

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESEMPENHO EXERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA NO USO DO BIOCÁRVÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO.**

JAIR DINOAH DE ARAÚJO JÚNIOR

ORIENTADOR: ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA-PIRES

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS

BRASÍLIA/DF: AGOSTO – 2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DESEMPENHO EXERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA NO USO DO BIOCÁRVÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO.**

JAIR DINOAH DE ARAÚJO JÚNIOR

**TESE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM CIÊNCIAS MECÂNICAS.**

APROVADA POR:

**Prof. Dr. Armando de Azevedo Caldeira-Pires (ENM-UnB)
(Orientador)**

**Prof. Dr. Mário Benjamim Baptista de Siqueira (ENM-UnB)
(Examinador Interno)**

**Prof. Dr. João Paulo Guimarães Soares (Embrapa-UnB)
(Examinador Externo)**

**Prof. Dr. Sérgio Botelho de Oliveira (Química-IFG)
(Examinador Externo)**

BRASÍLIA/DF, 12 DE AGOSTO DE 2019

FICHA CATALOGRÁFICA

ARAÚJO JR., JAIR DINOAH DE

Desempenho exergético e emissões de gases de efeito estufa no uso do biocarvão no setor sucroenergético [Distrito Federal] 2019.

179 p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Doutor, Ciências Mecânicas).

Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica. Pós-Graduação em Ciências Mecânicas.

1. ACV

2. Biocarvão

3. Bioenergia

4. Exergia

5. GEE

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO JR., J. D. (2019). Desempenho exergético e emissões de gases de efeito estufa no uso do biocarvão no setor sucroenergético. Tese de Doutorado em Ciências Mecânicas, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 179 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Jair Dinoah de Araújo Júnior.

TÍTULO: Desempenho exergético e emissões de gases de efeito estufa no uso do biocarvão no setor sucroenergético.

GRAU: Doutor

ANO: 2019

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa tese de doutorado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Jair Dinoah de Araújo Júnior

Rua 227-A nº 107, Ap. 1003, Setor Leste Universitário.

74.610-155

Goiânia – GO – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade de Brasília pela oportunidade de realizar esta tese de doutorado, e a todos que direta ou indiretamente contribuíram para conclusão deste trabalho, e, em especial:

Ao professor orientador Armando de Azevedo Caldeira-Pires, do Programa de Pós-Graduação em Ciências Mecânicas na UnB, pelo acompanhamento neste trabalho;

Ao professor Sérgio Botelho de Oliveira, do programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG, pela co-orientação;

Aos colegas do IFG, os professores: José Luiz de Oliveira Pena, Eider Lúcio de Oliveira e Wesley Pacheco Calixto, pelo auxílio em tópicos específicos;

Ao Instituto Federal de Goiás, em especial nas pessoas do professor Hipólito Barbosa, chefe do departamento de áreas acadêmicas 4 e José Luis Domingos, gerente de pesquisa e pós-graduação, nos encaminhamentos iniciais deste trabalho.

À Família pela compreensão.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais (*in memoriam*),
exemplos de conduta e sucesso.

O primeiro consegui fazê-lo,
já o segundo,
não cheguei tão longe,
mas certamente, parte deste está aqui.

RESUMO

DESEMPENHO EXERGÉTICO E EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO USO DO BIOCÁRVÃO NO SETOR SUCROENERGÉTICO.

Autor: Jair Dinoah de Araújo Júnior

Orientador: Armando de Azevedo Caldeira-Pires

Programa de Pós-graduação em Ciências Mecânicas

Brasília-DF, agosto de 2019

A perda da qualidade da energia ao longo de um processo qualquer pode ser avaliada pela grandeza termodinâmica relacionada ao desempenho entrópico, a exergia, definida como o trabalho máximo que pode ser obtido de um sistema desde seu estado inicial até atingir o estado final, caracterizado pelo equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Após nortear melhorias em equipamentos e processos pós crise do petróleo da década de 70, hoje consolidada nestes termos a exergia tem demonstrado ser também um indicador ambiental, ao quantificar o uso de recursos, renováveis ou não, em processos quaisquer. Ao tratar fluxos de massa e de energia com a mesma unidade de energia, que é a exergia Joules, esta grandeza possui vantagens em relação a outros indicadores de desempenho ambiental, porém relacioná-la com a tradicional metodologia da ACV (Avaliação do Ciclo de Vida) mesmo que somente no indicador referente às emissões de gases de efeito estufa (GEE) não é tão simples. Trabalhando com três tipos de exergia em dois cenários, o primeiro, de referência, sem uso do biocárvão e o segundo ao retornar este produto ao solo agrícola, trouxe para a exergia CEENE (*Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment*) os seguintes resultados: a) com o uso do biocárvão houve um aumento na produtividade da cana-de-açúcar em 10% e b) redução das emissões de óxido nitroso em 27%. Essas mudanças resultaram em alterações entre os cenários 1 e 2, reduzindo a exergia destruída (CEENE) de 390 para 355 MJ/MJ de etanol (9,0%) e uma diminuição das emissões de GEE de 11,8 para 11,0 g de CO₂ equivalente / MJ etanol (6,8%). A análise de sensibilidade, além de trazer uma equação que relaciona a exergia com as emissões, mostrou a produtividade ser bastante sensível, onde a exergia mostrou uma sensibilidade de -0,49, e as emissões totais este valor é ligeiramente inferior, -0,41. Especificamente para as emissões de N₂O no solo, a sensibilidade da exergia foi quase nula e referente às emissões foi de 0,077. Seja com o uso da eficiência exergética CEENE ou *Breeding*, usando estes mesmos indicadores, houve resultados equivalentes, porém, por abranger de maneira mais sensível demais indicadores, a exergia *Breeding* é vista como a mais adequada para quantificar emissões bem como a razão exergia-emissões na bioenergia.

Palavras – chave: ACV; biocárvão; bioenergia; exergia; GEE.

ABSTRACT

EXERGETIC PERFORMANCE AND GREENHOUSE GAS EMISSIONS IN THE USE OF BIOCHAR IN THE SUCROENERGY SECTOR.

Author: Jair Dinoah de Araújo Júnior

Supervisor: Armando de Azevedo Caldeira-Pires

Post Graduate Program in Mechanical Sciences

Brasília-DF, August of 2019

The loss of energy quality throughout any process can be evaluated by thermodynamic magnitude related to entropic performance, the exergy, defined as the maximum work that can be obtained from a system from its initial state to its final state, characterized by thermodynamic equilibrium with the environment. After guiding improvements in equipment and processes following the oil crisis of the 1970s, exergy has also been shown to be an environmental indicator in quantifying the use of resources, renewable or otherwise, in any processes. Expanding this initial achievement, exergy has also proved to be an environmental indicator, quantifying the use of renewable and non-renewable resources in any process. In dealing with mass and energy flows with the same energy unit, which is the Joules exergy, this greatness has advantages over other environmental performance indicators, but relates it to the traditional LCA (Life Cycle Assessment) even though only the indicator on greenhouse gas (GHG) emissions is not so simple. Working with three types of exergy in two scenarios, the first one, reference, without the use of biochar and the second when returning this product to the agricultural soil, brought to the exergy CEENE (*Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment*) the following results. With the use of biocarbon there was an increase in the productivity of sugarcane by 10% and a reduction of nitrous oxide emissions by 27%. These changes resulted in changes between Scenarios 1 and 2, reducing the destroyed exergy (CEENE) from 390 to 355 MJ / MJ of ethanol (9.0%) and a decrease in GHG emissions from 11.8 to 11.0 g of CO₂-equivalent / MJ ethanol (6.8%). The sensitivity analysis, in addition to bringing an equation that relates the exergy to the emissions, showed the productivity to be quite sensitive, where the exergy showed a sensitivity of -0.49, and the total emissions this value is slightly lower, -0.41. Specifically for the N₂O emissions in the soil, the exergy sensitivity was almost nil and the emissions were 0.077. With the use of the exergetic efficiency CEENE or Breeding, using these same indicators, there were equivalent results, however, since it includes a more sensitive indicator, Breeding exergy can be considered the most adequate to quantify emissions as well as the ratio exergy-emissions in bioenergy.

Keywords: Biochar; bioenergy, exergy, GHG, LCA.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	7
1.1.1 Objetivos gerais	7
1.1.2 Objetivos específicos.....	7
1.2 ESTRUTURA DA TESE	7
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 MÉTRICAS ACV E EXERGIA.....	9
2.2 TERMODINÂMICA E O USO EFICIENTE DE RECURSOS	10
2.2.1 Exergia como indicador termodinâmico de sustentabilidade	13
2.3 DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS BIOENERGÉTICOS.....	20
2.3.1 Exergia aplicada a sistemas bioenergéticos.....	30
2.4 BIOCARVÃO	36
2.4.1 Biocarvão e o desempenho agrícola	38
2.4.2 Biocarvão e o desempenho ambiental.....	46
3. METODOLOGIA	54
3.1 QUANTIFICAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS BIOENERGÉTICOS	54
3.2 ANÁLISE EXERGÉTICA DE SISTEMAS BIOENERGÉTICOS	58
3.3 BIOCARVÃO	68
3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	68
4. ESTUDO DE CASO	71
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA TECNOLÓGICO AGROINDUSTRIAL	71
4.2 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO / SISTEMA DE REFERÊNCIA	72
4.3 CONTABILIZANDO EMISSÕES E EXERGIA	75

4.3.1	Emissões de GEE	77
4.3.2	Exergias	77
4.3.3	Base de Dados inventariadas	82
4.3.4	Razão exergia-emissões	84
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	87
4.4.1	Resultados preliminares.....	87
4.4.2	Sensibilidade adimensional com 5 indicadores	91
4.4.3	Resultados exergia <i>versus</i> emissões com 5 indicadores	96
4.4.4	Resultados exergias e emissões	101
4.4.5	Equacionamento linear da razão exergia-emissões	105
4.5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	115
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	117
6.	APÊNDICES	127
6.1	PROGRAMAÇÃO NUMÉRICA SCILAB	127
6.2	DETALHAMENTO ACV SETOR AGRÍCOLA, por hectare	154
6.3	DETALHAMENTO ACV SETOR INDUSTRIAL, por hectare	156
6.4	DETALHAMENTO EXERGIA SETOR AGRÍCOLA, por hectare	158
6.5	DETALHAMENTO EXERGIA SETOR INDUSTRIAL, por hectare	160

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – BALANÇO ENERGIA E EMISSÕES NA PRODUÇÃO DO ETANOL NO BRASIL (FONTE: MACEDO <i>ET AL.</i> (2004), ADAPTADO).	28
TABELA 2 - ALTERAÇÃO DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS E FÍSICAS COM ADIÇÃO DE BIOCARVÃO AO SOLO (FONTE: MUKHERJEE E LAL, 2016 (ADAPTADO)).	42
TABELA 3 - EFEITOS DO BIOCARVÃO NAS PRINCIPAIS PROPRIEDADES DO SOLO E NA PRODUÇÃO DE GRÃOS (FONTE: CARVALHO, 2015).	46
TABELA 4 - CO ₂ EMITIDO NAS TRÊS SEMANAS DE INCUBAÇÃO (ADAPTADO EYKELBOSH <i>ET AL.</i> 2014).....	51
TABELA 5 - PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DE SOLOS MODIFICADOS COM BIOCARVÃO DA TORTA.	52
TABELA 6 – ENERGIA E EXERGIA ESPECÍFICA DE ALGUMAS FONTES E FATOR DE QUALIDADE DAS MESMAS (FONTES: SCIUBBA E WALL, 2007, ADAPTADO; DINCER E ROSEN 2007, ADAPTADO).	61
TABELA 7 – VALORES DE REFERÊNCIA UTILIZADOS NO CÁLCULO DO INVENTÁRIO.....	74
TABELA 8 – CONTABILIZAÇÃO EXERGIA E EMISSÕES DE CO ₂ -EQUIVALENTE, CENÁRIOS 1 E 2.....	83
TABELA 9–SENSIBILIDADES EXERGIAS E EMISSÕES GEE PARA PRODUTIVIDADE DA CANA E EMISSÕES N ₂ O PELO SOLO	113

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – NÚMERO DE ARTIGOS SOBRE EXERGIA E MEIO AMBIENTE POR ANO (FONTE: SCIENCE DIRECT, 2017).....	4
FIGURA 2 – EVOLUÇÃO DO NÚMERO DE ARTIGOS SOBRE BIOCARVÃO ÚLTIMOS ANOS (FONTE: SCIENCE DIRECT,2017).	4
FIGURA 3 - NÚMERO DE ARTIGOS POR ANO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS COM: ACV, EXERGIA E BIOCARVÃO (FONTE: SCIENCE DIRECT, 2017).....	4
FIGURA 4 - NÚMERO DE ARTIGOS POR ANO SOBRE BIOCOMBUSTÍVEIS COM: ACV+EXERGIA, ACV+BIOCARVÃO (FONTE: SCIENCE DIRECT, 2017).	4
FIGURA 5 - NÚMERO DE ARTIGOS COMBINANDO AS PALAVRAS CHAVE: BIOCOMBUSTÍVEIS, ACV, EXERGIA, BIOCARVÃO.	4
FIGURA 6 - QUALITATIVO DA RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA EXERGÉTICA DO PROCESSO E OS IMPACTOS AMBIENTAIS ASSOCIADOS (FONTE: DINCER E ROSEN, 2007, ADAPTADO).	15
FIGURA 7 – FLUXOS DE CARBONO NO SISTEMA BIOENERGÉTICO (FONTE: PTASINSKI (2016), ADAPTADO).	22
FIGURA 8 – TECNOLOGIAS DE CONVERSÕES DA BIOMASSA E SEUS PRINCIPAIS PRODUTOS (FONTE: PTASINSKI (2016), ADAPTADO).	23
FIGURA 9 - ESTRATÉGIAS INTEGRADAS PELO BIOCARVÃO.....	37
FIGURA 10–COMPORTAMENTO DO pH DO SOLO COM ACRÉSCIMO DE BIOCARVÃO.	43
FIGURA 11–COMPORTAMENTO DA CAPACIDADE DE TROCA CATIONICA COM ACRÉSCIMO DE BIOCARVÃO.	44
FIGURA 12 - COMPORTAMENTO DA DENSIDADE COM ACRÉSCIMO DE BIOCARVÃO.	44
FIGURA 13 - COMPORTAMENTO DA CAPACIDADE DE RETENÇÃO DE ÁGUA COM ACRÉSCIMO DE BIOCARVÃO.	44
FIGURA 14 - COMPORTAMENTO DA POROSIDADE COM ACRÉSCIMO DE BIOCARVÃO.	45
FIGURA 15 - COMPARATIVO EMISSÕES SOLO PURO E COM BIOCARVÃO-VINHAÇA-TORTA CRUA.	51
FIGURA 16 – FLUXOGRAMA GERAL MASSA E ENERGIA SETOR SUCROENERGIA.	57
FIGURA 17 - CAPTURA E EMISSÕES DE CO ₂ NO SETOR DA SUCROENERGIA.	57
FIGURA 18 - FLUXOS EXERGIA EM UM VOLUME DE CONTROLE.	62

FIGURA 19 – FLUXOS DE EXERGIA NO SETOR DA SUCROENERGIA.	66
FIGURA 20 - OBTENÇÃO/DESTINAÇÃO BIOCARVÃO EM AMBOS OS CENÁRIOS.	68
FIGURA 21 – EXEMPLO DE GRÁFICO RESULTANTE PARA DOIS VALORES BASE ALTERADOS (FONTE: GOMES <i>ET AL</i> , 2017).	69
FIGURA 22 – FLUXOGRAMA DO SISTEMA PRODUTIVO.	71
FIGURA 23 – VARIAÇÃO DA EXERGIA CEENE ENTRE OS CENÁRIOS (1-SEM BIOCARVÃO; 2-COM BIOCARVÃO).	88
FIGURA 24 – VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA CEENE ENTRE OS CENÁRIOS (1-SEM BIOCARVÃO; 2-COM BIOCARVÃO).	88
FIGURA 25 – VARIAÇÃO EFICIÊNCIA EXB ENTRE CENÁRIOS (1-SEM BIOCARVÃO; 2-COM BIOCARVÃO).	88
FIGURA 26 – VARIAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE ENTRE CENÁRIOS (1-SEM BIOCARVÃO; 2-COM BIOCARVÃO).	88
FIGURA 27 – RAZÃO ENTRE A EXERGIA CEENE ⁽¹⁾ E AS EMISSÕES GEE ⁽⁴⁾ ENTRE CENÁRIOS	90
FIGURA 28– RAZÃO ENTRE A EFICIÊNCIA EXERGÉTICA CEENE ⁽²⁾ E AS EMISSÕES DE GEE ⁽⁴⁾ ENTRE CENÁRIOS	90
FIGURA 29 - RAZÃO ENTRE A EXB ⁽³⁾ E AS EMISSÕES GEE ⁽⁴⁾ ENTRE CENÁRIOS.	90
FIGURA 30 – AUMENTO OU DIMINUIÇÃO GRANDEZAS ENTRE CENÁRIOS (%).	90
FIGURA 31 – ALTERAÇÃO PERCENTUAL DA RAZÃO EXERGIA-EMISSIONES ENTRE CENÁRIOS.	91
FIGURA 32 – ALTERAÇÃO DA RAZÃO EXERGIAS-EMISSIONES EM FUNÇÃO DA ALTERAÇÃO GEE ENTRE CENÁRIOS.	91
FIGURA 33–INDICADORES DE EXERGIA PARA A PRODUTIVIDADE DA CANA, X_1' (50 A 150%).	93
FIGURA 34 - INDICADORES DE EXERGIA PARA AS EMISSÕES DE N ₂ O NO SOLO, X_2' (50 A 150%).	93
FIGURA 35 - INDICADORES DE EXERGIA PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA, X_3' (50 A 150%)...	94
FIGURA 36 - INDICADORES DE EXERGIA PARA O USO DO DIESEL, X_4' (50 A 150%).	94
FIGURA 37 - INDICADORES DE EXERGIA PARA A PRODUÇÃO DE ETANOL, X_5' (50 A 150%).	95
FIGURA 38 - EMISSÕES RELATIVAS PARA OS INDICADORES, X_1' , X_2' , X_3' , X_4' E X_5' (50 A 150%).	95

