



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL
EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

ELIVALDO LOZER FRACALLOSSI RIBEIRO

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA DINÂMICO-FUZZY PARA
ANÁLISE DE VIABILIDADE: UM ESTUDO DE CASO DO BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEO
DE PINHÃO MANSO

ILHÉUS-BA
2015

ELIVALDO LOZER FRACALLOSSI RIBEIRO

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA
DINÂMICO-FUZZY PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE: UM
ESTUDO DE CASO DO BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEO DE
PINHÃO MANSO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual de Santa Cruz, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Bruno Souza Oliveira

Coorientador: Prof. Dr. José Adolfo de Almeida Neto

ILHÉUS-BA
2015

R484 Ribeiro, Elivaldo Lozer Fracalossi.
Modelagem computacional de um Sistema Dinâmico-Fuzzy para análise de viabilidade: um estudo de caso do biodiesel a partir de óleo de pinhão manso/ Elivaldo Lozer Fracalossi Ribeiro. – Ilhéus: UESC, 2016. 75f.: il.
Orientador: Francisco Bruno Souza Oliveira.
Coorientador: José Adolfo de Almeida Neto.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Santa Cruz. Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional em Ciência e Tecnologia.
Inclui referências e apêndices.

1. Lógica difusa. 2. Lógica simbólica e matemática – Processamento de dados. 3. Biodiesel – Brasil. 4. Combustíveis – Brasil. 5. Pinhão manso. I. Oliveira, Francisco Bruno Souza. II. Almeida Neto, José Adolfo de. III. Título.

CDD – 511.3

ELIVALDO LOZER FRACALOSSO RIBEIRO

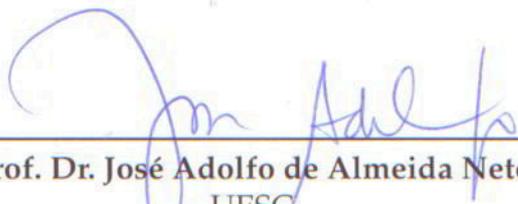
**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE UM SISTEMA
DINÂMICO-FUZZY PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE: UM
ESTUDO DE CASO DO BIODIESEL A PARTIR DE ÓLEO DE
PINHÃO MANSO**

Ilhéus-BA, 21/12/2015

Comissão Examinadora



Prof. Dr. Francisco Bruno Souza Oliveira
UESC
(Orientador)



Prof. Dr. José Adolfo de Almeida Neto
UESC
(Coorientador)



Prof. Dr. Paulo Eduardo Ambrósio
UESC



Prof. Dr. José André Villas Boas Mello
CEFET/RJ

Dedico: a Deus, aos meus pais e meu irmão,
aos meus familiares, a minha amada esposa
e aos meus amigos.

Agradecimentos

- A Deus, eu agradeço pela vida, pela saúde e pelas pessoas existentes na minha vida;
- Aos meus pais, Olivaldo e Elizabeth, e ao meu irmão, Elivelton, eu agradeço pelo carinho e por sempre acreditarem nos meus sonhos;
- A toda minha família, fisicamente próximos ou distantes, eu agradeço pelo afeto e pela atenção;
- Ao amor de minha vida e minha esposa, Adriadna, eu agradeço pelo amor, pela dedicação, pela compreensão, pelo incentivo e pela solidariedade;
- A todos os meus amigos, eu agradeço pela torcida e pelo companheirismo;
- À FAPESB, eu agradeço pelo auxílio financeiro;
- A todos os funcionários da UESC e do PPGMC, eu agradeço pelo suporte;
- A turma de 2014.1 do PPGMC, que antes eram meus colegas e hoje são meus amigos, eu agradeço pela cumplicidade e pela benevolência;
- A todos os professores do PPGMC, eu agradeço pelas informações partilhadas e por todas as contribuições;
- Ao BioMA, eu agradeço por toda cooperação, especialmente a Henrique Maranduba, que apesar de corintiano é gente boa, rs;
- Aos meus orientadores, Dr. Francisco Bruno e Dr. José Adolfo eu agradeço de forma especial por TUDO... agradeço pela paciência, pela amizade, por toda ajuda, pela confiança e pela oportunidade;
- Aos professores Dr. Eduardo Ambrósio e Dr. José André, eu agradeço pela disposição e pelas contribuições;
- E, a todos que não foram aqui citados, recebam minhas desculpas e meu muito obrigado.

“Bazinga!”

Dr. Sheldon L. Cooper

Modelagem computacional de um Sistema Dinâmico-Fuzzy para análise de viabilidade:
um estudo de caso do biodiesel a partir de óleo de pinhão manso

Resumo

Com a diminuição de recursos naturais e o aumento crescente da demanda por combustíveis fósseis, produções alternativas renováveis têm sido estudadas. Em consequência do elevado uso, tem-se a redução dos estoques de recursos naturais e o aumento crescente da demanda. Dentre os biocombustíveis, o biodiesel surge como potencial opção, uma vez que tem origem animal ou vegetal e possui teor energético próximo ao do diesel. No Brasil, várias oleaginosas podem ser utilizadas na produção do biodiesel, como pinhão manso, mamona, soja e dendê. Dentre as opções, o pinhão manso (*Jatropha curcas L.*) surge no cenário atual como uma oleaginosa promissora para o desenvolvimento de biodiesel, pois se adapta bem a regiões com baixa pluviosidade e possui ciclo de vida de até 40 anos com produção média de 2 t/ha. No entanto, quando comparamos biodieseis de rotas distintas, um fator importante é o monitoramento de toda a cadeia produtiva, que na sua essência contém incertezas. Desse modo, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo computacional como ferramenta de análise de viabilidade de produtos, levando em consideração as incertezas e o dinamismo presente no objeto de estudo. Utilizamos a Lógica Fuzzy para tratar os dados subjetivos ou incertos e os Sistemas Dinâmicos para lidar com a dinâmica do sistema. O modelo foi proposto de modo genérico para que o praticante, tendo seu conjunto de variáveis pertinentes ao estudo, possa utilizar e analisar seus dados a partir da análise de cenários. No estudo de caso, aplicamos o modelo construído para comparar o biodiesel de pinhão manso com outras alternativas, levando em consideração fatores (variáveis) importantes da produção, como Emissão de GEE, Custos e Demanda de Exergia Acumulada. Os resultados confirmaram o que a literatura específica vem mostrando, o propício cenário envolvendo o biodiesel a partir do óleo de pinhão manso, principalmente se comparado com fontes utilizadas para produção de biodiesel no Brasil. Portanto, o modelo desenvolvido pode servir como auxílio no desenvolvimento de políticas públicas transparentes, visto que trás contribuições para a matriz energética do país, agregando questões antes analisadas de modo isolado.

Palavras-chave: Lógica Fuzzy; Biodiesel; Pinhão manso; Modelagem Computacional.

Computational modeling of a Dynamic-Fuzzy System for feasibility analysis: a case study of biodiesel from jatropha oil

Abstract

With the depletion of natural resources and the increasing demand for fossil fuels, renewable alternative crops have been studied. As a result of high use, there is a reduction in natural resource stocks and the increasing demand. Among biofuels, the biodiesel arises as a potential option, since it has vegetable or animal origin and has close to the energy content of diesel. In Brazil, several oil can be used in biodiesel production, as jatropha, castor beans, soybeans and palm oil. Among the options, the *Jatropha curcas L.* arises in the current scenario as a promising oilseed for the development of biodiesel as it is well suited to regions with low rainfall and has life cycle of up to 40 years with an average output of 2 t/ha. However, when we compare biodiesels from different routes, an important factor is the monitoring of the entire production chain, which in essence contains uncertainties. Thus, the aim of this study was to develop a computer model as an analysis tool of product viability, taking into account the uncertainties and the present momentum in the subject matter. We use fuzzy logic to deal with the subjective or uncertain data and Dynamical Systems to handle the dynamics of the system. The model has been proposed in general terms for the practitioner, with its set of variables relevant to the study, you can display and analyze your data from scenario analysis. In the case study, we applied the model built to compare the jatropha biodiesel to other alternatives, taking into account factors (variables) important production, as GHG emission, costs and Exergy Accumulated Demand. The results confirmed what the literature has shown, the favorable scenario involving biodiesel from jatropha oil, especially when compared with sources used for biodiesel production in Brazil. Therefore, the developed model can serve as an aid in the development of transparent public policies, as back contributions to the country's energy matrix, adding issues before analyzed in isolation.

Keywords: Fuzzy Logic; Biofuel; Jatropha; Computational Modeling.

Lista de figuras

Figura 1 – Duas representações para um mesmo problema.	6
Figura 2 – Fluxograma que ilustra o processo envolvido na construção e simulação de um modelo dinâmico.	7
Figura 3 – Exemplo de um controlador cotidiano: fritar um ovo.	15
Figura 4 – Funcionamento de um controlador Fuzzy, bem como os módulos nele existentes.	15
Figura 5 – Resumo da modelagem envolvida na construção de uma variável linguística.	16
Figura 6 – Exemplos das diferentes saídas dos diferentes métodos de defuzzificação em dois casos distintos.	20
Figura 7 – Estrutura básica do AHP: para atingir uma meta elencamos várias variáveis que suportam algumas alternativas.	23
Figura 8 – Estrutura genérica do modelo proposto.	27
Figura 9 – Fluxograma da obtenção do biodiesel por meio da transesterificação.	34
Figura 10 – Limites do sistema e fluxograma linear da cadeia produtiva de biodiesel a partir do óleo de pinhão manso.	41
Figura 11 – Fluxograma que considera a cadeia produtiva como um processo dinâmico.	42
Figura 12 – Resumo do Controlador Fuzzy: SIF de Mamdani, 27 regras, 3 <i>inputs</i> e 1 <i>output</i> (cada <i>input</i> com 3 classificações e o <i>output</i> com 5).	45
Figura 13 – Resumo da função de pertinência do <i>input</i> Emissão de GEE.	46
Figura 14 – Resumo da função de pertinência do <i>input</i> Custo.	47
Figura 15 – Resumo da função de pertinência do <i>input</i> DExA.	47
Figura 16 – Resumo da função de pertinência do <i>output</i> Viabilidade.	47
Figura 17 – Visão geral do Controlador Dinâmico-Fuzzy.	50
Figura 18 – Comparativo das Emissões de GEE de diversas fontes energéticas.	50
Figura 19 – Detalhamento da Emissão de GEE do biodiesel de pinhão manso.	51
Figura 20 – Detalhamento da Etapa pós-plantio, considerando apenas as atividades com emissões diferentes de zero.	52
Figura 21 – Comparação do BE (em GJ/ha) e da RE do óleo de pinhão manso com outras oleaginosas.	52
Figura 22 – Superfícies que relacionam os <i>inputs</i> com o <i>output</i> para C_1	54
Figura 23 – Superfícies que relacionam os <i>inputs</i> com o <i>output</i> para C_2	55
Figura 24 – Primeiro nível da variável Emissão de GEE. Ilustra como os <i>inputs</i> foram desenvolvidos.	56
Figura 25 – Representação dos subsistemas envolvidos no dinamismo do modelo.	57

Lista de tabelas

Tabela 1 – Exemplo: nome, altura e conceito de alto para um grupo de amigos fictício	11
Tabela 2 – Principais t-normas e t-conormas	14
Tabela 3 – Principais implicações Fuzzy	14
Tabela 4 – Representação das classificações das variáveis analisadas para o cenário ambiental	25
Tabela 5 – Representação das classificações das variáveis analisadas	25
Tabela 6 – Valores dos Índices de Consistência Aleatória para o número de critérios	26
Tabela 7 – Resumo da reserva, produção, capacidade produtiva e consumo mundial de petróleo, no ano de 2013	31
Tabela 8 – Resumo das variações (em %) da reserva, produção, capacidade produtiva e consumo mundial de petróleo, do ano de 2013 com relação ao ano anterior	31
Tabela 9 – Características de algumas oleaginosas utilizadas para produção de biodiesel	36
Tabela 10 – Estudos envolvendo as principais oleaginosas utilizadas na produção do biodiesel	37
Tabela 11 – Algumas aplicações do pinhão manso	39
Tabela 12 – Representação das classificações das variáveis analisadas para o cenário econômico	46
Tabela 13 – Base de regras completa utilizada na modelagem do Controlador Dinâmico-Fuzzy, para C_1 e C_2	49
Tabela 14 – Simulações utilizando o Controlador Dinâmico-Fuzzy para 7 oleaginosas, incluindo o pinhão manso, para o cenário ambiental (C_1) e econômico (C_2)	53
Tabela 15 – Fator de Emissão de GEE por unidade de produto/serviço, considerando um ciclo de vida de 15 anos	71
Tabela 16 – Fator de DExA por unidade de produto/serviço, considerando um ciclo de vida de 15 anos	73
Tabela 17 – Emissões, Custos e DExA de cada subsistema, com base no esboço dinâmico e considerando um ciclo de vida de 15 anos	75

Lista de abreviaturas e siglas

°C	Graus Celsius
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AHP	<i>Analytic Hierarchy Process</i>
ANP	Agência Nacional de Petróleo
BE	Balço Energético
CI	Cálculo de Inconsistência
CO	Monóxido de Carbono
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO ₂ -eq	Dióxido de Carbono equivalente
COA	<i>Center of Area</i>
DEA	Demanda de Energia Acumulada
DExA	Demanda de Exergia Acumulada
dia ⁻¹	Por dia
Ex	Exergia
FIFO	<i>First In, First Out</i>
FOM	<i>First of maxima</i>
GEE	Gases do Efeito Estufa
GJ	Gigajoule
GUI	<i>Graphical User Interface</i>
ha	Hectare
ha ⁻¹	Por hectare
HC	Hexacloroetano
ICA	Índice de Consistência Aleatória
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo

ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
K	Graus Kelvin
kg	Quilograma
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
LOM	Last of maxima
m	Metro
MJ	Megajoule
MJ-eq	Megajoule equivalente
MOM	<i>Mean of Maximum</i>
NPK	Nitrogênio, Fósforo e Potássio
OPEC	<i>Organization of the Petroleum Exporting Countries</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PLT	Primeira Lei da Termodinâmica
RE	Relação Energética
SD	Sistemas Dinâmicos
SIF	Sistema de Inferência Fuzzy
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
t	Tonelada
TC	Taxa de Consistência
TSK	Takagi-Sugeno-Kang

Sumário

1 – Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Geral	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 Organização do trabalho	3
2 – Sistemas Dinâmicos	4
2.1 Apresentação	4
2.2 Conceitos básicos	4
2.3 Aplicações	8
3 – Lógica Fuzzy	10
3.1 Apresentação	10
3.2 Conjuntos Fuzzy	10
3.3 Controladores Fuzzy	15
3.3.1 Fuzzificação	16
3.3.2 Base de regras	16
3.3.3 Inferência Fuzzy	17
3.3.3.1 Método de Mamdani	17
3.3.3.2 Método de Larsen	18
3.3.3.3 Método de Tsukamoto	18
3.3.3.4 Método TSK	19
3.3.4 Defuzzificação	19
3.4 Aplicações	20
4 – Descrição e Modelagem	22
4.1 Softwares utilizados	22
4.2 <i>Analytic Hierarchy Process</i>	23
4.3 Construção do modelo genérico Dinâmico-Fuzzy	26
5 – Estudo de caso: Biodiesel de pinhão manso	29
5.1 Considerações iniciais	29
5.2 Combustíveis renováveis e não renováveis	29
5.2.1 Petróleo	29
5.2.2 Biocombustível	31
5.2.3 Biodiesel	33

5.2.4	Pinhão Manso	38
5.3	Exergia como indicador de impacto ambiental	39
5.4	Estudos preliminares	40
5.4.1	Inventário	40
5.4.2	Esboço do fluxograma linear e dinâmico	41
5.4.3	Emissão de GEE, BE e RE	42
5.5	Descrição da aplicação do modelo Dinâmico-Fuzzy	44
5.5.1	Descrição das variáveis analisadas	44
5.5.2	Cenários propostos	45
5.5.3	Fuzzificação	46
5.5.4	Base de Regras	47
5.5.5	Sistema de Inferência e Defuzzificação	49
5.5.6	Dinamismo do modelo	49
5.6	Resultados e Discussões	50
5.6.1	Emissão de GEE, BE e RE	50
5.6.2	Modelo Dinâmico-Fuzzy	53
6	– Considerações finais	58
6.1	Conclusões	58
6.2	Trabalhos Futuros	59
Referências	60
Apêndices	70
APÊNDICE A	– Inventário das Emissões de GEE (individual)	71
APÊNDICE B	– Inventário da DExA (individual)	73
APÊNDICE C	– Inventários de acordo com o modelo dinâmico	75

1 Introdução

1.1 Contextualização

Motivada pela escassez dos recursos fósseis, a necessidade da utilização de fontes alternativas de combustíveis está cada vez mais evidente. A demanda mundial de combustíveis tem sido atenuada graças ao crescente consumo de biocombustíveis, que em 2014 totalizava 10% (MATSUURA et al., 2010; MAITY et al., 2014). Dentre estes, o biodiesel, derivado de óleos vegetais ou de gordura residual animal, aparece no cenário atual como um dos biocombustíveis mais promissores, uma vez que pode ser utilizado em motores que operem em ciclo de diesel, com a vantagem de uma emissão menos poluente (FERREIRA; BORENSTEIN, 2007).

No Brasil diversos tipos de oleaginosas podem ser utilizados na produção de biodiesel (ARRUDA et al., 2004). Uma das alternativas, o pinhão-manso é uma espécie exótica que não foi completamente domesticada e somente nas últimas quatro décadas começou a ter alguns aspectos pesquisados (MATSUURA et al., 2010; SATO et al., 2009).

Diante da produção e do uso dos bicombustíveis, há uma discussão acerca da sustentabilidade ecológica, na qual se destaca: (i) monitoramento de toda cadeia de produção, que poderá ser avaliada com a metodologia da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); (ii) limites da regeneração dos recursos ambientais empregados; e (iii) utilização dos recursos naturais (ALMEIDA NETO et al., 2004).

Uma metodologia utilizada para determinar os impactos ambientais que são causados durante um procedimento é a ACV, ou *Life Cycle Assessment* (LCA). ACV tem como objetivo avaliar os encargos ambientais associados aos processos e produtos durante toda sua vida útil. Isso é feito através da identificação e quantificação da energia utilizada, materiais consumidos e emissões ao meio ambiente, avaliando o impacto desde a criação até o descarte final (HINZ et al., 2007). Essa metodologia segue o padrão definido pela *International Organization for Standardization* (ISO), através da ISO 14040 e da ISO 14044, que define todos os passos necessários para realização de estudos dessa natureza.

Além disso, a ACV pode ser utilizado em tomadas de decisão a cerca do melhor produto, pois as melhorias nos processos são analisadas ao longo da vida útil do processo ou serviço, afetando o seu desempenho ambiental (CALDEIRA-PIRES et al., 2002; GALDIANO, 2006).

No entanto, concordando com Arbault et al. (2014), a ACV nem sempre explicita as implicações causadas pelas interações do homem com o objeto de estudo. Assim,

três fatos devem ser analisados: (i) processos naturais influenciam uns aos outros; (ii) sistemas controlados por humanos usam os recursos naturais e geram resíduos (e/ou emissões) que podem afetar os ecossistemas; e (iii) o estado atual dos ecossistemas podem ser alterado por consequência de uma ação externa sob o mesmo.

Considerando os itens apresentados acima, seria necessária a introdução de uma perspectiva dinâmica, levando em consideração as influências que o sistema pode sofrer do ambiente externo e dos seus próprios subsistemas. Consequentemente, isso tornaria o modelo construído mais real, levando em consideração as inter-relações (*feedbacks*) entre dois ou mais subsistemas ao longo do tempo (ARBAULT et al., 2014). Em contraste, as abordagens adotadas pelos modelos atuais que utilizam a ACV, levam em consideração dados constantes, não sendo possível analisar o modelo sob a perspectiva dinâmica. Esse dinamismo não modelado pela ACV pode ser descrito a partir dos Sistemas Dinâmicos (SD) (ARBAULT et al., 2014).

SD é uma metodologia de modelagem e simulação desenvolvida com o intuito de elucidar e detalhar o entendimento a respeito de um determinado processo. Para isso, permite a simulação, análise e discussão acerca dos dados envolvidos, buscando entender a evolução de um sistema ao longo do tempo. Com isso, tornou-se uma útil ferramenta na tomada de decisão (FERREIRA; BORENSTEIN, 2007).

SD não tem como enfoque a análise de informações precisas em um dado instante de tempo. A finalidade da metodologia é avaliar as oscilações do sistema ao longo do tempo, analisando as tendências e levando em consideração fatores externos ao sistema modelado (FERREIRA; BORENSTEIN, 2007; FRANCO, 2005; NASCIMENTO et al., 2009).

Prata (2007) afirma que diversos tipos de SD são modelados através de equações diferenciais, pois através delas é possível representar as mudanças decorrentes das interações internas ou externas do modelo.

Porém, a análise de determinados sistemas é frequentemente dificultada pelo número e pela heterogeneidade dos resultados da avaliação de impactos, bem como pelas incertezas decorrentes dos dados, modelos e opções do praticante (BENETTO et al., 2008). Com isso, surge a necessidade de uma análise mais criteriosa. Assim, por tratar valores dinâmicos, os dados podem conter algum tipo de incerteza, que podem ser analisados a partir de um modelo matemático. Para tal, utilizaremos a Lógica Fuzzy, que é uma extensão da lógica convencional desenvolvida para lidar com o conceito de premissas parcialmente verdadeiras (BECAERT et al., 2006).

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

- Desenvolver um modelo computacional para análise de viabilidade de produtos.

1.2.2 Específicos

- Propor um modelo genérico para estimar a viabilidade de um produto;
- Aplicar o modelo para analisar a viabilidade do biodiesel de pinhão manso;
- Avaliar o potencial da aplicação do modelo por meio da comparação do biodiesel de pinhão manso com outras oleaginosas.

1.3 Organização do trabalho

Essa dissertação foi dividida em seis capítulos: (i) Introdução; (ii) Sistemas Dinâmicos; (iii) Lógica Fuzzy; (iv) Descrição e Modelagem; (v) Estudo de caso: Biodiesel de pinhão manso; e (vi) Considerações finais.

O capítulo 1, com intuito de demonstrar a relevância do estudo, contextualiza os temas envolvidos. E após isso consta os objetivos e como o relatório final foi estruturado.

Os dois próximos capítulos contêm uma revisão de literatura sobre temas e métodos necessários no desenvolvendo da pesquisa. No capítulo 2 se encontra uma revisão sobre os Sistemas Dinâmicos incluindo algumas aplicações reais e, finalizando a fundamentação teórica, no capítulo 3 é apresentada a Lógica Fuzzy, também com algumas aplicações reais.

O capítulo 4 descreve toda a metodologia empregada, desde as ferramentas utilizadas até como foi realizado os estudos preliminares e o Controlador Dinâmico-Fuzzy, detalhando cada etapa envolvida.

No capítulo 5 há a aplicação do modelo desenvolvido em um estudo de caso. A viabilidade do Biodiesel a partir do óleo de pinhão manso e estimada e comparada com outras oleaginosas.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões da pesquisa, além de uma relação de trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos como uma forma de tornar o modelo mais próximo da realidade.

2 Sistemas Dinâmicos

2.1 Apresentação

Criado nos anos 50 pelo professor americano Jay W. Forrester, SD é uma metodologia que foi inicialmente desenvolvida com intuito de ajudar gerentes de produção e logística a entender melhor os processos aos quais estavam envolvidos. Com o passar do tempo, tornou-se uma valiosa ferramenta de auxílio em tomadas de decisões. Vale ressaltar que, de modo geral, essa metodologia não está interessada em informações de um determinado instante, mas sim ao longo do tempo, analisando se o processo é estável ou instável, se tende a crescer, declinar ou oscilar (FERREIRA; BORENSTEIN, 2007).

SD são sistemas suscetíveis à influência do ambiente ao seu redor, ao contrário dos estáticos que são estritamente fechados com relação às mudanças externas. Para isso, SD podem ser modelados por meio de equações diferenciais, uma vez que, por seu intermédio, é possível representar a mudança de estados por uma taxa de variação entre as variáveis envolvidas, isto é, a modelagem da dinâmica do processo é feita através da evolução dos estados ao longo do tempo (PRATA, 2007; FALEIROS; YOUNEYAMA, 2002).

2.2 Conceitos básicos

De acordo com Chiavenato (2004), a Teoria Geral dos Sistemas afirma que a compreensão de um modelo não pode ser feita a partir da análise dos elementos de forma isolada, isto é, o entendimento dos sistemas ocorre apenas quando se considera o sistema de forma global, considerando todas as conexões dos seus subsistemas. De modo breve, a Teoria Geral dos Sistemas se baseia em três premissas:

- (i) Os sistemas existem dentro de sistemas¹;
- (ii) Os sistemas são abertos²;
- (iii) As funções de um sistema dependem de sua estrutura³.

Formalmente, um sistema por ser descrito como uma coleção de componentes⁴ que foram agrupados por meio de uma ou mais dependência, de modo que, dentre

¹Todo sistema é um subsistema de um sistema maior.

²Todo sistema realiza troca com o meio ambiente, através de entradas e saídas.

³Não faz sentido analisar uma variável de forma isolada, sem considerar o contexto.

⁴Um componente é qualquer variável envolvida no sistema

os elementos do conjunto, existam relações de causa e efeito, com um determinado objetivo (MONTEIRO, 2006).

Assim sendo, os sistemas podem ser classificados em estáticos ou dinâmicos. Um sistema é estático se dada uma entrada $u(t)$, a saída $y(t)$ depende unicamente da entrada atual (FALEIROS; YOUNEYAMA, 2002). Por outro lado, um sistema é dito dinâmico quando a grandeza de algum elemento do sistema varia em função do tempo. Por exemplo: a situação financeira de uma família é um sistema, e os gastos com vestuário é um sistema dinâmico (MONTEIRO, 2006).

A importância de determinar a evolução das variáveis ao longo do tempo se justifica pois, nem sempre o sistema modelado de fato existe, o objetivo pode ser tentar explicar o comportamento de algum modelo já existente e o teste experimental pode ser caro e/ou perigoso. Desse modo, o objetivo dos modelos dinâmicos é prever o funcionamento de um sistema ou explicar como um já existente opera, para isso é necessário conhecer detalhadamente o que deseja estudar, bem como o fluxo de informações (MONTEIRO, 2006).

