact of the Indonesian Central Bank certificate related on loan interest rate to the demand growth of property. **Materials Science and Engineering**, 2018. v. 337, p. 1-9.

XU, J.; LI, X. Using system dynamics for simulation and optimization of one coal industry system under fuzzy environment. **Expert Systems With Applications**, set. 2011. v. 38, p. 11552–11559.

YUNUS KHAN, T. M.; ATABANI, A. E.; BADRUDDIN, I. A.; BADARUDIN, A.; KHAYOON, M. S.; TRIWAHYONO, S. Recent scenario and technologies to utilize non-edible oils for biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014. v. 37, p. 840-851.

YUSUF, N. N. A. N.; KAMARUDIN, S. K.; YAAKUB, Z. Overview on the current trends in biodiesel production. **Energy Conversion and Management**, 2011. v. 52, p. 2741–2751.

ZAGONEL, A. A.; CORBET, T. F. **Levels of Confidence in System Dynamics Modeling: A**

Pragmatic Approach to Assessment of Dynamic Models. In: International Conference of the System Dynamics Society, 24., 2006. Nijmegen, The Netherlands. Proceedings... Nijmegen: ISDC, 2006. p. 1-19.

ZHANG, Y.; DUBÉ, M. A.; McLEAN, D. D.; KATES, M. Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis. **Bioresource Technology**, 2003. v. 90, p. 229-240.

APÊNDICE A

Tabela 1 - Fator de conversão entre m³ e tep.

Combustível	m ³	tep
Diesel	1	0,98
Biodiesel	1	0,79

Fonte: EPE, 2020.

Tabela 2 – Fator de conversão entre Joule e tep.

Tep	Joule
$2,388 \times 10^{-11}$	1

Fonte: ANEEL, 2020.

Tabela 3 – Dados para geração de fator de emprego no mercado de biodiesel

Ano	Produção Biodiesel (m ³)	Produção Biodiesel (TJ)	Emprego (emprego/ano)	Fator de emprego (emprego/TJ)
2014	3.422.210	113.275	141.200	1,25
2015	3.937.269	130.314	162.600	1,25
2016	3.801.339	125.780	169.700	1,35
2017	4.291.294	142.330	202.000	1,42
2018	5.350.036	178.748	257.000	1,44
2019	5.900.000	195.678	285.998	1,46
Média Aritmética				1,36

Fonte: Autores.