FIGURA 39 – COMPORTAMENTO CEENE-GEE COM 5 INDICADORES.	97
FIGURA 40 - COMPORTAMENTO EFICIÊNCIA CEENE-GEE COM 5 INDICADORES.	97
FIGURA 41 - COMPORTAMENTO EXB-GEE COM 5 INDICADORES.	98
FIGURA 42 – RELAÇÃO ENTRE CEENE E EMISSÕES GEE COM: A) A VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CANA; B) VARIAÇÕES DE N ₂ O EMITIDO PELO SOLO.	99
FIGURA 43 - RELAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA CEENE E EMISSÕES GEE COM: A) A VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CANA; B) VARIAÇÕES DE N ₂ O EMITIDO PELO SOLO.	100
FIGURA 44 - RELAÇÃO ENTRE EXB E EMISSÕES GEE COM: A) A VARIAÇÃO DA PRODUTIVIDADE DA CANA; B) VARIAÇÕES DE N ₂ O EMITIDO PELO SOLO.	101
FIGURA 45 – COMPORTAMENTO CEENE PARA AS VARIÁVEIS PRODUTIVIDADE DA CANA E EMISSÕES DE N ₂ O SOLO (50 - 150%).	102
FIGURA 46 - COMPORTAMENTO EFICIÊNCIA CEENE PARA AS VARIÁVEIS PRODUTIVIDADE DA CANA E EMISSÕES DE N ₂ O (50 - 150%).	103
FIGURA 47 - COMPORTAMENTO EFICIÊNCIA BREEDING (EXB) PARA AS VARIÁVEIS PRODUTIVIDADE CANA E EMISSÕES DE N ₂ O (50 - 150%).	104
FIGURA 48 – COMPORTAMENTO EMISSÕES GEE PARA AS VARIÁVEIS PRODUTIVIDADE DA CANA E EMISSÕES DE N ₂ O (50 - 150%).	105
FIGURA 49 - COMPORTAMENTO FUNÇÃO Y _K PARA A PRODUTIVIDADE DA CANA (50 A 150%)..	107
FIGURA 50 - COMPORTAMENTO FUNÇÃO Y _K PARA ADUBAÇÃO NITROGENADA (50 A 150%)....	108
FIGURA 51 - COMPORTAMENTO FUNÇÃO Y _L PARA A PRODUTIVIDADE DA CANA (50 A 150%)..	109
FIGURA 52 - COMPORTAMENTO FUNÇÃO Y _L PARA ADUBAÇÃO NITROGENADA (50 A 150%). ...	110
FIGURA 53 – COMPORTAMENTO FUNÇÃO Y _M PARA A PRODUTIVIDADE DA CANA (50 A 150%).	111
FIGURA 54 - COMPORTAMENTO FUNÇÃO Y _M PARA ADUBAÇÃO NITROGENADA (50 A 150%)....	112

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

$\tilde{b}_{ch,i}$	Exergia química molar do componente i
Φ_i	Coefficiente de sensibilidade em X_i
κ_1	Razão exergia-emissões cenário 1
κ_2	Razão exergia-emissões cenário 2
ABC	Plano MAPA para a Agricultura de Baixo Carbono
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo
BECS	<i>Bioenergy With Carbon Storage</i>
CDP	<i>Cumulative Degree of Perfection</i>
CED	<i>Cumulative Energy Demand</i>
CEENE	CEENE (<i>Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment</i>)
CEnC	<i>Cumulative Energy Consumption</i>
CExC	<i>Cumulative Exergy Consumption</i>
CExD	<i>Cumulative Exergy Demand</i>
CF	<i>Carbon Footprinting</i>
CHT	Carbonização Hidrotermal
CMMAD	Comissão Mundial Sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento
CO ₂ -equivalente	Dióxido de Carbono Equivalente
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
CRA	Capacidade de Retenção de Água
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CTC/C	Relação entre a Capacidade de Troca Catiônica e Carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DDGS	Distillers Dried Grains with Solubles
EBC	<i>European Biochar Certificate</i>

<i>EGM</i>	<i>Entropy Generation Minimization</i>
EI	Ecologia Industrial
<i>EPA</i>	<i>Environmental Protection Agency</i>
ExB	Eficiência exergética <i>Breeding</i>
GEE	Gas de Efeito Estufa
<i>GHG</i>	<i>GreenHouseGas</i>
GHG Protocol	O protocolo de gases de efeito estufa (GEE), desenvolvido pelo World Resources Institute (WRI)
GWP	Global WarmingPotential
<i>GWP</i>	<i>Global WarmingPotential</i>
H	Entalpia
H ₀	Entalpia de referência
<i>HHV</i>	<i>Higher Heating Value</i>
<i>HTC</i>	<i>Hydrothermal Carbonization</i>
ICV	Inventário do Ciclo de Vida, fase de coleta de dados da ACV
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
<i>LHV</i>	<i>Lower Heating Values</i>
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
<i>MIT</i>	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MOS	Matéria Orgânica do Solo
NUE	<i>Nitrogen Use Efficiency</i>
OCDE	Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico
ONG	Organização Não Governamental
P	Pressão
P ₀	Pressão de referência

PAG	Potencial de Aquecimento Global
PC	Pegada de Carbono
PCA	Produtividade da Cana-de-Açúcar
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
pH	Potencial de Hidrogênio
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RLS	Regressão Linear Simples
<i>SCP</i>	<i>Sugarcane Productivity</i>
<i>SDG</i>	<i>Sustainable Development Goals</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica
SLT	Segunda Lei da Termodinâmica
SNG	Gás Natural Sintético
SR	Sistema de Referência
T	Temperatura
T_0	Temperatura de referência
TC	Tonelada de Cana
TPI	Terra Preta de Índio
<i>Triple Botton Line</i>	Tripé da Sustentabilidade
UF	Unidade Funcional
<i>UNEP</i>	<i>United Nations Eviroment Program</i>
<i>UNEP</i>	<i>United Nations Eviroment Program</i>
<i>UNFCCC</i>	<i>United Nation Framework Convention on Climate Change</i>
X_{cin}	Exergia cinética
X_{fis}	Exergia física

X_{pot}	Exergia potencial
$X_{quím}$	Exergia química
ε_{GEE}	Emissões de GEE
$\Psi(\text{CEENE})$	Eficiência CEENE (<i>Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment</i>)
$Y(X_i)$	Razão exergia-emissões da variável X_i

INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX a população humana do planeta mais que quadruplicou, passando de 1,7 para 7 bilhões de habitantes. Simultaneamente houve um incremento de 100 vezes na produção industrial e de 50 vezes no consumo de combustíveis fósseis, alcançando 10.700 MTEP (milhões de toneladas equivalentes de petróleo) em 2016 (BP, 2017). De acordo com Graedel e Allenby (2003), este elevado consumo tem demonstrado não ser sustentável, ora pela finitude dos recursos naturais ora pelos consequentes danos que provocam ao meio ambiente. O antigo modelo industrial, focado na produção (e produtividade), de certa forma tem atendido essas demandas de consumo, porém, de maneira imediatista. Despertou-se então, para se adotar um novo modelo industrial, que seja além de economicamente viável, ser social e ambientalmente sustentável.

Segundo a ONU (Organização das Nações Unidas), desenvolvimento sustentável é definido como “aquele que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”. Otimizar a utilização dos recursos “disponíveis” do planeta para atender estas necessidades, tornou um verdadeiro desafio para atender de forma responsável as crescentes demandas da população.

Neste contexto, visando uma produção mais sustentável para o setor agropecuário, nosso país assumiu o compromisso da Agenda 21 das Nações Unidas. Com o objetivo de implementar ações para a redução de emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), dentre outros, teve início em 2012 através do Ministério da Agricultura e Abastecimento, a implementação do plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono).

Mas quaisquer ações visando uma produção mais sustentável necessitam da mensuração dos possíveis impactos ambientais. Mais focada na sustentabilidade ambiental, existe uma metodologia madura que atende esta necessidade, que é a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Desde seu início, nos anos 60 e 70, esta metodologia evoluiu bastante, tornando desde então uma métrica bastante utilizada na determinação de impactos ambientais de produtos ou sistemas durante a utilização de seus respectivos insumos ou recursos (MCMANUS e TAYLOR, 2015).

Existe porém, uma outra métrica, denominada exergia, cujo uso na caracterização da sustentabilidade ambiental é mais recente. A base teórica da grandeza termodinâmica exergia é bem antiga, foi postulada ainda no século XIX, logo após o desenvolvimento da segunda lei da termodinâmica (SCIUBBA e WALL, 2007), mas sua aplicação na mensuração de impactos

ambientais ainda está em evolução. Daí surgem alguns questionamentos: a) A métrica exergia pode ser utilizada para avaliar sustentabilidade ambiental? b) Em quais setores econômicos? c) Quais são suas vantagens? d) Quais suas limitações?

Este trabalho propõe responder ao menos parte destas questões ao relacionar os resultados de um primeiro indicador, que diz respeito ao uso eficiente de recursos/insumos durante um processo, através da análise exérgica, com um segundo indicador, as emissões de GEE modelado dentro de uma ACV. A base de dados para esta comparação é oriunda do setor sucroenergético, denominação relativamente recente que representa o atual setor canavieiro brasileiro, ao produzir além do açúcar e do álcool, a eletricidade.

Setor representativo da bioenergia brasileira, a sucroenergia tem demonstrado ganhos de produtividade na produção açúcar/álcool e avanços na melhor destinação e reaproveitamento dos resíduos agrícolas e industriais, como exemplo, a mudança de rota da grande quantidade do “resíduo” bagaço, cujo excedente estava restrito à ração animal, passou a gerar eletricidade hoje exportada para o Sistema Interligado Nacional de Energia Elétrica (SIN).

Este reaproveitamento ou reciclagem, está dentro de um conceito da Ecologia Industrial (EI), em que as atividades industriais devem ser organizadas para tornar os fluxos de materiais e energia mais cíclicos, trazendo ganhos econômicos e ambientais (GRAEDEL e ALLENBY, 2003). Dentro deste conceito de tornar os fluxos mais cíclicos, durante este estudo serão avaliados os possíveis ganhos ao se reciclar parcela do carbono biótico presente na biomassa cana-de-açúcar, obtido a partir do resíduo industrial torta de filtro que retornará ao solo agrícola na forma de biocarvão.

Uma grande vantagem de se utilizar a exergia como métrica ambiental, é a possibilidade de se abordar todos os fluxos do sistema em uma unidade comum e simples, que é a unidade da energia, usualmente expressa em Joules. Por outro lado, a ACV já é uma ferramenta bastante consolidada e abrange, diferente da exergia, uma vasta gama de indicadores ambientais, podendo avaliar desde potencialidades de mudanças climáticas até a toxicidade marinha (ZISOPOULOS *et al.*, 2017). A aplicabilidade dessas grandezas, exergia e das emissões dentro de uma ACV, em setores sucroenergéticos na produção de biocombustíveis, de maneira desacoplada até existe, que será detalhado mais adiante, mas pouco existe da relação entre as palavras chave: biocombustíveis, exergia, ACV e biocarvões.

Apesar da aplicação de biocarvões no solo constar em pesquisas recentes e promissoras sobre

seu comportamento, tanto no que diz respeito à produtividade quanto ao desempenho ambiental (SPARKES e STOUTJESDIJK, 2011), pouco existe da sua conexão com a exergia. É esperado que com os resultados deste estudo com este sub-produto, estes venham a contribuir para consolidar a utilização da exergia, em sistemas bioenergéticos, como um indicador ambiental.

Mesmo que poucas, existe considerável crescimento nas publicações relacionadas ao tema deste trabalho, representados na Figura 1, Figura 2, Figura 3, Figura 4 e Figura 5 da página 4, contabilizadas a partir do ano de 2009 até o ano de 2018. A fonte destas informações é do sítio *www.sciencedirect.com*, a partir das palavras chave: a) *environmental* (meio ambiente); b) *biofuels* (biocombustíveis); c) *exergy* (exergia); d) *LCA* (ACV); e) *biochar* (biocarvão), que agrupadas de forma conveniente, trouxeram os seguintes resultados:

Observando a Figura 1, esta apresenta o crescente número de publicações na linha do tempo (2009 em diante) para a associação de palavras Exergia e Meio Ambiente. Estes dados, *a priori*, denotam um crescimento mais recente, mas bastante significativo da utilização destes termos.

É apresentado na Figura 2 a evolução do número de artigos sobre biocarvão, nos últimos anos. Observa-se os pouquíssimos artigos no início, a partir de 2009, e uma consistente evolução a partir deste ano com média de crescimento médio anual de 55%.

Em uma filtragem mais amplificada, na Figura 3 encontramos a evolução do número de artigos, ao longo dos últimos anos das palavras chave: a) biocombustíveis (*biofuels*); b) ACV (*LCA*); c) exergia (*exergy*); d) biocarvão (*biochar*).

Já na Figura 4, em uma filtragem mais restrita, encontramos a evolução do número de artigos, ao longo dos últimos anos das palavras chave: a) biocombustíveis (*biofuels*); b) ACV (*LCA*); c) exergia (*exergy*); d) biocarvão (*biochar*). A palavra chave meio ambiente (*environmental*), apesar de não constar na figura por simplificação, pouco interferiu nos resultados.

Exibido na Figura 5, apesar de crescente, poucas e recentes pesquisas existem sobre este tema, ainda em evolução, mostrando a necessidade de novos trabalhos científicos para o amadurecimento do uso da Exergia em aplicações ambientais, ainda incipientes. Esta mesma figura mostra que partir de 2012 foi atingido o patamar de 7 artigos, sugerindo uma tendência de aumento a partir de 2016. Não mostrado nos gráficos, estes quantitativos caem aproximadamente pela metade ao se acrescentar paulatinamente “filtros” como: *ethanol* (etanol), *bagasse* (bagaço) e *sugarcane* (cana-de-açúcar).

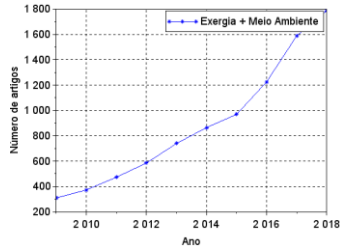


Figura 1 – Número de artigos sobre exergia e meio ambiente por ano (Fonte: Science Direct, 2017).

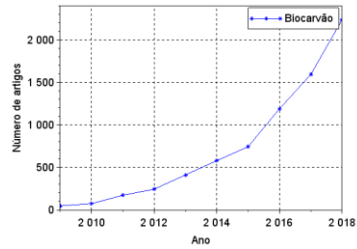


Figura 2 – Evolução do número de artigos sobre biocarvão últimos anos (Fonte: Science Direct, 2017).

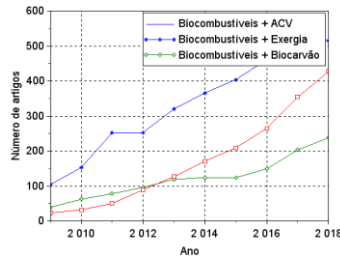


Figura 3 - Número de artigos por ano sobre biocombustíveis com: ACV, exergia e biocarvão (Fonte: Science Direct, 2017).

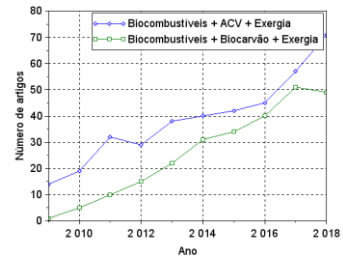


Figura 4 - Número de artigos por ano sobre biocombustíveis com: ACV+exergia, ACV+biocarvão (Fonte: Science Direct, 2017).

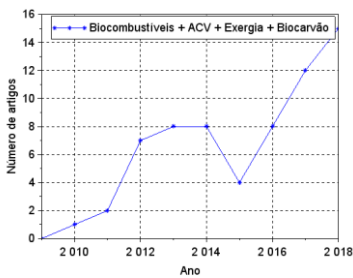


Figura 5 - Número de artigos combinando as palavras chave: biocombustíveis, ACV, exergia, biocarvão.

Ao final, no Quadro 1, estão transcritos de forma resumida alguns títulos dos artigos referenciados nas figuras anteriores.

Quadro 1 – Alguns dos títulos mais recentes com as palavras chave: biofuel, LCA, exergy, biochar.

Ano	Título do trabalho
2012	<i>Negative carbon intensity of renewable energy technologies involving biomass or carbon dioxide as inputs</i>
2012	<i>Biomass to Liquids Technology</i>
2013	<i>Assessment of a novel alder biorefinery concept to meet demands of economic feasibility, energy production and long term environmental sustainability</i>
2013	<i>Environmental assessment of gasification technology for biomass conversion to energy in comparison with other alternatives: the case of wheat straw</i>
2013	<i>The potential of using biomass-based reducing agents in the blast furnace: A review of thermochemical conversion technologies and assessments related to sustainability</i>
2014	<i>Review of evolution, technology and sustainability assessments of biofuel production</i>
2014	<i>Life cycle assessment of Brassica carinata biomass conversion to bioenergy and platform chemicals</i>
2016	<i>A review on hydrothermal pre-treatment technologies and environmental profiles of algal biomass processing</i>
2016	<i>Sustainability assessment of cellulosic biorefinery stillage utilization methods using emergy analysis</i>
2016	<i>Malaysia's stand on municipal solid waste conversion to energy: A review</i>
2017	<i>A review of the use of exergy to evaluate the sustainability of fossil fuels and non-fuel mineral depletion</i>
2017	<i>Sustainable biorefineries, an analysis of practices for incorporating sustainability in biorefinery design</i>
2017	<i>Extensive review of the opportunities to use biomass-based fuels in iron and steelmaking processes</i>
2017	<i>Polygeneration as a future sustainable energy solution – A comprehensive review</i>
2017	<i>Constructing an allocation factor based on product- and process-related parameters to assess environmental burdens of producing value-added sludge-based products</i>
2018	<i>The potential roles of bio-economy in the transition to equitable, sustainable, post fossil-carbon societies: Findings from this virtual special issue</i>

Observa-se que a correlação exergia-emissões é realizada com dados inventariados do processo agroindustrial da bioenergia brasileira, denominado sucroenergia, onde se produz etanol e eletricidade a partir da cana-de-açúcar, sendo estas informações tratadas em dois cenários neste trabalho.