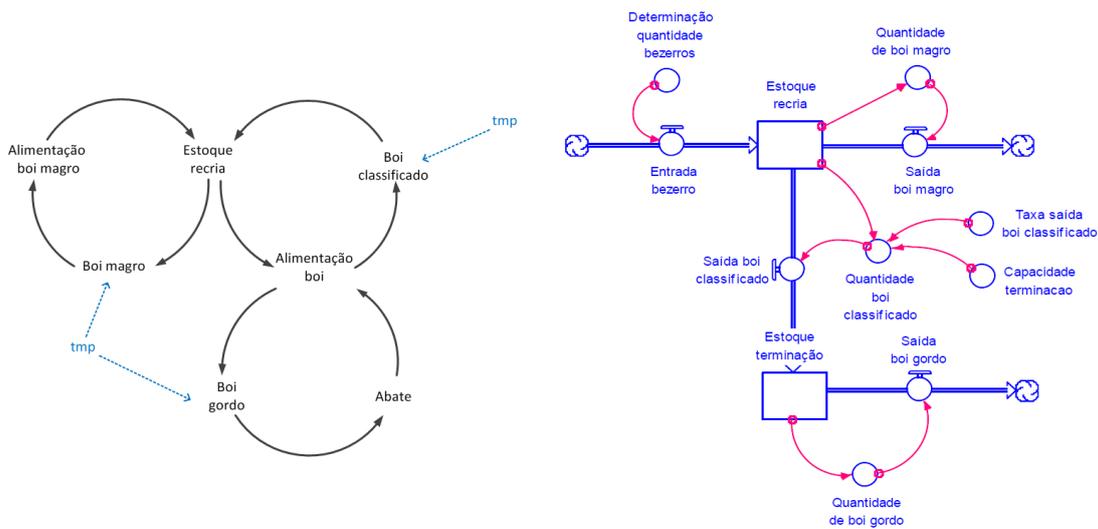
De modo geral, conforme destaca Monteiro (2006), um SD inclui:

- (i) Um espaço de estados (também chamado de estado de fases): onde as variáveis do modelo representam os possíveis estados do sistema;
- (ii) O tempo: que pode ser discreto⁵ ou contínuo⁶;
- (iii) Leis de evolução: expressões que descrevem o comportamento do sistema, isto é, a mudança dos estados.

Para esta compreensão, utiliza-se basicamente dois tipos de representação: diagrama causal (ou diagrama de enlace causal) e diagrama de estoque e fluxo (FAULIN, 2004). O primeiro pode ser visto como um rascunho, onde se busca, sem se importar com os detalhes, apenas entender o funcionamento do sistema e como ocorre o fluxo das variáveis (FAULIN, 2004). Posteriormente, o rascunho é “traduzido” para algum software e, nessa segunda etapa, as variáveis são quantificadas e as prováveis decisões são modeladas (MUNIZ et al., 2007). O diagrama causal é caracterizado pela simplicidade de representação, por outro lado o diagrama de estoque e fluxo é caracterizado pela possibilidade de quantificar as relações existentes entre os componentes do sistema (visto que os diagramas causais descrevem apenas as variáveis de modo qualitativo) (FAULIN, 2004; MUNIZ et al., 2007). A Figura 1(a) ilustra um diagrama causal, enquanto 1(b) demonstra o mesmo exemplo a partir do diagrama de estoque e fluxo.

⁵Um SD é de tempo discreto se o tempo t é um número inteiro. Geralmente, $t \in \mathbb{Z}_+$, isto é, t é um número inteiro não-negativo.

⁶Um SD é de tempo contínuo se o tempo t é um número real. Geralmente, $t \in \mathbb{R}_+$, isto é, t é um número real não-negativo.



(a) Exemplo de diagrama causal (b) Exemplo de diagrama de estoque e fluxo

Figura 1 – Duas representações para um mesmo problema.

Fonte: Muniz et al. (2007)

Através dos SD, Saito et al. (1999) destacam a possibilidade, e a importância, da simulação de um mesmo modelo de várias formas diferentes, como por exemplo o aumento de uma determinada variável, funcionando como um verdadeiro laboratório, onde as ideias podem ser testadas com riscos minimizados.

Dentre as terminologias comumente utilizadas em modelos dinâmicos, destacamos: (i) Variável: parâmetro utilizado no sistema; (ii) Recurso: material que se deseja simular; (iii) Informação: meio (não físico) pelo qual o recurso é transformado, explicitando a relação entre dois elementos; (iv) Estoque: acúmulo da quantidade de recurso ao longo do tempo; (v) Fluxo: funções que determinam o comportamento do modelo; e (vi) Fonte externa: alguma fonte de recurso não considerada no escopo do projeto (MUNIZ et al., 2007).

Um elemento importante e que está diretamente relacionado com as fontes externas são os atrasos (ou *delays*). Alguns destes podem gerar oscilações ou instabilidade no modelo, desse modo um fator importante é o tempo com que o atraso ocorre, isto é, o tempo total que um dado percorre um fluxo completamente (partindo do fluxo de saída e chegando no fluxo de entrada). Podemos exemplificar, como o tempo que uma pessoa demora entre uma decisão e uma ação tomada (STERMAN, 2001).

De modo geral, existem dois tipos de atrasos: de informação e de materiais. Os atrasos de informação retratam um refinamento progressivo de observações ou intuições. É o tempo necessário para que o pesquisador absorva as novas informações do estudo ou se convença de algum fato já conhecido. Já os atrasos de materiais são aqueles relacionados com o fluxo físico que os materiais percorrem no modelo, podendo

ser de duto (*pipeline*) ou de primeira ordem. Os atrasos de materiais de duto consideram que os atrasos são simples, pois sempre respeitam a ideia de que o primeiro elemento a entrar será o primeiro a sair (FIFO: *First In, First Out*). Por outro lado, os de primeira ordem consideram que não há uma relação tão clara entre as ordens de saídas e entradas, não respeitando a regra do FIFO (FRANCO, 2005; STERMAN, 2001).

Forrester (1968) descreveu que os SD são construídos da seguinte forma:

1. Definição do problema: etapa onde é definido o problema a ser resolvido;
2. Descrição da situação: nessa fase o pesquisador utiliza sua percepção para construir, de modo intuitivo, uma descrição do sistema e do problema a ser modelado;
3. Modelo matemático: o modelo mental (da etapa anterior) é traduzido em termos matemáticos, como por exemplo, através de uma equação que represente uma variável do sistema;
4. Simulação: momento em que todo o modelo matemático é inserido em um software específico, capaz de realizar a simulação dinâmica;
5. Interpretação: o pesquisador analisa o que se pode entender com o sistema, obtendo assim possíveis conclusões a partir da simulação;
6. Repetição do experimento: por fim, nesse estágio alguma variável pode ser alterada, de modo a verificar as consequências que as mudanças impulsionam no resultado obtido.

A Figura 2 ilustra a sequência lógica das etapas que constituem os projeto dinâmicos.

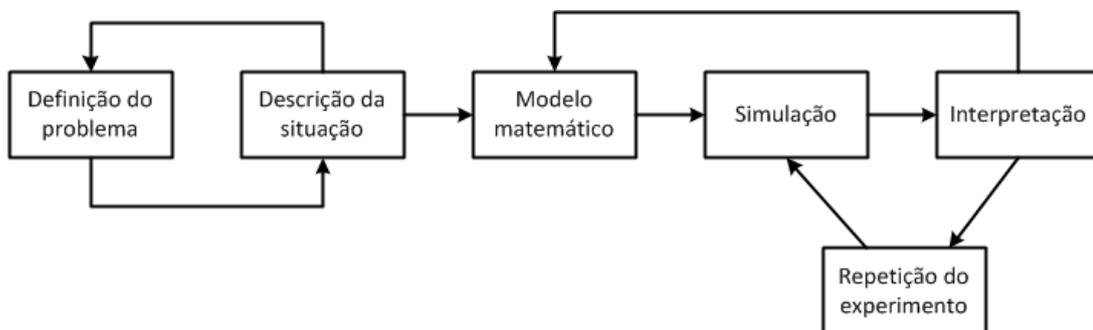


Figura 2 – Fluxograma que ilustra o processo envolvido na construção e simulação de um modelo dinâmico.

Fonte: Adaptado de Forrester (1968)

Na construção dos SD é fundamental a compreensão total e minimalista do funcionamento da cadeia produtiva, bem como o fluxo com que ocorrem a troca de

informações, permitindo que valores sejam ajustados para uma simulação mais realista (SCRAMIM; BATALHA, 1999).

2.3 Aplicações

Atualmente, SD são utilizados nas mais diversas áreas:

- (i) Nascimento et al. (2009) aplicaram a metodologia para analisar a viabilidade econômica da co-geração de energia em uma usina a partir do bagaço de cana-de-açúcar;
- (ii) Safdarnjad et al. (2015) apresentam várias estratégias úteis para a obtenção de uma solução inicial de um SD, acarretando na otimização do mesmo;
- (iii) Franco (2005) avaliou a dinâmica econômica na terceirização da logística de uma empresa, objetivando elaborar políticas que visem maximizar os lucros e alcançar retornos positivos desejados;
- (iv) Arbault et al. (2014) descreveram como SD poderiam integrar a ACV, de modo a tornar a metodologia mais próxima da realidade;
- (v) Ferreira e Borenstein (2007) realizaram um estudo acerca da viabilidade da produção de biodiesel a partir de soja, levando em consideração a mistura do biodiesel no petróleo (exigência do governo), e analisando os níveis de exportação dessa produção;
- (vi) Rehan et al. (2015) apresentaram um roteiro de como implementar SD na gestão estratégica de companhias hídricas como ferramentas de planejamento financeiro;
- (vii) Oliveira e Pacheco (2004) analisaram, sob o ponto de vista dos SD, o problema da dinâmica de ambientes produtivos e do efeito chicote, que pode ser exemplificado como uma amplificação da demanda ao longo da cadeia de suprimentos, modelado a partir de Transformadas de Laplace;
- (viii) Franco et al. (2009) estudaram a produção de biocombustíveis na Colômbia, considerando a capacidade das refinarias, oferta e demanda;
- (ix) Faulin (2004) aplicou a metodologia para desenvolver uma ferramenta que auxiliasse a tomada de decisão do produtor de hortaliças sobre a comercialização do seu produto;
- (x) Muniz et al. (2007) analisaram a viabilidade econômica da integração da lavoura com a pecuária, levando em conta a aleatoriedade das variáveis;

- (xi) [Saito et al. \(1999\)](#) evidenciaram a importância da simulação como ferramenta de apoio a tomada de decisão dentro de uma empresa ou cadeia;
- (xii) [Chen e Billings \(1992\)](#) abordam questões relacionadas com a identificação de SD discreto utilizando redes neurais;
- (xiii) [Nikolaou et al. \(2015\)](#) desenvolveram um modelo dinâmico para investigar as relações entre os riscos das alterações climáticas, o desempenho financeiro e os processos operacionais das empresas;
- (xiv) [Huang et al. \(2006\)](#) desenvolveram um modelo dinâmico para caracterizar a dinâmica viral a longo prazo, por intermédio de um conjunto de equações diferenciais não-lineares;
- (xv) [Ngo e Shin \(2015\)](#) propuseram novas técnicas para analisar os ganhos em SD não-lineares representados por modelos fuzzy.

3 Lógica Fuzzy

3.1 Apresentação

Também conhecida como lógica nebulosa ou difusa, e desenvolvida por Lofti A. Zadeh na década de 60, Lógica Fuzzy é um dos modelos mais bem sucedidos para o desenvolvimento de sistemas que precisam do controle de processos incertos. Atualmente, é aplicada nas ciências ambientais, medicina, engenharias, entre outras áreas (SANDRI; CORREA, 1999).

Brevemente descrita como uma extensão da Lógica Clássica (ou convencional), a Lógica Fuzzy foi concebida com foco em aumentar a confiança das informações qualitativas, de modo a tornar as informações mais reais. Com isso, criou-se a ideia de “verdade parcial”, uma vez que modela fielmente dados imprecisos, como por exemplo, informações ambientais (dados essencialmente imprecisos) (BECAERT et al., 2006; BENETTO et al., 2008). Em termos conceituais, a Lógica Fuzzy difere dos dois princípios básicos da Lógica Clássica: não-contradição⁷ e terceiro excluído⁸ (ANTUNES, 2006).

Assim, uma vez que a mente humana manipula conceitos subjetivos (como cheio, vazio, alto, baixo, etc.) (ZADEH, 1997), é evidente a quantidade de situações reais que a Lógica Clássica não consegue modelar (MISSIO, 2008).

3.2 Conjuntos Fuzzy

Na Lógica Clássica, dado um conjunto A e um elemento x , pode-se afirmar que $x \in A$ ou que $x \notin A$. No entanto, na prática existem diversos problemas que essa relação de pertinência não é tão direta assim. Por exemplo, suponha um conjunto $B = \{ y \mid y \text{ é próximo de } 0 \}$, com $B \subset \mathbb{R}$. Agora, imaginemos que: se $y_1 = 0,01$, $y_1 \in B$? Por outro lado, se $y_2 = 0,9$, $y_2 \in B$? Como as repostas a respeito dessas pertinências não são óbvias, fica claro que não é característica da Lógica Clássica levar em consideração as incertezas das informações. Com isso, a Lógica Fuzzy surge como alternativa, uma vez que associa à imprecisão dos dados níveis de “pertencimento”. Em outras palavras, poderíamos dizer que $y_1, y_2 \in B$ com diferentes graus de pertinência (BARROS, 1992; MISSIO, 2008).

Formalmente, um conjunto clássico A , $A \subset U$, pode ser representado por sua

⁷Pelo princípio da não-contradição, dada uma proposição p qualquer, temos que: se p é verdadeira, então $\neg p$ (a negação de p) é falsa, e vice-versa.

⁸Pelo princípio do terceiro excluído, dada uma proposição p qualquer, temos que: ou p é verdadeira, ou $\neg p$ (a negação de p) é verdadeira, não existindo uma terceira opção.

função característica, conforme a Equação 1.

$$\chi_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Com isso, Zadeh (1965) flexibilizou a função característica, expandindo-a para a Lógica Fuzzy, criando a ideia de grau de pertinência, fazendo com que um elemento pertença parcialmente a um conjunto. Desse modo, um conjunto Fuzzy B , $B \subset U$, pode ser definido como uma função $\mu_A : U \rightarrow [0, 1]$, chamada de função de pertinência (MISSIO, 2008; ZADEH, 1965).

Consoante Sandri e Correa (1999), a função $\mu_A(x)$ indica o grau de presença de x em A , em outras palavras aponta “o quanto” $x \in A$. Assim:

- se $\mu_A(x) = 1$: então x está totalmente presente em A ;
- se $\mu_A(x) = 0$: então x está totalmente ausente em A ;
- se $0 < \mu_A(x) < 1$: então x está parcialmente em A , com grau $\mu_A(x)$.

Dentre as maneiras de representar conjuntos Fuzzy, destacamos duas: (i) quando finito, através de tabelas; e (ii) quando contínuos, por meio da sua própria função de pertinência (JAFELICE et al., 2005).

Assim, o conjunto das alturas de um grupo de amigos pode ser descrito conforme a Tabela 1. Pode-se supor que um observador externo atribuiu conceitos a todos: 0 indica que a pessoa não é nada alta e 1 que a pessoa é muito alta (JAFELICE et al., 2005).

Tabela 1 – Exemplo: nome, altura e conceito de alto para um grupo de amigos fictício

Amigo	Altura (m)	Conceito
Antônio	1,65	0,6
Bruno	1,72	0,7
Carlos	1,51	0,0
Diego	1,98	1,0

Por outro lado, se o conjunto for contínuo, sua representação pode ser sua própria função de pertinência, e as mais comuns são as lineares por partes (trapezoidal ou triangular), quadrática e gaussiana (JAFELICE et al., 2005). A Equação 2 descreve uma possível função que represente os dados mostrados na Tabela 1. A vantagem desta

é que não deixa margem para ambiguidade (NAVARES, 2007).

$$f(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq 1,55 \\ x - 1, & \text{se } x > 1,55 \text{ e } x < 1,9 \\ 1, & \text{se } x \geq 1,9 \end{cases} \quad (2)$$

Vale salientar que um conjunto clássico pode ser visto como um conjunto Fuzzy específico, normalmente chamado de “crisp”. Para isso, basta considerar apenas os valores de $\mu_A(x)$ nos extremos (SANDRI; CORREA, 1999).

Assim como nos clássicos, pode-se realizar operações sobre os conjuntos Fuzzy. Conforme conceitua Zadeh (1965), sejam A e B dois conjuntos Fuzzy, ambos contidos no universo U , podemos definir as operações:

1. $A = B \iff \mu_A(x) = \mu_B(x), \forall x \in U$
2. $A \subset B \iff \mu_A(x) \leq \mu_B(x), \forall x \in U$
3. $A \cup B = \mu_{A \cup B}(x) = \max \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \forall x \in U$
4. $A \cap B = \mu_{A \cap B}(x) = \min \{ \mu_A(x), \mu_B(x) \}, \forall x \in U$
5. $\bar{A} = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x), \forall x \in U$

De acordo com Barros (1992) e Zadeh (1965), dado os conjuntos Fuzzy A , B e C contidos no mesmo universo U , sobre as operações de união, intersecção e complemento incidem as seguintes propriedades:

1. $A \cup B = B \cup A$
2. $A \cap B = B \cap A$
3. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
4. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
5. $A \cup A = A$
6. $A \cap A = A$
7. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
8. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
9. $A \cap \emptyset = \emptyset$
10. $A \cup \emptyset = A$

11. $A \cap U = A$

12. $A \cup U = U$

13. Leis de DeMorgan

a) $\overline{(A \cap B)} = \overline{A} \cup \overline{B}$

b) $\overline{(A \cup B)} = \overline{A} \cap \overline{B}$

Dada duas ou mais proposições clássicas, elas podem se relacionar por meio de conectivos lógicos. Esses relacionamentos ocorrem, principalmente, porque cada proposição tem um valor bem definido (0 ou 1), fazendo com que a expressão resultante seja precisa. Esses conectores são conhecidas como negação (\neg , não), conjunção (\wedge , e), disjunção (\vee , ou) e implicação (\rightarrow , se... então...). No entanto, as proposições Fuzzy não são tão definidas como as clássicas, pois um valor pode parcialmente pertencer a um conjunto⁹. Assim, surgiu a necessidade de “adaptar” para os conjuntos Fuzzy os conectivos clássicos, feito através da negação Fuzzy, t-norma, t-conorma e da implicação Fuzzy, que correspondem, respectivamente, a negação, conjunção, disjunção e a implicação (DESCHRIJVER et al., 2004; GUPTA; QI, 1991; MISSIO, 2008).

De acordo com Bellucci (2009), a negação Fuzzy pode ser definida como $\eta : [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, desde que satisfaça:

1. $\eta(0) = 1$ e $\eta(1) = 0$

2. $\eta(\eta(x)) = x$

Segundo Lee (2005), a operação t-norma pode ser definida como $\Delta : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, desde que satisfaça:

1. $1 \Delta x = x$

2. $x \Delta y = y \Delta x$

3. $x \Delta (y \Delta z) = (x \Delta y) \Delta z$

4. se $x \leq y$ e $z \leq w$ então $x \Delta z \leq y \Delta w$

Ainda de acordo com o mesmo autor, de forma análoga, a t-conorma pode ser definida como $\nabla : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, desde que satisfaça:

1. $0 \nabla x = x$

⁹Por exemplo: $\mu_{Alto}(p)=0,7$ pode indicar que a pessoa p pertence ao conjunto das pessoas altas com grau de pertinência 0,7.

2. $x \nabla y = y \nabla x$
3. $x \nabla (y \nabla z) = (x \nabla y) \nabla z$
4. se $x \leq y$ e $z \leq w$ então $x \nabla z \leq y \nabla w$

Podemos observar que o operador \min ($\Delta(x, y) = \min \{x, y\} = x \wedge y$) é uma t-norma e \max ($\nabla(x, y) = \max \{x, y\} = x \vee y$) é uma t-conorma. Logo, as t-normas e t-conormas se mostram úteis na base teórica dos sistemas Fuzzy pois generalizam os conceitos de união, intersecção e complemento (MISSIO, 2008).

Por sua vez, o operador de implicação Fuzzy pode ser definido como $I : [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, e é utilizado nas regras do tipo *Se <premissas> então <conclusão>*. Desse modo, se A e B são conjuntos Fuzzy, com $\mu_A(x) : X \rightarrow [0, 1]$ e $\mu_B(y) : Y \rightarrow [0, 1]$, então a relação $A \rightarrow B$ é dada por $\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = I(\mu_A(x), \mu_B(y))$ (SANDRI; CORREA, 1999).

A negação mais utilizada é a definida por Zadeh: $\eta(x) = 1 - x$. A Tabela 2 elenca algumas t-normas e t-conormas, enquanto a Tabela 3 dispõe de algumas implicações.

Tabela 2 – Principais t-normas e t-conormas

Nome	t-norma (Δ)	t-conorma (∇)
Zadeh	$\min(x, y)$	$\max(x, y)$
Probabilista	$x \cdot y$	$x + y - xy$
Lukasiewicz	$\max(x + y - 1, 0)$	$\min(x + y, 1)$
Weber	$\begin{cases} x, & \text{se } y = 1 \\ y, & \text{se } x = 1 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$	$\begin{cases} x, & \text{se } y = 0 \\ y, & \text{se } x = 0 \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Fonte: Sandri e Correa (1999)

Tabela 3 – Principais implicações Fuzzy

Nome	Implicação
Kleene-Dienes	$\max(1 - x, y)$
Lukasiewicz	$\min(1 - x + y, 1)$
Rescher-Gaines	$\begin{cases} 1, & \text{se } x \leq y \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
Brower-Gödel	$\begin{cases} 1, & \text{se } x \leq y \\ y, & \text{caso contrário} \end{cases}$
Reichenbach	$1 - x + xy$
Zadeh-Wilmott	$\max(1 - x, \min(x, y))$
Mamdani	$\min(x, y)$
Larsen	$x \cdot y$

Fonte: Sandri e Correa (1999)

3.3 Controladores Fuzzy

Um controlador Fuzzy descreve o funcionamento de um sistema por meio de opiniões de especialistas, ao invés de simplesmente executar ações. De funcionamento semelhante ao pensamento humano, um controlador Fuzzy trata diretamente informações imprecisas e, por meio de um conjunto de prováveis ações (base de regras), determina a melhor saída possível, dada certas condições iniciais (BARROS; BASSANEZI, 2006; GOMIDE et al., 1995). No nosso cotidiano podemos imaginar um controlador para fritar um ovo, ilustrado pela Figura 3. Nesse sentido, uma questão subjetiva é inserida, pois o “Frito?” depende de vários fatores, por exemplo o estado final da gema, que deverá ser respondida pelo usuário do objeto da ação, no caso o especialista.

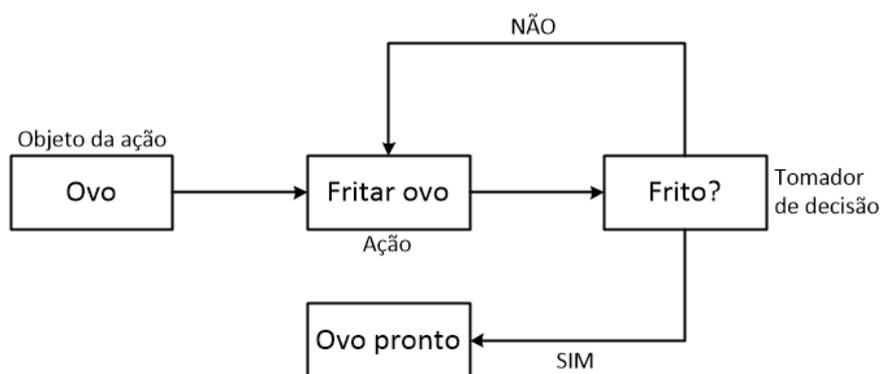


Figura 3 – Exemplo de um controlador cotidiano: fritar um ovo.

Como explicita a Figura 4, um controlador Fuzzy é composto por quatro módulos: (i) Fuzzificação; (ii) Base de regras; (iii) Inferência Fuzzy; e (iv) Defuzzificação (BARROS; BASSANEZI, 2006).

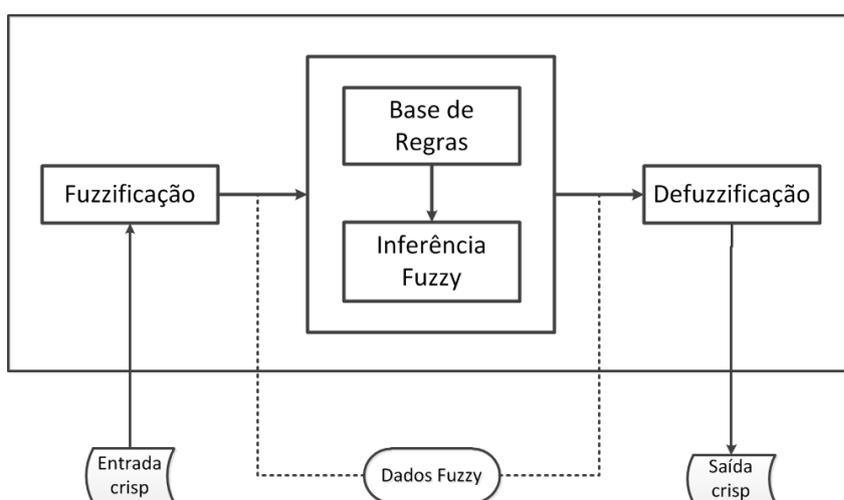


Figura 4 – Funcionamento de um controlador Fuzzy, bem como os módulos nele existentes.

Fonte: Adaptado de Barros e Bassanezi (2006)

3.3.1 Fuzzificação

Esse módulo é responsável por transformar as entradas do sistema (que são crisp) em conjuntos Fuzzy, de acordo com seus respectivos domínios (graus de pertinência), isto é, transformar os dados de entrada em variáveis linguísticas. É nele que se justifica a importância dos especialistas (BARROS; BASSANEZI, 2006; MISSIO, 2008).

Amplamente utilizada no processo de fuzzificação, variável linguística pode ser definida como um conjunto de quatro elementos (V, U, T, X) , onde: V é o nome da variável linguística, U é o universo onde V está definida, T é o conjunto de valores linguísticos que a variável V pode assumir e X é a função de pertinência que define V (JAFELICE et al., 2005; SANDRI; CORREA, 1999).

Um exemplo genérico pode ser baseado na classificação das temperaturas corporais. Supondo que um médico (nesse caso, o especialista) descreveu quais temperaturas são consideradas para que um indivíduo esteja sem febre ou com febre discreta, moderada, elevada ou extrema. Nesse caso, a quádrupla (V, U, T, X) é composta por: (i) nome da variável (V): Febre; (ii) universo (U): temperaturas entre 34 e 43 °C; (iii) conjunto dos valores linguísticos (T): *Sem febre*, *Febre discreta*, *Febre moderada*, *Febre elevada* e *Febre extrema*; e (iv) a função de pertinência (X) que descreve a variável. Essa modelagem pode ser resumida pela Figura 5 conforme as temperaturas descritas por Lopez e Laurentys-Medeiros (2004). De acordo com Sandri e Correa (1999), vale reforçar que o grau com que uma temperatura t satisfaz a variável linguística V é dada pela pertinência de t em V , que por sua vez é dada por $\mu_V(t)$.

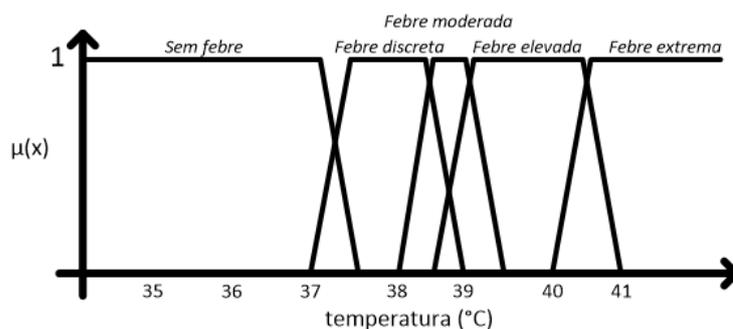


Figura 5 – Resumo da modelagem envolvida na construção de uma variável linguística.

Fonte: Adaptado de Lopez e Laurentys-Medeiros (2004)

3.3.2 Base de regras

Como o nome sugere, o objetivo desse módulo é caracterizar a estratégia adotada no sistema modelado, por meio de um conjunto de regras. Conforme dito, as regras são do tipo *Se <premissas> então <conclusão>*. A primeira parte (*premissas*, ou antecedente) é composta por uma ou mais condições que correspondem aos graus de pertinência,

calculados durante o processo de fuzzificação. A parte final (*conclusão*, ou consequente) contém ações que vão definir o comportamento do controlador modelado. É importante que existam tantas regras quantas forem necessárias para mapear totalmente as combinações dos termos das variáveis, garantindo que uma regra seja ativada para qualquer conjunto de entrada (JAFELICE et al., 2005; MISSIO, 2008). Assim sendo, a base de regras sustenta a definição da relação Fuzzy do modelo, refletindo na produção uma saída para cada entrada (BARROS; BASSANEZI, 2006).

Suponha que um controlador Fuzzy seja composto: (i) pelas variáveis linguísticas de entrada “Febre” (visto anteriormente) e “Idade”; e (ii) pela variável linguística de saída “Preocupação”. Podemos exemplificar algumas das regras que poderão compor o conjunto:

R_1 : Se \langle Febre = Sem febre e Idade = baixa \rangle então \langle Preocupação = nenhuma \rangle

R_2 : Se \langle Febre = Febre discreta e Idade = média \rangle então \langle Preocupação = média \rangle

R_3 : Se \langle Febre = Febre discreta e Idade = alta \rangle então \langle Preocupação = alta \rangle

R_4 : Se \langle Febre = Febre extrema e Idade = alta \rangle então \langle Preocupação = altíssima \rangle

3.3.3 Inferência Fuzzy

Essa etapa é responsável por processar os dados de entrada e as regras, resultando uma¹⁰ ação (conclusão). É por meio dessa fase que é feita a tomada de decisão. Para isso, existem alguns métodos, e este determina qual regra será ativada dado um conjunto de entradas (BARROS; BASSANEZI, 2006). O método de inferência define quais t-normas, t-conormas e regras de inferência são utilizadas para traduzir matematicamente as sentenças da base de regras (BELLUCCI, 2009).

Os métodos diferem entre si na escolha da implicação Fuzzy, da t-norma e da t-conorma (CORDON, 2011). Dentre os métodos, Lee (2005) destaca o de Mamdani, de Larsen, de Tsukamoto e o TSK (Takagi-Sugeno-Kang).

3.3.3.1 Método de Mamdani

Mamdani propôs esse método utilizando: (i) a aplicação do min (\wedge) para todas as condições *Se \langle premissas \rangle então \langle conclusão \rangle* de cada regra; (ii) a t-norma do min para a conjunção (isto é, na implicação Fuzzy); e (iii) a t-conorma do max para a disjunção, que tem a função de conectar todas as regras da base (BARROS; BASSANEZI, 2006; JAFELICE et al., 2005). Em outras palavras, Lee (2005) descreve que essa estratégia

¹⁰Quando várias regras inferem a mesma saída, os resultados são agregados por meio de alguma operação matemática.

utiliza a operação do min como implicação Fuzzy e o operador max-min na composição de cada regra.

Conforme Lee (2005), as regras são da seguinte forma R_i : *Se $\langle a \text{ é } A_i \text{ e } b \text{ é } B_i \text{ e } \dots \text{ e } w \text{ é } W_i \rangle$ então $\langle z \text{ é } Z_i \rangle$* , com $i = 1, 2, \dots, n$ (onde n é o total de regras). E assim sucessivamente, tantas quantas forem necessárias as regras para mapear todo o conjunto de dados.

Ainda de acordo com o mesmo autor, a Equação 3 descreve o método e pode ser vista por

$$\mu_M(x, u) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{R_i}(x, u)) = \max_{1 \leq i \leq r} [\mu_{A_j}(x) \wedge \mu_{B_j}(u)] \quad (3)$$

onde A_j e B_j os subconjuntos fuzzy da regra j e sendo r o número de regras que compõem a base de regras.

3.3.3.2 Método de Larsen

O método de Larsen é bastante semelhante ao de Mamdani, com a forma geral das regras idêntica. No entanto, adota o operador produto (\cdot) ao invés do min como inferência Fuzzy (condições das regras) e como a t-norma (SANDRI; CORREA, 1999). A abordagem faz uso do produto na implicação Fuzzy e do operador max-produto na composição de cada regra, conforme Equação 4 (LEE, 2005).

$$\mu_M(x, u) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{R_i}(x, u)) = \max_{1 \leq i \leq r} [\mu_{A_j}(x) \times \mu_{B_j}(u)] \quad (4)$$

3.3.3.3 Método de Tsukamoto

A tática de Tsukamoto difere de Mamdani e Larsen pois o consequente de cada regra é representado por um conjunto Fuzzy com uma função de pertinência monotônica¹¹. Assim, as regras são do tipo R_i : *Se $\langle a \text{ é } A_i \text{ e } b \text{ é } B_i \text{ e } \dots \text{ e } w \text{ é } W_i \rangle$ então $\langle z \text{ é } Z_i \rangle$* , com $i = 1, 2, \dots, n$ (onde n é o total de regras), no entanto $\mu_{Z_i}(z)$ é uma função monotônica (LEE, 2005).

Ainda conforme Lee (2005), como resultado do processo, a saída inferida de cada regra é definida como um valor crisp de acordo com a “força de disparo” da regra. O retorno total se obtém como média ponderada de cada regra, evitando assim a etapa que será definida posteriormente: a defuzzificação.

¹¹Sejam $A \subset \mathbb{R}$ e $f : A \rightarrow \mathbb{R}$ uma função real de uma variável, definida por $y = f(x)$. Desse modo, $\forall x_1, x_2 \in A$, com $x_1 < x_2$, a função f é dita: (i) crescente, sempre que $f(x_1) < f(x_2)$; (ii) decrescente, sempre que $f(x_1) > f(x_2)$; (iii) não-crescente, sempre que $f(x_1) \geq f(x_2)$; e (iv) não-decrescente, sempre que $f(x_1) \leq f(x_2)$. Assim, f é monótona em A se for crescente, decrescente, não-crescente ou não-decrescente em A .

3.3.3.4 Método TSK

Esse método foi proposto por Takagi, Sugeno e Kang e as diferenças deste para o de Mamdani estão na forma de escrever o consequente de cada regra e no processo de defuzzificação. Nessa técnica, a saída de cada regra é uma função das variáveis de entrada. Desse modo, temos que as regras são da forma R_i : *Se $\langle a \text{ é } A_i \text{ e } b \text{ é } B_i \text{ e } \dots \text{ e } w \text{ é } W_i \rangle$ então $\langle z \text{ é } f_i(a, b, \dots, w) \rangle$* , com $i = 1, 2, \dots, n$ (onde n é o total de regras), e sendo $f_i(a, b, \dots, w)$ a função polinomial da regra R_i (BARROS; BASSANEZI, 2006; LEE, 2005).

Silva (2011) narra que a saída geral do sistema é dada por uma média ponderada, conforme a equação:

$$u = g(a, b, \dots, w) = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j \cdot f_j(a, b, \dots, w)}{\sum_{j=1}^n \omega_j} = \frac{\sum_{j=1}^n \omega_j \cdot u_j}{\sum_{j=1}^n \omega_j} \quad (5)$$

onde os pesos ω_j são dados por $\omega_j = \mu_{A_i}(a) \Delta \mu_{B_i}(b) \Delta \dots \Delta \mu_{W_i}(w)$, e Δ é uma t-norma. O peso ω_j e a contribuição da regra R_j para o resultado final. Os casos mais comuns de t-normas são o produto e o min.

3.3.4 Defuzzificação

Geralmente, um sistema Fuzzy tem como resultado um conjunto Fuzzy. Assim deve-se escolher um método para defuzzificar a saída (Fuzzy) e obter um número real (crisp) que a represente, ou seja, a defuzzificação é um procedimento que representa um conjunto Fuzzy por meio de um número real. A interface de defuzzificação faz o inverso feito na fuzzificação, mas em estudos onde os resultados podem ser dados por valores linguísticos essa etapa não é necessária (JAFELICE et al., 2005; MISSIO, 2008).

Para realizar essa tarefa existem alguns métodos. Porém, infelizmente não há um procedimento que determine a escolha da melhor estratégia de defuzzificação a ser utilizada. A escolha deve ocorrer com base na aplicação (LEE, 2005). Dentre as técnicas mais utilizadas estão: Primeiro dos máximos (FOM - *First of maxima*), Último dos máximos (LOM - *Last of maxima*), Média dos máximos (MOM - *Mean of Maximum*) e Centro de área (COA - *Center of Area*).

Os mais simples de todos são os métodos FOM e LOM. FOM encontra o primeiro ponto entre os valores que têm os maiores graus de pertinência, enquanto LOM retorna o último deles (LEEKWIJCK; KERRE, 1999; SANDRI; CORREA, 1999).

Já MOM, calcula a média de todos os valores de saída que tenham os maiores

graus de possibilidade (LEE, 2005). A regra é dada pela equação abaixo:

$$MOM(B) = \frac{\sum_{i=1}^n u_i}{n} \tag{6}$$

onde u_i são os elementos de maior pertinência do conjunto Fuzzy B , que são n .

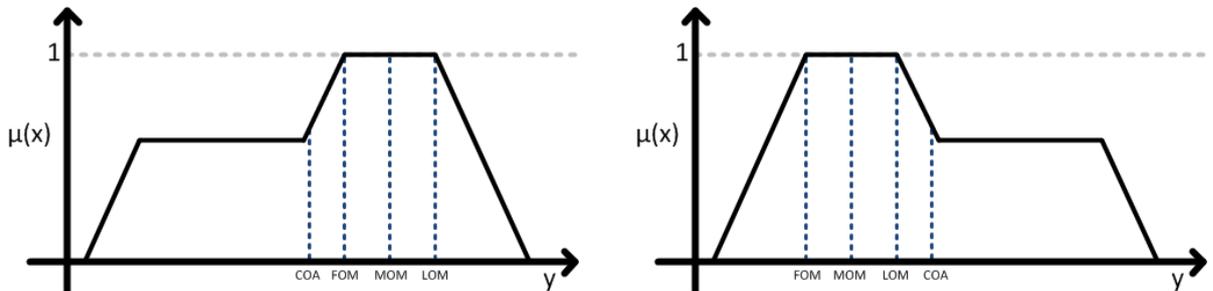
Também conhecido como Centro de massa, Centroide ou Centro de gravidade, o método COA funciona de forma semelhante a uma média ponderada para uma distribuição de dados. Ele retorna a média das áreas de todas as figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto Fuzzy (LEE, 2005; BARROS; BASSANEZI, 2006; JAFELICE et al., 2005; MISSIO, 2008).

Para um domínio discreto, o método COA é representado pela Equação 7:

$$COA(B) = \frac{\sum_{i=1}^n u_i \mu_B(u_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_B(u_i)} \tag{7}$$

onde u_i são os elementos de maior pertinência do conjunto Fuzzy B , que são n .

Visando exemplificar a diferença nos resultados gerados pelos métodos de defuzzificação, a Figura 6 resume, em uma só imagem, qual seria o resultado para cada método, considerando disposições distintas.



(a) Ordem dos resultados para os métodos de defuzzificação. Da esquerda para a direita: COA, MOM, FOM e LOM.

(b) Ordem dos resultados para os métodos de defuzzificação. Da esquerda para a direita: FOM, MOM, LOM e COA.

Figura 6 – Exemplos das diferentes saídas dos diferentes métodos de defuzzificação em dois casos distintos.

Fonte: Adaptado de Barros e Bassanezi (2006), Sandri e Correa (1999), Jafelice et al. (2005), Missio (2008)

3.4 Aplicações

Como listado a seguir, vários estudos utilizam como metodologia a Lógica Fuzzy, utilizada desde aplicações teóricas até no desenvolvimento de um produto a ser

industrializado.

- (i) [Reznik \(1997\)](#) cita uma panela de arroz (*Panasonic®/National® Fuzzy Logic*) que tem o cozimento controlado por um processo Fuzzy e uma máquina para fazer chá (*National® Deluxe Electric Fuzzy Logic*) que utiliza a metodologia;
- (ii) [Leite et al. \(2007\)](#) analisaram um provável serviço para avaliação de um ambiente de TV digital, utilizando Fuzzy;
- (iii) [Fernandez et al. \(2003\)](#) apresentaram uma implementação para políticas de gerenciamento com Lógica Fuzzy objetivando a melhoria na qualidade de serviço;
- (iv) [Antunes \(2006\)](#) avaliou riscos na auditoria, incluindo na análise aspectos nebulosos;
- (v) [Ganga et al. \(2011\)](#) pesquisaram sobre o desempenho de cadeias de suprimentos usando Lógica Fuzzy;
- (vi) [Navares \(2007\)](#) estimou, por meio da Lógica Fuzzy, o estado de conservação do uso de terras na Amazônia Ocidental, utilizando um besouro específico;
- (vii) [Missio \(2008\)](#) desenvolveu modelos de equações diferenciais (integrados a Lógica Fuzzy e métodos probabilísticos) para estudo da febre aftosa em bovinos;
- (viii) [Ponciano et al. \(2011\)](#) analisaram o habitat dos frangos por meio de conceitos difusos;
- (ix) [Benetto et al. \(2008\)](#) propuseram uma versão modificada do NAIADE (método que analisa a ACV por meio da probabilidade) com auxílio da Lógica Fuzzy;
- (x) [Becaert et al. \(2006\)](#) apresentaram uma ferramenta baseada em Fuzzy para interpretar informações qualitativas da ACV;
- (xi) [McBratney e Odeh \(1997\)](#) ilustraram a aplicação dos conjuntos difusos para análise do solo;
- (xii) [Stumm \(2005\)](#) apresentou um sistema Web inteligente, baseado na Lógica Fuzzy, para monitoração alimentar;
- (xiii) [Marques et al. \(2005\)](#) elaboraram um guia de auxílio na enfermagem obstétrica, especificamente para amniotomia, utilizando uma formulação Fuzzy;
- (xiv) [Dias e Barros \(2005\)](#) relataram sobre o uso dos controladores Fuzzy na solução de equações diferenciais ordinárias;
- (xv) [Sousa \(2005\)](#) explorou a utilização da Lógica Fuzzy em sistemas de controle de tráfego.

4 Descrição e Modelagem

4.1 Softwares utilizados

O projeto proposto foi desenvolvido por meio do software Matlab, abreviatura para *Matrix Laboratory*, na versão R2013a (8.1.0.604). De acordo com [Castro \(2003\)](#), a ferramenta é um ambiente de manipulação algébrica com apresentação gráfica intuitiva, disponível para uma variedade de plataformas. Quanto a licença de uso, é um software comercial, desenvolvido pela *The MathWorks, Inc.*

Apesar de comercial, o Matlab apresenta algumas vantagens que facilitam a criação e manipulação de modelos (justificando sua alta popularidade no meio acadêmico), dentre elas: (i) facilidade de manipular matrizes; (ii) ampla documentação (*help*); (iii) saídas gráficas e/ou animadas; (iv) facilidade na criação algoritmos; e (v) vasta biblioteca, envolvendo funções em diversas áreas, como Química, Ciências Biológicas, Física, Matemática (álgebra, equações diferenciais, estatística, etc.) ([SALVIANO FILHO, 2009](#)).

Ainda para o mesmo autor, apesar de não citado, uma das principais vantagens do Matlab são os *toolboxes*. Um *toolbox* pode ser entendido como um pacote de funções predefinidas por terceiros, que são acopladas à aplicação original. A biblioteca externa (conjunto de *toolboxes*) pode ser atualizada à medida que novas funcionalidades são adicionadas. Dentre os *toolboxes* disponíveis, dois foram utilizados nesse estudo: *Simulink* e *Fuzzy Logic Toolbox*.

Conforme descrição da própria desenvolvedora, *Simulink* é um ambiente de diagrama de blocos para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos, lineares ou não lineares, discretos ou contínuos no tempo. Para isso, oferece interface gráfica ao usuário (GUI - *Graphical User Interface*) intuitiva, bibliotecas personalizáveis e uma documentação robusta e consistente. Pode-se por exemplo: criar um sistema de embreagem automotiva, estudar a dinâmica da asa de um avião ou analisar o efeito que a oferta monetária acarreta na economia ([MATHWORKS, 2014](#)).

[Mathworks \(2015\)](#) descreve *Fuzzy Logic Toolbox* como uma ferramenta para análise e concepção de sistemas baseados na lógica difusa. Também por intermédio de uma GUI intuitiva, esse *toolbox* fornece um conjunto de funções necessárias na implementação de um processo Fuzzy, incluindo fuzzificação, defuzzificação, base de regras e a inferência Fuzzy.

Dentre as principais características do *Fuzzy Logic Toolbox* estão: (i) criar e editar sistemas Fuzzy; (ii) permitir a integração de modelos Fuzzy com simulações do *Simulink*;

e (iii) a possibilidade de arquivos .c interagirem com sistemas nebulosos construídos no Matlab. No entanto, o *toolbox* dispõe, como sistema de inferência, apenas o método de Mamdani e o de Sugeno, o que não pode ser alterado pelo usuário, acarretando assim em uma desvantagem (SIVANANDAM et al., 2007).

4.2 Analytic Hierarchy Process

Desenvolvido pelo matemático Thomas L. Saaty, AHP (*Analytic Hierarchy Process*) tem a finalidade de dar suporte em tomadas de decisões complexas, escalonando critérios de categorias distintas e de difícil comparação (VAIDYA; KUMAR, 2006). Conforme Forman (1998), a técnica é baseada em cinco elementos:

- Atributos: são os critérios (variáveis) que se deseja comparar;
- Correlação binária: para cada critério, é realizado sua comparação com os outros, isto é, é quantificado se o critério em questão é preferível ou indiferente ao outro;
- Escala fundamental: cada critério, com base na correlação binária, recebe um valor numérico de prioridade;
- Hierarquia: as escalas são hierarquizada em ordem de preferência;
- Cálculo da inconsistência: por fim, verifica-se a consistência dos dados.

A Figura 7 destaca a hierarquia envolvida na aplicação do AHP: para atingir uma meta (objetivo), escolhem-se os critérios a serem analisados e, dada a ordem de preferência, as alternativas são quantificadas. O método transforma as comparações, muitas vezes subjetivas, em valores numéricos que podem ser comparados. Os resultados do processo são os pesos de cada critério, permitindo hierarquização das variáveis.

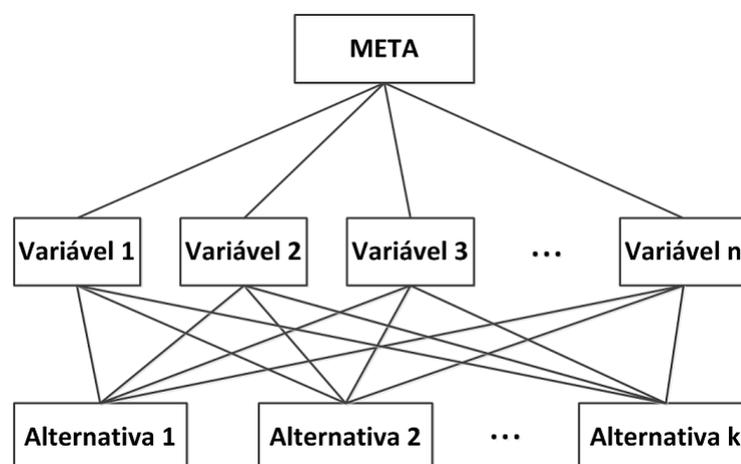


Figura 7 – Estrutura básica do AHP: para atingir uma meta elencamos várias variáveis que suportam algumas alternativas.

O estudo de caso proposto, é baseado em dois cenários: ambiental e econômico. Em ambos os casos, o AHP foi utilizado para determinar os pesos de cada variável. De modo a exemplificar o uso da ferramenta, e para tornar o processo mais transparente, será descrito o passo-a-passo utilizado para encontrar os pesos dos critérios considerados no cenário ambiental (no outro cenário o raciocínio é análogo).

O primeiro passo é determinar os critérios (variáveis) a serem analisados. Neste caso, consideramos três: Emissão de GEE (Emissão), Custos de produção (Custo) e Demanda de Exergia Acumulada (DExA).

A segunda etapa deve-se correlacionar binariamente as variáveis critérios, isto é, comparar dois a dois os critérios, atribuindo uma qualificação. Podemos fazer isso atribuindo valores pré-definidos. Assim, dado dois critérios x e y , podemos dizer que sua relação é:

- 1, para indicar que x é tão importante quanto y ;
- 3, para indicar que x é um pouco mais importante que y ;
- 5, para indicar que x é muito mais importante que y ;
- 7, para indicar que x é bastante mais importante que y ;
- 9, para indicar que x é extremamente mais importante que y .

Vale destacar que: (i) os valores intermediários (2, 4, 6 e 8) podem ser utilizados para “suavizar” mais o método; (ii) se temos, por exemplo, que a relação entre x e y é 5 (indicando que x é muito mais importante que y), necessariamente devemos ter, por questões de coerência, que a relação entre y e x é $1/5$ (ou 0,2), descrevendo que y é muito menos importante que x ; e (iii) a relação entre uma variável com ela mesma é sempre 1.

Dado um estudo com n variáveis, e após montar uma matriz $n \times n$ com todas as combinações, serão necessários $n(n - 1)/2$ julgamentos. Isso pois, a diagonal principal da matriz deve receber o valor 1 (indicando que uma variável é tão importante quanto ela mesma) e, supondo que $a_{ij} = q$, tem-se de imediato que $a_{ji} = 1/q$ (garantindo que se x é bastante mais importante que y , deve-se ter que y é bastante menos importante que x).

Como resultado da classificação, temos a Tabela 4, que correlaciona os critérios aos pares conforme a opinião dos especialistas, que nesse caso foram integrantes do Grupo de Bioenergia e Meio Ambiente da Universidade Estadual de Santa Cruz.

Tabela 4 – Representação das classificações das variáveis analisadas para o cenário ambiental

	Emissão	Custos	DExA
Emissão	1	3	3
Custos	0,33	1	1
DExA	0,33	1	1
SOMA	1,67	5	5

O valor numérico de prioridade que cada variável recebe é a média de seus valores normalizados, com base na soma de cada coluna. Para isso, basta dividir cada correlação binária pela soma da coluna em que o valor se encontra. A Tabela 5 é a normalização da Tabela 4. O peso de cada variável é a média aritmética dos valores de sua linha correspondente. Assim, por exemplo, o peso da variável Emissão é $(0,6 + 0,6 + 0,6)/3 = 0,6 = 60\%$.

Tabela 5 – Representação das classificações das variáveis analisadas

	Emissão	Custos	DExA
Emissão	$1/1,67 = 0,6$	$3/5 = 0,6$	$3/5 = 0,6$
Custos	$0,33/1,67 = 0,2$	$1/5 = 0,2$	$1/5 = 0,2$
DExA	$0,33/1,67 = 0,2$	$1/5 = 0,2$	$1/5 = 0,2$

Desse modo, como temos os pesos de todos os critérios, basta classificar do maior para o menor para obter os critérios “mais importantes” com relação aos demais. Assim, temos 60% como o peso da Emissão e 20% nos outros dois casos (Custos e DExA).

O último passo é verificar a inconsistência dos dados. Por exemplo: se, na correlação binária afirmou-se que x é muito melhor que y e que y é muito melhor que z , não faz sentido outra correlação afirmar que z é melhor que x .

Conforme Forman (1998), o cálculo da inconsistência (CI) é dada pela fórmula

$$CI = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1} \quad (8)$$

onde λ_{MAX} é denominado valor principal e n é o número de critérios avaliados.