- Cenário 1: sem aplicação do biocarvão no solo agrícola, que é o sistema de referência (SR);

- Cenário 2: com aplicação do biocarvão no solo agrícola, este proveniente da torta de filtro.

Este subproduto (biocarvão), ao ser reciclado no solo agrícola, altera significativamente o comportamento tanto das emissões quanto dos fluxos de exergia do sistema.

Além da alteração pura e simples dos resultados de exergia e de emissões, bem como da razão entre as mesmas, a partir do referido sistema de referência, foi realizada uma análise de sensibilidade cujo objetivo é diagnosticar o comportamento de algumas variáveis, dentre as quais as impactadas pelo uso do biocarvão, e também de trazer um equacionamento da relação exergia-emissões para estas últimas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivos gerais

Convalidar o uso da exergia como indicador ambiental para sistemas bioenergéticos. Pretende-se em um estudo de caso, a partir de um sistema de referência, correlacionar os resultados de uma análise exergética aos das emissões de GEE, em uma modelagem dentro de uma ACV, e de se inferir uma dependência entre estes resultados.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Descrever os aspectos positivos com o uso do biocarvão quanto ao seu desempenho ambiental e agrícola;
- b) Caracterizar os fluxos de exergia do setor sucroenergético, nas formas CEENE (*Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment*), eficiência CEENE e *Breeding*, comparando cenários com e sem o uso do biocarvão;
- c) Caracterizar as emissões de GEE do setor sucroenergético, comparando cenários com e sem o uso do biocarvão;
- d) Correlacionar os resultados das duas técnicas de diagnóstico, com as três formas de exergia e as emissões neste setor, trazendo os resultados pontuais da razão exergia-emissões, com e sem o uso do biocarvão para três tipos de exergia;
- e) Apresentar a exergia mais adequada para se correlacionar com as emissões.

1.2 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está estruturada em quatro capítulos, conforme descrição que segue:

Capítulo 1- Introdução

Apresenta os aspectos que motivaram o trabalho, que é aplicar a termodinâmica como uma nova métrica capaz de avaliar a sustentabilidade em processos industriais relacionando-a com a quantificação de GEE modelados dentro de uma ACV. Para demonstrar a importância do tema, mostra o aumento recente das pesquisas com as palavras chave tratadas neste estudo, que são: exergia, ACV, biocombustíveis e biocarvão. Apresenta por fim os objetivos geral e específicos, as ferramentas utilizadas, bem como, a estrutura geral da tese.

Capítulo 2- Revisão bibliográfica

Apresenta a base teórica necessária para o desenvolvimento do estudo. Exibe também, inicialmente a relação mais geral entre termodinâmica e o uso eficiente de recursos, e logo em

seguida a exergia como um indicador termodinâmico. Na sequência, ao exibir e tratar os sistemas bioenergéticos, aborda o desempenho ambiental destes sistemas da forma tradicional e posteriormente com o uso da exergia. Por fim, após apresentar o biocarvão, mostra os impactos no desempenho agrícola e ambiental ao se utilizar este produto.

Capítulo 3 - Metodologia

Inicialmente apresenta a metodologia de cálculo a ser implantada no estudo de caso, tanto no que se refere à quantificação dos gases de efeito estufa quanto na exergia, bem como as respectivas unidades funcionais que serão utilizadas. Exibe então os cenários 1 (de referência, sem aplicação do biocarvão) e cenário 2 (com aplicação do biocarvão), onde estarão sendo tratadas estas grandezas de forma pontual. Posteriormente são trabalhadas a razão exergia-emissões, cujo objetivo é correlacioná-las. Por fim apresenta o conceito de sensibilidade onde serão tratados o comportamento destas mesmas grandezas.

Capítulo 4 –Estudo de caso

De início descreve o sistema tecnológico agroindustrial deste estudo de caso, faz a contabilização das emissões bem como da exergia, esta última em três formas distintas, com as metodologias: CEENE, eficiência CEENE e *Breeding*. Além dos resultados individuais destas grandezas, é calculada a razão exergia-emissões, para ambos os cenários, onde no cenário 2, com biocarvão, as variáveis produtividade da cana e as emissões de óxido nitroso no solo são alterados para valores indicados pela literatura. Em seguida é feita uma varredura de cinco variáveis (indicadores), dentre os quais a produtividade da cana e as emissões de óxido nitroso, que trazem como resultado o comportamento destas nos resultados das exergias, das emissões e também da razão exergia-emissões, assim como as sensibilidades destes agentes. Através desta varredura é realizada uma regressão linear com os indicadores alterados com o uso do biocarvão, trazendo para cada indicador uma formulação matemática que relaciona a exergia com as emissões. Por fim, se faz uma discussão de todos estes resultados bem como a conclusão.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MÉTRICAS ACV E EXERGIA

A Ecologia Industrial (EI) trouxe uma nova visão para o desenvolvimento industrial, onde a atividade industrial, passou a ser vista não como um sistema isolado, mas como parte integrante de um sistema. Este novo modelo trouxe ferramentas para quantificar, e intervir caso necessário, nos impactos deste desenvolvimento ao dar subsídios à implementação de políticas mais sustentáveis. A mensuração dos possíveis impactos ambientais para a avaliação e intervenção foram criadas para a auxiliar na implementação dessas políticas, cuja ferramenta importante e madura da EI para quantificar impactos ambientais é a ACV. Este indicador possibilita contabilizar os impactos gerados ao meio ambiente durante a vida de um produto, ou mesmo serviço, desde seu nascimento até o seu descarte final, por este motivo esta avaliação é usualmente mencionada como “do berço ao túmulo” (GIANNETTI e ALMEIDA, 2006).

Nessa metodologia os impactos ambientais de um processo são calculados partindo-se de um inventário dos fluxos de massa e de energia nele presentes, ao se relacionar o quanto determinado consumo ou descarte está impactando ao meio ambiente, seja na terra, ar ou água. Segundo a EPA (*Environmental Protection Agency*), a ACV é uma ferramenta para avaliar de forma sistêmica um produto ou uma atividade durante todo o seu ciclo de vida.

Especificamente para o impacto ambiental, no que diz respeito ao aquecimento global, é quantificada a geração de GEE (gases de efeito estufa), na forma de dióxido de carbono equivalente, relacionando-a a uma unidade funcional selecionada. O conceito de unidade funcional permite numa ACV relacionar as entradas e as saídas de um sistema tornando possível comparar os resultados dentro de uma mesma família. Como exemplo, ao se comparar o desempenho ambiental da atividade transporte de passageiros seria usual ter como unidade funcional passageiro-quilômetro, isto é, o resultado dessa grandeza seria em quilogramas de CO₂-equivalente emitidos por passageiro-quilômetro (GIANNETTI e ALMEIDA, 2006).

Parametrizada tradicionalmente pela ACV, os impactos ambientais foram abordados por uma metodologia ainda incipiente no ano de 1971. Ao tratar a relação existente entre a economia e o uso eficiente de recursos através da termodinâmica, Nicolas Georgescu-Roegen, na obra *The Entropy Law and th e Economic Process*, Georgescu-Roegen (1971, 1986), tratou a economia através de princípios da termodinâmica. Como a economia é um sistema aberto, que converte os recursos materiais/energia em resíduos de alta entropia, a atividade econômica é um grande

agente indutor de entropia. Este autor alertou para a inevitável degradação dos recursos naturais em decorrência das atividades humanas e criticou os economistas liberais neoclássicos por defenderem o crescimento econômico material sem limites.

Dentro de um contexto do uso eficiente de recursos, relacionar a grandeza termodinâmica Exergia com as emissões de CO₂-equivalente é o grande foco deste trabalho, bastante alinhado com a discussão ambiental no momento, que é o ciclo do carbono e seus impactos em relação aos gases de efeito estufa (GEE). Combustíveis fósseis ou não, são carbono com alta exergia, na forma sólida, líquida ou gasosa. Mas ao contrário dos combustíveis fósseis, a bioenergia pode até ter um ciclo neutro do carbono, desempenhando um importante papel na redução das emissões de GEE (MUENCH e GUENTHER, 2013).

2.2 TERMODINÂMICA E O USO EFICIENTE DE RECURSOS

A termodinâmica, que nasceu no século XIX, teve como foco o estudo das transformações da energia nas formas de calor e trabalho, este último, nas suas diversas formas. Quem deu clareza às transformações de calor em trabalho foram, inicialmente, Carnot e posteriormente, Clausius, Boltzmann, Maxwell, Kelvin, Planck e Gibbs, consolidando ainda no século XIX a Segunda Lei da Termodinâmica (SLT). Esta lei trouxe o conceito da geração de entropia, que está diretamente relacionada com aumento da desordem e a perda da qualidade da energia presente em um sistema durante suas transformações, conceitos estes que estão intimamente ligados às irreversibilidades em sistemas, em que as suas melhorias são trabalhadas com o conceito *Entropy Generation Minimization* (EGM) (BEJAN, 1995; SCIUBBA e WALL, 2007).

Estas irreversibilidades, tratadas inicialmente somente com a entropia, passaram também a ser abordadas também pela exergia, que é definida como o trabalho máximo que pode ser obtido de um sistema desde seu estado inicial até atingir o estado final, este último, em equilíbrio termodinâmico com o ambiente. Existe uma correlação entre estas grandezas, representada pelo teorema de Gouy-Stodola, que relaciona a destruição da exergia com os aumentos de entropia, isto é, a “produção” de irreversibilidades durante uma transformação qualquer.

Conforme a Equação (1), a exergia destruída é proporcional à entropia gerada, então, como todos os processos irreversíveis causam perdas irrecuperáveis de exergia, a análise exérgica pode quantificar estas irreversibilidades (LUCIA, 2013).

$$X_{destruída} = T_0 \Sigma \Delta S \quad (1)$$

Onde,

$X_{destruída}$: exergia destruída (J); T_0 : temperatura ambiente (K); $\Sigma\Delta S$: é a somatório dos aumentos de entropia durante o processo (JK^{-1}).

Com a crise do petróleo na década de 70, a menor disponibilidade e maiores preços deste recurso energético também despertaram ao mundo a respeito de alguns pontos a serem então considerados: a) que este recurso é finito; b) que parte do mundo se encontrava refém dos grandes produtores de petróleo; c) que as energias renováveis necessariamente, em algum momento deveriam ser implementadas; e) que a curto prazo, o aumento de eficiência do uso deste recurso era uma solução, mesmo que parcial, factível (AYRES e AYRES, 2010).

Sobre a finitude deste recurso, despertou-se sobre a necessidade da utilização de fontes renováveis, almejando uma mundo menos refém deste recurso na mão dos poucos e grandes produtores de petróleo. A solução de curto prazo, o aumento de eficiência, quem trouxe foi a termodinâmica, ao aperfeiçoar máquinas e sistemas térmicos viabilizando um melhor uso do recurso não renovável petróleo, seja pelo aumento da eficiência energética (Primeira Lei) e também ao mitigar irreversibilidades aumentando o rendimento entrópico (Segunda Lei).

Já no ano de 1974, surgiram os primeiros artigos científicos de *Warme Krafte* Jan Szargut, que ao avaliar a depleção de recursos naturais conjuntamente com o respectivo impacto ambiental e também o problema do aquecimento global, passaram a utilizar a termodinâmica como ferramenta de análise, mais especificamente através da exergia (AYRES e AYRES, 2010).

Logo em seguida, Göran Wall - *Exergy: a useful concept with in resource accounting* - Wall (1977), defendeu a exergia como um conceito útil na gestão de recursos, visando atender às necessidades crescentes de um desenvolvimento sólido e sustentável. Isto ocorreu quando este autor constatou que os sistemas de energia estão fortemente inseridos no meio ambiente, então os problemas ambientais poderiam ser avaliados observando o impacto global destes sistemas neste meio, incluso o problema do aquecimento global. A partir de então a utilização da exergia, com forte ênfase à possíveis aplicações e análises complexas de sistemas foram impulsionadas.

Relativamente ao uso eficiente de recursos, a partir da década de 80 a relação meio ambiente e utilização da energia foi melhor reconhecido, com o “alarme” ambiental pronunciado através da chuva ácida, da depleção da camada de ozônio e das mudanças climáticas. A partir daquele momento, aumentou-se a atenção para a conexão entre o uso da energia e as emissões, visto que, processos que trazem benefícios para a humanidade estão associados a emissões térmicas,

químicas e nucleares bem como os seus respectivos impactos ambientais, devido à necessidade do insumo energia seja para: produzir, transformar ou transportar bens de consumo. Concomitantemente houve uma preocupação em se desenvolver métodos de nortear/alcançar um desenvolvimento duradouro utilizando melhor os recursos disponíveis, e a termodinâmica teve papel importante neste contexto, através da primeira e da segunda leis (DINCER e ROSEN, 2007).

Os recursos do planeta, além de finitos não estão sendo utilizados de maneira eficiente. A degradação destes recursos e suas consequências já eram abordados por Rifkin (1980), ao mencionar: *.....cada vez que a energia é transformada de um estado para outro, tem-se que pagar uma penalidade, e esta penalidade equivale a uma perda de qualidade da energia disponível para se executar qualquer espécie de trabalho*. Na visão deste pesquisador, a poluição nada mais é que a energia não mais disponível durante seus processos de transformação, em outras palavras, poluição é o somatório de toda a energia disponível que foi convertida em energia não disponível, ou seja, poluição é simplesmente um nome equivalente para geração de entropia, ferramenta clássica da termodinâmica.

Para Wall e Gong (2001), uma sociedade não se sustenta ao consumir os recursos exergéticos a uma taxa mais elevada do que são renovados. A sociedade “industrial” obviamente não se sustenta e está enfrentando um colapso. Estes autores entendem que a humanidade não vai morrer de poluição direta, mas de novas doenças relacionadas a novos microrganismos melhor adaptados a um ambiente cada vez mais poluído caso a taxa de consumo continue maior que a renovação. Afirmam que o conceito de exergia ao contabilizar globalmente os recursos naturais oferece uma boa compreensão do ambiente natural, bem como dos problemas que existem por trás das recentes crises ecológicas, então, a exergia que é um conceito bem definido, nos oferece uma oportunidade única de melhorar o uso dos recursos e reduzir o impacto ambiental.

Na mesma direção, Rifkin e Howard (1990) afirmam que tanto os sistemas industriais quanto os processos ecológicos processam materiais e consomem energia, de maneira similar a um sistema econômico, e a termodinâmica apresenta a entropia como uma ferramenta que permite abordar estas transformações. Rifkin (2013) acrescenta que a queima indiscriminada da exergia acumulada durante anos (combustíveis fósseis), está saqueando recursos naturais acumulados durante tantos anos, em outras palavras, o planeta está trabalhando “no vermelho”.

Corroborando com a aplicabilidade da termodinâmica com questões ambientais estão os trabalhos de Dincer e Rosen (2007). Estes autores defendem que ganhos ambientais são obtidos

com o uso mais eficiente da energia. Ao focar na produção de bens e serviços dentro de um meio ambiente duradouro, este pode ser referenciado como relação entre o desenvolvimento sustentável e o uso eficiente de recursos, especialmente os recursos energéticos, e o uso eficiente desses recursos tem na ferramenta termodinâmica exergia, ao avaliar a qualidade da energia, um importante aliado para aperfeiçoar essa eficiência. Estes pesquisadores concluem que a exergia pode ser vista como uma confluência entre a energia, o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável.

Todavia, estes autores alertam que mesmo existindo esta confluência, relacionar exergia com a questão ambiental não é tarefa simples, devido não ser a sustentabilidade um conceito termodinâmico puro e simples. O aspecto ambiental faz parte de um conceito mais amplo, onde o tripé da sustentabilidade (*Triple Bottom Line*), trata também da sustentabilidade social e econômica. Pode parecer um paradoxo, mas a Segunda Lei da Termodinâmica nega a sustentabilidade enfaticamente, no entanto, pesquisas nessa área, tem como objetivo ajustar e encontrar uma utilização adequada da exergia na análise das questões ambientais.

Para Cornelissen (1997), a análise exérgica, originalmente aplicada na melhoria da eficiência de máquinas térmicas, é uma importante ferramenta para abordar o desenvolvimento sustentável, e que as perdas entrópicas, especialmente as de fontes de energia não renovável devem ser minimizadas e que efeitos ambientais associados às emissões e ao esgotamento de recursos podem ser expressos em termos de um indicador único, baseado na exergia.

2.2.1 Exergia como indicador termodinâmico de sustentabilidade

Abordado inicialmente por Gibbs, como energia disponível e, posteriormente por Rant, como Exergia, esta grandeza termodinâmica quantifica a perda da qualidade da energia durante uma transformação. Diferentes processos podem ser avaliados por este indicador, onde uma maior eficiência exérgica para se produzir o mesmo significa que se utilizou melhor algum insumo, ou seja, houve um uso mais eficiente de um insumo ou recurso, que pode ser o carbono. O grande estímulo à sua utilização desta ferramenta foi inicialmente para a melhor utilização de combustíveis não renováveis em sistemas térmicos em geral, mas a sua aplicabilidade se ampliou para outras áreas do conhecimento, ao melhor quantificar o uso de recursos/insumos renováveis ou não, em processos quaisquer.