Por sua vez, o valor principal (λ_{MAX}) é calculado pela prioridade de cada variável multiplicado pelo total da respectiva coluna da tabela comparativa original (Tabela 4). Neste caso, temos que:

$$\lambda_{MAX} = [(0,6 * 1,67) + (0,2 * 5) + (0,2 * 5)] = 3,002$$

Assim sendo, o CI é determinado por:

$$CI = \frac{\lambda_{MAX} - n}{n - 1} = \frac{3,002 - 3}{3 - 1} = \frac{0,002}{2} = 0,001 \quad (9)$$

Para verificar se o valor encontrado para o CI é adequado, [Forman \(1998\)](#) propôs a Taxa de Consistência (TC), determinada pela razão entre o CI e o Índice de Consistência Aleatória (ICA). Com isso, os pesos encontrados serão ditos consistente se $TC < 10\%$.

O valor do ICA é fixo e depende unicamente do número de critérios, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Valores dos Índices de Consistência Aleatória para o número de critérios

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ICA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: [Forman \(1998\)](#)

Portanto, temos que:

$$TC = \frac{CI}{IAC} = \frac{0,001}{0,58} = 0,00172 = 0,17\% \quad (10)$$

Como o valor encontrado é menor que 10% temos que os pesos estão consistentes. Caso o valor do TC tivesse sido maior que 10%, as correlações deveriam ser revisadas para que as inconsistências fossem desfeitas.

4.3 Construção do modelo genérico Dinâmico-Fuzzy

O modelo proposto visa ser o mais generalista possível para que não se torne um limitante ao usuário. Logo, pode ser adaptado ou ajustado para melhor atender a demanda do estudo.

A ideia se baseia em desenvolver um modelo como ferramenta de análise de viabilidade. Como se trata de um sistema genérico, as variáveis envolvidas e os cenários não foram definidos (exemplo do uso, na prática, pode ser visto no capítulo 5). A Figura 8 resume a proposta.

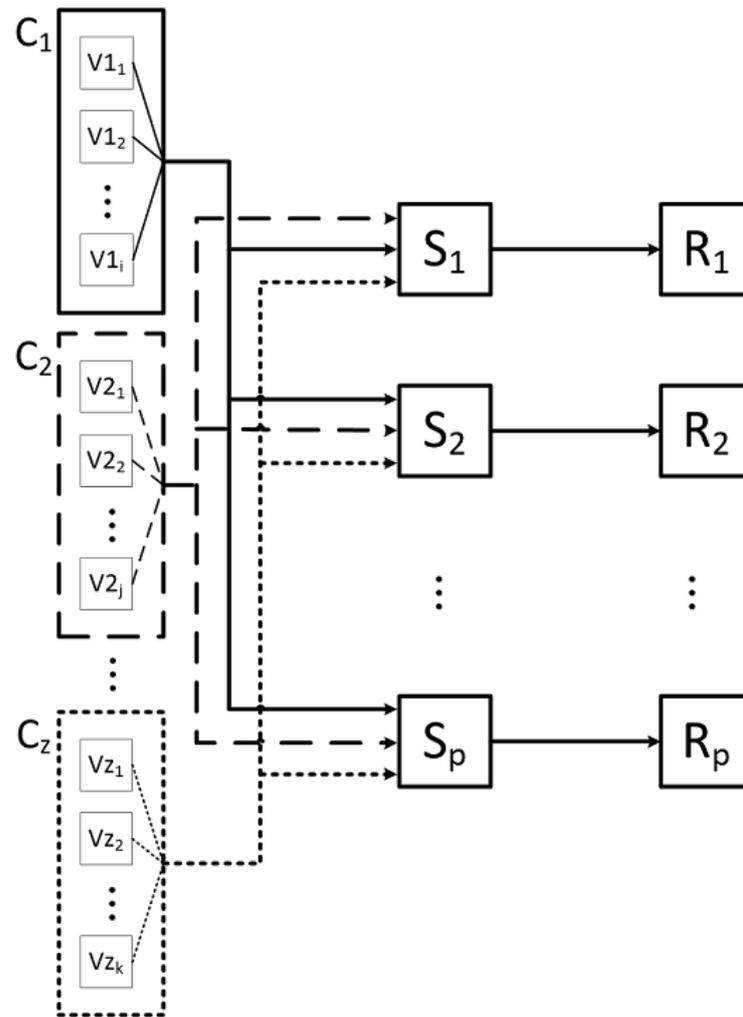


Figura 8 – Estrutura genérica do modelo proposto.

O modelo considera que serão analisadas z categorias de variáveis (C_1, C_2, \dots, C_z), que poderiam ser, por exemplo, econômica, energética, ambiental. Consideramos que uma categoria C_g qualquer possui n variáveis (variando de V_{g1} até V_{gn}), que por sua vez possui uma relação direta de contexto com os outros critérios desta categoria, pois caso contrário deveria pertencer a outro grupo. A quantidade de variáveis não é fixa pois depende das opções do praticante, e estes devem ser, preferencialmente, calculados com base no dinamismo do processo que o gerou, garantindo que as inter-relações contidas no sistema sejam respeitadas.

Quando as variáveis têm um valor a ser retornado, estes dados são enviados para que o(s) controlador(es) Fuzzy calcule(m) a(s) viabilidade(s) com base nos p cenários propostos, e a quantidade de cenários não é limitada para que possam existir tantos quantos sejam necessários para uma tomada de decisão. Claramente vemos que para cada cenário S_h existe uma resposta R_h correspondente, deixando claro que as viabilidades dependem de elementos contidos nos cenários (e consequentemente nos controladores Fuzzy), especificamente nos pesos atribuídos às variáveis na construção da base de regras. Por outro lado, percebemos ainda que as variáveis não mudam em

função do cenário, a mudança ocorre, semelhante ao caso anterior, nos pesos atribuídos, que depende da estratégia adotada para cada controlador específico.

Apesar de simplificado na Figura 8, destacamos que os resultados das variáveis de uma mesma categoria, por exemplo, as saídas de $V1_1, V1_2, \dots, V1_i$ em C_1 , não são, de alguma forma, agrupadas. O fato de existir apenas uma seta conectando C_1 aos cenários abstrai a ideia de que existem setas para cada uma das variáveis descritas, que por falta de espaço e para não poluir a imagem foram simplificadas.

Desse modo, o que se precisa para utilizar o modelo é:

1. Definir quais variáveis serão consideradas no estudo;
2. Definir qual(is) cenário(s) será(ão) analisado(s);
3. Desenvolver o(s) controlador(es) Fuzzy correspondente(s) ao(s) cenário(s);
 - a) Categorizar (fuzzificar) a variável “Viabilidade”, uma vez que será o *output* do modelo;
 - b) Fuzzificar as variáveis de entrada escolhidas, para que sejam os *inputs* do controlador;
 - c) Determinar os pesos de cada variável de entrada através do AHP;
 - d) Com auxílio de especialistas, elaborar a base de regras;
 - e) Definir o SIF e o método de defuzzificação;
4. Para cada variável de entrada, obter ou calcular os valores numéricos que serão utilizados para alimentar o(s) cenário(s);
5. Analisar e/ou comparar os resultados obtidos.

5 Estudo de caso: Biodiesel de pinhão manso

5.1 Considerações iniciais

O objetivo dessa seção é utilizar o modelo proposto para comparar biodieseis produzidos a partir de várias oleaginosas, utilizando a ferramenta para estimar as viabilidades destes produtos.

O caso do pinhão manso teve como base dados coletados por [Oliveira \(2014\)](#) em uma propriedade rural em Vitória da Conquista, região Sudoeste da Bahia, Brasil. Para isso, considerou um ciclo de vida de 15 anos em uma área de 5 ha e, conforme descreve, os materiais foram agrupados por processos. No local, a precipitação anual média é de 732 mm, temperatura média é de 20,2 °C e possui latitude de 15,95° sul, longitude de 40,88° oeste e altitude de 839 metros acima do nível do mar.

O teor de óleo obtido a partir do pinhão manso depende do modo extração. O método considerado neste estudo foi a extração mecânica, com um rendimento de aproximadamente 34% de óleo bruto ([CARVALHO; COSTA, 2009](#)).

Destacamos que os dados utilizados na comparação foram obtidos de modo distintos, acarretando em uma limitação do estudo. Enquanto as informações do pinhão manso foram coletadas por intermédio de pesquisa de campo, como descrito, os valores para outras oleaginosas foram coletados através de pesquisa bibliográfica. Mesmo não possuindo fontes idênticas, os dados coletados serviram para parametrizar o modelo, que calculou uma estimativa da produção do biodiesel.

Por exemplo, para comparar, supondo o cenário ideal, o biodiesel de pinhão manso com o biodiesel a partir do óleo dendê seria necessário os valores de Emissão de GEE, Custo e DExA para cada atividade dos subsistemas, conforme o modelo dinâmico descrito. O que pode-se fazer, nesse caso, é inserir apenas os valores finais para outras oleaginosas, desconsiderando o dinamismo da cadeia. Assim, ao invés de inserir os valores individuais das atividades (como feito no caso do pinhão manso), é necessário apenas os dados de cada *input* para as oleaginosas a serem comparadas.

5.2 Combustíveis renováveis e não renováveis

5.2.1 Petróleo

Os constantes conflitos políticos envolvendo os países do Oriente Médio, onde está localizada quase 48% das reservas comprovadas de petróleo no mundo, conferem

instabilidade de suprimento e oscilações no valor pago por barril do combustível (MELLO et al., 2007). Dessa forma, segundo a ANP (Agência Nacional de Petróleo) várias nações são incentivadas a reduzirem sua dependência em relação às importações do produto, sinalizando a necessidade de buscar alternativas para a substituição deste combustível (ANP, 2014).

Considerada a principal matéria-prima energética desde sua descoberta, no século XVIII, o petróleo é utilizado nos mais variados setores, gerando uma grande movimentação em diversas áreas do mercado mundial, fazendo com que várias nações busquem caminhos no desenvolvimento desse combustível (PAULILLO et al., 2007). No entanto, essa fonte é limitada e existem previsões futuras de esgotamento, mostrando que buscas por fontes alternativas de energia é de suma importância (KIM; DALE, 2005).

Em 2013, as reservas mundiais de petróleo totalizavam 1,69 trilhão de barris (aumento de 0,04% com relação ao ano anterior) (ANP, 2014). De acordo com a OPEC (*Organization of the Petroleum Exporting Countries*), a Venezuela é a detentora do maior volume de reservas de petróleo, totalizando 298,3 bilhões de barris (17,7% do total mundial), seguida pela Arábia Saudita, com 15,8% do total mundial. O Brasil aparece na décima quinta posição, com reserva de 15,6 bilhões de barris (1,82% do total mundial), 0,5% de aumento com relação ao ano anterior (OPEC, 2014).

O volume global de petróleo produzido em 2013 foi de 86,8 milhões de barris/dia (aumento de 0,64% em relação a 2012) (ANP, 2014). No ranking dos produtores de petróleo, a Arábia Saudita aparece no topo, com volume médio de 11,5 milhões de barris/dia (13,3% do total mundial), seguida pela Rússia, com produção média de 10,8 milhões de barris/dia (OPEC, 2014). O Brasil ocupa o décimo terceiro lugar, com produtividade de 2,1 milhões de barris/dia (decréscimo de 1,9% com relação ao ano anterior) tendo uma representatividade mundial de 2,5% (ANP, 2014).

Sobre o consumo mundial do petróleo, no mesmo ano que os casos anteriores, esse valor foi estimado em 91,3 milhões de barris/dia (aumento de 1,6% com relação ao ano anterior) (ANP, 2014; OPEC, 2014). O país que mais consumiu esse tipo de combustível continuou sendo os Estados Unidos, com 18,9 milhões de barris/dia (20,7% do consumo total). Em seguida, com consumo de 10,8 milhões de barris/dia de petróleo (11,8% do total mundial), vem a China. E assim como nos anos anteriores, o Brasil ocupa o sétimo lugar, com consumo aproximado de 3 milhões de barris/dia (3,2% do consumo global) (OPEC, 2014).

Vale ressaltar que a capacidade de refino mundial era, em 2013, 94,9 milhões de barris/dia, 1,5% maior que em 2012 (ANP, 2014; OPEC, 2014). Dentre os países que possuem a maior capacidade, os Estados Unidos obtêm o primeiro lugar, com 17,8 milhões de barris/dia (cerca 18,8% da capacidade mundial). Em seguida vem a China, com 12,6 milhões de barris/dia (o que representa 13,3% da capacidade mundial). Nesse

ranking, o Brasil ocupa a oitava colocação, com capacidade de refino de 2,1 milhões de barris/dia (2,2% da capacidade mundial) (OPEC, 2014).

A Tabela 7 apresenta os valores das reservas, da produção, do consumo e da capacidade de refino do petróleo por regiões geográficas e blocos econômicos. Já a Tabela 8 ilustra a taxa de variação dos valores acima com relação ao ano anterior.

Tabela 7 – Resumo da reserva, produção, capacidade produtiva e consumo mundial de petróleo, no ano de 2013

Região	Reserva ¹	Produção ²	Capacidade ²	Consumo ²
América do Norte	229,6	16.826	21.389	23.292
Américas Central e do Sul	329,6	7.293	6.029	6.775
Europa	147,8	17.281	23.887	18.645
Oriente Médio	808,5	28.358	8.822	8.526
África	130,3	8.818	3.517	3.624
Ásia-Pacífico	42,1	8.232	31.284	30.470
TOTAL	1.687,9	86.808	94.929	91.331

Fonte: ANP (2014) e OPEC (2014)

¹Unidade: bilhões de barris

²Unidade: milhões de barris por dia

Tabela 8 – Resumo das variações (em %) da reserva, produção, capacidade produtiva e consumo mundial de petróleo, do ano de 2013 com relação ao ano anterior

Região	Reserva	Produção	Capacidade	Consumo
América do Norte	-0,15	8,25	-0,48	1,50
Américas Central e do Sul	0,32	0,18	2,28	4,58
Europa	0,26	0,29	-0,16	0,05
Oriente Médio	-0,02	-0,44	6,87	2,07
África	-0,23	-5,68	4,99	2,98
Ásia-Pacífico	0,02	-1,64	2,20	1,58
TOTAL	0,04	0,64	1,50	1,56

Fonte: ANP (2014) e OPEC (2014)

As Tabelas 7 e 8 sugerem que, apesar do aumento do consumo do petróleo ter acontecido em todas as regiões, o mesmo não aconteceu com a reserva, produção e capacidade.

5.2.2 Biocombustível

Atualmente, cerca de 90% de toda energia consumida é gerada a partir de combustíveis fósseis, ao contrário das fontes renováveis. Conseqüentemente, a preocupação com a escassez dos recursos naturais, o aumento do preço do petróleo e o aquecimento

global acelerado foram responsáveis pelo crescente interesse, em todo mundo, por fontes de energia renováveis, como os biocombustíveis (MAITY et al., 2014; DRAGONE et al., 2010).

Além disso, a extensa utilização de combustíveis fósseis para a produção de energia acarreta no aumento da poluição global e nas alterações climáticas, bem como influencia a degradação ecológica (MAITY et al., 2014).

Oriundos de fontes animais ou vegetais, os biocombustíveis são definidos como combustíveis de origem biológica não fóssil, e geralmente são classificados em dois grandes grupos: (i) primários, que são os combustíveis não transformados, utilizados em sua forma natural, tais como lenha e cavacos de madeira, e (ii) os secundários, que são aqueles processados através da combustão para gerar calor ou eletricidade, como por exemplo bioetanol, butanol e biodiesel (ABILA, 2010; MAITY et al., 2014).

O etanol ou butanol, produzido pela fermentação de amido (de trigo, cevada, milho, batata) ou açúcares (a partir da cana-de-açúcar, beterraba), e o biodiesel, produzido por transesterificação de oleaginosas (colza, soja, girassol, palma, óleo de cozinha usado, gorduras animais, etc.), são considerados como biocombustível da primeira geração (DRAGONE et al., 2010). A produção de etanol ou biodiesel a partir de tecnologias convencionais, mas com base em novas culturas de amido, óleo e açúcar, como pinhão manso e mandioca, bem como o etanol, o butanol partir de materiais lignocelulósicos (como palha, madeira e grama) são considerados como biocombustível de segunda geração. Já o biodiesel a partir de microalgas e o bioetanol derivado de algas e microalgas são classificados como biocombustíveis da terceira geração (ABILA, 2010; MAITY et al., 2014).

De modo geral, os efeitos que o cultivo das oleaginosas que serão destinadas à produção de biocombustíveis exercem sobre a biodiversidade diferem entre os três tipos de gerações, e dependem principalmente: da espécie escolhida, da estrutura agrícola utilizada e das práticas de gestão empregadas. Desse modo, alguns indicadores são utilizados para quantificar os impactos ambientais contidos na produção do biocombustível, dentre eles: a qualidade do solo, da água e do ar, as emissões dos Gases do Efeito Estufa (GEE), a produtividade primária líquida, o Balanço Energético (BE) e a Relação Energética (RE) (LIU et al., 2014).

Conforme Xu et al. (2011), existem duas rotas de conversão da biomassa em biocombustíveis: a bioquímica e a termoquímica. A rota bioquímica consiste na produção do biocombustível por intermédio da hidrólise dos carboidratos presentes na biomassa, que necessitam de tratamento anterior mediante ações mecânicas e físicas, com intuito de tornar a matéria-prima mais acessível para um tratamento químico ou biológico posterior. Já a rota termoquímica ocorre através da pirólise ou gaseificação da biomassa, seguido da síntese catalítica ou da fermentação, tornando possível a obtenção

de hidrocarbonetos, álcoois, etc.

Apesar das vantagens da utilização dos biocombustíveis, durante o processo produtivo ocorrem alguns impactos ambientais. Para padronizar essa produção, algumas ferramentas e metodologias foram desenvolvidas, como por exemplo a ACV.

O equilíbrio entre os fatores positivos e negativos da produção de biocombustíveis tem provocado acalorados debates e pesquisas experimentais. Pois as causas e as consequências dependem da espécie, do modo de gestão e do uso da terra (bem como das alterações na composição da área) (LIU et al., 2014).

Diante da crescente busca por energias sustentáveis, o Brasil vem procurando o caminho do domínio tecnológico dos biocombustíveis, como o biodiesel (PAULILLO et al., 2007).

5.2.3 Biodiesel

Geralmente, os óleos das plantas, na sua forma pura, possuem algumas impurezas. Por esse motivo, o óleo necessita de uma modificação química, que pode ser, por exemplo, através de uma transesterificação, pirólise, craqueamento ou esterificação (FERREIRA; BORENSTEIN, 2007). Dentre estes, a primeira opção é uma reação na qual é possível produzir um combustível mais limpo e de modo mais seguro para o ambiente a partir de óleos vegetais (MEHER et al., 2006; SCHUCHARDT et al., 1998).

O biodiesel refere-se ao combustível formado por éster monoalquílico de ácidos graxos e pode ser produzido, juntamente com a glicerina (um sub-produto), através de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais, após a reação de triglicerídeos com etanol ou metanol, na presença de um catalisador, por meio do processo de transesterificação (ou pirólise) (SCHUCHARDT et al., 1998). A Figura 9 ilustra o processo necessário para obtenção do biodiesel através da transesterificação.

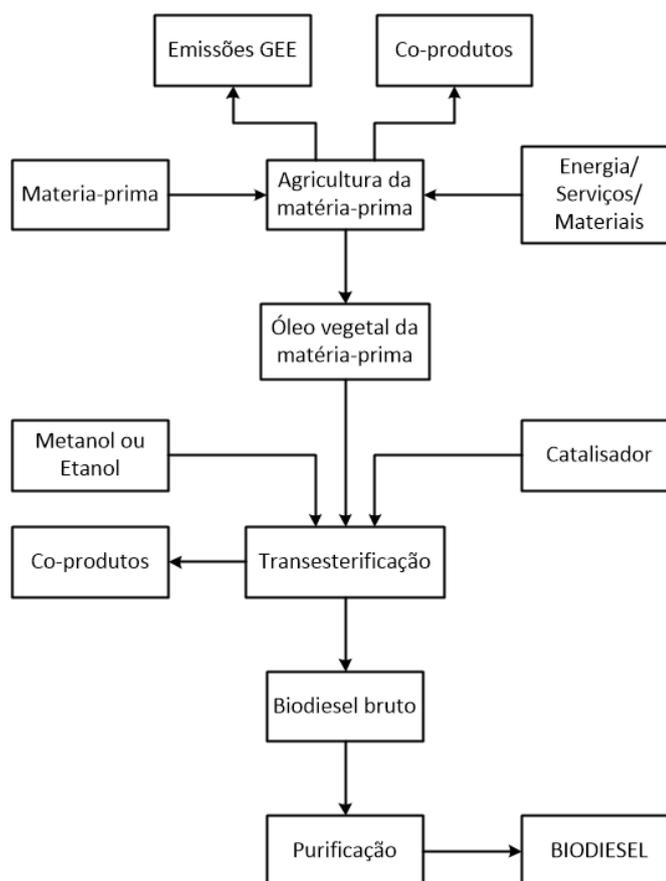


Figura 9 – Fluxograma da obtenção do biodiesel por meio da transesterificação.

Fonte: Adaptado de [Demirbas \(2007\)](#)

Quanto à utilização, o biodiesel pode ser proporcionalmente adicionado em uma mistura de diesel ou ser utilizado sozinho. Atualmente, a combinação mais comum é 20% de biodiesel adicionado a um montante de 80% de diesel, chamado de B20 ([DEMIRBAS, 2007](#)). No Brasil, desde 14 de novembro de 2014 ficou estabelecido B7 (mistura contendo 7% de biodiesel com 93% de diesel) como o percentual mínimo obrigatório do biodiesel no diesel disponibilizado ao consumidor final ([BRASIL, 2014](#)).

De acordo com [ANP \(2014\)](#), a capacidade produtiva do biodiesel B100 no Brasil foi, nos últimos anos, de 8 milhões de m³ (aproximadamente, 22 mil m³ dia⁻¹). No entanto, a produtividade foi de 2,9 milhões de m³ (7,4% maior do que o ano anterior), correspondendo a 36,5% da capacidade de produção total. A região brasileira que mais produziu biodiesel, em 2013, foi o Centro-Oeste, com 40,6% da produção nacional, cerca de 1,2 milhão de m³. Já por estados, o maior produtor continuou sendo o Rio Grande do Sul, com volume de 883,3 mil m³, 30,3% do quantitativo nacional. Nesse mesmo período, a Bahia produziu 194,2 mil m³ de biodiesel B100, queda de 16,01% com relação ao ano anterior.

Em comparação com os combustíveis derivados do petróleo, o biodiesel possui algumas vantagens, como: (i) originado através de óleos vegetais, que são potencial-

mente fontes inesgotáveis de energia (BAJPAI; TYAGI, 2006; FERRARI et al., 2005); (ii) teor de energia próximo do diesel (MA; HANNA, 1999); (iii) maior eficiência de combustão (DEMIRBAS, 2007; MA; HANNA, 1999); (iv) alto número de cetano¹² (FERRARI et al., 2005); (v) baixo número de enxofre (MA; HANNA, 1999); (vi) é não-tóxico e degrada cerca de quatro vezes mais rapidamente do que o diesel (DEMIRBAS, 2007); (vii) possui elevado ponto de fulgor, sendo 150 °C do biodiesel e 80 °C o ponto de fulgor do diesel (DEMIRBAS, 2007); (viii) menor emissão de HC, CO e CO₂ (DEMIRBAS, 2007; FERRARI et al., 2005); (ix) redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental (FERRARI et al., 2005); (x) pode aumentar a vida útil do motor, já que, na forma pura, é um excelente lubrificante (DEMIRBAS, 2007); (xi) pode ser armazenado junto com o diesel (DEMIRBAS, 2007); (xii) os riscos na manipulação, transporte e armazenamento são menores do que aqueles associados ao diesel (DEMIRBAS, 2007); e (xiii) sua produção é mais barata do que a do petróleo, se contabilizado os gastos com desenvolvimento de tecnologia e perfuração de poços (CARVALHO; RIBEIRO, 2012).

Dentre as desvantagens do biodiesel podemos citar: (i) o poder calorífico do biodiesel é 5% menor do que do diesel (CANDEIA, 2008; DEMIRBAS, 2007); (ii) cristalização em baixas temperaturas (CANDEIA, 2008); (iii) a depender da oleaginosa utilizada, o ciclo de vida pode ter início tardio ou co-produtos tóxicos (SILVA; FREITAS, 2008); (iv) degradação do combustível se armazenado por períodos prolongados (BOZBAS, 2008); e (v) custos mais elevados (DEMIRBAS, 2007).

GEE são substâncias que detêm parte da radiação infravermelha, conservando a Terra aquecida. Comumente, a radiação é produzida pelos seres humanos, sobretudo na queima de combustíveis não-renováveis, atividades industriais e queimadas. No entanto, a produção de biodiesel também é responsável pela emissão de GEE, tanto na fase agrícola (plantação da lavoura, colheita, etc.) como na fase industrial (transesterificação), justificando a importância da sua integração no estudo (MATTOS, 2001).

Segundo Cherubini et al. (2009), a emissão de GEE varia de acordo com alguns fatores, como: matéria prima, tecnologia(s) utilizada(s), limites do sistema, área de estudo e período de tempo considerado. Conseqüentemente, a produção do biodiesel resulta na geração de co-produtos, podendo substituir alguns produtos convencionais, fornecendo benefícios para a cadeia produtiva.

Outros parâmetros importantes na análise da viabilidade, o BE e a RE estabelecem os fluxos de energia, equacionando a energia necessária para realizar a produção (*input*) e a energia obtida na combustão do produto proposto (*output*), através da relação *Output-Input* (O-I) e *Output/Input* (O/I) (ALMEIDA NETO et al., 2004).

¹²Cetano é um hidrocarboneto parafínico cuja fórmula química é CH₃(CH₂)₁₄CH₃(C₁₆H₃₄) e sua quantidade é utilizado como um índice de qualidade da combustão dos combustíveis. Esse indicador está relacionado com a velocidade de ignição (período entre o início da injeção de combustível e o início da combustão).

Diversas maneiras de obter o BE e a RE podem ser encontradas na literatura. Porém, o cálculo através da Demanda de Energia Acumulada (DEA) tem sido uma das mais utilizados. A DEA é determinada pela razão entre o somatório de todas as energias de entradas em todos os processos do sistema, sobre a energia contida nos produtos do sistema (FUKUROZAKI, 2011).