Em um primeiro momento, com a crise do petróleo da década de 70, conforme já mencionado, a termodinâmica tornou possível aumentos de eficiência energética (Primeira Lei) e exérgica

(Segunda Lei) em equipamentos e processos, o que mitigou o consumo de fontes primárias de energia, e mesmo não havendo necessariamente esse objetivo, acabou por trazer uma maior sustentabilidade ambiental ao utilizar o recurso petróleo de maneira mais eficiente.

Em evolução, até o final da década de 1990, utilização da exergia passou a identificar a performance de transformações em processos mais complexos, não somente em aumento de eficiências em ciclos de potência, como turbinas gás/vapor motores à combustão interna relacionados às fontes fósseis. Passou a abordar também energias renováveis como a solar e além das não convencionais como a geotérmica, e mais do que isso passou a ser utilizada em processos até então não abordados por esta grandeza, como: criogenia, química industrial, destilação, dessalinização em também em aplicações ambientais. Neste período, novos caminhos foram abertos com a utilização da exergia, como: a) conservação de energia; b) aperfeiçoamento das eficiências em processos; c) avanço de teorias detransformações químicas; d) desenvolvimento de ferramentas para projetos; e) quantificação das propriedades de materiais em relação aos estados de referência padrão, bem como na divulgação da importância e abrangência do tema (SCIUBBA e WALL, 2007).

Neste período, no que tange às questões ambientais, a exergia passou a ser considerada uma espécie de indicador termodinâmico do impacto ambiental de processos quaisquer, porém observado que a equivalência pura e simples com a poluição ambiental, embora parcialmente correta no aspecto qualitativo, é incorreta do ponto de vista quantitativo (CRANE *et al.*, 1990, 1992, *apud* SCIUBBA e WALL, 2007).

Uma correlação importante é abordada por Dincer e Rosen (2007), de que quanto maior for a eficiência exergética de um processo qualquer, menores serão a degradação dos recursos e as emissões de resíduos (excedentes) de exergia, conforme mostrados na Figura 6. Entendendo-se a eficiência exergética como a razão entre a saída e a entrada das exergias em um sistema.

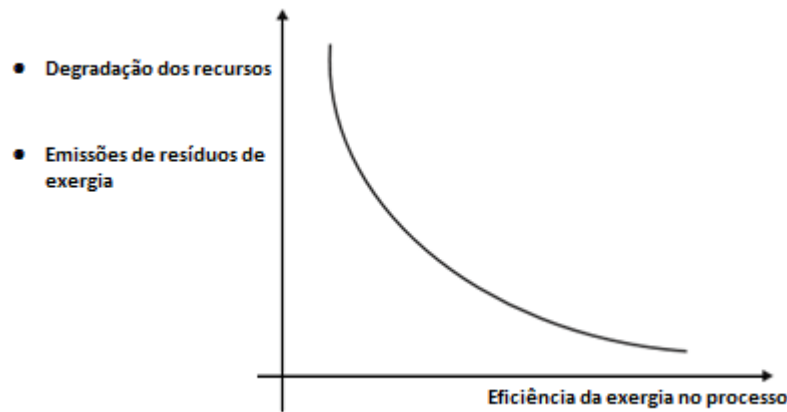


Figura 6 - Qualitativo da relação entre eficiência exergética do processo e os impactos ambientais associados (Fonte: Dincer e Rosen, 2007, adaptado).

De maneira semelhante à já preconizada por Rifkin (1980), para Dincer e Rosen (2007) a degradação dos recursos naturais pode ser entendida como uma forma de danos ao meio ambiente natural. Estes autores trazem, porém, uma abordagem com um maior detalhamento da relação entre a exergia e o meio ambiente, ao considerar o que se segue.

Como os recursos possuem exergia, e conseqüentemente estão distantes do equilíbrio com o meio, duas características quantitativas desta grandeza devem ser consideradas:

- a) A exergia de um minério purificado é maior que a de um não purificado, este último possui exergia zero, pois está em equilíbrio com o meio ambiente. Durante o processo de beneficiamento deste minério é possível aumentar a exergia do mesmo, porém, existe um custo nesta transformação ao importar exergia de outros locais, resultando na degradação da sua vizinhança, mesmo que de maneira indireta. A respeito da quantificação da exergia em minérios, De Meester *et al.* (2006) alertam que se deve ter muita cautela com os dados da literatura nestes tipos de recursos, por serem incompletos e inconsistentes, com grande variação nos resultados.
- b) Outra situação, são produtos de alta reatividade química, potencialmente prontos para causar mudanças no seu meio, ou seja, sua reatividade altera de maneira direta o equilíbrio onde estão inseridos ao reagir com o mesmo, a depender da reatividade, de maneira rápida e danosa.

Ao se relacionar eficiência exergética com a degradação dos recursos, que é uma forma de dano ambiental, mesmo com recursos criados artificialmente, existe uma relação inversa entre estas

grandezas, conforme mostrado na Figura 6, porém, deve ser destacado a existência de duas principais maneiras em se reduzir o impacto associado a esta degradação:

- a) A primeira, é através do aumento da eficiência exergética, que tem como consequência a redução de consumo de energia estocada em um sistema. Este fator reduz os danos ambientais que também podem ser associados à redução das emissões de GEE.
- b) A segunda alternativa, é a utilização de recursos exergéticos externos ao sistema considerado, por exemplo a energia solar. Esta utilização somente é possível porque a terra não é um sistema fechado, recebe exergia do sol constantemente.

Deve ser observado sobre a existência de uma relação entre a eficiência exergética e a emissão de resíduos de exergia, representado na mesma Figura 6. Este resíduo, por possuir ainda algum grau de reatividade, representa um potencial de mudança no sistema em que está inserido, ou seja, provoca um desequilíbrio ao meio ambiente quando lançado ao mesmo.

A depender da quantidade de resíduos de alta exergia propagados, estes podem culminar até com a morte de algum ecossistema, como é o caso da mortandade de peixes pelo lançamento excessivo de matéria orgânica de alta exergia em rios e lagos, morte provocada pelo aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) da água. Mas esta regra nem sempre é válida, como é o caso do sorvedouro de termelétricas em lagos muito frios, onde o aumento da temperatura da água acaba sendo benéfico, mas via de regra, a lançamento de resíduos de alta exergia representa um desequilíbrio ao meio que o recebe.

Neste contexto, conforme ocorre com os *flairs* de biodigestores ou mesmo de refinarias caso não haja aproveitamento da exergia destes “resíduos” com alta exergia, é preferível queimá-los lançando na atmosfera resíduos menos reativos. Para o Biogás, após sua queima, o resíduo CO_2 , além de menos reativo que o CH_4 , o CO_2 -equivalente, é 28 vezes menor (IPCC, 2014; AR5).

A termodinâmica possui instrumentos para medir os impactos, através da exergia, de todos os processos reais ao causar alguma transformação ao meio ambiente. A magnitude desta grandeza em um sistema depende tanto do sistema quanto do meio ambiente, e a compreensão dessas relações podem revelar os padrões e forças que afetam mudanças no ambiente, amparando pesquisadores a lidar melhor com os danos ambientais (KAY, 2002 *apud* ZISOPOULOS *et al.*, 2017).

As medidas de eficiência ambiental, construídas dentro de uma ACV, usando somente o princípio do saldo de materiais possuem duas importantes inconsistências: a primeira, é a

ambiguidade no tratamento de insumos de não materiais e os vários tipos de energia, e, a segunda, é a falta de pesos universalmente aceitos para vários materiais de insumos. Essas duas limitações são principalmente causadas pelo fato de que a condição do balanço de materiais ser estritamente regulada pela lei da massa-energia. Com várias entradas, a conservação desse conteúdo de massa-energia não ser representada por uma unidade física comum (HOANG e RAO, 2010).

Estes problemas passaram a ser superados através do *Cumulative Exergy Consumption (CExC)*, detalhado mais adiante, na Equação (4) da página 32. Esta metodologia foi proposta por Szargut *et al.* (1988) ao tratar conteúdo exergético dos insumos e dos produtos em um ciclo de vida, e por ser uma unidade física única, permite a análise da poluição cumulativa e total que afeta os recursos naturais. Sua aplicabilidade é muito ampla porque inclui a exergia não somente dos fluxos de energia, mas também dos insumos materiais dos processos, como combustíveis, minerais ou gases (SZARGUT, 2005). No caso de um composto químico, a exergia da sua matéria (massa) é determinada ao comparar a sua energia disponível (exergia) até ser transformado na composição química padrão deste composto na biosfera terrestre, que é seu estado morto (HOANG e RAO, 2010; MAES e PASSEL, 2014).

Ao se estudar a eficiência exergética de toda uma cadeia de produção, Szargut *et al.* (1988) introduziu também o conceito do *Cumulative Degree of Perfection (CDP)*, que é a razão entre exergia química do produto final analisado e o consumo cumulativo de exergia (CExC) de recursos naturais durante toda a sua cadeia produtiva, aqui representado na Equação (2). Baixos CDPs estão relacionados à produtos que além de baixa exergia química, possuem cadeias de produção longas, como é o caso do ouro, e os altos CDPs, como é o caso da gasolina, são os que possuem, além da alta exergia intrínseca, um baixo consumo de recursos em sua cadeia produtiva.

$$(CDP)_i = \frac{e_i^{ch}}{(CExC)_i} \quad (2)$$

Onde:

- $(CDP)_i$, é o grau cumulativo de perfeição;
- e_i^{ch} , é a exergia química do produto final em consideração;
- $(CExC)_i$, é o consumo acumulado de exergia de recursos naturais em toda a cadeia produtiva.

Ao ser aplicada como um indicador de sustentabilidade na agricultura em países da OCDE (Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico), a exergia trouxe uma série de resultados importantes, mas com grande variação. Estudo comparativo foi realizado entre 1990 e 2003 com seus países membro, que trouxeram algumas informações importantes, aqui apontadas: a) que existe um potencial de se economizar 72,3% com melhorias que podem ser alcançadas ao serem mais tecnicamente eficientes, e também se escolher uma melhor combinação de insumos; b) foi observado uma grande variação da eficiência exergética entre os países membros; c) que os níveis de eficiência em 2003 foram menores do que em 1990. O mencionado potencial de economizar retrata o quanto ainda pode ser aperfeiçoado no setor agrícola.

Dentro deste contexto, Hoang e Rao (2010) propuseram uma abordagem unificada para a sustentabilidade na agricultura, ao combinar dois diferentes indicadores. Um primeiro, relacionado à produtividade, representando eficiência técnica na produção (*Technical Efficiency - TE*) e um segundo que diz respeito à eficiência exergética, representando a alocação cumulativa de exergias na produção agrícola, a *Exergy Allocative Efficiency - CExAE*, que ao serem multiplicados resultam em um conceito de sustentabilidade ambiental, denominado *Sustainable Efficiency - SE*, que é definido pela Equação (3) como:

$$SE = (TE)(CExAE) \quad (3)$$

Onde:

- *SE* é a eficiência sustentável, com valor entre “0” e “1”;
- *TE* é a eficiência técnica na produção, é a razão entre a produtividade real e a fronteira da produção, com valor entre “0” e “1”;
- *CExAE* é a eficiência exergética de todo o processo de produção agrícola, cujo valor é também, entre “0” e “1”.

Dentre as abordagens das questões ambientais através da exergia, existe a contabilização ecológica ao inserir o custo ecológico. São tratadas duas faces distintas, uma primeira calculando a quantidade de consumo exergético que compõe esta poluição, e uma segunda, calculando o montante das despesas monetárias para remediação dessa poluição (CHEN *et al.*, 2014 e VALERO, 1998, *apud* SCIUBBA e WALL, 2007).

De forma semelhante ao anterior, existe o método *Extended Exergy Accounting (EEA)*, que inclui além da contabilidade clássica da exergia de Szargut, a influência de três fatores de produção adicionais: os custos relacionados ao trabalho humano, ao capital e à remediação ambiental (SCIUBBA, 2001 *apud* ROSEN e DINCER, 2007). Essas extensões expressam todos os fatores produtivos que geralmente são considerados na análise econômica em termos exergéticos. A *EEA* mostra então uma visão paralela da análise econômica. No caso da remediação ambiental, é contabilizado equivalente de consumo de recursos a ser aplicado em processo de tratamento de algum efluente poluidor, em concordância com a abordagem de Szargut (2005): “... o consumo de exergia eventualmente pode incluir o consumo adicional de recursos devido ao efeito nocivo dos processos de produção no meio ambiente, principalmente como resultado de resíduos rejeitados ao meio ambiente”.

Meyer *et al.* (2009) defendem o uso da *Exergo-Environmental Analysis*, onde simultaneamente impacto ambiental e consumo de exergia são estudados. Dewulf *et al.* (2007) defendem a metodologia denominada *Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (CEENE)*. Este método amplia a CExC ao incluir também recursos extraídos de fontes renováveis e ecossistemas, incluso a energia solar.

A metodologia CEENE abordada por Dewulf *et al.* (2007) divide o uso da exergia em oito categorias e seus respectivos impactos no seu ciclo de vida, onde os recursos naturais são de alguma forma retirados do ambiente, que são: a) recursos renováveis; b) combustíveis fósseis; c) energia nuclear; d) minérios metálicos; e) minerais; f) recursos hídricos; g) recursos terrestres e recursos atmosféricos. Para o recurso renovável biomassa, caso o ecossistema produza este recurso de forma menos eficiente, o mesmo exigirá mais área de terra e mais irradiação solar, e isso terá um impacto correspondente no resultado final.

Ao contabilizar a exergia de determinada biomassa foi proposto por Alvarenga *et al.* (2013) o conceito da produção primária líquida, a *Net Primary Production (NPP)*, cujo objetivo é de se ter uma referência da saída de exergia na forma de biomassa, a partir do valor estimado de biomassa produzida no ambiente local em condições naturais. Ao tratar a produção de biomassa em gramas de carbono por metro quadrado ano, o objetivo deste conceito é o de ponderar a exergia da biomassa de saída conforme o bioma local.

Proposto por Caudill *et al.* (2010), *apud* Zisopoulos *et al.* (2017), existe ainda uma outra proposta, que é a “pegada” da exergia (*exergy footprint*), um método que combina a estrutura básica de pegadas de carbono com a análise da exergia. Não há, porém, ao menos por enquanto,

uma concordância sobre este tema em termos globais. Uma das razões para isso é a de ser muito complexa para o público em geral, pois nos métodos tradicionais as grandezas são medidas diretamente, e na exergia devem ser calculadas.

Uma outra abordagem é proposta por Coelli *et al.* (2007) e também por Lauwers (2009), onde se utiliza o princípio de saldo somente de materiais, ou seja, a lei de conservação de massa, para mensurar a eficiência ambiental na suínocultura e piscicultura. Estes estudos consideraram a questão de poluição ambiental contabilizando a diferença entre nutrientes em insumos e nutrientes nas saídas, cujo objetivo é o de reduzir poluição reduzindo a quantidade de nutrientes dos insumos.

Com o objetivo de se identificar os pontos críticos de um sistema em estudo, existe o conceito denominado *Critical Exergy dissipation Points (CEPs)*, proposto por Zisopoulos (2016) para setores agrícola/alimentos. Nesta técnica perdas locais são inventariadas e classificadas percentualmente em relação à perda total, sendo importante em um sistema de gestão, por trazer subsídios para uma atuação mais focada nestes pontos críticos.

Apesar de ainda não consolidada, a exergia possui grande potencial de aperfeiçoar políticas públicas seja no sistema de transportes, na produção e consumo de etanol, ou na agricultura, podendo-se comparar a exergia em diferentes culturas. Em políticas públicas, a exergia tem sido desenvolvida como ferramenta adicional para promover o desenvolvimento sustentável. Políticas baseadas nesta grandeza, não devem ser aplicadas somente para gerenciamento de perdas na agricultura com foco na exergia química, mas em quaisquer práticas que envolvam perdas de exergia. Através de incentivos e suporte governamental e de ONGs internacionais, é possível se adotar programas de preservação da exergia tanto no setor agrícola, quanto na indústria de alimentos em geral (ROSEN, 2002; ZISOPOULOS, 2016).

2.3 DESEMPENHO AMBIENTAL DE SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

Na agricultura, a biomassa é produzida em processo agrícola complexo, e a maioria dos impactos ambientais estão relacionados ao uso de fertilizantes e pesticidas, bem como a mudança de uso da terra. A parte do nitrogênio que é presente nos fertilizantes é convertida por nitrificação microbiana em óxido nitroso (N_2O), que é emitido para a atmosfera. Como o potencial de aquecimento global do óxido nitroso é quase 300 vezes maior que o de CO_2 , na agricultura global é atualmente responsável por mais de 75% da emissão de nitrogênio reativo emitidos. A partir de 1750, a concentração atmosférica de N_2O aumentou 15%, enquanto a de

CO₂, no mesmo período, aumentou 30%. Além do efeito estufa, outros efeitos negativos das emissões de nitrogênio reativo devem ser considerados, como a acidificação de solos e água, e a eutrofização (águas) (ABBASI e ABBASI, 2010).

Conforme Fazio e Monti (2011), a energia renovável da biomassa pode substituir os combustíveis fósseis e é esperado benefícios ambientais com esta substituição. Também, não especificamente para a produção de energia renovável, surgiu a partir da década de 90 o uso do conceito de biorrefinaria, que integra métodos diversos de conversão da biomassa para uma produção química sustentável. As matérias-primas de várias origens, desde culturas agrícolas, gramas e resíduos de lixo são transformados em uma variedade de produtos de maior valor agregado, como combustíveis, produtos químicos, alimentos e rações, além da geração de calor e eletricidade (RODRIGUES, 2011; KAMM *et al.* 2010).

A biomassa é o primeiro combustível usado pela humanidade e também pilar da economia global até meados do século XVIII, quando, a partir de então foi substituído pelos combustíveis de origem fóssil devido a sua maior abundância, maior densidade energética também pela queima mais limpa em relação à então biomassa disponível. Mais recentemente, ressurgiu o interesse pela utilização da energia da biomassa, dentre outras motivações, por ser entendida como uma fonte de energia neutra em carbono, ao contrário dos combustíveis fósseis (ABBASI e ABBASI, 2010).

As vantagens da substituição dos combustíveis fósseis no futuro serão determinantes para o desenvolvimento de novas agroindústrias. Ao estimular a produção e a conversão da biomassa, estimula-se a agricultura, a silvicultura e processamento químico. Além disso, a produção e a conversão da biomassa são mais espalhadas geograficamente do que os combustíveis fósseis, portanto, mais países podem usufruir deste novo desenvolvimento econômico (PTASINSKI, 2016).

Biomassa de baixo custo, os resíduos florestais e agrícolas são subprodutos que também podem ser utilizados como matérias-primas de bioenergia. Mesmo tendo uma baixa produtividade atestada na literatura comparada ao rendimento das culturas tradicionais, o quantitativo desses resíduos de biomassa é considerável devido a grandes áreas a partir das quais uma gama de resíduos pode ser coletada (FARINE *et al.*, 2012; PTASINSKI, 2016).

Através de uma ampla gama de biomassa, Farine *et al.*, (2012) estudaram a bioenergia proveniente de matérias-primas renováveis como alternativa para se substituir o carvão mineral

e o petróleo na Austrália. Mencionam que estas tecnologias podem fornecer alternativas à dependência deste país em fontes fósseis e até que ponto a biomassa poderia contribuir na produção de energia e mitigação nas emissões de GEE, que é avaliada de forma estimada para possíveis combustíveis provenientes destes “resíduos”.

No caso específico da etapa industrial da destilação do etanol de milho, cujo produto alvo do processo é o biocombustível, também são formados alguns subprodutos úteis, cujo valor comercial é interessante, como é o caso do DDGS, sigla em inglês de concentrado proteico. Não havendo valor comercial como alimento ou ração, rotineiramente os subprodutos do processo industrial podem ser aproveitados como fonte de calor.

Os estágios de produção e conversão da biomassa podem ser resumidamente descritos como: a) operações de cultivo; b) produção de fertilizantes e pesticidas; c) combustível para sistemas irrigação e drenagem; d) operações de colheita; e) transporte das matérias-primas até as instalações de processamento; f) conversão da biomassa (calor e eletricidade). Quanto a forma característica dos fluxos de carbono em sistemas bioenergéticos, os mesmos estão apresentados na Figura 7 (PTASINSKI, 2016).

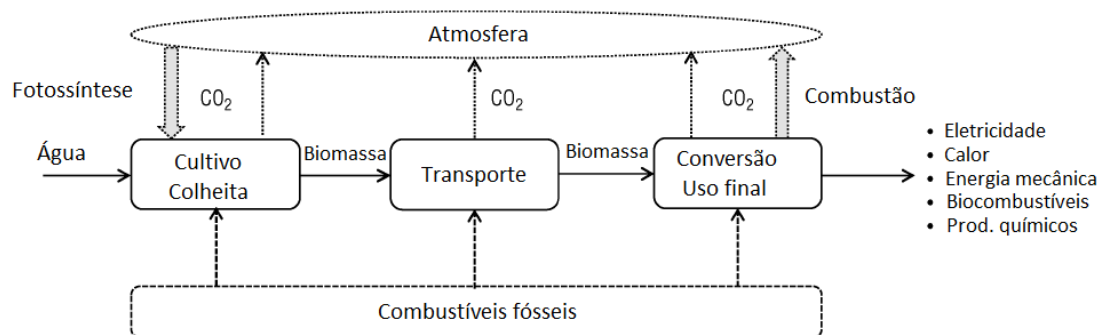


Figura 7 – Fluxos de carbono no sistema bioenergético (Fonte: Ptasinski (2016), adaptado).

Contabilizadas as parcelas agrícola e industrial, a redução dos GEE com a utilização dos biocombustíveis, tem como meta um ciclo completamente neutro em carbono, onde o dióxido de carbono gerado na etapa final, uma combustão com finalidades diversas, seja 100% retornado às culturas através da fotossíntese. No entanto, apesar de melhorias notáveis de redução de emissões ao se utilizar a bioenergia, por serem também utilizados combustíveis fósseis e consequentemente carbono fóssil em todos os estágios da cadeia da bioenergia, ao inserir esse carbono “extra” ao sistema, o almejado ciclo completamente neutro do carbono, deixa de existir,

mas mesmo parcialmente neutros, em comparação aos de origem não renovável, trazem resultados positivos.

Da mesma forma em que ocorre com os combustíveis fósseis, nos sistemas bioenergéticos a biomassa possui sua energia armazenada na forma química, porém com uma característica distinta e bastante importante que é a sua renovabilidade. As diversas variedades de biomassa disponíveis refletem, dentre os vários processos de conversão disponíveis, qual o mais adequado a ser utilizado (BERTHIAUME *et al.*, 2001; PTASINSKI, 2016).

Em um primeiro nível pode-se dividir estas conversões em termoquímicas, bioquímicas e químicas, onde, através dos processos de combustão, gaseificação, pirólise, digestão, fermentação, esterificação e hidrólise resultam em produtos finais como calor, eletricidade, combustíveis e produtos químicos conforme indicado na Figura 8.

De forma específica, a partir da biomassa cana-de-açúcar, este trabalho quantifica os GEE durante a produção do combustível de primeira geração etanol, pela fermentação bioquímica do caldo de cana e também durante a geração de eletricidade pelo excedente de calor da conversão termoquímica do bagaço e palha (queima).

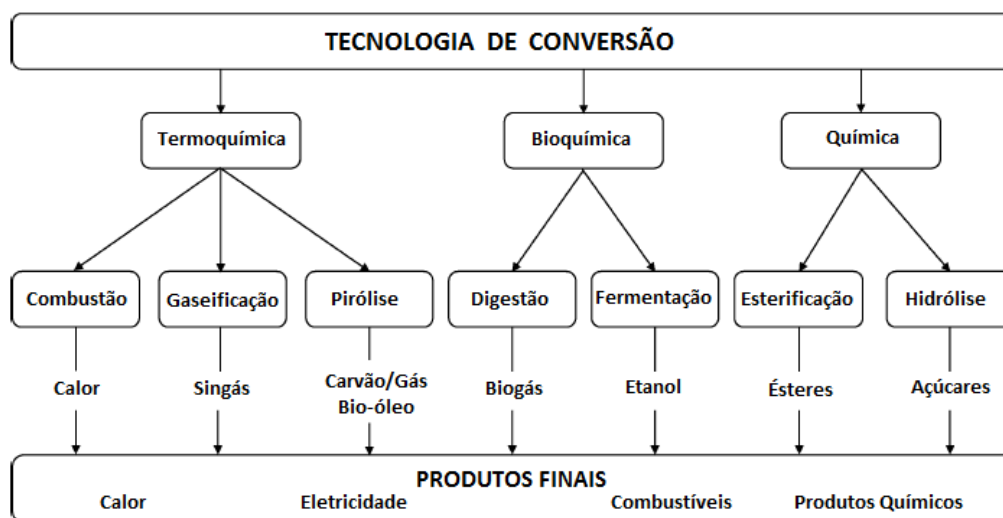


Figura 8 – Tecnologias de conversões da biomassa e seus principais produtos (Fonte: Ptasinski (2016), adaptado).

Um melhor detalhamento sobre a sustentabilidade na produção de biocombustíveis produzidos a partir de biomassa renovável é abordado por Ptasinski (2016). Ao considerar que estes biocombustíveis requerem a utilização de recursos não renováveis, a renovabilidade destes processos não pode ser 100%, tornando tanto a renovabilidade quanto a sustentabilidade uma

questão um tanto complexa e de difícil aferição. Esta dificuldade ocorre por exemplo ao se contabilizar as mudanças no uso da terra e a sua consequente geração de GEE.

Claramente, a sustentabilidade tem relação com produção agrícola/alimentos, mas não há um consenso sobre como operar e/ou selecionar dentre os vários indicadores do impacto ambiental durante sua produção. O CO₂ é um importante indicador desse impacto, porém sua amplitude é muito extensa, partindo de 0,1 kg chegando a até 40 kg de CO₂ por quilograma de alimento/biomassa com sua respectiva exergia, e ainda há outros insumos como água e energia que não refletem necessariamente as emissões de CO₂. (ZISOPOULOS, 2016).

Grande quantidade de referências bibliográficas é dedicada ao impacto ambiental desde a produção da biomassa até sua posterior conversão em uma energia utilizável. A maioria desses estudos utiliza a ACV, em dois estágios principais: a) na produção agrícola da bioenergia durante o cultivo da biomassa; b) na subsequente conversão, geralmente industrial, em um vetor específico de bioenergia. O desempenho ambiental destes sistemas, além de uma contabilização do todo, podem ser abordados separadamente, devido às características próprias de cada subsistema. Habitualmente a produção agrícola da biomassa é mais impactante que a conversão industrial (DAVIS *et al.*, 2009; ABBASI e ABBASI, 2010; FAZIO e MONTI, 2011).

Em sistemas de bioenergia, ao se buscar englobar impactos tão diversos quanto a contabilidade de recursos e o bem-estar social, a expansão do uso da ACV é positiva, mas por vezes a torna muito complexa, o que traz seu uso em alguns casos até incerto. Assim, mesmo que em expansão, ainda existem dificuldades na aplicabilidade de se utilizar a ACV nestes sistemas (MCMANUS e TAYLOR, 2015).

De acordo com Davis *et al.* (2009), a magnitude da redução de GEE ao substituir combustíveis fósseis por biocombustíveis depende muito do tipo de cultura e suas condições de cultivo. Para a maioria dos cultivos, as reduções de emissões de GEE constantes na literatura, apesar de positivas, possuem uma amplitude de resultados elevada, podendo o uso da biomassa na produção de biocombustíveis, além de reduzir as emissões de GEE, até sequestrar algum carbono. Foi constatado por estes autores, no caso de culturas e condições de cultivo desfavoráveis, de que existem resultados que chegam a divergir do esperado, chegando em condições extremas até indicar um aumento das emissões de GEE.

De maneira distinta à abordada por Fazio e Monti (2011), que tratava uma biorefinaria de maneira mais ampla, agora de forma mais específica para biocombustíveis, Puig-Arnavat *et al.*

(2010), mencionam que tem ocorrido avanços na gaseificação da biomassa e ratificam que esta tecnologia termoquímica possui vantagem ao tornar possível se utilizar uma ampla gama de matérias-primas, incluindo os resíduos sólidos urbanos. Inserido nas tecnologias termoquímicas, acrescentam que a gaseificação possui vantagem em relação à pirólise, devido a seu produto final, o *syngas*, poder ser queimado para gerar calor ou eletricidade de maneira mais direta ou mesmo ser aproveitado como matéria-prima para sintetizar uma ampla gama de combustíveis, tais como: etanol, metanol, dimethyl ether (DME), hidrocarbonetos líquidos pelo processo Fischer-Tropsch (F-T), gás natural sintético (SNG) e hidrogênio.

Dentro da bioenergia, segundo Cherubini *et al.* (2009), é possível se revelar desempenhos ambientais e energéticos através da ACV, porém uma gama de resultados pode ocorrer mesmo para sistemas aparentemente similares. Essas diferenças podem ser imputadas à várias razões, como: a) ao tipo e gerenciamento de matérias-primas; b) às variadas tecnologias de conversão; c) às tecnologias de seu uso final; d) aos limites do sistema de referência de energia com o qual a cadeia de bioenergia é comparada.

Estes mesmos autores pontuam que dentro de um sistema bioenergético, algumas questões devem ser observadas, como as que seguem:

- a) Cada sistema de bioenergia deve evitar o esgotamento dos estoques de carbono;
- b) Desde que haja um corte anual controlado de gramíneas perenes como fonte de bioenergia, estas podem melhorar o sequestro de carbono nos solos, aumentando assim a poupança de GEE destes sistemas de bioenergia;
- c) Os resultados de ACV de bioenergia de culturas dedicadas devem ser expressos por área, uma vez que a terra disponível para a produção de matérias-primas de biomassa é a maior restrição;
- d) Os resultados de ACV do sistema de bioenergia com base em resíduos de biomassa devem ser expressos primordialmente por unidade de produção;
- e) Os resultados da produção de biocombustíveis de transporte devem ser expressos por quilômetro, a fim contabilizar as eficiências mecânicas do motor, o tipo de combustível e as emissões da combustão;
- f) A produção da energia dos biocombustíveis líquidos geralmente requer mais insumos de energia fóssil do que simplesmente a produção da energia da biomassa para a geração de eletricidade e calor;

- g) Como consequência, a geração de eletricidade ou calor a partir da biomassa pode atingir economias maiores de GEE e energia fóssil por hectare dedicado à produção de biomassa, do que a produção biocombustíveis para o setor de transportes;
- h) As cadeias de bioenergia que possuem resíduos como matérias-primas mostram os melhores desempenhos da ACV, pois evitam os altos impactos da produção de culturas dedicadas e as emissões na gestão dos resíduos;
- i) Devido aos limites do uso da terra e da concorrência com a produção de alimentos, altos rendimentos de biomassa são extremamente importantes na mitigação de GEE;
- j) A poupança de energia fóssil e a mitigação de gases com efeito de estufa serão aumentadas se os coprodutos agrícolas (bagaço, palha etc.) e resíduos do processo (DDGS, lignina, carvão etc.) também forem utilizados para a produção de energia para executar as plantas de conversão de biomassa;
- k) Quando os resíduos agrícolas são coletados de campos e utilizados para a produção de bioenergia, os efeitos da remoção desse tipo de solo específico não podem ser negligenciados e as implicações de GEE, ou seja, menores rendimentos, emissões de N₂O da terra e declínio estoque de carbono no solo devem ser contabilizados em conjunto com o sistema de bioenergia;
- l) A alta eficiência de conversão de biomassa para produtos energéticos é fundamental para mitigar as emissões de GEE;
- m) O uso em cascata da biomassa para produtos, seguido pelo uso de energia, no caso das madeiras, pode atenuar ainda mais as emissões de GEE.

Para avaliar o desempenho ambiental aplicável em sistemas de bioenergia, para a categoria do impacto nas mudanças climáticas, pode ser utilizada a pegada do carbono como indicador para a categoria do impacto nas mudanças climáticas. Schryver *et al.* (2016) propuseram em seu estudo intitulado “*Guidance and requirements for biogenic carbono modelling in PEF CRs*”, também alguns sub-indicadores a serem utilizados, ao agrupar as emissões de GEE de acordo com o tipo da fonte que o gerou, como segue:

Um primeiro sub-indicador de fonte fóssil abrange as emissões de gases de efeito estufa para qualquer meio proveniente da oxidação e/ou redução de combustíveis fósseis seja por meio da sua transformação ou mesmo da sua degradação.

Um segundo sub-indicador, de fonte biogênica, representa as emissões de carbono para o ar, na forma de CO₂, CO ou CH₄, que são provenientes da oxidação e/ou redução da biomassa por

meio de sua transformação ou degradação, por exemplo combustão, digestão, compostagem, aterro, e também a absorção de CO₂ da atmosfera através da fotossíntese durante crescimento da biomassa, isto é, correspondente ao teor de carbono do produto e possível biocombustível.

E um terceiro sub-indicador, diferente dos anteriores, se refere ao uso do solo e transformação de terras, das emissões e do sequestro de gases com efeito de estufa provenientes das mudanças de estoque de carbono causadas pela mudança do uso da terra e as capturas do solo.

No balanço da pegada do carbono em produtos à base da biomassa, contabilizadas a sua captura pela fotossíntese, as emissões e a sua estocagem, é prática comum em inventários de ciclo de vida (ICVs) se assumir a neutralidade, no entanto, é cada vez mais reconhecido que isso é incorreto (JOHNSON, 2009). Para Caldeira-Pires *et al.* (2018), as mudanças nos parâmetros bióticos, principalmente naquelas associadas ao uso da terra, são uma questão fundamental para a avaliação do balanço de gases de efeito estufa (GEE) na produção de bioenergia, sendo importante a caracterização do carbono biótico para se avaliar o impacto global dos produtos que possuem como base a biomassa.

Na bioenergia, são de grande interesse em termos de impactos ambientais as parcelas de biomassa que são deixadas no campo, visto que parte se degradam e parte se estabilizam no solo, formando um estoque. A proporção deste estoque de carbono depende do solo e características da biomassa, bem como o clima e horizonte de tempo sob consideração. As alterações dos estoques de Carbono Orgânico do Solo (COS) podem ser resultantes de alterações no uso da terra, do tipo de cultura ou das práticas de gestão (CALDEIRA-PIRES *et al.*, 2018).

Ao comparar as emissões para a geração de eletricidade, dentro de uma ACV e com dados do IPCC (2012), têm-se alguns resultados representativos. A partir combustíveis fósseis como: gás natural, óleo combustível e carvão mineral, são respectivamente: 100-200, 200-300 e 300-500 g CO₂ equivalente/MJ, já os valores de emissões, com estes mesmos insumos fósseis no caso de se gerar simplesmente calor, são semelhantes. Indiferente de se gerar eletricidade ou calor, porém com bioenergia, os valores das emissões são bem melhores, estão entre 5 a 30 g de CO₂ equivalente / MJ, uma ordem de grandeza menor, que é bastante significativo. No caso dos biocombustíveis, apesar de positivas, as reduções das emissões são menores que as da eletricidade e do calor, emissões de GEE do ciclo de vida para o etanol de cana-de-açúcar e o etanol de milho variam de 15 a 70 g de CO₂ equivalente / MJ em comparação com a gasolina de petróleo de 85-110 g de CO₂ equivalente / MJ. Da mesma forma, as emissões de GEE do

ciclo de vida do biodiesel variam de 25 a 125 g CO₂equivalente / MJ, enquanto que para diesel de petróleo são 75-120 g CO₂ equivalente / MJ (PTASINSKI, 2016).