O biodiesel pode ser produzido a partir de óleos vegetais, gorduras animais ou produtos residuais (como o óleo de fritura já usado). Dos óleos vegetais, várias oleaginosas podem fornecer o necessário para a produção, como: dendê, girassol, canola, mamona, soja, algodão, amendoim, além do pinhão manso. A Tabela 9, fornece algumas informações sobre aspectos de algumas oleaginosas utilizadas para produção de biodiesel.

Tabela 9 – Características de algumas oleaginosas utilizadas para produção de biodiesel

Oleaginosa	Nome Científico	Teor de óleo (%)	Rendimento (t óleo ha ⁻¹)
Dendê	<i>Elaeis guineensis</i> L.	22	3,0 - 6,0
Girassol	<i>Helianthus annuus</i> L.	38 - 48	0,5 - 1,9
Canola	<i>Brassica napus</i> L.	40 - 48	0,5 - 0,9
Mamona	<i>Ricinus communis</i> L.	45 - 50	0,5 - 0,9
Soja	<i>Glycine max</i> L. Merrill	18	0,2 - 0,4
Algodão	<i>Gossypium hirsutum</i> L.	15	0,1 - 0,2
Amendoim	<i>Arachis hypogea</i> L.	40 - 43	0,6 - 0,8
Pinhão Manso	<i>Jatropha curcas</i> L.	35 - 40	0,3 - 0,5

Fonte: Boora e Dhillon (2010) e BRASIL (2006)

Dentre as oleaginosas utilizadas, a soja continuou sendo a mais utilizada em todo o território nacional em 2013, sendo empregada em 76,4% da produtividade total. Em segundo lugar, a gordura animal representou 19,8% do total, seguida do óleo de algodão, com 2,2% (ANP, 2014).

Ao longo do tempo, estudos foram desenvolvidos de modo a entender características importantes sobre cada oleaginosa, na intenção de obter o aproveitamento máximo da matéria-prima. A Tabela 10 exemplifica pesquisas com essa finalidade.

Tabela 10 – Estudos envolvendo as principais oleaginosas utilizadas na produção do biodiesel

Oleaginosa	Estudo	Fonte
Dendê	Avaliação da produção do biodiesel a partir de óleo de dendê, através do processo de transesterificação	Al-Widyan e Al-Shyoukh (2002)
	Produção do biodiesel da mistura dos óleos de pinhão manso e dendê na Ásia	Sarin et al. (2007)
Girassol	Modelagem da produção do biodiesel a partir do óleo de girassol e a relação com o preço do combustível convencional	Hassouneh et al. (2012)
	Otimização da produção de biodiesel do óleo de girassol por transesterificação	Antolín et al. (2002)
Mamona	BE do óleo de mamona sob diferentes rotas de produção	Almeida Neto et al. (2004)
	Análise, baseado em redes de Petri, da cadeia produtiva do biodiesel de mamona	Prata (2007)
Soja	Investigação de algumas propriedades do biodiesel do óleo de soja obtidos pela transesterificação	Candeia (2008)
	Cálculo do rendimento do biodiesel de soja, produzido a partir da transesterificação, e teste de consumo em gerador de energia elétrica	Ferrari et al. (2005)
Algodão	Produção de biodiesel a partir do óleo da semente de algodão, utilizando um solvente específico	Royon et al. (2007)
	Desempenho do motor utilizando biodiesel de algodão	Nabi et al. (2009)
Amendoim	Desempenho óleo de amendoim como matéria-prima potencial para a produção de biodiesel	Kaya et al. (2009)
	Avaliação do comportamento da cristalização do biodiesel de amendoim	Perez et al. (2010)
Nabo	Sintetizar o biodiesel de óleo de nabo forrageiro, produzido com metanol supercrítico	Dambiski (2007)
	Avaliação do processo de obtenção do biodiesel de nabo bem como seu impacto sobre a sustentabilidade	Pereira (2012)

Neste contexto, o pinhão manso se destaca como uma alternativa promissora, pois, dentre outros motivos, é uma oleaginosa que não é utilizada como fonte de alimentação, é resistente à diversas variações de clima e possui ciclo de vida perene com elevada produtividade ([MATSUURA et al., 2010](#)).

5.2.4 Pinhão Manso

De origem controversa e sem cadeia produtiva ainda estabelecida, o pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) pertence à família *Euphorbiaceae* e também é conhecido como pinhão-do-Paraguai, purgueira, pinha-de-purga, grão-demaluco, pinhão-de-cerca, turba, tartago, medicineira, tapete, siclité, pinhão-do-inferno, pinhão bravo, figo-do-inferno, pião, pinhão-das-barbadas e sassi, e é considerada uma das potenciais culturas energéticas para a produção de biodiesel (ARRUDA et al., 2004; SATO et al., 2009). É cultivado especialmente no sul da Ásia, na Índia, na África e nas Américas Central e Sul (GUBITZ et al., 1999). No Brasil, Laviola e Dias (2008) destacam que as plantações dessa oleaginosa estão concentradas, na maior parte, nos estados do Nordeste, em Goiás e em Minas Gerais.

Os motivos pela provável potencialidade do pinhão manso são vários: (i) capacidade produtiva por mais de 40 anos, sendo a produção iniciada já a partir do primeiro ano e com ápice logo no quarto (LAVIOLA; DIAS, 2008); (ii) produtividade média de óleo de 2 t/ha (LAVIOLA; DIAS, 2008); (iii) adaptável em áreas marginais e degradadas (que não estão aptas para cultivo alimentar) (MATSUURA et al., 2010); (iv) forte resistência à seca, bem como variações de solo e clima (ARRUDA et al., 2004); (v) perene e de fácil cultivo (ARRUDA et al., 2004); (vi) possibilidade de ser cultivadas em pequenas propriedades com uso da força de trabalho familiar, gerando renda aos pequenos produtores (MATSUURA et al., 2010); (vii) baixa demanda de insumos e pesticidas, resultando em impactos ambientais minimizados (BOORA; DHILLON, 2010); (viii) formação de um microclima que beneficia o desenvolvimento de outras culturas nas entrelinhas de sua produção (SATO et al., 2009); (ix) lavoura pode ser utilizada no controle de erosão (GUBITZ et al., 1999; BOORA; DHILLON, 2010); (x) elevada eficiência no sequestro de carbono (auxiliando na despoluição do ar) (KUMAR; SHARMA, 2008); (xi) cultivo auxilia na redução da salinidade do solo (BOORA; DHILLON, 2010); (xii) as sementes são de fácil armazenamento e boa conservação (ARRUDA et al., 2004); e (xiii) as flores atraem abelhas, tornando a planta um potencial na produção de mel (OPENSHAW, 2000).

A literatura disponível sobre o pinhão manso ainda é bastante limitada, uma vez que só passou a ter aspectos estudados nas últimas décadas (NERY et al., 2009). No entanto, além da finalidade de produzir biodiesel, o pinhão manso vem sendo utilizado em diversas áreas, conforme ilustra a Tabela 11.

Tabela 11 – Algumas aplicações do pinhão manso

	Aplicações
Semente	a) para produção de sabão (GUBITZ et al., 1999); b) como purgativo (GUBITZ et al., 1999); c) para tratar doenças de pele, como sarna, eczemas e micose (GUBITZ et al., 1999; KUMAR; SHARMA, 2008); d) para aliviar a dor (GUBITZ et al., 1999); e) tratamento de picada de cobra (KUMAR; SHARMA, 2008); f) como insecticidas e fungicidas (GUBITZ et al., 1999).
Folha	a) como insecticidas e fungicidas (GUBITZ et al., 1999); b) para a criação de <i>silks</i> para tinturaria (GUBITZ et al., 1999).
Raiz	a) contra pneumonia, sífilis, vermífugo e purgativo (GUBITZ et al., 1999); b) como diurético (ARRUDA et al., 2004).
Torta	a) como adubo orgânico (devido ao alto teor de NPK) (ARRUDA et al., 2004); b) após destoxificação, como alimentação animal (BOMFIM et al., 2009).

5.3 Exergia como indicador de impacto ambiental

Como dito, a ACV é uma metodologia utilizada para classificar, caracterizar e analisar os efeitos que determinados processos causam no meio ambiente. Para tal, os dados obtidos são analisados através da perspectiva de uma categoria de impacto, como Consumo de recursos ou Potenciais de impactos ambientais. A primeira opção se subdivide em recursos renováveis, não-renováveis e energia, e dentre os impactos ambientais destacam-se aquecimento global, acidificação, eutrofização, ecotoxicidade e toxicidade humana (OMETTO, 2005).

Horlock (1997) descreve que o melhor modo de estudar a viabilidade de um processo seria através da análise energética, com base na primeira lei da Termodinâmica (PLT). Porém, estudos posteriores elencaram fatores limitantes para estudos com essas condições, como o fato de que nesse caso as perdas não seriam quantificadas, visto que a PLT descreve que toda a energia não pode ser criada ou destruída, apenas transformada/transferida.

No entanto, a Exergia não se conserva (ao contrário do que descreve a PLT, logo não pode ser descrita com base nesse conceito), pois parte da mesma é perdida por causa

dos processos irreversíveis (BEJAN et al., 1996). Assim sendo, Bösch et al. (2007) e Rosen e Dincer (1997) definem Exergia com base na segunda lei da Termodinâmica (SLT), como sendo a quantidade máxima de energia disponível, isto é, o total máximo de energia que pode ser convertida em trabalho. Vale destacar que, à medida que a PLT reconhece apenas a conservação da energia, a SLT, conforme Equação 11, dispõe requisitos para que transformações possam ocorrer (e não apenas criação/destruição), indicando que diferentes tipos de energia possuem diferentes qualidades (ALBUQUERQUE, 2005).

$$\delta Ex = T_0 \Sigma \Delta S \quad (11)$$

onde: Ex é a Exergia (MJ); T_0 é a temperatura ambiente (K); e S é a entropia (MJ/K).

Segundo Bösch et al. (2007), um indicador que quantifique a exergia pode ser descrita, pois todos os processos e materiais apresentam essa variável. Esse indicador é denominado de Demanda de Exergia Acumulada (DExA) (descrito pela Equação 12) e pode ser definido como a soma das exergias de todos os recursos necessários no sistema.

$$DExA = \sum_i (m_i * Ex_{(ch),i}) + \sum_j (n_j * r_{ex-e(ch,k,p,n,r,t),j}) \quad (12)$$

onde: $DExA$ é a Demanda de Exergia Acumulada por unidade do produto ou processo (MJ-eq); m_i é massa do i -ésimo material (kg); $Ex_{(ch),i}$ é a exergia do i -ésimo material (MJ-eq/kg); n_j é a quantidade de energia no j -ésimo combustível (MJ); $r_{ex-e(ch,k,p,n,r,t),j}$ é a relação entre a exergia e a energia do j -ésimo combustível (MJ-eq/MJ); ch indica exergia química; k indica exergia cinética; p indica exergia potencial; n indica exergia nuclear; r indica exergia radioativa; e t indica exergia térmica.

Ainda conforme o mesmo autor, como o surgimento de grandes bases de dados de ACV (como Ecoinvent), o cálculo das exergias individuais foi simplificado, uma vez que essas bases de dados dispõem desses valores para um extenso número de materiais.

5.4 Estudos preliminares

5.4.1 Inventário

De acordo com Caldeira-Pires et al. (2002), o inventário é uma etapa importante e necessária em estudos dessa natureza. Nela são elencadas todas as entradas e saídas do sistema de estudo visando agrupar as informações utilizadas.

O primeiro passo é listar todos os materiais que foram utilizados no processo produtivo em análise. Depois, para cada material, são listadas informações para uso posterior: quantidade utilizada, total de energia requerida (dada através da DEA), emissão de GEE e outros que se façam necessários.

Adotou-se nesse estudo uma abordagem do tipo berço–ao–portão, que considera os limites do sistema sendo desde a extração das matérias-primas (berço) até a disposição final (portão), antes de ser transportado ao consumidor. O inventário completo pode ser visto nos apêndices A e B.

5.4.2 Esboço do fluxograma linear e dinâmico

Como dito anteriormente, os materiais do inventário foram agrupados por processos: (i) Viveiro; (ii) Preparo do Solo; (iii) Plantio; (iv) Tratos Culturais; (v) Colheita; (vi) Extração; e (vii) Produção do Biodiesel. Esses processos seguem um fluxo linear na cadeia produtiva, como mostra a Figura 10, que ilustra ainda os limites adotados no sistema.

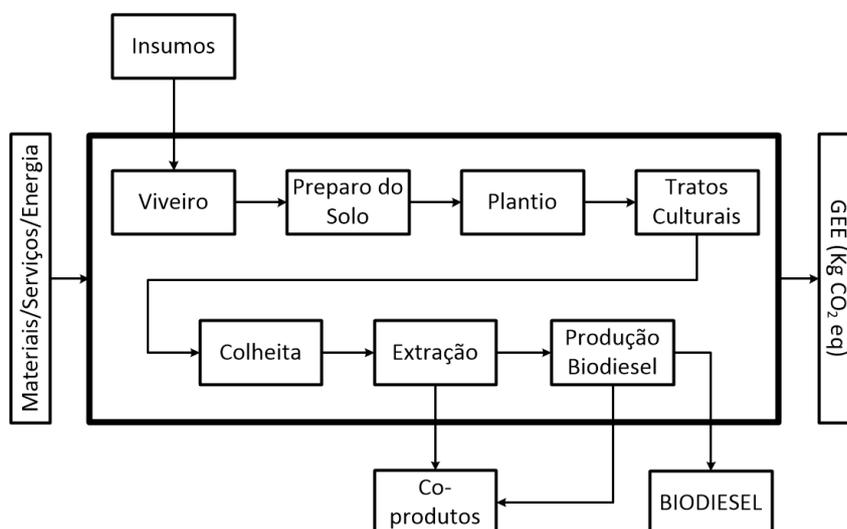


Figura 10 – Limites do sistema e fluxograma linear da cadeia produtiva de biodiesel a partir do óleo de pinhão manso.

A próxima etapa foi esboçar outro fluxograma, levando em consideração o dinamismo da cadeia. Os materiais foram agrupados em: (i) Preparo das mudas; (ii) Plantio com tratamento; (iii) Preparo do solo; (iv) Etapas pós plantio; e (v) Produção do Biodiesel.

A segunda representação é mais real, pois retrata a relação de causa e efeito que acontece, além de analisar o modelo ao longo do tempo. Por exemplo, podemos visualizar que: no plantio com tratamento, a medida que os sacos são encheidos existem mais mudas para serem transportadas, assim, quando as mudas são transportadas há mais plantio a ser feito, e quanto mais plantio são realizados mais tratos culturais também devem ser realizados. Desse modo, o ciclo é iniciado novamente, para realizar mais tratos culturais, é necessário mais sacos encheidos, e assim sucessivamente. Vale lembrar que os transportes das mudas, ainda no mesmo exemplo, pode demorar mais do que o esperado, visto que depende de fatores externos ao sistema. E assim por diante,

o raciocínio pode ser estendido aos demais processos, levando em consideração que eles se relacionam por intermédio de atividades em comum. O fluxograma pode ser visto na Figura 11, que enfatiza *tmp*, indicando atividades que podem sofrer um *delay* (atraso), pois dependem de fatores externos ao sistema modelado.

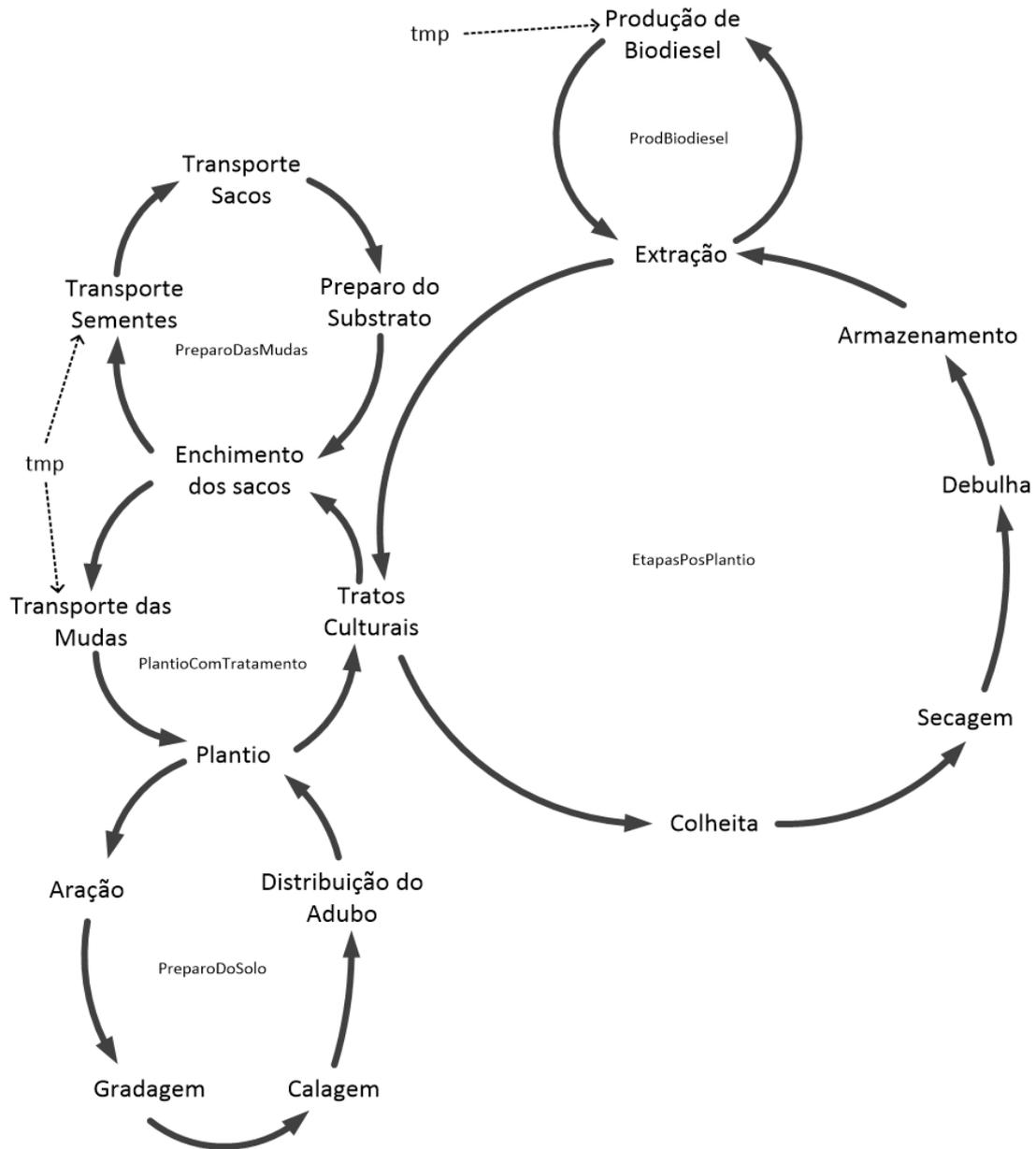


Figura 11 – Fluxograma que considera a cadeia produtiva como um processo dinâmico.

5.4.3 Emissão de GEE, BE e RE

Os fatores de emissão (que indicam quanto o material emite de CO₂) e a DEA (que indica o quanto de energia é necessário para a produção de uma unidade¹³ de um determinado produto) utilizada no cálculo do BE e da RE foram obtidos a partir

¹³Por exemplo, se a DEA de um determinado produto (ou serviço) for 10, então para produzir uma unidade desse produto (ou realizar uma unidade do serviço) são necessários 10 MJ de energia.

das bases de dados Ecoinvent 2.2 e PAS 2050, por intermédio dos softwares SimaPro e Umberto for Carbon Footprint.

A Emissão de GEE é calculada com base na totalidade das emissões. Para uma emissão por unidade de *output*, basta dividir o somatório pelo total da produção, conforme fórmula 13.

$$GEE = \frac{\sum e(m_i)}{ProdTotal} \quad (13)$$

onde:

- $e(m_i)$: emissão do i -ésimo material;
- $ProdTotal$: Total de toneladas de biodiesel produzido.

Para o cálculo do BE e da RE optamos em não considerar a fase da produção do biodiesel, com isso, calculamos até a etapa da extração do óleo. Isso se justifica por dois motivos: primeiro, os resultados obtidos independem da rota de produção adotada na produção do biodiesel, uma vez que o determinante da viabilidade é a matéria-prima, e segundo pelo fato de que em outros estudos semelhantes essa etapa também não considerada, favorecendo a comparação (ALMEIDA NETO et al., 2004).

Ainda conforme Almeida Neto et al. (2004), os *inputs* de um sistema podem ser divididos em:

- Energia Direta: é a energia (fóssil, eletricidades, etc.) consumida durante a cadeia produtiva. Calculada com base no Poder Calorífico Inferior (PCI);
- Energia Indireta: é a energia consumida por intermédio dos insumos, máquinas, etc. Avaliada, geralmente, com base na DEA;
- Energia de Transporte: é a energia dispensada para o transporte. Computada com base na distância percorrida e no tipo de transporte utilizado.

Ainda de acordo com o mesmo autor, o *output* é calculado com base na energia disponível nos co-produtos e no produto final.

Obtivemos o BE realizando o somatório de todos os *inputs* e relacionando com o respectivo *output*. O *output* foi estimado com base na queima do próprio óleo, quantificado pelo seu PCI (que indica a energia emitida pela sua combustão, isto é, energia liberada na forma de calor).

Desse modo, temos que:

$$BE = pci(O) - \sum dea(I_i) \quad (14)$$

e

$$RE = \frac{pci(O)}{\sum dea(I_i)} \quad (15)$$

onde:

- $pci(O)$: é o PCI do(s) *output(s)*;
- $dea(I_i)$: é a DEA do *i-ésimo input*.

De acordo com estudos realizados por [Rahman et al. \(2010\)](#), o PCI do óleo de pinhão manso é 39,5 MJ/kg.

5.5 Descrição da aplicação do modelo Dinâmico-Fuzzy

O modelo Dinâmico-Fuzzy teve como base o fluxograma dinâmico, ilustrado pela Figura 11. Com base na ilustração podemos ver que:

- *PrepadoDasMudas* contém: Transporte das sementes, Transporte dos sacos, Preparo do Substrato e o Enchimento dos sacos;
- *PlantioComTratamento* contém: Enchimento dos sacos, Transporte das mudas, Plantio e os Tratos Culturais;
- *PreparoDoSolo* contém: Plantio, Aração, Gradagem, Calagem e Distribuição do Adubo;
- *EtapasPosPlantio* contém: Tratos Culturais, Colheita, Secagem, Debulha, Armazenamento e Extração;
- *ProdBiodiesel* contém: Extração e a Produção do Biodiesel.

5.5.1 Descrição das variáveis analisadas

Com a separação dos processos, escolhemos três variáveis para aplicar o modelo: (i) Emissão de GEE; (ii) Custo; e (iii) DExA. Em cada caso, estimamos o total durante um ciclo produtivo de 15 anos. Por exemplo: avaliamos o total de GEE emitido durante uma produção que perdura 15 anos. E esses três valores foram os *inputs* do sistema Fuzzy.

A emissão total foi calculada conforme Equação 13 e os dados foram obtidos por meio das bases de dados Ecoinvent 2.2 e PAS 2050, conforme já descrito.

As emissões individuais dos materiais foram elencados e estes foram agrupados conforme o modelo dinâmico. O apêndice A detalha as emissões individuais, enquanto os valores agrupados por subsistemas estão no apêndice C.

Os valores monetários (custos) foram coletados por Oliveira (2014) através de pesquisa de campo, no período entre 2010 e 2014. Em Junho de 2015 os dados foram corrigidos pelo índice IPCA¹⁴ (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo), com a taxa de 22,9%. Os custos agrupados também se encontram no apêndice C.

Na obtenção de dados necessários para o cálculo da DExA, os valores foram obtidos na base de dados do Ecoinvent 3.0, por intermédio do software SimaPro. A DExA para cada material se encontra no apêndice B, por outro lado os valores para cada subsistema pode ser vista no apêndice C.

A relação entre os *inputs* e o *output* pode ser resumida conforme Figura 12.

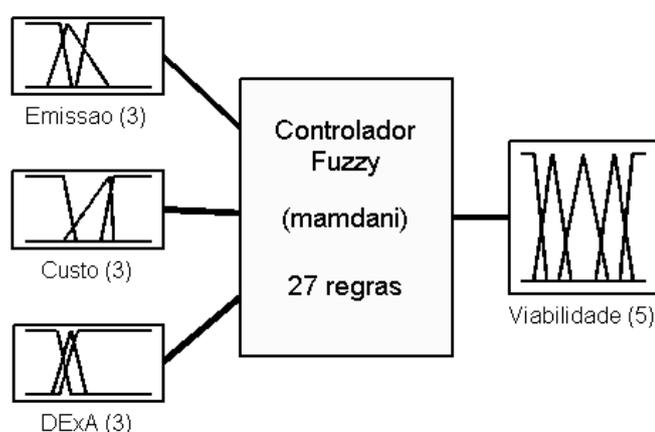


Figura 12 – Resumo do Controlador Fuzzy: SIF de Mamdani, 27 regras, 3 *inputs* e 1 *output* (cada *input* com 3 classificações e o *output* com 5).

5.5.2 Cenários propostos

Para tornar o modelo mais realista, foram propostos cenários com base em situações hipotéticas. As hipóteses foram importantes para propor a contribuição de cada *input* com relação ao *output*, determinadas com auxílio do AHP, descrito anteriormente.

Os cenários propostos foram:

- C_1 : O primeiro cenário foi desenvolvido conforme uma visão ambiental. Nele, a maior contribuição ao *output* foi dada a Emissão de GEE (60%), seguido do Custo e DExA (com 20% cada);
- C_2 : No segundo cenário o enfoque foi econômico. Assim, o Custo (com 63,7%) é o *input* com maior impacto, sendo a DExA e a Emissão de GEE responsáveis por 25,8% e 10,5%, respectivamente.

¹⁴O IPCA foi instituído, inicialmente, com a finalidade de corrigir valores monetário de companhias de capital aberto. Desde 1999 é utilizado pelo Banco Central para acompanhar as metas de inflação e atualmente é considerado o índice inflacionário oficial do Brasil.