No estudo de Macedo *et al.* (2004), intitulado “Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil”, foram apresentados importantes resultados que estão mostrados na Tabela 1. Neste estudo foram trabalhados dois diferentes cenários abrangendo os três níveis possíveis de consumo energético e suas respectivas emissões: o primeiro cenário é baseado na média de consumo de energia e de insumos e o segundo cenário nos melhores valores praticados, ou seja, somente a melhor tecnologia em uso. Já o balanço energético, foi tratado em três níveis de consumo: um primeiro, direto, se refere à eletricidade e diesel, um segundo, indireto, relacionado à produção de insumos para a lavoura e para o processo industrial e um terceiro relacionado ao consumo de energia para a produção e a manutenção dos equipamentos. Além destes valores, este trabalho trouxe as emissões evitadas tanto ao se substituir em veículos automotores o etanol pela gasolina quanto pela substituição pelo bagaço excedente da fração de óleo combustível utilizada na geração de eletricidade demandada pela usina.

Tabela 1 – Balanço energia e emissões na produção do etanol no Brasil (Fonte: Macedo *et al.* (2004), adaptado).

Item	Unidade	Cenário 1	Cenário 2
Consumo de energia agrícola	MJ/TC ^(*)	201,8	191,9
Consumo de energia industrial	MJ/TC ^(*)	49,4	39,8
Consumo total de energia	MJ/TC ^(*)	251,2	231,8
Emissões devido uso de energia fóssil	kg CO ₂ -equivalente/TC ^(*)	19,2	17,7
Emissões de outras fontes	kg CO ₂ -equivalente/TC ^(*)	15,3	15,3
Total emissões	kg CO ₂ -equivalente/TC ^(*)	34,5	33,0
Produção de energia (etanol+sobra bagaço)	MJ/TC ^(*)	2.090,5	2.368,0
Relação total emissões / produção energia	g CO ₂ -equivalente/MJ	16,5	13,9
Relação da energia produzida/consumida	adimensional	8,3	10,2
Emissões líquidas evitadas (etanol anidro)	kg CO ₂ /TC ^(*)	2,6	2,7
Emissões líquidas evitadas (etanol hidratado)	Mg CO ₂ -equivalente/m ³	1,7	1,9

(*) tonelada de cana

Destacamos a relação entre o total de emissões e a produção de energia, cujo valor é de 16,5 gramas de CO₂-equivalente/MJ para o Cenário 1 (sistema de referência), está em conformidade com

o valor referenciado por Ptasinski (2016), “para o etanol de cana-de-açúcar e o etanol de milho variam de 15 a 70 g de CO₂ equivalente / MJ”.

Outra observação a ser feita é que a razão entre a energia produzida e a energia consumida, ou razão entre a energia renovável e o insumo fóssil, cujo valor para o Cenário 1 é de 8,3, valor adimensional. Mesmo sendo o referido trabalho bastante relacionado a uma ACV, ao se fazer o inventário das emissões de CO₂ equivalente e dos consumos de energia, o resultado exibido (8,3), importante para o setor da bioenergia, se trata da já abordada “criação” de exergia (*Exergy Breeding - ExB*), referenciada na Equação (5) na página 33.

Neste projeto de pesquisa de Macedo *et al.* (2004), ainda se trabalhava com a queima de uma parcela da palhada (colheita manual) e outra parcela depositada no campo (colheita mecanizada), já indicava através dos resultados, uma tendência hoje vigente de que excedentes de palha com a colheita mecanizada conjuntamente com o bagaço poderiam produzir quantidades adicionais de energia elétrica, corroborando com o etanol para mitigar ainda mais a geração de GEE. Para Caldeira-Pires *et al.* (2018), com a aplicação de leis mais restritivas à antiga prática de queimadas, já abolidas nos estados de São Paulo e Minas Gerais, a utilização deste insumo, com geração estimada entre 10-20 Mg/ha.ano de biomassa seca, bem como as práticas de gestão deste recurso são de grande interesse em termos de impactos ambientais.

A relação entre a geração de eletricidade em termelétricas a partir de outras biomassas, bem como seus efeitos ambientais foi abordado por Giuntoli *et al.* (2013), ao estudarem cinco países da Europa os impactos ambientais de futuros caminhos da bioenergia para a produção de eletricidade, estes autores procuraram idealizar alguns parâmetros dentro do conceito da ACV para uma menor geração de GEE tendo como fonte de energia a biomassa da palha de trigo, que é extremamente abundante na Europa. Foram comparados os resultados desta biomassa de duas formas: em fardos e em *pellets* (pastilhas) em uma termelétrica modelada com a capacidade de se absorver 50 MW em calor. Os resultados indicaram um decréscimo de 70-94% na geração de GEE comparativamente às tradicionais termelétricas à carvão. As maiores emissões no campo ocorreram notadamente em países com pequenas propriedades rurais, ou em propriedades com alta utilização de fertilizantes químicos, mas mesmo assim todos os países avaliados indicaram melhor desempenho ambiental em suas termelétricas com o uso da biomassa comparados ao uso do carvão. Transformar ou não os fardos de palha em pellets foi

um dos objetivos deste trabalho, visto que a distância entre as lavouras e as usinas térmicas possui grande influência nesse sentido.

2.3.1 Exergia aplicada a sistemas bioenergéticos

Existem várias formas de medição do impacto ambiental relacionados à biomassa agrícola/alimentos, mas apenas mais recentemente a eficiência na conversão (exergia) tem ganhado atenção, lembrando ser a agricultura a fonte de bioenergia. Zisopoulos (2016), defendem dentro do programa das Nações Unidas *Sustainable Development Goals* (SDG), lançado em 2015, a utilização da exergia para avaliar, monitorar e projetar os setores agrícola e de alimentos de maneira mais eficiente no que tange à utilização de recursos. Esse programa possui 17 metas, mas estes autores, defendem a “ferramenta” exergia especificamente para as três metas que seguem:

- De número 2, que se refere à fome, segurança alimentar, melhoria da nutrição e promoção da sustentabilidade na agricultura;
- De número 12, que é o de garantir padrões de consumo e produção sustentáveis;
- De número 13, que é de tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas.

A análise exérgica, que é uma ferramenta de diagnóstico de irreversibilidades, pode ser utilizada para avaliar a sustentabilidade de uma agroindústria em qualquer nível. Ao se analisar a produção de uma agroindústria através da exergia, é relevante identificar os fluxos mais importantes de exergia química e física nas entradas e saídas. Usualmente, incluir a exergia solar não é recomendado porque poderia tornar os fluxos subsequentes de exergia muito escassos, tornando uma visão global do sistema mais difícil (ZISOPOULOS *et al.*, 2017).

De acordo com Hoang e Rao (2010), para se quantificar a sustentabilidade na produção agrícola, dados da literatura identificam dois aspectos principais: a extração total de recursos naturais e a poluição causada ao meio ambiente. Estes mencionam que pesquisadores têm se esforçado expressivamente para desenvolver métodos eficazes de medição destes dois principais aspectos. As metodologias de análise através da exergia tem sido comprovada eficaz ao facilitar a contabilização da extração de recursos naturais em uma unidade comum.

Os métodos de mensurar a sustentabilidade apenas com base na exergia, diferem na metodologia de cálculo, mas usualmente fazem uma distinção entre os insumos de exergia renováveis e os de não renováveis. A fração renovável de entrada é um importante indicador de sustentabilidade do processo, porém, essa informação pode se perder ao somar as exergias de entrada de todos

recursos e impactos. Para uma interpretação mais adequada é necessário de observar a entrada total e a respectiva fração renovável (MAES e PASSEL, 2014).

No processo agrícola, seja para a produção de bioenergia ou não, nos insumos de exergia renováveis, destaca-se a radiação solar, e nos insumos não renováveis, os fertilizantes, os pesticidas e os combustíveis consumidos durante o cultivo. A exergia de outros insumos renováveis como o dióxido de carbono e a água utilizados pelos reagentes na fotossíntese podem usualmente ser negligenciados porque são transportados nas condições ambientais, assim como a exergia das sementes, por ser muito pequena (FLÓREZ-ORREGOA, 2015).

Na produção de biocombustíveis é importante ter em mente que a contabilização destes dois grupos de insumos de exergia, é decisivo durante a análise da sustentabilidade do processo. No caso da radiação solar, existem duas abordagens possíveis para inclusão da mesma, uma primeira é incluir a exergia solar apenas indiretamente, representando-a somente a partir da biomassa fornecida pelo ecossistema ao processo industrial e uma segunda, mais inclusiva, inclui de maneira direta, a própria radiação solar. Esta última, contabiliza a quantidade total de exergia solar necessária para se produzir a biomassa, e estende o horizonte da cadeia de produção da biomassa (MAES e PASSEL, 2014).

Via de regra, durante a análise exérgica do processamento industrial da biomassa para a produção de biocombustíveis, nem todo potencial exérgico da mesma é aproveitado para tal, mas uma fração denominada matéria-prima do biocombustível. No entanto, é possível que a outra fração se transforme em exergia que não seja na forma de biocombustível, como é caso da fração bagaço da cana-de-açúcar, ao produzir eletricidade.

Durante o processamento industrial da biomassa, os insumos são principalmente recursos não renováveis, como combustíveis, eletricidade, vapor e produtos químicos. Mesmo quando a eletricidade necessária ao processo estiver sendo produzida a partir de recursos renováveis, no caso de uma hidrelétrica ou termelétrica, ao menos uma parcela deste insumo, requerido na fase da construção dos equipamentos, pode tornar esta geração não totalmente renovável.

Não exclusivo dos sistemas bioenergéticos, a maioria dos produtos fabricados em uma complexa cadeia de processos de produção, partindo de recursos naturais até um produto final, é necessário e útil quantificar o consumo total de exergia desses recursos durante todo o ciclo de vida (do berço ao túmulo), que é a análise cumulativa do consumo de exergia ou *Cumulative Exergy Consumption* (CExC) (SZARGUT *et al.*, 1988). O cálculo da CExC é calculado de

forma semelhante ao consumo cumulativo de energia (CEnC) que teve sua origem na década de 1970 (CHAPMAN *et al.*, 1974). Mais recentemente o conceito de consumo de energia tem sido tratado como *Cumulative Energy Demand* (CED), como ocorre na base de dados do inventário de ciclo de vida do software Ecoinvent, versão 2.2 (Ecoinvent Report, 2010).

De aplicação geral em processos, o conceito de exergia CExC ao avaliar o consumo cumulativo de recursos naturais oferece vantagens ao incluir além dos combustíveis, as matérias-primas não energéticas. O CExC é calculado como a soma da exergia de todos os recursos naturais (renováveis e não renováveis, Szargut *et al.* (1988), entrando em todas as etapas da cadeia de produção global de um produto “i”, em relação à unidade de sua taxa de produção, conforme Equação (4). De forma similar, na base de dados do mencionado software Ecoinvent, esta grandeza é denominada como *Cumulative Exergy Demand* (CExD).

$$(CExC)_i = \frac{\sum_{in} \dot{E}_{i,s}}{\dot{m}_i} \quad (4)$$

Onde:

$(CExC)_i$ é a soma da exergia de todos os recursos naturais que entram todas as etapas da cadeia global de produção do produto “i”, em relação à de sua taxa de produção unitária (J/kg);

$\dot{E}_{i,s}$ é a exergia dos recursos naturais entregue na etapa “s” do produto “i” (J/s);

\dot{m}_i é a taxa de produção líquida do produto “i” (kg/s).

No cálculo do CExC (SZARGUT *et al.*, 1988) é sugerido por estes autores de se dividir a cadeia de produção em vários níveis, onde, em cada etapa, é levado em consideração o consumo de combustíveis e das matérias-primas, mesmo que não energéticas ora utilizadas na respectiva etapa, conforme discriminado a seguir:

- a) O nível 1 envolve os combustíveis e as matérias primas utilizadas diretamente até o passo final da cadeia de produção;
- b) O nível 2 envolve os combustíveis e as matérias primas utilizadas nas etapas nas quais os produtos intermediários são fabricados;
- c) O nível 3 envolve os combustíveis e as matérias primas utilizadas na fabricação de máquinas do nível 1, além de combustíveis e matérias primas relacionadas à extração, ao transporte, ao armazenamento do nível 2, até o passo final na cadeia de produção;
- d) O nível 4 envolvem os combustíveis e matérias-primas utilizadas na fabricação de máquinas

para o nível 2 bem como estes mesmos insumos relacionados à extração, transporte do nível 3.

Ptasinski (2016) recomenda que basta limitar o cálculo do CExC para os níveis 1 e 2, visto que, nas cadeias de produção, essas etapas representam de 90 a 95% de todo o consumo cumulativo de exergia.

Durante a produção de biocombustíveis, existe a preocupação de se medir o quão renovável é este combustível, usualmente através de um indicador de renovabilidade. Na bioenergia, existe um indicador que utiliza uma metodologia própria de exergia como métrica, ao quantificar o quanto de combustível renovável é reproduzido a partir de insumos não renováveis. Definido como “criação” de exergia, ou *Exergy Breeding* (ExB), este indicador avalia a razão entre a exergia de biocombustíveis que saem, e o consumo acumulado (CExC) dos insumos não renováveis que entram, utilizados em todas as etapas da produção do biocombustível (DEWULF *et al.*, 2005). Deve ser observado, que quando outros subprodutos também são formados, nem todas as exergias de saída devem ser atribuídas ao biocombustível. A Equação (5) exhibe este indicador.

$$ExB = \frac{\dot{E}_P}{(C\dot{E}xC)_{NR}^P} \quad (5)$$

Onde:

- ExB , é a razão de produção/consumo de exergia;
- \dot{E}_P , é a taxa de exergia produzida na forma de biocombustíveis (saída);
- $(C\dot{E}xC)_{NR}^P$, é a taxa de exergia (conteúdo cumulativo) em insumos não renováveis (entrada).

Este indicador pode trazer os seguintes resultados:

- a) $ExB \rightarrow \infty$, indica um processo totalmente renovável, ocorre quando $(C\dot{E}xC)_{NR}^P \rightarrow 0$;
- b) $1 < ExB < \infty$, indica um processo parcialmente renovável, sendo a exergia do biocombustível maior que o consumo não renovável;
- c) $ExB = 1$, indica exergeticamente que o insumo de não renováveis é igual à produção de combustíveis renováveis;
- d) $ExB < 1$, indica exergeticamente que há maior insumo de não renováveis que a produção de combustíveis renováveis.

Existem outros indicadores de renovabilidade na produção de biocombustíveis abalizados pela exergia, tal qual o fator de “criação” de exergia (ExB), já definido, que compara a exergia do biocombustível produzido com a contabilização de insumos não renováveis através da CExC. Berthiaume *et al.* (2001) oferecem um outro indicador de renovabilidade, mais rigoroso, que compara a contribuição geral da CExC de recursos não renováveis, agora com a quantidade líquida de trabalho obtida com o biocombustível produzido, e não com a exergia do combustível em si definido por Dewulf *et al.* (2005).

A taxa de trabalho útil “ \dot{W}_P ”, que pode ser obtida a partir do biocombustível, é sempre menor do que a taxa de exergia de biocombustíveis “ \dot{E}_P ” devido a perdas no processo de conversão. Vários sistemas de conversão podem ser considerados, desde de ciclo de combustão em motores até células de combustível.

Além disso, na produção de biocombustíveis renováveis, parte da taxa de trabalho útil obtido a partir do biocombustível é necessário o trabalho (taxa) de reparação “ \dot{W}_R ” para corrigir os recursos não renováveis degradados consumidos durante o ciclo de produção dos biocombustíveis, restando a taxa de trabalho líquida “ $\dot{W}_P - \dot{W}_R$ ”. Daí Berthiaume *et al.* (2001) definem o indicador de renovabilidade “ I_R ”, conforme a Equação (6) :

$$I_R = \frac{\dot{W}_P - \dot{W}_R}{\dot{W}_P} \quad (6)$$

Onde:

$\dot{W}_P = (C\dot{E}xC)_P^{NR}$ é a taxa (cumulativa) de consumo de exergia de recursos não renováveis utilizada na produção do biocombustível;

$\dot{W}_R = (C\dot{E}xC)_R^{NR}$ é a taxa (cumulativa) de consumo de exergia de recursos não renováveis utilizada na correção dos ciclo de produção do biocombustível.

Os valores típicos do indicador de renovabilidade “ I_R ” são considerados na sequência:

$I_R=1$, para processos totalmente renováveis, sem entrada de recursos não renováveis;

$0 < I_R < 1$, para processos parcialmente renováveis;

$I_R = 0$, para processos neutros no ponto de vista de renovabilidade;

$I_R < 0$, para processos não renováveis que consomem mais exergia na recuperação que produzem.

Ao avaliar exergeticamente a produção de biodiesel de soja e girassol, Patzek e Pimentel (2005) trouxeram resultados divergentes em relação ao usual. Foi observado, mesmo que pequeno, um maior consumo de energia fóssil na produção que a energia do próprio biodiesel resultante. Esta situação não desejada pode ter ocorrido devido a maiores estimativas de entrada de energia fóssil, tanto na agricultura quanto no processamento industrial (REIJNDERS e HUIJBREGTS, 2009). Porém deve ser lembrado, de que mesmo nesta situação, ao se substituir o diesel fóssil por um biodiesel, ainda que parcialmente, existe um ganho para o meio ambiente. Para este caso, o indicador de renovabilidade (ExB), definido na Equação (5), é menor que a unidade.

Pesquisa realizada por Velásquez *et al.* (2013), na avaliação exergo-ambiental na produção de biocombustíveis, comparando os resultados da produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar e a produção de etanol a partir de biomassa lignocelulósica da bananeira concluiu que o uso de matérias-primas renováveis não garantem que o processo seja renovável, e que a destruição da exergia está grandemente relacionada nas reações químicas e bioquímicas como combustão, hidrólise e fermentação enzimática e ácida. Observam ainda serem importantes novas pesquisas para se reduzir este consumo de exergia das matérias-primas, e isso pode ser feito ao empregar este indicador de desempenho de recursos renováveis (exergia) cujo objetivo fim é o de se maximizar o desempenho ambiental.

Mais relacionado ao setor de agro alimentos, além de baixas eficiências de conversão, grandes perdas de exergia na forma de desperdícios estão presentes. Na parcela agrícola, o percentual de água e de fertilizantes desperdiçados são da ordem de 27%, são recursos naturais utilizados durante a produção agrícola que são literalmente jogados na lixeira (ZISOPOULOS *et al.*, 2017).

Sobre a criação de incentivos com base na exergia para uma melhor utilização dos recursos, Hák *et al.*, (2016), *apud* Zisopoulos (2016) alertam que ainda não existe consenso global. Que uma modelagem de um sistema agroalimentar para alcançar os SDGs, só será possível, primeiramente, identificando limites superiores realistas de uma produção sustentável, e em segundo lugar, inserindo políticas baseadas em métricas bastante claras. Com estes incentivos as empresas até podem modificar o seu sistema atual de produção utilizando melhor os recursos, mas é importante que também os consumidores alterarem seus hábitos.

2.4 BIOCARVÃO

O estudo do biocarvão na agricultura é relativamente recente, mas seu uso é bastante antigo. Ao estudar e tentar explicar a melhoria das propriedades do solo impostas pela Terra Preta de Índio (TPI), que são manchas de solo escuro de origem antrópica encontradas na Bacia Amazônica, é que parcela da ciência tem se dedicado ao tema do Biocarvão.

Ainda não está claro se a TPI foi produzida intencionalmente ou não e qual foi o tempo necessário para sua consolidação e mais pesquisas são necessárias para responder estas e outras questões com maior segurança. O potencial da terra preta deu início a um grande número de estudos sobre o tema, devido que, seus altos teores de nutrientes e carbono quando comparados aos solos adjacentes, se mostraram bastante resilientes quanto à degradação de sua fertilidade ao longo do tempo. A partir de então tem sido estudados o comportamento de solos quaisquer ao se adicionar biocarvão, seja de pirólise ou não (MARTINS, 2012; GLASER e BIRK, 2012).

Por definição, segundo o comitê consultivo *International Biochar Initiative* (IBI), o *biochar* (ou biocarvão) é um carvão de baixa granulometria rico em carbono orgânico e em grande parte resistente à decomposição. É produzido a partir da pirólise de plantas e resíduos de matérias-primas. Hu *et. al.* (2010), no entanto, abordam uma alternativa à pirólise e de aplicação mais recente que é a carbonização hidrotermal, que produz o hidrocarvão (*hydrochar*) pelo processo HTC (*Hydrothermal Carbonization*).

Biocarvão de pirólise é o produto final obtido pela queima de qualquer biomassa vegetal rica em celulose, em temperaturas controladas entre 300 e 900°C na ausência ou limitação de oxigênio pelo processo denominado pirólise. Ao ser aplicado como condicionador de solos agrícolas, que são produtos que promovem a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica dos solos. Esta biomassa modificada, conforme exibido na Figura 9, pode fornecer uma estratégia integrada no gerenciamento de resíduos, na produção de bioenergia, na melhoria da fertilidade do solo e na mitigação de GEE (LEHMANN, 2007 *apud* RAMLOW e COTRUFO, 2017).

Neste mesmo entendimento, Roberts *et al.* (2010) citam que a pirólise da biomassa com biocarvão devolvido ao solo é uma possibilidade estratégica para mitigação das mudanças climáticas e redução do consumo combustíveis fósseis.

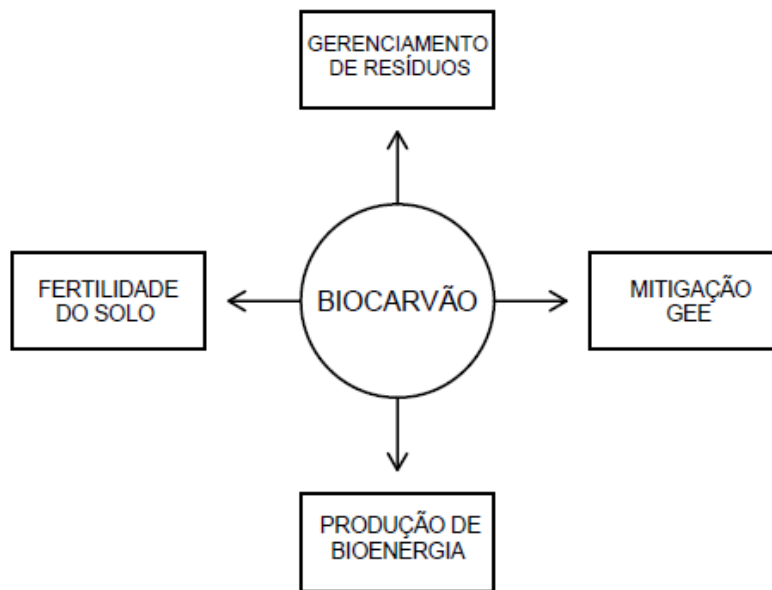


Figura 9 - Estratégias integradas pelo biocarvão.

Como condicionador de solo, o biocarvão cria um depósito tenaz de carbono no solo na forma de carbono-negativo, servindo para a retirada do dióxido carbono atmosférico. Ao trazer uma maior capacidade de retenção de nutrientes no solo alterado, o biocarvão não só reduz o total de fertilizantes requeridos, mas também o impacto ambiental das terras agrícolas.

Não obstante existirem várias tecnologias para remoções de carbono da atmosfera, o biocarvão tem um importante e potencial papel, particularmente nos países em desenvolvimento com características tecnológicas adequadas à sua utilização. Também por ser uma resposta factível à necessidade imprescindível de se evitar uma catástrofe climática, que requer além da remoção do carbono pela fotossíntese, um armazenamento seguro no solo, seja na superfície, dentro ou mesmo ao fundo do mesmo (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

Na superfície os reflorestamentos fornecem uma boa resposta, mas estão limitados pela disponibilidade de terras. Já o armazenamento de biocarvão dentro do solo, além dos denominados BECS (*Bioenergy With Carbon Storage*), que estão relacionados à armazenamentos geológicos profundos e que podem viabilizar o armazenamento do atual excesso e de futuras emissões de CO₂ dos combustíveis fósseis é factível que o biocarvão tenha, ao ser armazenado nas primeiras camadas do solo, um papel fundamental pelo possibilidade de seu amplo uso em grande parte das áreas de terras relacionadas seja à produção sustentável de matéria-prima de biomassa, seja na co-produção de alimentos-fibra, sendo este último também relacionado a atender demandas de biocombustíveis (LEHMANN e JOSEPH, 2009).

2.4.1 Biocarvão e o desempenho agrícola

O biocarvão é uma forma de carvão estável e rico em carbono, que pode ser aplicado em terras agrícolas como parte da gestão agrônômica ou ambiental (SPARKES e STOUTJESDIJK, 2011). Sua utilização tem sido recebida com grande entusiasmo para melhoramentos no solo e ao meio ambiente, podendo ser uma alternativa para diminuir o estresse das culturas agrícolas e provocar menores danos ambientais, cita o editorial da publicação *Chemosphere Journal* (2016), intitulado *Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors*. No entanto, é importante ser observado que nem todas as culturas se comportam da mesma maneira, e nem todos os solos são amplamente melhorados com a aplicação do biocarvão (SPARKES e STOUTJESDIJK, 2011; COSTA JÚNIOR e PIATTO, 2016).

Este produto é reconhecido por aumentar o sequestro de carbono para o solo e a cinza produzida durante a pirólise pode também auxiliar em macroconstituintes inorgânicos para as plantas (N, Ca, K, P etc.), onde a sua aplicação no solo pode aumentar a retenção de nutrientes, melhorar o armazenamento de água e mitigar as emissões de GEE. Pode ser utilizado também como fonte de energia (combustível sólido) e até como sorvente de toxinas em tratamentos em seres humanos intoxicados, isto vem demonstrar a diversidade de aplicações deste produto (BALDOCK e SMERNIK, 2002; NOVAK *et al.*, 2009).

De acordo com Mukherjee e Lal (2016), a partir de meados do ano de 2000, extensa pesquisa sobre biocarvão de pirólise vem sendo realizada por causa de seu uso pretendido na correção de solos. Embora ainda haja incertezas e preocupações sobre o seu uso em escala no campo, estudos têm confirmado melhorias na qualidade do solo, aumentando sua fertilidade, reduzindo sua acidez, aumentando os nutrientes disponíveis para a planta, ratificando que estes solos podem ser melhorados através da adição de biocarvão.

Esses pesquisadores compilaram dados da bibliografia sobre o tema, do ano de 2010 até 2016, constatando que nos mais variados tipos de solo, ao inserir o biocarvão houve alterações significativas, como um aumento máximo de pH no solo de até 73% com média de 28%, que dependeu da taxa de aplicação. Observou-se também um dado aparentemente paradoxal, que mesmo se aplicando ao solo biocarvão com pH menor que 7, o pH resultante no solo incorporado poderá até diminuir, mas é comum aumentar, o que atesta que este produto possui a propriedade de aumentar o pH funcionando melhor em solos ácidos. Os dados coletados, também, indicaram um aumento na Capacidade de Troca Cátions (CTC) em um máximo de

100% (dobrou) com uma média de 30%. Conforme já mencionado pode ser estabelecido existir uma tendência de que o pH do solo pode ser aumentado pelo biocarvão, porém ao que se refere à CTC, essa tendência não pôde ainda ser estabelecida categoricamente, devido a alguns resultados conflitantes e também pela falta de uma maior experimentação no campo. Ainda, dados pesquisados indicam que a maior taxa de aplicação do biocarvão poderia ser mais benéfica para alguns tipos de solo à baixa profundidade, no entanto, nenhuma tendência clara pode ser estabelecida nesse sentido. A Capacidade de Retenção de Água (CRA) dos solos modificados, também foram melhoradas na avaliação de laboratório, mas não de forma consistente nos estudos de campo. Embora esses dados sejam representativos, é necessário priorizar estudos experimentais no campo com maior tempo de duração para que se possa estabelecer de forma mais consistente as alterações na qualidade do solo com a adição de biocarvão.

A caracterização da composição do biocarvão, isto é, das propriedades químicas e físicas, antes de sua aplicação no solo, é fundamental para investigar seu desempenho. Wang *et al.* (2012) caracterizaram o biocarvão pirolisado a diferentes temperaturas, oriundos da cana-de-açúcar, para demonstrar como as condições da pirólise impactam nas características e potenciais benefícios deste insumo como condicionador de solo, ou seja, produtos que promovem a melhoria das propriedades físicas, físico-químicas ou da atividade biológica dos solos. As alterações destas características trazem principalmente melhorias na qualidade do solo, que tem como principal consequência aumentos de produtividade.

Segundo Jeffery *et al.* (2011) o aumento do rendimento das culturas é um benefício comumente relatado da adição de biochar aos solos, no entanto, os resultados são variáveis e dependem das propriedades e condições do solo, mas os mecanismos que dão origem a este aumento de rendimento não foram totalmente elucidados. Com o objetivo de avaliar a relação entre o biochar e a produtividade das culturas estes autores fizeram uma meta-análise e os resultados mostraram um benefício geral pequeno, mas estatisticamente significativo, da aplicação de biochar aos solos na produtividade das culturas, com um aumento médio de 10%. Os melhores resultados ocorreram em solos ácidos ou mesmo neutros. Os melhores resultados positivos, de 39%, ocorreram com uma taxa de aplicação de 100 t ha⁻¹.

Taxas de aplicação abordadas foram de 10, 25, 50 e 100 t ha⁻¹ que resultaram em aumentos significativos de produtividade das culturas comparados às culturas que não receberam adição de biochar, entretanto algumas taxas de aplicação, dentro do intervalo investigado, entre 40 e

65 t ha⁻¹, não apresentaram estatisticamente os efeitos da adição de biochar nos rendimentos das culturas. Estes resultados demonstraram que a adição de biochar ao solo pode aumentar a produtividade das culturas, mas não houve uma correlação entre a taxa de aplicação e os efeitos na cultura produtividade (JEFFERY *et al.*, 2011).

Pesquisa de Sarma *et al.* (2017) indicam que o biocarvão ao aumentar o carbono estável no solo, parece ser um método promissor para melhorar as propriedades físico-químicas e biológicas no mesmo. Neste estudo, foram aplicados cinco tratamentos de fertilizantes, combinando fertilizantes inorgânicos e biocarvão, como segue: controle não fertilizado (T1); 100% NPK (T2); 5 Mg de biocarvão ha⁻¹ (T3); 100% NPK + 5 Mg ha⁻¹ biocarvão (T4); E 50% N + 100% PK + 5 Mg ha⁻¹ biocarvão (T5). A aplicação de Biocarvão (T3 vs. T1; T4 e T5 vs. T2) aumentaram significativamente: o teor de clorofila foliar; a taxa de fotossíntese líquida e a concentração de nitrogênio (N) na folha e na biomassa abaixo do solo. O pH do solo, a capacidade de retenção de água, os nutrientes disponíveis (N, P e K), o carbono orgânico e suas frações também aumentaram, mesmo em frações de biocarvão aparentemente pequenas. A qualidade do grão de trigo (proteína total e carboidratos) foi melhorada, e esse estudo confirmou a eficácia do biocarvão como um condicionador do solo. Ao ser aplicado simultaneamente com fertilizantes nitrogenados comprovou ser uma opção sustentável para melhorar a produção e a qualidade do trigo, em estudo experimental em solos ácidos arenosos na Índia.

Em outra pesquisa em campo, referenciada por Mukherjee e Lal (2016), comprovou-se que com a adição de biocarvão houve um aumento no nível dos principais nutrientes do solo: nitrogênio, fósforo e potássio. Apesar do biocarvão conter nutrientes que servem como adsorventes destes nutrientes do solo, o mesmo tem a capacidade de liberá-los de maneira gradual, onde as quantidades liberadas, bem como os tipos de nutrientes possuem uma relação com o tipo da biomassa que deu origem a este insumo bem como do seu tratamento. Como exemplo, o biocarvão de grama pirolisado em temperaturas mais baixas, este efeito é mais intenso. Embora a capacidade de troca catiônica tenha se elevado durante esta experimentação, não se pode assegurar uma clara tendência neste sentido (ZHENG, STEWART e COTRUFO, 2012 *apud* MUKHERJEE e Lal, 2016).

Em uma outra análise, realizada por Zhang *et al.* (2017), durante a produção de milho na China, constatou-se que na fertilização equilibrada de nutrientes, ao se adicionar biocarvão, houve um aumento no rendimento de grãos de milho em mais de 20%, e simultaneamente uma redução de emissão de N₂O em mais de 30% em relação à fertilização química convencional.

A grande contribuição do biocarvão na agricultura é que, ao ser aplicado como um condicionador de solos, conforme já mencionado anteriormente, o mesmo altera positivamente nas características físico-químicas do solo. Pesquisa de Mukherjee e Lal (2016) em diferentes culturas e solo trouxeram resultados que estão transcritos de maneira simplificada na Tabela 2. Segundo estes autores, no que diz respeito às mudanças impostas às características físicas do solo, o biocarvão é extremamente leve e poroso, diminuindo sua densidade e aumentando a capacidade de retenção de água e resistência à penetração. Características como porosidade são melhoradas, entretanto, para uma maior confiabilidade dos resultados, faz-se necessário coleta de mais dados no campo e estudos de longo prazo. Uma diminuição na densidade do solo foi observada, porém nem sempre, é o caso da espiga de milho pirolisada à 350 °C, onde não houve diminuição da densidade. Nos incrementos iniciais (de até 10%), até ocorreu uma diminuição da densidade, mas de uma maneira geral, não se pode concluir que haja uma tendência de não diminuir a densidade.

Tabela 2 - Alteração das propriedades químicas e físicas com adição de biocarvão ao solo (Fonte: Mukherjee e Lal, 2016 (adaptado)).

Propriedade	Tipo de Biocarvão	Tipo de solo	Amplitude (Média)				
			% aplicado no solo kg/kg	Biocarvão puro	Solo puro	Solo modificado com biocarvão	(%) alteração propriedade no solo
pH	(1)	(2)	0,5 a 10 (4,8)	7,0 a 9,9 (8,7)	4,0 a 7,5 (5,2)	4,7 a 7,5 (6,5)	-1,3 a 72,7 (27,9)
CTC Capacidade de Troca Catiônica (cmol _c /kg)	(3)	(4)	0,2 a 10 (2,6)	10 a 69,2 (37,2)	1,4 a 22,5 (13,5)	1,8 a 25 (11,7)	-41,0 a 100 (30,2)
Densidade Aparente (kg/m ³)	(5)	(6)	0,5 a 10 (4,1)	0,2 a 0,7 (0,5)	1,0 a 1,7 (1,3)	0,8 a 1,6 (1,2)	-23,5 a 0 (-12,2)
CRA Capacidade de Retenção de Água (%)	(7)	(8)	0,5 a 10 (4,6)	—	4,5 a 61 (41,5)	7,1 a 73 (35,7)	-14,6 a 148,9 (30,5)
Porosidade (m ² /g)	(9)	(10)	0,5 a 2,7 (1,1)	4,4 a 604 (206,7)	1,3 a 130 (63,1)	2,7 a 153 (69,9)	2,3 a 546,2 (99,9)

Legenda:

- (1) café, espiga de milho e carvalho;
- (2) silte argiloso, Latossolo Vermelho distrófico, Neossolo Argissolo;
- (3) carvalho, grama, cama de frango e espiga de milho;
- (4) argiloso, Latossolo Vermelho, distrófico, spodosol floresta, Neossolo arenoso, argiloso;
- (5) madeira dura, sabugo de milho e carvalho; a 650
- (6) calcária, argilosos, arenoso, Latossolo Vermelho distrófico;
- (7) palha de milho, carvalho, madeiras, espiga de milho e carvalho;
- (8) tokomaru argiloso, egmont argiloso, normania barro, arenoso;
- (9) carvalho e nogueira, carvalho e madeira jarrah (eucalipto);
- (10) clarion fina argilosa, Crosby argiloso e arenoso.