A Tabela 4 descreve as correlações binárias para C_1 e a Tabela 12 para C_2 . Assim como na primeira, os valores da segunda tabela foram obtidos por meio dos especialistas (integrantes do Grupo de Bioenergia e Meio Ambiente da Universidade Estadual de Santa Cruz).

Tabela 12 – Representação das classificações das variáveis analisadas para o cenário econômico

	Emissão	Custos	DExA
Emissão	1	0,2	0,33
Custos	5	1	3
DExA	3	0,33	1
SOMA	9	1,53	4,33

Vale destacar que, como a mudança nos cenários estão relacionadas com as contribuições de cada *input*, a mudança é feita apenas na Base de Regras. Desse modo, as demais etapas do estudo se mantêm inalteradas.

5.5.3 Fuzzificação

Como descrito, os *inputs* definidos no estudo de caso foram Emissão de GEE, Custo e DExA, e foram definidas em três classificações: baixo(a), médio(a) e alto(a). A Viabilidade, por sua vez, foi delimitada como: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta. Por falta de um volume maior de dados, os *inputs* foram descritos utilizando funções lineares trapezoidais e triangulares.

As ilustrações abaixo detalham a construção das variáveis, destacando o modo como foram determinadas. As Figuras 13, 14 e 15 referem-se aos *inputs*, e a Figura 16 ao *output*.

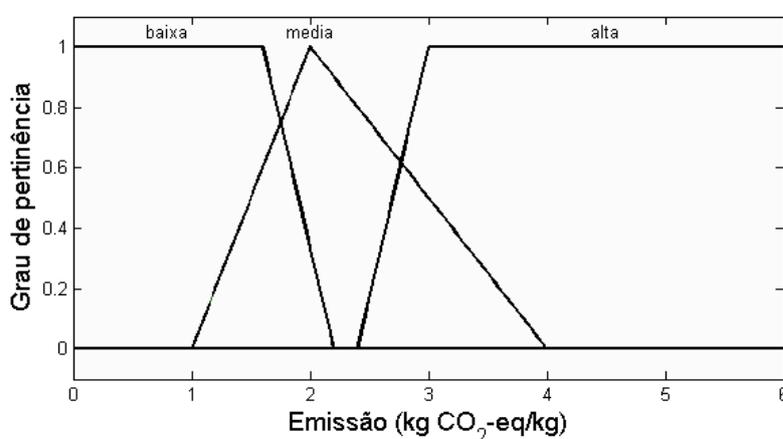


Figura 13 – Resumo da função de pertinência do *input* Emissão de GEE.

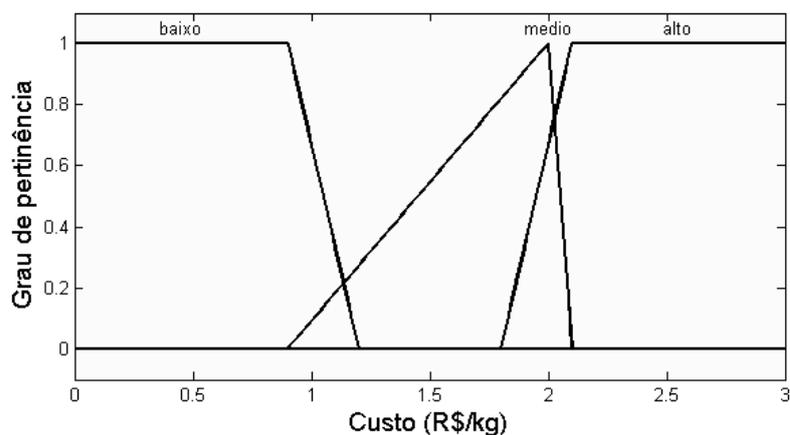


Figura 14 – Resumo da função de pertinência do *input* Custo.

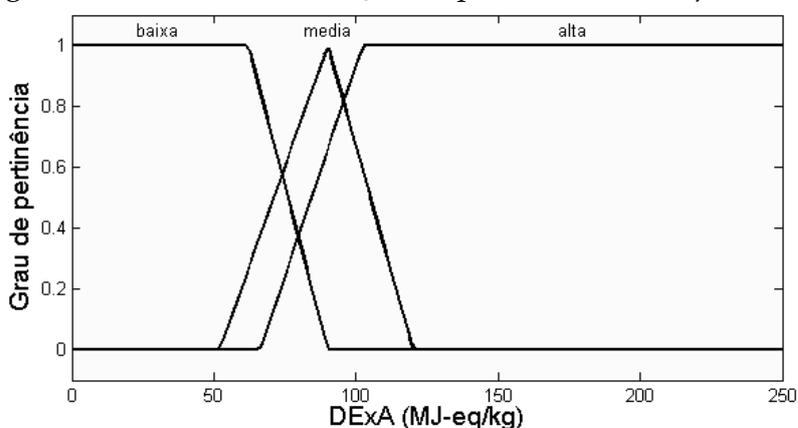


Figura 15 – Resumo da função de pertinência do *input* DExA.

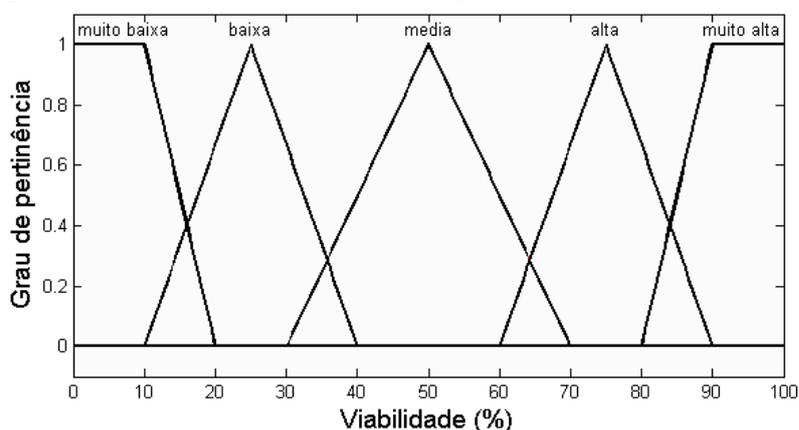


Figura 16 – Resumo da função de pertinência do *output* Viabilidade.

5.5.4 Base de Regras

A Base de Regra depende das condições impostas pelo cenário, pois um fator determinante são os pesos atribuídos a cada *input*. Ambas foram construídas conforme os seguintes passos:

1. Considerando todas as combinações possíveis, nos *inputs* substituímos o valor 3 nos piores casos (variável linguística 'alto(a)') e 1 no caso contrário (variável

linguística 'baixo(a)').

2. De posse dos pesos para cada *input*, para cada cenário, calculamos um valor numérico em cada regra, conforme Equação 16 em C_1 e Equação 17 para C_2 .

$$VN(R_i)_{C_1} = GEE * 0,6 + CP * 0,2 + DExA * 0,2 \quad (16)$$

$$VN(R_i)_{C_2} = GEE * 0,105 + CP * 0,637 + DExA * 0,258 \quad (17)$$

onde: $VN(R_i)_{C_1}$ determina o valor numérico das regras em C_1 (e, de modo análogo, $VN(R_i)_{C_2}$ em C_2), GEE é a Emissão de GEE e CP é o Custo.

3. Na etapa anterior, a cada regra foi atribuído um valor entre 1,0 e 3,0. O próximo é, dado seu valor numérico, classifica-lo conforme a Equação 18, fazendo com que, agora, cada regra seja classificada como muito baixa, baixa, média, alta ou muito alta, completando a base de regras. Os limites de cada regra foram determinados de modo a tornar os intervalos equidistantes (ambas as regras com o mesmo tamanho).

$$V(R_i) = \begin{cases} MA, & \text{se } VN(R_i) > 2,6 \\ A, & \text{se } 2,6 \geq VN(R_i) > 2,2 \\ M, & \text{se } 2,2 \geq VN(R_i) > 1,8 \\ B, & \text{se } 1,8 \geq VN(R_i) > 1,4 \\ MB, & \text{se } 1,4 \geq VN(R_i) \end{cases} \quad (18)$$

Após as etapas acima, as bases de regras podem ser vistas na Tabela 13, para ambos os cenários.

Tabela 13 – Base de regras completa utilizada na modelagem do Controlador Dinâmico-Fuzzy, para C_1 e C_2

Se	GEE (kg CO ₂ - eq/kg)	e	CP (R\$/kg)	e	DExA (MJ-eq/kg)	Então	Viabilidade (C ₁)	Viabilidade (C ₂)
R_{01}	alta		alto		alta		muito baixa	muito baixa
R_{02}	alta		alto		media		muito baixa	muito baixa
R_{03}	alta		alto		baixa		baixa	baixa
R_{04}	alta		medio		alta		muito baixa	baixa
R_{05}	alta		medio		media		baixa	media
R_{06}	alta		medio		baixa		baixa	media
R_{07}	alta		baixo		alta		baixa	alta
R_{08}	alta		baixo		media		baixa	alta
R_{09}	alta		baixo		baixa		media	muito alta
R_{10}	media		alto		alta		baixa	muito baixa
R_{11}	media		alto		media		media	muito baixa
R_{12}	media		alto		baixa		media	baixa
R_{13}	media		medio		alta		media	baixa
R_{14}	media		medio		media		media	media
R_{15}	media		medio		baixa		alta	alta
R_{16}	media		baixo		alta		media	alta
R_{17}	media		baixo		media		alta	muito alta
R_{18}	media		baixo		baixa		alta	muito alta
R_{19}	baixa		alto		alta		alta	muito baixa
R_{20}	baixa		alto		media		alta	baixa
R_{21}	baixa		alto		baixa		muito alta	baixa
R_{22}	baixa		medio		alta		alta	media
R_{23}	baixa		medio		media		muito alta	media
R_{24}	baixa		medio		baixa		muito alta	alta
R_{25}	baixa		baixo		alta		muito alta	alta
R_{26}	baixa		baixo		media		muito alta	muito alta
R_{27}	baixa		baixo		baixa		muito alta	muito alta

5.5.5 Sistema de Inferência e Defuzzificação

No modelo Dinâmico-Fuzzy utilizamos o SIF de Mamdani (conforme Equação 3) e o método de defuzzificação de Centro de Massa (conforme Equação 7).

5.5.6 Dinamismo do modelo

Os dados dinâmicos serviram como “fonte de alimentação” para o Controlador Fuzzy. Após o esboço dinâmico (Figura 11) os valores individuais de cada atividade foram contabilizados (conforme descrito no apêndice C) para que, totalizando a Emissão, Custo e DExA das atividades, cada *input* tivesse seu total calculado, alimentado os Controladores Fuzzy, conforme descreve a Figura 17.

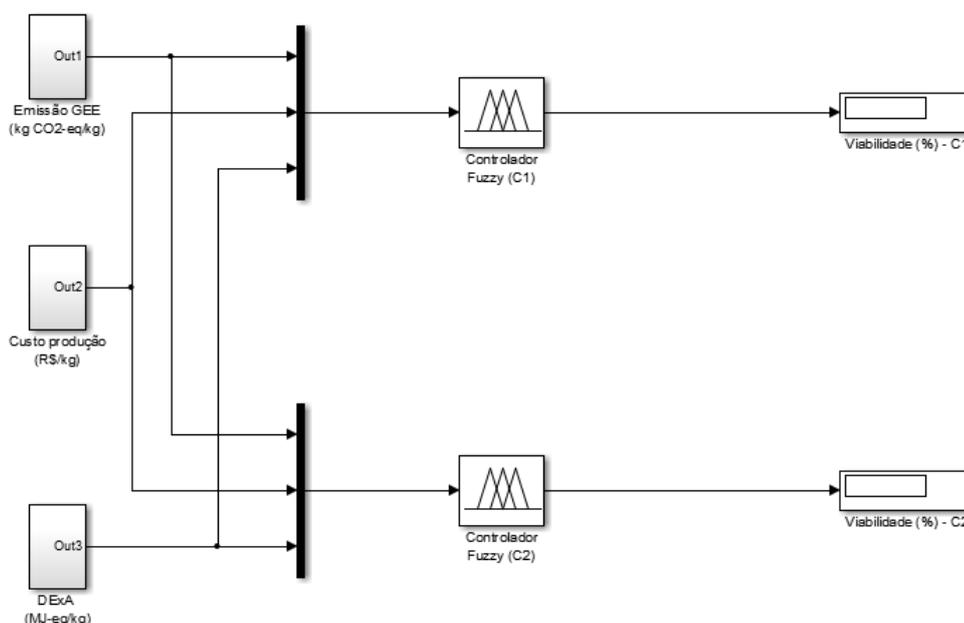


Figura 17 – Visão geral do Controlador Dinâmico-Fuzzy.

5.6 Resultados e Discussões

5.6.1 Emissão de GEE, BE e RE

Comparando o valor referente a Emissão de GEE do biodiesel de pinhão manso com outras fontes de energia, conforme Figura 18, podemos visualizar que a mesma é inferior apenas ao diesel e a dois casos de biodiesel de microalgas (C3 e C4), enfatizando sua elevada expectativa.

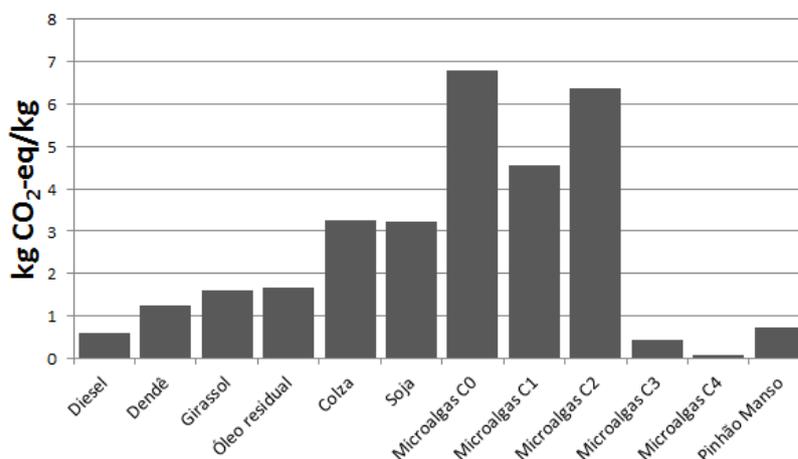


Figura 18 – Comparativo das Emissões de GEE de diversas fontes energéticas.

Fonte: Adaptado de [Maranduba \(2013\)](#)

Em seu estudo, [Maranduba \(2013\)](#) analisa aspectos ambientais sob a ótica de cinco cenários para produção de biodiesel a partir de microalgas: C0, sendo proposto por [Xu et al. \(2011\)](#) com algumas alterações; C1, sendo C0 com reaproveitamento

da biomassa residual, via pirólise; C2, sendo também C0 com reaproveitamento da biomassa residual, mas via biodigestão Anaeróbica; C3, sendo C1 com integração com uma destilaria de álcool; e C4, sendo C2 com integração com uma destilaria de álcool.

Considerando um ciclo de vida de 15 anos, a produção de biodiesel de pinhão manso teve uma emissão total de 88.710,23 kg CO₂-eq.

Se analisarmos a Emissão de GEE de cada subsistema envolvido podemos visualizar o responsável pela maior emissão, destacando assim o “gargalo do sistema”. A Figura 19 ilustra o percentual de emissão de cada etapa (conforme a divisão dinâmica), servindo de fundamento para um maior detalhamento.

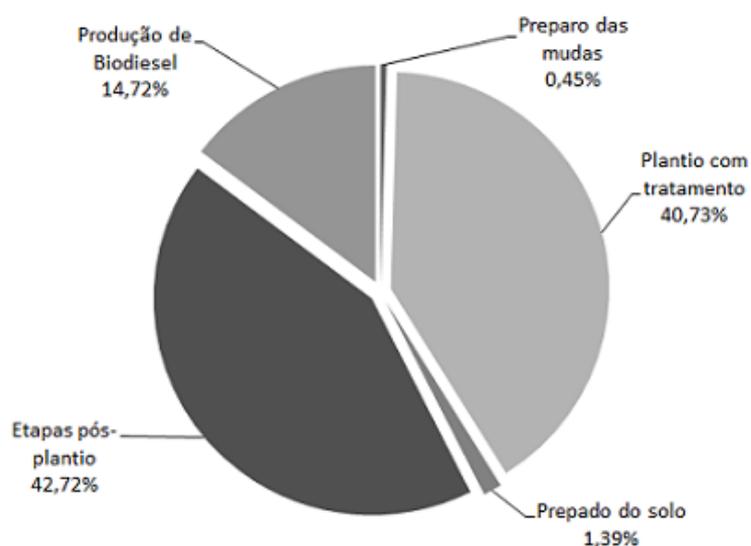


Figura 19 – Detalhamento da Emissão de GEE do biodiesel de pinhão manso.

Conforme a figura anterior, o subsistema responsável pela maior Emissão de GEE é a Etapa pós-plantio (42,72%). E, de posse dessa informação, podemos detalhar apenas essa etapa, com intuito de verificar qual atividade contribui em maior intensidade para isso, como mostra a Figura 20.

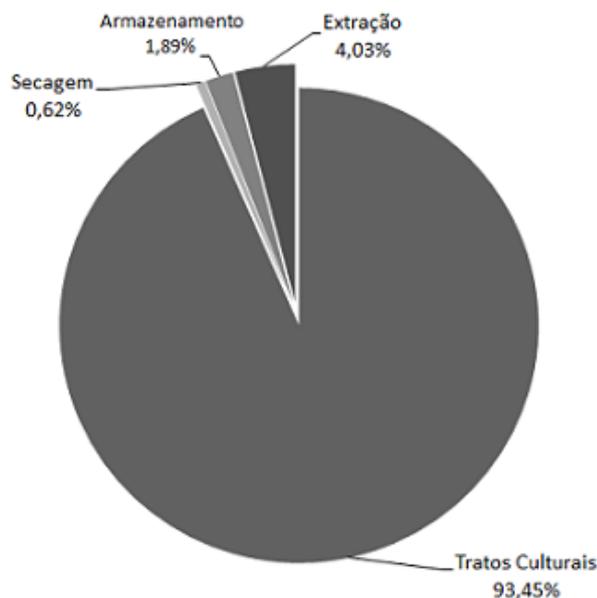


Figura 20 – Detalhamento da Etapa pós-plantio, considerando apenas as atividades com emissões diferentes de zero.

Causador de mais de 93% das emissões da Etapa pós-plantio, os Tratos Culturais é a atividade com maior emissão, o que se justifica pela elevada quantidade de fertilizantes do tipo NPK (Nitrogênio, Fósforo e Potássio) necessária na cadeia produtiva. Salientamos que as maiores de emissões ocorrem a partir do 4º ano, quando a cadeia atinge o ápice de produtividade, sendo necessário um maior uso de NPK e de operações envolvendo a queima de combustíveis fósseis.

Com relação ao BE e à RE, a Figura 21 ilustra que o pinhão manso se mostra uma alternativa favorável se comparada com outras oleaginosas, visto que os indicadores estão situados acima dos valores encontrados para mamona e soja, considerando um ciclo de vida de 15 anos com produção no Brasil.

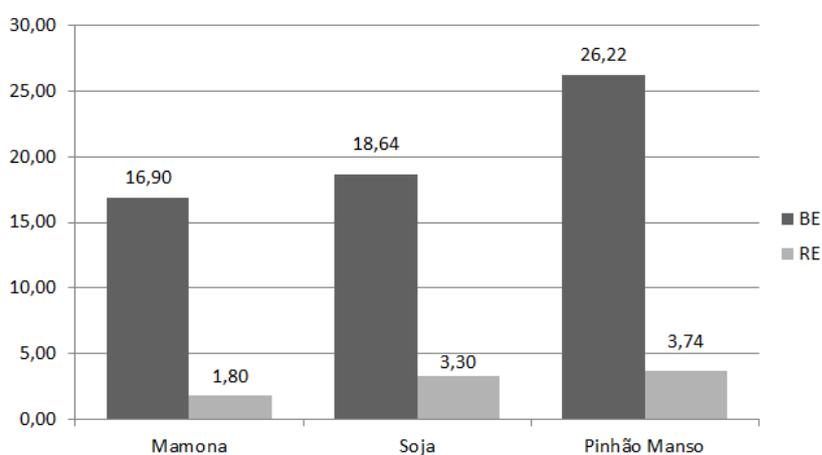


Figura 21 – Comparação do BE (em GJ/ha) e da RE do óleo de pinhão manso com outras oleaginosas.

Fonte: Adaptado de Almeida Neto et al. (2004)

5.6.2 Modelo Dinâmico-Fuzzy

Com o modelo construído, viabilidades podem ser estimadas, bastando parametrizar o modelo. A Tabela 14, apresenta a viabilidade para os cenários C_1 e C_2 (ambiental e econômico, respectivamente) de algumas oleaginosas. Conforme descrito anteriormente, apenas o dinamismo do pinhão manso está sendo considerado, uma vez que foi o único que a ser observado a partir de uma lavoura real. Nos demais casos, os dados foram obtidos por meio de pesquisa bibliográfica no qual, possivelmente, o dinamismo presente não foi considerado.

Tabela 14 – Simulações utilizando o Controlador Dinâmico-Fuzzy para 7 oleaginosas, incluindo o pinhão manso, para o cenário ambiental (C_1) e econômico (C_2)

Oleaginosa	Emissão (kg CO ₂ -eq/kg)	Custo (R\$/kg)	DExA (MJ-eq/kg)	Viabilidade (C ₁)	Viabilidade (C ₂)
Pinhão Manso	0,62	0,83	168,5	92,5	75,0
Soja	3,23	1,14	199,4	33,9	75,0
Dendê	1,25	1,07	228,1	90,2	75,0
Girassol	1,61	1,59	34,3	82,0	75,4
Colza	3,25	1,40	40,5	52,3	73,1
Microalgas (C0)	5,57	5,74	40,1	25,0	25,0
Microalgas (C4)	0,07	5,74	40,1	92,2	25,0

Do ponto de vista do cenário ambiental, o pinhão manso tem uma elevada viabilidade (92,5%) que pode ser atribuída à sua baixa emissão, ficando atrás apenas do C4 das microalgas, que tem viabilidade ligeiramente menor (92,2%) devido ao seu elevado custo. Isso ocorre mesmo com a DExA do pinhão manso superior ao C4 das microalgas, *input* que segundo os especialistas é um dos menos impactantes para o resultado final, independente do contexto analisado.

Sobre o cenário econômico, vale ressaltar que, nas condições atuais, o governo tem papel fundamental na produção das mesmas a partir do momento que geram subsídios que incorporem ao valor final do produto, diminuindo assim seu custo de produção aumentando a viabilidade da mesma. Não apenas no pinhão manso, mas em outras fontes como por exemplo o C4 das microalgas que possui baixíssimas Emissões de GEE e DExA. Porém, seu alto custo produtivo faz com que sua viabilidade econômica seja de 25,0%, ao contrário de seus 92,2% de viabilidade ambiental.

A soja, oleaginosa mais utilizada na produção de biodiesel no Brasil, tem uma viabilidade ambiental 172,86% menos que o pinhão manso, se equiparando quando a análise ocorre economicamente. Isso pois, pode-se observar a inferioridade do pinhão manso em todos os *inputs* considerados, tendo -80,8% de emissão, com custo de -27,2% e DExA de -15,5% se comparado com a fonte de maior produção de biodiesel nacional.

Outro recurso importante do *toolbox* utilizado na modelagem é a possibilidade

de visualizar superfícies a partir das combinações possíveis entre *inputs* e *output*. Esses gráficos são importantes pois ilustram as relações que determinadas entradas têm com a viabilidade, gerando uma correspondência entre as mesmas. Isso é útil pois permite uma visualização rápida do que seria necessário para atender ao objetivo proposto.

Por exemplo, a superfície que associa DExA e Custo em C_1 (visto na Figura 22) indica que as mesmas possuem pesos próximos ou idênticos, uma vez que elas pouco influenciam na viabilidade, e como foi descrito na metodologia, ambas possuem fator de 20% com relação a saída.

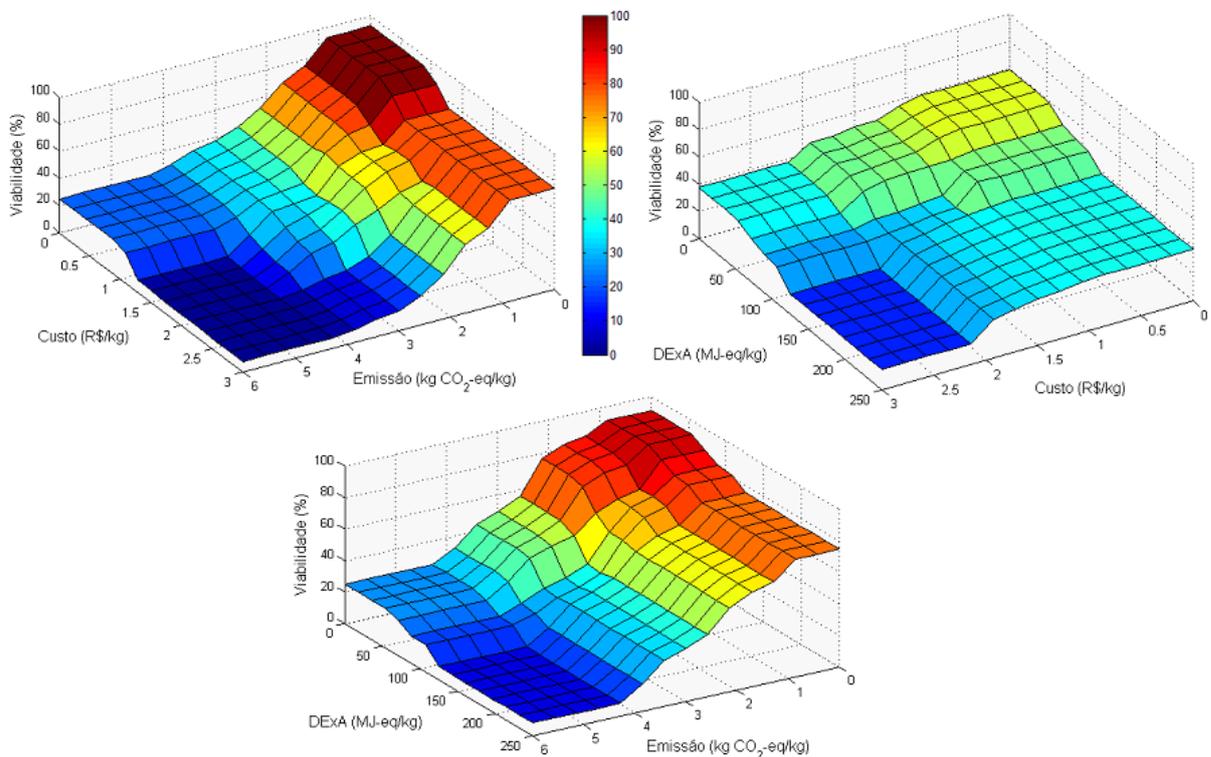


Figura 22 – Superfícies que relacionam os *inputs* com o *output* para C_1 .

Por outro lado, conforme mostra a superfície do Custo e Emissão em C_2 na Figura 23, a partir de determinado custo a emissão da produção não influencia na viabilidade, visto que nesse cenários a economia é o fator principal. De modo análogo, faixas podem ser definidas para resumir a partir de quais valores a viabilidade é considerada alta, e vice-versa, o que pode ser útil em tomada de decisões.

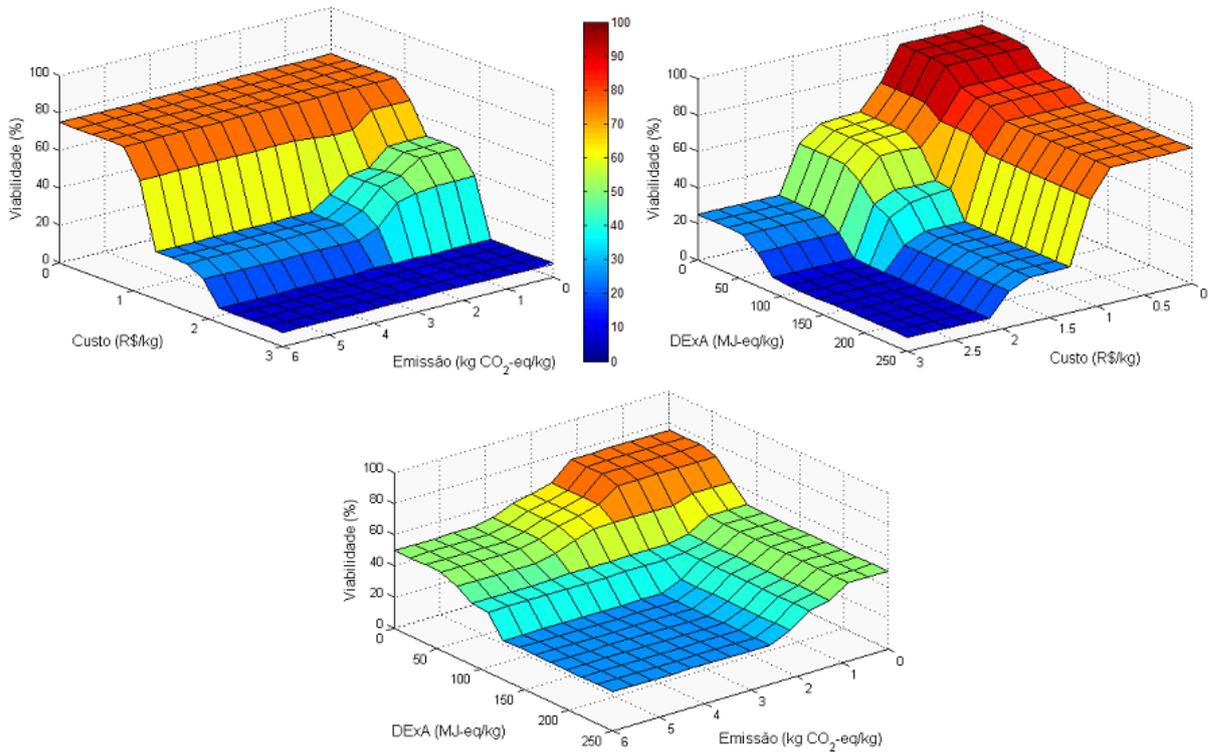


Figura 23 – Superfícies que relacionam os *inputs* com o *output* para C_2 .

A Figura 24 descreve a forma como cada *input* do modelo foi construído. Destacamos que a imagem representa o primeiro nível da variável responsável pelas Emissões de GEE, e que nas demais altera-se apenas os parâmetros que foram utilizados. Neste caso, 'Out1' (a saída do *input*) é a entrada para os controladores dos cenários propostos, C_1 e C_2 . Após a somatória de todos os subsistemas existentes, o valor é dividido pela produtividade total da lavoura para um ciclo de vida de 15 anos (143.008,25) para se obter o valor normalizado: kg CO₂-eq para cada kg de biodiesel produzido (kg CO₂-eq/kg).

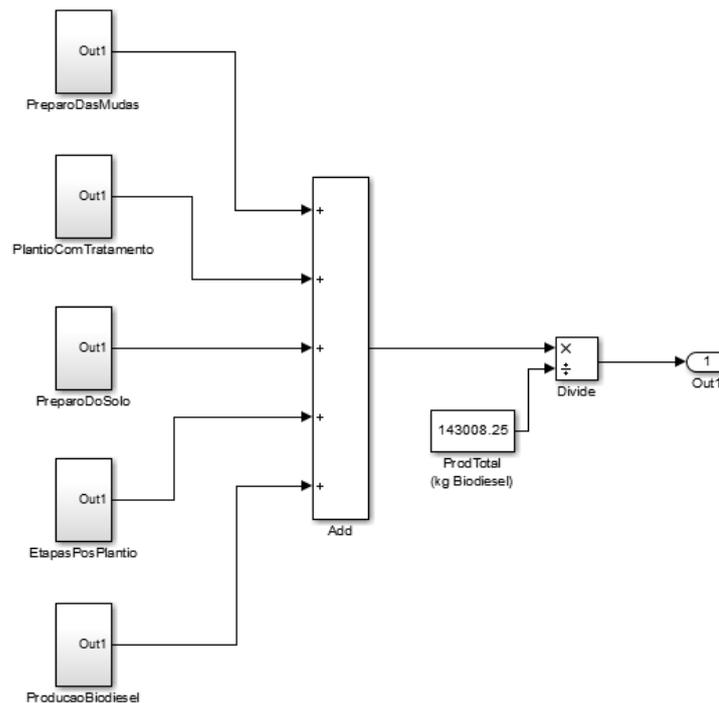
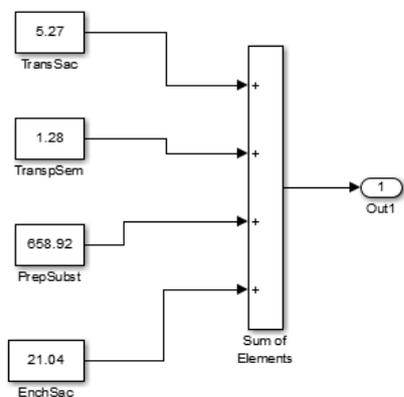
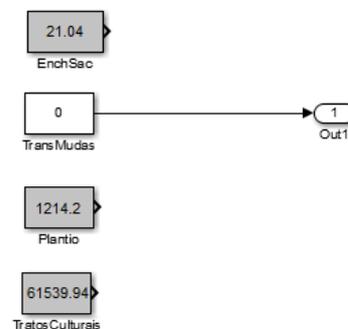


Figura 24 – Primeiro nível da variável Emissão de GEE. Ilustra como os *inputs* foram desenvolvidos.

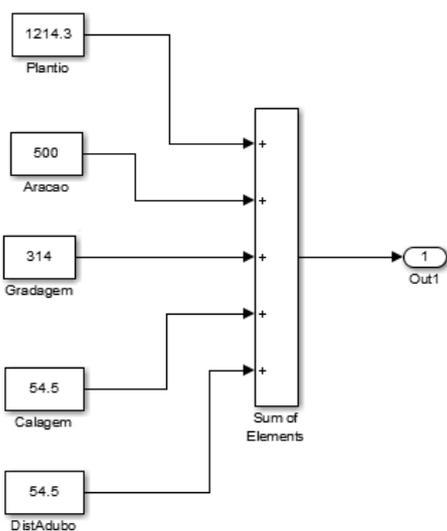
Os níveis seguintes consistiram em somar os dados relativos às atividades individualizadas, gerando uma representação gráfica para cada um dos cinco subsistemas (elencados na Figura 24: *PreparoDasMudas*, *PlantioCom Tratamento*, *PreparoDoSolo*, *Etapas-PosPlantio* e *ProducaoBiodiesel*). A Figura 25 ilustra como as atividades foram consideradas. Ressaltamos, mais uma vez que, como a representação nos outros casos (Custo e DExA) é rigorosamente a mesma (mudando apenas os parâmetros relativos à variável), será ilustrado apenas o caso das Emissões de GEE. Destacamos ainda que, nas imagens que ilustram o segundo nível, as atividades focadas em cinza (não contabilizadas) indicam que a atividade já foi considerada em outro subsistema (neste caso, a atividade em destaque pertence a mais de um subsistema, assim, para não haver sobreposição de valores, deve ser somada apenas uma vez).



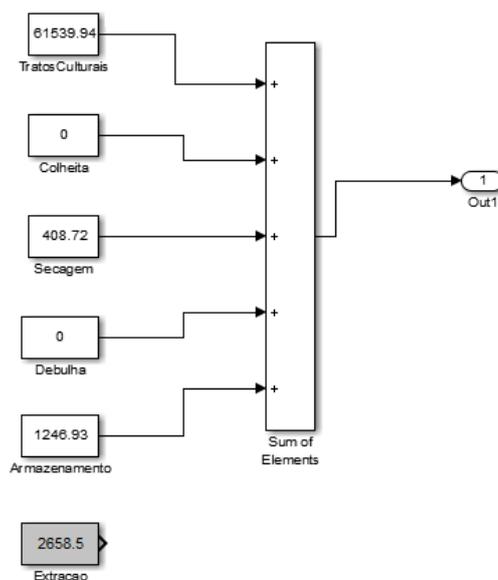
(a) Segundo nível para o Preparo das Mudas.



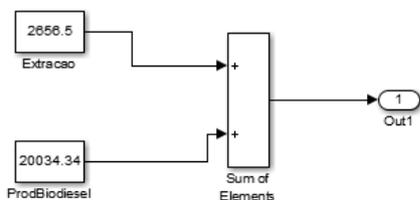
(b) Segundo nível para o Plantio com Tratamento.



(c) Segundo nível para o Preparo do Solo.



(d) Segundo nível para as Etapas Pós Plantio.



(e) Segundo nível para a Produção de Biodiesel.

Figura 25 – Representação dos subsistemas envolvidos no dinamismo do modelo.

6 Considerações finais

6.1 Conclusões

A atual realidade da oferta e demanda dos combustíveis fósseis expõe a necessidade de avanços quanto a viabilidade da produção a partir de opções renováveis. Como pudemos ver no desenvolvimento do trabalho, o biodiesel de pinhão manso surge como alternativa proeminente, uma vez que possui baixa emissão e baixo custo de produção. No entanto, para comparar biodieseis proeminentes de rotas e fontes distintas, deve-se considerar as particularidades das mesmas e a subjetividade envolvida, que podem gerar incertezas, uma vez que depende de tantos quantos fatores sejam considerados.

A utilização da Lógica Fuzzy e do SD possibilitou agregar, em um mesmo estudo, questões antes analisadas de forma isolada: viabilidade sob o ponto vista econômico, ambiental e exergética. Para isso, visamos minimizar a subjetividade presente em estudos que analisam esses fatores isoladamente, permitindo um avanço quanto a viabilidade da produção de biodiesel a partir de óleo de pinhão manso no Brasil, fonte pouco aproveitada. Além disso, permitiu tratar de forma objetiva e transparente a complexidade na análise das incertezas envolvidas na viabilidade do biodiesel. Destacamos que o procedimento criado é totalmente expansivo e que foi considerado apenas três variáveis por limitação de tempo.

O modelo poderá auxiliar no desenvolvimento de políticas públicas transparentes, uma vez que define claramente a importância dos fatores envolvidos, contribuindo, no caso do biodiesel, no planejamento energético do país.

Com a análise dos resultados, o estudo corroborou o que a literatura especializada tem apontado sobre o tema. Trata-se de uma fonte promissora sob diversos aspectos se comparado com outras opções disponíveis, sobretudo com algumas que possuem alta escala produtiva (como por exemplo a soja), principalmente no que diz respeito as Emissões de GEE e no Custo de Produção, que impactaria de forma ainda mais positiva caso fosse substanciado por órgãos externos.

Destacamos a elevada relação de dependência que existe entre os *inputs* e *output*. Dessa maneira, as superfícies ilustram a probabilidade da alta viabilidade, exibindo os objetivos que devem ser alcançados para uma produção eficaz. E, apesar de inicialmente simples, o dinamismo foi importante pois os subsistemas geraram uma ideia de causa e efeito nas atividades, útil no detalhamento de um processo pouco estudado.

Por fim, esperamos que essa pesquisa sirva como incentivo ao progresso em estudos dessa natureza, visto que as condições globais apresentadas reforçam a ideia de

medidas emergenciais e sensatas, visto que o modelo apresentado pode servir como ferramenta em análises futuras.

6.2 Trabalhos Futuros

Alguns aspectos importantes não foram considerados nesse estudo, desse modo, serão listadas algumas propostas de melhorias que podem ser agregadas ao projeto:

- automatizar a entrada de dados (não limitando a inserção apenas pela interface dos *toolboxes*);
- desenvolver *software* com base no modelo e registrar o produto;
- propor outros cenários, para que não fique fixado apenas ao ambiental e econômico;
- refinar as funções de pertinência e limites das mesmas, tornando o modelo mais realista;
- refinar a base de regras através do método delphi (que se baseia nas previsões e no consenso de um grupo de especialistas);
- comparar dados com mais oleaginosas que são utilizadas como fontes de biodiesel;
- considerar o dinamismo em outras produções através da obtenção de outros dados coletados, para que as comparações sejam mais precisas;
- incluir outros *inputs* oportunos, como Incentivos Governamental, Emergia, etc.

Referências

- ABILA, N. Biofuels adoption in Nigeria: A preliminary review of feedstock and fuel production potentials. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 21, n. 6, p. 785–795, 2010. ISSN 14777835.
- AL-WIDYAN, M. I.; AL-SHYOUKH, A. O. Experimental evaluation of the transesterification of waste palm oil into biodiesel. **Bioresource Technology**, v. 85, n. 3, p. 253–256, 2002. ISSN 09608524.
- ALBUQUERQUE, A. G. **Avaliação Exergética dos efluentes do processo industrial do álcool**. 75 p. Tese (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) — Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2005.
- ALMEIDA NETO, J. A. de; CRUZ, R. S. da; ALVES, J. M.; PIRES, M. de M.; ROBRA, S.; PARENTE JR, E. Balanço Energético de ésteres metílicos e etílicos de óleo de mamona. **Anais... I Congresso Brasileiro de Mamona**, Campina Grande - PB, 2004. Disponível em: <http://www.cnpa.embrapa.br/produtos/mamona/publicacoes/trabalhos/_cbm1/122.pdf>.
- ANP. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2014**. Rio de Janeiro - RJ: Ministério de Minas e Energia, 2014. 236 p.
- ANTOLÍN, G.; TINAUT, F. V.; BRICEO, Y.; CASTAO, V.; PEREZ, C.; RAMÍREZ, A. I. Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification. **Bioresource Technology**, v. 83, n. 2, p. 111–114, 2002. ISSN 09608524.
- ANTUNES, J. Lógica nebulosa para avaliar riscos na auditoria. **R. Contr. Fin.**, n. 5, p. 80–91, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rcf/v17nspe/v17nspea07.pdf>>.
- ARBAULT, D.; RIVIERE, M.; RUGANI, B.; BENETTO, E.; TIRUTA-BARNA, L. Integrated earth system dynamic modeling for life cycle impact assessment of ecosystem services. **The Science of the total environment**, Elsevier B.V., v. 472, p. 262–72, fev. 2014. ISSN 1879-1026. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24291626>>.
- ARRUDA, F. P.; BELTRÃO, N. E. de M.; ANDRADE, A. P. de; PEREIRA, W. E.; SEVERINO, L. S. Cultivo de pinhão manso (*Jatropha curca* L.) como alternativa para o semi-árido nordestino. **Revista Brasileira de Olericultura Fibrose**, v. 8, n. 1, p. 789–799, 2004.
- BAJPAI, D.; TYAGI, V. Biodiesel: Source, Production, Composition, Properties and Its Benefits. **Journal of Oleo Science**, v. 55, n. 10, p. 487–502, 2006. ISSN 1345-8957.
- BARROS, L. C. de. **Modelos determinísticos com parâmetros subjetivos**. 86 p. Tese (Mestrado em Matemática Aplicada), Campinas - SP, 1992.
- BARROS, L. C. de; BASSANEZI, R. C. **Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática**. Campinas: Coleção IMECC: Textos didáticos (v.5), 2006. 392 p. ISBN 8587185055.

- BECAERT, V.; BAGE, G. F.; CADOTTE, M.; SAMSON, R. Fuzzy Life Cycle Evaluation: A Tool to Interpret Qualitative Information in Streamlined LCA. **Anais... 13th International Conference on Life Cycle Engineering**, Leuven, p. 155–160, 2006. Disponível em: <<http://www.mech.kuleuven.be/lce2006/136.pdf>>.
- BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal Design and Optimization**. New York: Wiley-Interscience Publication, 1996. 543 p.
- BELLUCCI, D. P. **Sistemas Baseados em Regras Fuzzy e Aplicações**. 70 p. Tese (Mestrado em Matemática Aplicada) — Universidade Federal do ABC, Santo André - SP, 2009.
- BENETTO, E.; DUJET, C.; ROUSSEAU, P. Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 12, p. 1461–1467, dez. 2008. ISSN 13648152. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364815208000704>>.
- BOMFIM, M. A. D.; SANTOS, M. M. C. S.; SANTOS, S. F. Potencialidades da utilização de subprodutos da indústria de biodiesel na alimentação de caprinos e ovinos. **Tecnol. & Ciên. Agropec**, v. 3, n. 4, p. 15–26, 2009.
- BOORA, K. S.; DHILLON, R. S. Evaluation of genetic diversity in *Jatropha curcas* L. using RAPD markers. **Indian Journal of Biotechnology**, v. 9, n. January, p. 50–57, 2010.
- BÖSCH, M. E.; HELLWEG, S.; HUIJBREGTS, M. A. J.; FRISCHKNECHT, R. Applying cumulative exergy demand (CExD) indicators to the ecoinvent database. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 12, n. 3, p. 181–190, 2007. ISSN 0948-3349.
- BOZBAS, K. Biodiesel as an alternative motor fuel: Production and policies in the European Union. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 2, p. 542–552, 2008. ISSN 13640321.
- BRASIL. **Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011**. 2. ed. Brasília - DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2006. 110 p. ISBN 8573833572.
- BRASIL. **Lei 13.033, de 24 de Setembro de 2014. Dispõe sobre a adição obrigatória de biodiesel ao óleo diesel comercializado com o consumidor final**. Brasília - DF: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2014.
- CALDEIRA-PIRES, A.; RABELO, R. R.; XAVIER, J. H. V. Uso potencial da Análise do Ciclo de Vida (ACV) associada aos conceitos da produção orgânica aplicados à agricultura familiar. **Cadernos de ciência & Tecnologia**, v. 19, n. 62, p. 149–178, 2002. Disponível em: <<http://seer.sct.embrapa.br/index.php/cct/article/view/8802>>.
- CANDEIA, R. A. **Biodiesel de Soja: Síntese, Degradação e Misturas Binárias**. 150 p. Tese (Doutorado em Química Orgânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa - PB, 2008. Disponível em: <http://150.165.145.1/posgrad/teses/Tese_Roberlucia_Candeia.pdf>.
- CARVALHO, H. M.; RIBEIRO, A. B. Biodiesel: Vantagens e desvantagens numa comparação com o diesel convencional. **Bolsista de Valor: Revista de divulgação do Projeto Universidade Petrobras e IF Fluminense**, v. 2, n. 1, p. 49–53, 2012. Disponível em: <<http://www.essentiaeditora.iff.edu.br/index.php/BolsistaDeValor/article/view/2394/1283>>.

CARVALHO, M. G.; COSTA, A. Avaliação do Valor Fertilizante de Tortas Oleaginosas para Adubação Orgânica. **Rev. Bras. De Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 2883–2887, 2009.

CASTRO, R. S. de. **Cache comprimido adaptativo: projeto, estudo e implementação**. 147 p. Tese (Mestrado em Ciências) — Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2003.

CHEN, S.; BILLINGS, S. A. Neural networks for nonlinear dynamic system modelling and identification. **International Journal of Control**, v. 56, n. 2, p. 319–346, 1992. ISSN 0020-7179. Disponível em: <<http://eprints.soton.ac.uk/251130/>>.

CHERUBINI, F.; BIRD, N. D.; COWIE, A.; JUNGMEIER, G.; SCHLAMADINGER, B.; WOESS-GALLASCH, S. Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 53, n. 8, p. 434–447, 2009. ISSN 09213449.

CHIAVENATO, I. **Introdução a teoria geral da administração**. 7. ed. São Paulo: Editora Elsevier - Campus, 2004. 634 p.

CORDON, O. A historical review of evolutionary learning methods for Mamdani-type fuzzy rule-based systems: Designing interpretable genetic fuzzy systems. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 52, n. 6, p. 894–913, 2011. ISSN 0888613X.

DAMBISKI, L. **Síntese de biodiesel de óleo de nabo forrageiro empregando metanol supercrítico**. 94 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Materiais) — Universidade Tecnológica de Federal do Paraná, Curitiba - PR, 2007.

DEMIRBAS, A. Importance of biodiesel as transportation fuel. **Energy Policy**, v. 35, n. 9, p. 4661–4670, 2007. ISSN 03014215.

DESCHRIJVER, G.; CORNELIS, C.; KERRE, E. On the Representation of Intuitionistic Fuzzy t-Norms and t-Conorms. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 12, n. 1, p. 45–61, 2004. ISSN 1063-6706.

DIAS, M. R. B.; BARROS, L. C. O uso de Controladores Fuzzy para Resolução de Equações Diferenciais Ordinárias. **Biomatemática**, v. 15, p. 147–156, 2005.

DRAGONE, G.; FERNANDES, B.; VICENTE, A.; TEIXEIRA, J. Third generation biofuels from microalgae. **Current Research, Technology and Education Topics in Applied Microbiology and Microbial Biotechnology**, p. 1355–1366, 2010. ISSN 978-84-614-6195-0. Disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/16807>>.

FALEIROS, A.; YOUNEYAMA, T. **Teoria Matemática de Sistemas**. 1. ed. São José dos Campos - SP: Editora Arte & Ciência, 2002. 250 p. ISBN 9788574730745.

FAULIN, E. J. **O uso do System Dynamics em um modelo de apoio a comercialização: uma aplicação à agricultura familiar**. 191 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos - SP, 2004.

FERNANDEZ, M. P.; PEDROZA, A. de C. P.; REZENDE, J. F. de. Implementação de Políticas de Gerenciamento com lógica Fuzzy e Algoritmo Genético visando à melhoria da Qualidade de Serviço (QoS). **Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações**, v. 18, n. 2, p. 1–15, 2003.

- FERRARI, R. A.; OLIVEIRA, V. da; SCABIO, A. Biodiesel de Soja - Taxa de conversão em ésteres etílicos, caracterização físico-química e consumo em gerador de energia. **Química Nova**, v. 28, n. 1, p. 19–23, 2005. ISSN 1807-8648. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-40422005000100004&script=sci_arttext>.
- FERREIRA, L.; BORENSTEIN, D. Análise da viabilidade da produção de biodiesel a partir da soja no Brasil. **Anais... XXXIX SBPO: A Pesquisa Operacional e o Desenvolvimento Sustentável**, Fortaleza - CE, p. 2448–2459, 2007. Disponível em: <http://www.unicruz.edu.br/site/cursos/administracao/downloads/28-05-2008/artigo_ferreira.pdf>.
- FORMAN, E. **Decision by objectives**. McLean, 1998. 416 p. ISBN 9789812810694. Disponível em: <<papers://ef64220a-a077-48ec-ae81-be13b32d2073/Paper/p724>>.
- FORRESTER, J. W. Industrial Dynamics - After the First Decade. **Management Science**, v. 14, n. 7, p. 398–415, 1968.
- FRANCO, C. J.; OCHOA, M. C.; FLÓREZ, A. M. A system dynamics approach to biofuels in Colombia. **The 27th International Conference of the System Dynamics Society**, p. 1–11, 2009. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2009/proceed/papers/P1189.pdf>>.
- FRANCO, R. A. C. **Processo de terceirização logística: uma abordagem de dinâmica de sistemas**. 155 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Sistemas Lógicos) — Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3148/tde-17102005-193741/publico/DissertacaoRaulArellanoCaldeiraFrancoPOLIUSP.pdf>>.
- FUKUROZAKI, S. H. **Avaliação do Ciclo de Vida de potenciais rotas de produção de hidrogênio : Estudo dos sistemas de gaseificação da biomassa e de energia solar fotovoltaica**. 180 p. Tese (Doutorado em Ciências) — Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2011.
- GALDIANO, G. de P. **Inventário do ciclo de vida do papel offset produzido no Brasil**. 303 p. Tese (Mestrado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2006. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-13122006-163035/>>.
- GANGA, G. M. D.; CARPINETTI, L. C. R.; POLITANO, P. R. Gestão do desempenho em cadeias de suprimentos usando lógica fuzzy. **Gestão & Produção**, v. 18, n. 4, p. 755–774, 2011. ISSN 0104-530X.
- GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R.; TANSCHKEIT, R. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. **Anais... VI IFSA Congress-Tutorials**, p. 1–38, 1995.
- GUBITZ, G. M.; MITTELBAACH, M.; TRABI, M. Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L. **Bioresource Technology**, v. 67, p. 73–82, 1999.
- GUPTA, M.; QI, J. Theory of T-norms and fuzzy inference methods. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 40, n. 3, p. 431–450, 1991. ISSN 01650114.

- HASSOUNEH, I.; SERRA, T.; GOODWIN, B. K.; GIL, J. M. Non-parametric and parametric modeling of biodiesel, sunflower oil, and crude oil price relationships. **Energy Economics**, Elsevier B.V., v. 34, n. 5, p. 1507–1513, 2012. ISSN 01409883. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2012.06.027>>.
- HINZ, R. T. P.; VALENTINA, L. V. D.; FRANCO, A. C. Monitorando o desempenho ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela avaliação do ciclo de vida. **Revista Produção**, v. 7, 2007.
- HORLOCK, J. **Cogeneration - combined heat and power (CHP): thermodynamics and economics**. 2. ed. [S.l.]: Krieger, 1997. 226 p. ISBN 9780894649288.
- HUANG, Y.; LIU, D.; WU, H. Hierarchical Bayesian methods for estimation of parameters in a longitudinal HIV dynamic system. **Biometrics**, v. 62, n. 2, p. 413–423, 2006. ISSN 0006341X.
- JAFELICE, R. S. da M.; BARROS, L. C. de; BASSANEZI, R. C. **Notas em Matemática Aplicada Rubens Sampaio**. São Carlos - SP: SBMAC, 2005. 81 p. ISBN 8576510200.
- KAYA, C.; HAMAMCI, C.; BAYSAL, A.; AKBA, O.; ERDOGAN, S.; SAYDUT, A. Methyl ester of peanut (*Arachis hypogea* L.) seed oil as a potential feedstock for biodiesel production. **Renewable Energy**, Elsevier Ltd, v. 34, n. 5, p. 1257–1260, 2009. ISSN 09601481. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.10.002>>.
- KIM, S.; DALE, B. E. Life cycle assessment of various cropping systems utilized for producing biofuels: Bioethanol and biodiesel. **Biomass and Bioenergy**, v. 29, n. 6, p. 426–439, 2005. ISSN 09619534.
- KUMAR, A.; SHARMA, S. An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review. **Industrial Crops and Products**, v. 28, n. 1, p. 1–10, 2008. ISSN 09266690.
- LAVIOLA, B. G.; DIAS, L. A. dos S. Teor e acúmulo de nutrientes em folhas e frutos de pinhão-mansão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 1969–1975, 2008. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v32n5/18.pdf>>.
- LEE, K. H. **First Course on Fuzzy Theory and Applications**. 1. ed. New York: Springer, 2005. 340 p.
- LEEKWIJCK, W. V.; KERRE, E. E. Defuzzification: criteria and classification. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 108, n. 2, p. 159–178, 1999. ISSN 01650114.
- LEITE, L. E. C.; LIMA, O.; SOUZA FILHO, G. L. de; MEIRA, S. R. de L.; TEDESCO, P. C. A. R. Uma arquitetura de serviço para avaliação de contextos em redes de TV Digital. **Ansis... XXV Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos**, p. 1015–1028, 2007. Disponível em: <<http://www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/sbrc/2007/071.pdf>>.
- LIU, Y.; XU, Y.; ZHANG, F.; YUN, J.; SHEN, Z. The impact of biofuel plantation on biodiversity: a review. **Chinese Science Bulletin**, v. 59, n. 34, p. 4639–4651, 2014. ISSN 1001-6538. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11434-014-0639-1>>.
- LOPEZ, M.; LAURENTYS-MEDEIROS, J. **Semiologia Médica: as Bases do Diagnóstico Clínico**. 5. ed. São Paulo: Revinter, 2004. 1246 p. ISBN 8573098287.

- MA, F.; HANNA, M. A. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v. 70, n. 1, p. 1–15, 1999. ISSN 09608524.
- MAITY, J. P.; BUNDSCHUH, J.; CHEN, C. Y.; BHATTACHARYA, P. Microalgae for third generation biofuel production, mitigation of greenhouse gas emissions and wastewater treatment: Present and future perspectives - A mini review. **Energy**, Elsevier Ltd, p. 10, 2014. ISSN 03605442. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2014.04.003>>.
- MARANDUBA, H. L. **Redução dos impactos ambientais do Ciclo de Vida do biodiesel de Microalgas: uma proposta de integração com uma destilaria de álcool**. 77 p. Tese (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, 2013.
- MARQUES, I. R.; BARBOSA, S. de F.; BASILE, A. L. de O.; MARIN, H. F. Guia de apoio à decisão em enfermagem obstétrica: aplicação da técnica da lógica fuzzy. **Rev. Bras. Enferm.**, v. 58, n. 2, p. 349–54, 2005. ISSN 00347167. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/reben/v58n3/a19v58n3.pdf>>.
- MATHWORKS. **Simulink - Getting Started Guide (R2014b)**. Natick: The MathWorks, Inc., 2014. 80 p. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/pdf/_doc/simulink/sl_gs.pdf>.
- MATHWORKS. **Fuzzy Logic Toolbox - User's Guide (R2015a)**. Natick: [s.n.], 2015. 350 p. Disponível em: <http://www.mathworks.com/help/pdf/_doc/fuzzy/fuzzy.pdf>.
- MATSUURA, M. I. da S. F.; SILVA, G. A. da; KULAY, L. A.; LAVIOLA, B. G. Inventário do Ciclo de Vida do pinhão manso destinado à produção de Biodiesel. **Anais... II Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida em Produtos e Serviços**, Florianópolis - SC, v. 1, p. 41–46, 2010. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/56082/1/2011AA103.pdf>>.
- MATTOS, L. B. R. de. **A importância do setor de transportes na emissão de gases do efeito estufa - O caso do município do Rio de Janeiro**. 222 p. Tese (Mestrado em Engenharia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2001.
- MCBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma**, v. 77, n. 1997, p. 85–113, 1997.
- MEHER, L. C.; SAGAR, D. V.; NAIK, S. N. Technical aspects of biodiesel production by transesterification - A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 10, n. 3, p. 248–268, 2006. ISSN 13640321.
- MELLO, F. O. T. de; PAULILLO, L. F.; VIAN, C. E. de F. O biodiesel no Brasil: panorama, perspectivas e desafios. **Informações Econômicas, SP**, v. 37, p. 28–40, 2007. Disponível em: <<ftp://ftp.sp.gov.br/ftpiea/publicacoes/tec3-0107.pdf>>.
- MISSIO, M. **Modelos de EDP integrados a logica fuzzy e metodos probabilisticos no tratamento de incertezas: uma aplicação à febre aftosa em bovinos**. 195 p. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2008. Disponível em: <<http://cutter.unicamp.br/document/?code=000433737>>.

- MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas Dinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006. 625 p. ISBN 858832508X.
- MUNIZ, L.; FIQUEIREDO, R.; MAGNABOSCO, C.; WANDER, A.; MARTHA, G. Análise de risco da integração lavoura e pecuária com a utilização de System Dynamics. **Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural**, n. 1, 2007. Disponível em: <<http://www.sober.org.br/palestra/6/842.pdf>>.
- NABI, M. N.; RAHMAN, M. M.; AKHTER, M. S. Biodiesel from cotton seed oil and its effect on engine performance and exhaust emissions. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier Ltd, v. 29, n. 11-12, p. 2265–2270, 2009. ISSN 13594311. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.11.009>>.
- NASCIMENTO, F. N. do; OLIVEIRA NETO, O. J. de; FIGUEIREDO, R. S.; MAIA, L. C. de C. Metodologia System Dynamics aplicada ao estudo da viabilidade econômica da co-geração de energia pela utilização do bagaço da cana-de-açúcar. **Anais... Congresso Virtual Brasileiro de Administração**, 2009. Disponível em: <http://www.convibra.com.br/2009/artigos/41_0.pdf>.
- NAVARES, E. T. U. **Conjuntos Fuzzy na avaliação do estado de conservação de sistemas de usa da terra na Amazônia Ocidental, usando besouros (Scarabaeidae) com bioindicadores**. 81 p. Tese (Mestrado em Agronomia) — Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2007.
- NERY, A. R.; RODRIGUES, L. N.; SILVA, M. B. R.; FERNANDES, P. D.; CHAVES, L. H. G.; DANTAS NETO, J.; GHEYI, H. R. Crescimento do pinhão-mansão irrigado com águas salinas em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 5, p. 551–558, 2009. ISSN 14154366.
- NGO, P. D.; SHIN, Y. C. Gain estimation of nonlinear dynamic systems modeled by an FBFN and the maximum output scaling factor of a self-tuning PI fuzzy controller. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, Elsevier, v. 42, p. 1–15, 2015. ISSN 09521976. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0952197615000561>>.
- NIKOLAOU, I.; EVANGELINOS, K.; LEAL FILHO, W. A system dynamic approach for exploring the effects of climate change risks on firms' economic performance. **Journal of Cleaner Production**, Elsevier Ltd, v. 103, p. 499–506, 2015. ISSN 09596526. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652614010257>>.
- OLIVEIRA, G. H. C.; PACHECO, E. O. Análise de Cadeias de Suprimentos e do Efeito Chicote usando Sistemas Dinâmicos. **Anais... XXIV Encontro Nac. de Eng. de Produção**, Florianópolis - SC, p. 77–84, 2004.
- OLIVEIRA, L. B. de. **Custeio de Ciclo de Vida Adicionado: Um método para mensuração sustentável de custos**. 110 p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) — Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus - BA, 2014.
- OMETTO, A. R. **Avaliação do Ciclo de Vida do álcool etílico hidratado combustível pelos métodos EDIP, exergia e emergia**. 209 p. Tese (Doutorado em Engenharia) — Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-10072008-151015/en>>.

[php\\$ \delimiter"026E30F\\$nhhttp://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/artigos/impactosAmbientais/cicloDeVidaAlcool.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/etanolverde/artigos/impactosAmbientais/cicloDeVidaAlcool.pdf)>.

OPEC. **Annual Statistical Bulletin**. Vienna - Austria: [s.n.], 2014. 112 p.

OPENSHAW, K. A review of *Jatropha curcas*: An oil plant of unfulfilled promise. **Biomass and Bioenergy**, v. 19, n. 1, p. 1–15, 2000. ISSN 09619534.

PAULILLO, L. F.; VIAN, C. E. de F.; SHIKIDA, P. F. A.; MELLO, F. O. T. de. Álcool combustível e biodiesel no Brasil: quo vadis? **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 45, n. 3, p. 531–565, set. 2007. ISSN 0103-2003. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-20032007000300001&script=sci_arttext>.

PEREIRA, P. P. **Biodiesel e Agricultura Familiar: Estudos do nabo forrageiro**. 108 p. Tese (Mestrado em Desenvolvimento Regional) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco - PR, 2012.

PEREZ, A.; CASAS, A.; FERNANDEZ, C. M.; RAMOS, M. J.; RODRÍGUEZ, L. Winterization of peanut biodiesel to improve the cold flow properties. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 19, p. 7375–7381, 2010. ISSN 09608524.

PONCIANO, P. F.; LOPES, M. A.; Yanagi Junior, T.; FERRAZ, G. A. S. Análise do ambiente para frangos por meio da lógica Fuzzy: Uma revisão. **Arch. Zootec.**, v. 60, p. 1–13, 2011.

PRATA, B. de A. **Controle supervisorio da cadeia produtiva do biodiesel da mamona baseado em redes de Petri**. 135 p. Tese (Mestrado em Ciências) — Universidade Federal do Ceará, Fortaleza - CE, 2007.

RAHMAN, K. M.; MASHUD, M.; GALIB, A. A. Biodiesel from *Jatropha* Oil as an Alternative Fuel for Diesel Engine. **International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering**, v. 10, n. 3, p. 1–6, 2010.

REHAN, R.; UNGER, A.; KNIGHT, M. A.; HAAS, C. Strategic Water Utility Management and Financial Planning Using a New System Dynamics Tool. **Journal American Water Works Association**, v. 107, n. 1, p. 22–36, 2015.

REZNIK, L. **Fuzzy controllers**. Melbourne: Newnes, 1997. 240 p. ISSN 00051098. ISBN 0750634294.

ROSEN, M.; DINCER, I. On exergy and environmental impact. **International Journal of Energy Research**, v. 21, n. January 1996, p. 643–654, 1997. ISSN 0363-907X. Disponível em: <[http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(19970610\)21:7<643::AID-ER284>3.0.CO;2-I/abstract](http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/(SICI)1099-114X(19970610)21:7<643::AID-ER284>3.0.CO;2-I/abstract)>.

ROYON, D.; DAZ, M.; ELLENRIEDER, G.; LOCATELLI, S. Enzymatic production of biodiesel from cotton seed oil using t-butanol as a solvent. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 3, p. 648–653, 2007. ISSN 09608524.

SAFDARNEJAD, S. M.; HEDENGREN, J. D.; LEWIS, N. R.; HASELTINE, E. L. Initialization strategies for optimization of dynamic systems. **Computers and Chemical Engineering**, v. 78, p. 39–50, 2015.

- SAITO, J. R.; FIGUEIREDO, R. S.; BATALHA, M. O. Simulando Cadeias Agroindustriais. **Anais... II Workshop Brasileiro de Gestão de Sistemas Agroalimentares**, Ribeirão Preto, n. 016, p. 45–55, 1999.
- SALVIANO FILHO, P. de T. **Ferramenta didática para o ensino de vibrações e de dinâmica em Engenharia**. 111 p. Tese (Mestrado em Ciências Mecânicas) — Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2009.
- SANDRI, S.; CORREA, C. Lógica nebulosa. **Anais... V Escola de Redes Neurais, Promoção: Conselho Nacional de Redes Neurais**, São José dos Campos, p. c073–c090, 1999. Disponível em: <<http://raquel.ele.ita.cta.br/cnrm/minicursos-5ern/log-neb.pdf>>.
- SARIN, R.; SHARMA, M.; SINHARAY, S.; MALHOTRA, R. K. Jatropha-Palm biodiesel blends: An optimum mix for Asia. **Fuel**, v. 86, n. 10-11, p. 1365–1371, 2007. ISSN 00162361.
- SATO, M.; BUENO, O. de C.; ESPERANCINI, M. S. T.; FRIGO, E. P. A cultura do pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.): uso para fins combustíveis e descrição agrônômica. **Revista Varia Scientia**, v. 7, n. 13, p. 47–62, 2009. Disponível em: <<http://e-revista.unioeste.br/index.php/variascientia/article/viewArticle/2523>>.
- SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; MATHEUS, R. Transesterification of Vegetable Oils: a Review General Aspects of Transesterification Transesterification of Vegetable Oils Acid-Catalyzed Processes Base-Catalyzed Processes. **J. Braz. Chem. Soc.**, v. 9, n. 1, p. 199–210, 1998.
- SCRAMIM, F. C. L.; BATALHA, M. O. Supply Chain Management Em Cadeias Agroindustriais: Discussões a Cerca Das Aplicações No Setor Lácteo Brasileiro. **Anais... II Workshop Brasileiro de Gestão de Sistemas Agroalimentares**, p. 33–44, 1999.
- SILVA, F. F. B. **Desvendando a Lógica Fuzzy**. 129 p. Tese (Mestrado em Matemática) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2011.
- SILVA, P. R. F. da; FREITAS, T. F. S. de. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 843–851, 2008. ISSN 0103-8478.
- SIVANANDAM, S. N.; SUMATHI, S.; DEEPA, S. N. **Introduction to Fuzzy Logic using MATLAB**. 1. ed. Berlin: Springer, 2007. 430 p. ISBN 978-3-540-35780-3.
- SOUSA, J. N. de P. **Aplicação de lógica Fuzzy em sistemas de controle de tráfego metropolitano em rodovias dotadas de faixas exclusivas para ônibus**. 106 p. Tese (Mestrado em Ciências) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro - RJ, 2005.
- STERMAN, J. D. System dynamics modeling: Tools for learning in a complex world. **California Management Review**, v. 43, n. 4, p. 8–25, 2001. ISSN 0008-1256. Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2002/proceed/papers/CAREVIEW/C2STERMA.PDF>>.
- STUMM, J. **Sistema inteligente de monitoração alimentar via web baseado em lógica fuzzy**. 118 p. Tese (Mestrado em Ciência da Computação) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2005.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, v. 169, n. 1, p. 1–29, 2006. ISSN 0377-2217.

XU, L.; BRILMAN, D. W. F.; WITHAG, J. A. M.; BREM, G.; KERSTEN, S. Assessment of a dry and a wet route for the production of biofuels from microalgae: Energy balance analysis. **Bioresource Technology**, Elsevier Ltd, v. 102, n. 8, p. 5113–5122, 2011. ISSN 09608524. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2011.01.066>>.

ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338–353, 1965.

ZADEH, L. A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 90, n. 2, p. 111–127, 1997. ISSN 01650114.

Apêndices

APÊNDICE A – Inventário das Emissões de GEE (individual)

Tabela 15 – Fator de Emissão de GEE por unidade de produto/serviço, considerando um ciclo de vida de 15 anos

Material	Emissão ¹	Fonte (Ecoinvent)
Viveiro		
Calcário	0,02	limestone, milled, packed, at plant [CH]
Cloreto de Potássio	0,03	Potassium chloride [KCl]
Consumo de água	0,00	tap water, at user [CH]
Energia Elétrica	0,08	electricity, low voltage, production BR, at grid [BR]
Esterco	0,11	poultry manure, dried, at regional storehouse [CH]
Frete Sementes	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]
Saquinhos	1,95	polyethylene, HDPE, granulate, at plant [RER]
Super Simples	2,62	single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse [RER]
Preparo do solo		
Aração	100,00	tillage, ploughing [CH]
Calagem	10,90	tillage, currying, by weeder [CH]
Dist. de adubo	22,80	tillage, currying, by weeder [CH]
Gradagem	62,80	tillage, harrowing, by rotary harrow [CH]
Plantio		
Transplante	0,47	transport, lorry 3.5-7.5t, EURO5 [RER]
Primeira Rega	0,47	transport, lorry 3.5-7.5t, EURO5 [RER]
Adubo (4-14-8)	0,54	Conforme equação 19
Calcário	0,02	limestone, milled, packed, at plant [CH]
Energia Elétrica	0,08	electricity, low voltage, production BR, at grid [BR]
Transp. Calcário	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]
Transp. NPK	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]
Tratos culturais		
Adubação	25,40	fertilising, by broadcaster [CH]
NPK (20-00-20)	0,76	Conforme equação 19
Energia Elétrica	0,08	electricity, low voltage, production BR, at grid [BR]
Fungicida	10,59	fungicides, at regional storehouse [RER]
Herbicida	10,26	herbicides, at regional storehouse [RER]
Inseticidas	16,68	insecticides, at regional storehouse [RER]
Super Simples	2,62	single superphosphate, as P2O5, at regional storehouse [RER]
Transp. Adubo	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]
Transp. de água	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]

¹A emissão de GEE é dada em kg CO₂-eq/unidade. Assim, por exemplo, 1 kg de calcário tem emissão de 0,02 kg de CO₂.

Transp. Produção	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]
Transp. Super Simples	0,17	transport, lorry 16-32t, EURO5 [RER]
Ureia	5,84	urea ammonium nitrate, as N, at regional storehouse [RER]
Colheita		
Lonas Plásticas	1,95	polyethylene, HDPE, granulate, at plant [RER]
Sacaria	1,95	polyethylene, HDPE, granulate, at plant [RER]
Extração		
Energia elétrica	0,08	electricity, low voltage, production BR, at grid [BR]
Produção de Biodiesel		
Metanol	0,80	methanol, at regional storage [CH]
Metóxido de Sódio	4,84	sodium methoxide, at plant [GLO]
Hidróxido de Sódio	1,10	sodium hydroxide, 50% in H ₂ O, production mix, at plant [RER]
Ácido Clorídrico	0,86	hydrochloric acid, 30% in H ₂ O, at plant [RER]
Energia térmica	0,07	natural gas, burned in industrial furnace >100kW [RER]
Glicerina	0,00	glycerine, from soybean oil, at esterification plant [BR]

A emissão dos fertilizantes do tipo NKP é dada pela fórmula:

$$GEE_{NPK} = N * GEE_N + P * GEE_P + K * GEE_K \quad (19)$$

onde: GEE_{NPK} é a emissão do fertilizante do tipo NPK; N é a proporção de Nitrogênio; P é a proporção de Fósforo; K é a proporção de Potássio; GEE_N é a emissão por unidade de Nitrogênio; GEE_P é a emissão por unidade de Fósforo; e GEE_K é a emissão por unidade de Potássio. Sendo 3,31 kg CO₂-eq/kg a emissão do Nitrogênio (urea, as N, at regional storehouse [RER]), 2,62 kg CO₂-eq/kg a emissão do Fósforo (single superphosphate, as P₂O₅, at regional storehouse [RER]) e 0,50 kg CO₂-eq/kg a emissão do Potássio (potassium chloride, as K₂O, at regional storehouse [RER]).

APÊNDICE B – Inventário da DExA (individual)

Tabela 16 – Fator de DExA por unidade de produto/serviço, considerando um ciclo de vida de 15 anos

Material	DExA ¹	Fonte (Ecoinvent) ²
Viveiro		
Calcário	1,65	Limestone, crushed, washed
Cloreto de Potássio	67,00	Potassium chloride, as K ₂ O
Consumo de água	0,34	Water, deionised, from tap water, at user
Energia Elétrica	380,00	Electricity, low voltage
Esterco	-29,30	Poultry manure, fresh
Frete Sementes	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5
Saquinhos	87,30	Polyethylene, low density, granulate
Super Simples	577,00	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅
Preparo do solo		
Aração	6.140,00	Tillage, ploughing
Calagem	1.110,00	Tillage, currying, by weeder
Dist. de adubo	1.110,00	Tillage, currying, by weeder
Gradagem	4.920,00	Tillage, harrowing, by rotary harrow
Plantio		
Transplante	27,70	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5
Primeira Rega	27,70	Transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO5
Adubo (4-14-8)	96,50	Conforme equação 20
Calcário	1,65	Limestone, crushed, washed
Energia Elétrica	380,00	Electricity, low voltage
Transp. Calcário	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5
Transp. NPK	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5
Tratos culturais		
Adubação	1.460,00	Fertilising, by broadcaster
NPK (20-00-20)	65,20	Conforme equação 20
Energia Elétrica	380,00	Electricity, low voltage
Fungicida	1.720,00	Pesticide, unspecified
Herbicida	1.720,00	Pesticide, unspecified
Inseticidas	1.720,00	Pesticide, unspecified
Super Simples	577,00	Phosphate fertiliser, as P ₂ O ₅
Transp. Adubo	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5
Transp. de água	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5
Transp. Produção	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5
Transp. Super Simples	11,90	Transport, freight, lorry 7.5-16 metric ton, EURO5

¹A DExA é dada em MJ-eq/unidade. Assim, por exemplo, 1 kg de calcário tem DExA de 1,65 MJ.

²Para busca na mesma base de dados, deve-se acrescentar no final de cada fonte: (i) “{BR} | market for | Alloc Def, U”, para a eletricidade; (ii) “{RER} | single superphosphate production | Alloc Def, U”, para o super simples; e (iii) “{GLO} | market for | Alloc Def, U”, nos demais casos.

Ureia	259,00	Urea, as N
Colheita		
Lonas Plásticas	87,30	Polyethylene, low density, granulate
Sacaria	87,30	Polyethylene, low density, granulate
Extração		
Energia elétrica	380,00	Electricity, low voltage
Produção de Biodiesel		
Metanol	67,70	Methanol
Metóxido de Sódio	400,00	Sodium methoxide
Hidróxido de Sódio	339,00	Sodium hydroxide, without water, in 50% sol. state
Ácido Clorídrico	12,70	Hydrochloric acid, without water, in 30% sol. state
Energia térmica	1,87	Natural gas, burned in gas motor, for storage
Glicerina	232,00	Glycerine

A DExA dos fertilizantes do tipo NKP é dada pela fórmula:

$$DExA_{NPK} = N * DExA_N + P * DExA_P + K * DExA_K \quad (20)$$

onde: $DExA_{NPK}$ é a DExA do fertilizante do tipo NPK; N é a proporção de Nitrogênio; P é a proporção de Fósforo; K é a proporção de Potássio; $DExA_N$ é a DExA por unidade de Nitrogênio; $DExA_P$ é a DExA por unidade de Fósforo; e $DExA_K$ é a DExA por unidade de Potássio. Sendo 259,00 MJ-eq/kg a DExA do Nitrogênio (Urea, as N GLO| market for | Alloc Def, U), 577,00 MJ-eq/kg a DExA do Fósforo (Phosphate fertiliser, as P2O5 RER| single superphosphate production | Alloc Def, U) e 67,00 MJ-eq/kg a DExA do Potássio (Potassium chloride, as K2O GLO| market for | Alloc Def, U).

APÊNDICE C – Inventários de acordo com o modelo dinâmico

Tabela 17 – Emissões, Custos e DExA de cada subsistema, com base no esboço dinâmico e considerando um ciclo de vida de 15 anos

Subsistema	Emissão (kg CO ₂ -eq)	Custo (R\$)	DExA (MJ-eq)
PreparoDasMudas			
Transporte dos Sacos	5,27	221,22	235,71
Transporte das Sementes	1,28	337,98	89,25
Preparo do Substrato	658,92	1.703,38	-46.800,75
Enchimento dos Sacos	21,04	345,13	99.899,70
PlantioComTratamento			
Enchimento dos Sacos	21,04	345,13	99.899,70
Transporte das Mudas	0,00	98,86	0,00
Plantio	1.214,30	3.244,56	196.682,00
Tratos Culturais	61.539,94	90.117,65	11.071.990,00
PreparoDoSolo			
Plantio	1.214,30	3.244,56	196.682,00
Aração	500,00	1.327,32	30.700,00
Gradagem	314,00	368,70	24.600,00
Calagem	54,50	368,70	5.550,00
Distribuição do Adubo	54,50	3.502,65	5.550,00
EtapasPosPlantio			
Tratos Culturais	61.539,94	90.117,65	11.071.990,00
Colheita	0,00	0,00	0,00
Secagem	408,72	1.635,80	18.298,08
Debulha	0,00	0,00	0,00
Armazenamento	1.246,93	8.452,45	55.823,99
Extração	2.656,50	5.558,29	12.618.375,00
ProdBiodiesel			
Extração	2.656,50	5.558,29	12.618.375,00
Produção de Biodiesel	20.034,34	2.064,72	14.240,38
Total¹	88.710,23	119.344,41	24.095.233,36

¹Deve-se levar em consideração as intersecções do modelo dinâmico. Assim, para que o total não seja superestimado, processos que pertencem a mais de um subsistema devem ser considerados apenas uma vez.