Uma representação simplificada dos resultados do estudo de Mukherjee e Lal (2016), isto é, o comportamento dessas propriedades químicas e físicas em função da quantidade de biocarvão aplicados, estão abordados a partir da Figura 10 até a Figura 14. Os dados foram plotados a partir da Tabela 2, na qual tem-se dois objetivos: um primeiro, o de se analisar diretamente o comportamento das propriedades do solo modificados em função do acréscimo de biocarvão na mistura com o solo original; e o segundo, de se estimar resultados da mistura, a partir dos valores ponderados das propriedades de cada parcela participante na mistura biocarvão/solo. Este último, teve o objetivo de se estimar a eficiência na aplicação, ao se comparar dados coletados com os dados projetados e estimados pela contribuição das parcelas.

Sobre o comportamento do pH, Figura 10, existe uma certa linearidade e pode-se observar que para baixos valores de biocarvão, o pH do solo modificado é até maior que o da estimativa ponderada. Esta aparente vantagem para baixos valores de biocarvão diminui conforme o mesmo é adicionado à mistura, ou seja, para baixos valores adicionados, este acréscimo é mais eficiente.

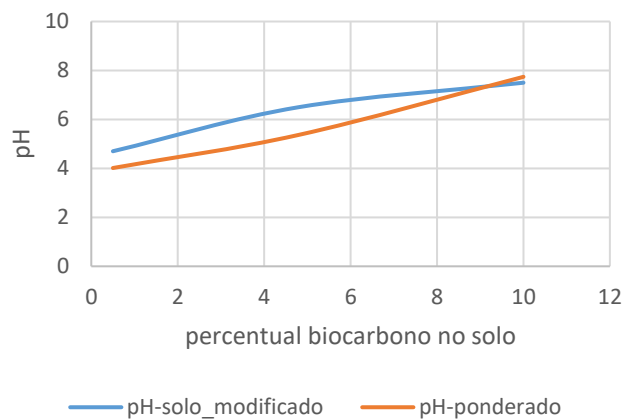


Figura 10–Comportamento do pH do solo com acréscimo de biocarvão.

Sobre a capacidade de troca catiônica, Figura 11, o comportamento é não linear, em ambas as curvas, com maior sensibilidade para baixos valores adicionados. Ao se acrescentar biocarvão existe uma característica de um resultado real ser um pouco menor que o estimado pela ponderação.

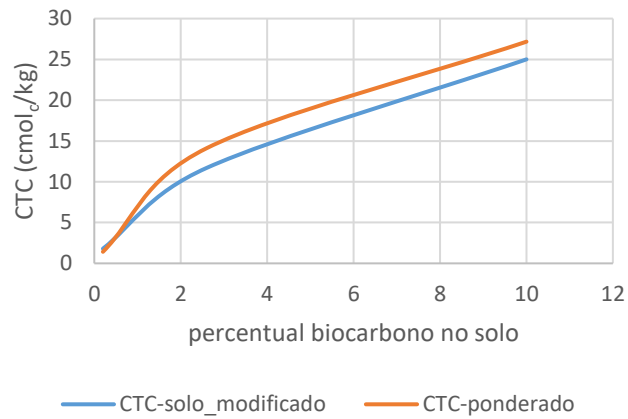


Figura 11–Comportamento da capacidade de Troca Catiônica com acréscimo de biocarbão.

O comportamento da densidade pode ser visualizado na Figura 12.

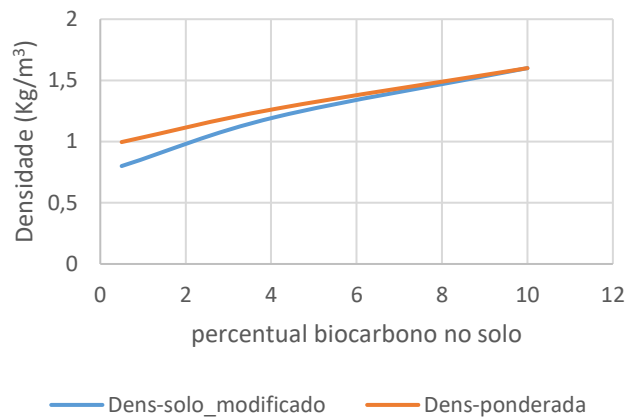


Figura 12 - Comportamento da densidade com acréscimo de biocarbão.

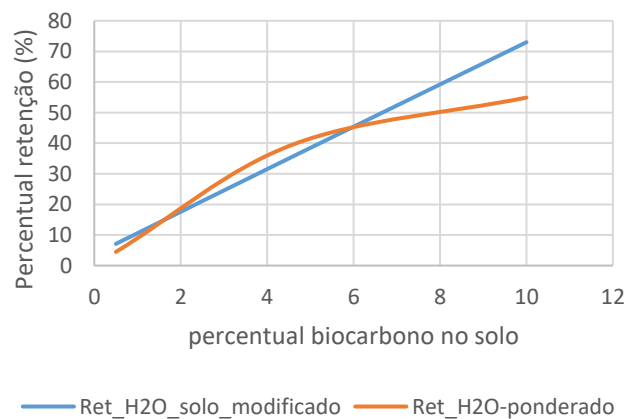


Figura 13 - Comportamento da capacidade de retenção de água com acréscimo de biocarbão.

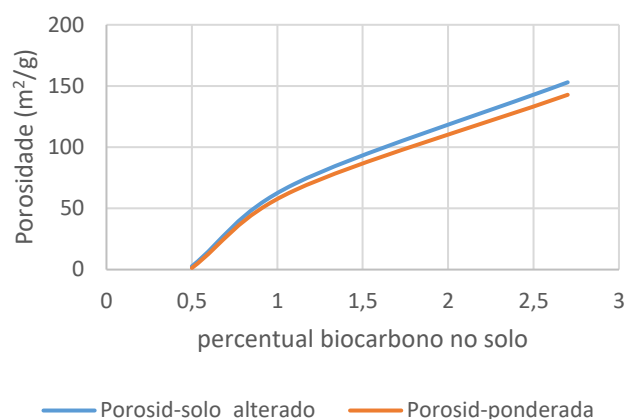


Figura 14 - Comportamento da porosidade com acréscimo de biocarbão.

Em uma outra pesquisa, esta desenvolvida no Brasil por Carvalho (2015), “*The impact of wood biochar as a soil amendment in aerobic rice systems of the Brazilian Savannah*”, se procurou determinar durante a produção de arroz, o aumento da qualidade e da estabilidade do solo cerrado brasileiro ao se adicionar carvão de eucalipto, obtido em pirólise lenta à 400-500 °C. A escolha do carvão de eucalipto ocorreu por ser uma alternativa da utilização desta biomassa já pirolisada na região, agora como condicionador de solo.

Este carvão foi aplicado em dois tipos de solo, um primeiro arenoso (Plintosolo) e um segundo argiloso (Latosolo) quando foram investigadas as propriedades físicas e químicas do solo ao longo de 3,5 anos após a aplicação inicial. Para tal, o carvão foi moído em peneiras de 2 mm e aplicado em quatro doses diferentes: “0, 8, 16 e 32” Mg ha⁻¹. Concomitantemente com a aplicação do biocarvão, foram aplicados quatro dosagens diferentes de nitrogênio de: “0, 30, 60 e 90” kg N ha⁻¹, esta última subdividida em três aplicações, uma no plantio e duas na cobertura. Além do carvão e do nitrogênio, todas as aplicações no campo receberam K e P uma vez por ano de acordo com a demanda da cultura. Em ambos tipos de solo, houve decréscimo da acidez mesmo após os 3,5 anos da aplicação. No solo argiloso, houve caso isolado de decréscimo na capacidade de retenção de água, porém, concomitantemente ocorreu um aumento da matéria orgânica incorporada ao mesmo.

Dependendo da quantidade de adubação nitrogenada, inserida durante o plantio, o efeito na produtividade em solo argiloso foi ausente e até negativo, mas induziu mudanças nas propriedades do solo, particularmente a retenção de água e a matéria orgânica. Resultados mais promissores ocorreram nos solos arenosos, onde o biocarvão aumentou a capacidade de retenção

de água ao longo destes 3,5 anos. Alguns efeitos do biocarvão foram divergentes, onde alguns efeitos positivos que foram observados nas primeiras duas estações, inexistiram nas estações seguintes. Durante este estudo, condições de tempo e pragas foram fatores que de certa forma influenciaram os resultados. Foi observado de que não houve influência do biocarvão no aumento das emissões de N₂O nos solos argilosos.

Com estes resultados, este trabalho concluiu que é interessante se utilizar biocarvão como condicionador em solos no cerrado, especialmente em solos arenosos, ao induzir uma melhoria nas propriedades químicas e físicas, como a correção de acidez, a capacidade de retenção de água e também na disponibilização de nutrientes para a planta. Estes resultados estão resumidos na Tabela 3, que trás uma visão ampla a respeito dos efeitos do biocarvão no solo bem como na produção de grãos ao longo das estações de cultivo em solo arenoso e argiloso.

Tabela 3 - Efeitos do biocarvão nas principais propriedades do solo e na produção de grãos (Fonte: Carvalho, 2015).

	---- Solo arenoso ----		---- Solo argiloso ----	
	2 primeiras estações	Últimas estações	2 primeiras estações	Últimas estações
Capacidade retenção de água	?	↑	?	↓
Matéria orgânica no solo	↑	x	x	↑
Acidez do solo	↓	↓	↓	↓
Rendimento de grãos	↑	x	x	↓
Emissões N ₂ O	?	?	x	x

↑ = aumento; ↓ = decréscimo; x = sem efeito; ? = não investigado.

2.4.2 Biocarvão e o desempenho ambiental

O melhoramento da fertilidade do solo tem sido sugerido como uma maneira de se reduzir as emissões de GEE tanto do próprio dióxido de carbono (CO₂) quanto de outras fontes potencialmente impactantes, especialmente o óxido nitroso (N₂O), dessa forma a aplicação do

biocarvão para melhoramento de solos tem sido proposta. Ensaios de campo têm demonstrado a redução das emissões de N_2O , porém este efeito a longo prazo tem sido questionado. Hagemann *et al.* (2016) pesquisaram em campo o uso de biocarvão da madeira de carvalho em pó obtida a partir de pirólise lenta, certificada em conformidade com a *European Biochar Certificate* (EBC), e mostraram que tanto as emissões de CO_2 quanto N_2O foram efetivamente reduzidas ainda após o terceiro ano de sua aplicação, no entanto, especificamente neste estudo, não houve influência na produção da biomassa de girassol para produção de biogás. A reduzida densidade do biocarvão aumentou a aeração do solo, reduziu o preenchimento de água entre os poros do solo, e foi capaz de reprimir a emissão de N_2O . Os experimentos tiveram impactos limitados na alteração do nitrogênio mineral no solo, mas reduziram o acúmulo deste nos microrganismos, que não tiveram sua abundância alterada.

Contrariando experiências anteriores, este estudo demonstrou a potencialidade da redução de emissões a partir do carvão de madeira, bem como a potencialidade para a mitigação das mudanças climáticas. Estes autores destacam que a compreensão detalhada requer pesquisas adicionais dos mecanismos correlatos que forneçam evidências em uma gama de condições induzidas entre biocarvão e solos, e as respectivas alterações com o tempo na redução das emissões de óxido nitroso (N_2O) (HAGEMANN *et al.*, 2016). Deve ser destacado que compostos nitrogenados emitidos por atividades humanas, mesmo que em pequena quantidade, o N_2O em conjunto com o NO , e o NO_2 , são considerados responsáveis pela depleção da camada de ozônio (ANWAR *et al.*, 2016).

As emissões de N_2O com origem no solo são predominantemente produzidas por duas categorias de bactérias que carregam processos denominados nitrificação e desnitrificação. A nitrificação é uma oxidação anaeróbica do amoníaco (NH_3), em que em duas etapas são obtidos os nitratos (NO_3^-) a partir de um nitrito (NO_2^-) em uma etapa inicial. Nesta transformação, atuam dois tipos de bactérias nitrificantes que resultam os nitratos finalmente prontos para serem assimilados pelas plantas. A desnitrificação é um processo inverso, em que ocorre também através de bactérias e se observa a redução anaeróbica do NO_2^- ou NO_3^- , em que o NO ou o N_2O voltam para a atmosfera na forma de gás nitrogênio (N_2). Considera-se esta, como sendo a principal via de perdas de nitrogênio em agrossistemas através da produção e a liberação do N_2O e do N_2 em diferentes proporções, geralmente controlados pelo pH do solo, onde maior pH induz a taxas mais baixas da relação entre N_2O e ($N_2O + N_2$). A supressão das emissões de N_2O

do solo pode ser um componente importante e potencial na mitigação das mudanças climáticas através do biocarvão, motivo que o mesmo tem sido amplamente estudado.

De acordo com Cayuela *et al.* (2014), mais de dois terços das emissões globais de N₂O são originários do solo, podendo as mesmas serem associadas ao uso generalizado de fertilizantes nitrogenados na agricultura. Embora a interação do carbono “negro” com o ciclo do nitrogênio seja reconhecida há bastante tempo, o impacto do biocarvão sobre as emissões de N₂O foi estudado apenas mais recentemente. A pesquisa destes autores traz algumas hipóteses para explicar a diminuição do N₂O com o biocarvão, relacionando alguns mecanismos específicos para a formação e o consumo do N₂O no solo.

Além disso, esta mesma pesquisa realiza uma meta-análise dos resultados da literatura publicada entre 2007 e 2013 para relacionar a influência no comportamento das emissões de óxido nitroso com o uso do biocarvão, que trouxe uma diminuição média de 27% deste gás para uma aplicação de biocarvão entre 1 e 2% no peso do solo.

Mesmo que estimativo, desempenhos além do ambiental com o uso do biocarvão foi o estudo de Roberts *et al.* (2010), intitulado *Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential*, onde foram utilizados e comparados o biocarvão de três matérias primas. A primeira de resíduos da palha de milho; a segunda, também resíduo, de jardim (gramas, folhas etc.) e a terceira de um não resíduo, mas uma biomassa que é uma forrageira densa denominada *swichtgrass*. Neste trabalho foi utilizada a metodologia ACV para estimar a energia, alteração dos impactos no clima e viabilidade econômica destes três tipos de biocarvões. Quanto à energia, o melhor resultado foi da forrageira densa (e seca), com 4899 MJt⁻¹. Quanto às emissões líquidas de GEE, ambos os resíduos e as forrageiras se apresentaram negativos, respectivamente 864 e 885 kg de CO₂ equivalente.

Destas reduções de emissões líquidas, entre 62 e 66% ocorrem a partir do sequestro de carbono do biocarvão. A forrageira oferecendo, dentro do sistema de biocarvão-pirólise ser um emissor líquido de GEE, da ordem de 36 kg CO₂ equivalente por tonelada de matéria seca, havendo uma dependência no método empregado na contabilização para impactos indiretos pela mudança no uso da terra. Sobre a viabilidade econômica, estes autores citam que a pirólise-biocarvão é largamente dependente dos custos de produção e que a distância para se transportar a matéria-prima cria um obstáculo para a rentabilidade dos sistemas de biochar-pirólise tornando a utilização de resíduos disponíveis *in loco*, mais indicada para contemplar tanto os benefícios nas mudanças climáticas quanto financeiros.

Originalmente abordado por Yanai *et al.* (2007), que, analisando 56 campos em laboratório, no que diz respeito ao impacto do biocarvão nas emissões de N₂O no solo, em uma abordagem global houve uma redução de emissões de $49 \pm 5\%$, no entanto houve pouca investigação quanto a relação entre a diminuição de emissões e o rendimento da cultura. Estes autores destacaram que existem ainda dois grandes desafios que impedem a ampla aplicação do biocarvão para a mitigação das mudanças climáticas, o primeiro é o conhecimento ainda limitado sobre a persistência deste ganho e o segundo, é que, mesmo que muitos mecanismos diferentes sejam sugeridos pela literatura, uma explicação integradora ainda está faltando. Devem, também, ser observados que sejam evitados aspectos negativos do biocarvão, e notar que o aumento das emissões de N₂O depende de aspectos tanto do solo quanto do biocarvão, mas constituem uma abordagem promissora a se tratar. Especificamente este estudo de avaliação do impacto do envelhecimento do solo sobre o potencial de mitigação de N₂O por um biocarvão de madeira, comparou-se duas situações: uma primeira com gestão convencional e uma segunda com a aplicação do biocarvão.

Com o mesmo objetivo, Wang *et al.* (2012) avaliaram os efeitos do biocarvão na emissão de gases de efeito estufa ao produzir arroz e trigo na China em dois diferentes tipos de solo: o de montanha e o de planície encharcada. Os rendimentos também foram avaliados e os resultados indicaram que o aumento de biocarvão no solo de montanha aumentaram as emissões de metano (CH₄) em 37% durante o arroz safrinha (temporada), enquanto não teve efeito sobre estas emissões durante a estação do trigo. O aumento do biocarvão no solo, diminuiu emissões de óxido nitroso (N₂O) até 54% e 53% durante as estações de arroz e trigo. No solo encharcado, sem nitrogênio ureico, a adição de biocarvão diminuiu significativamente as emissões de N₂O e aumentaram as de dióxido de carbono (CO₂). Além disso, a adição de biocarvão aumentou o rendimento de grãos/biomassa nos dois tipos de solo ao ser aplicado com adubo nitrogenado, aumentou a produção de arroz e trigo em 12% e 17%, respectivamente. Estes aumentos podem ser parcialmente atribuídos aos aumentos na retenção de nitrato do solo. Estes resultados demonstraram que, embora a utilização do biocarvão como condicionador de solo tenha aumentado o potencial de aquecimento global devido à aplicação simultânea de fertilizantes nitrogenados, a incorporação deste insumo no solo, diminuiu significativamente as emissões de N₂O, além de potencializar a produtividade dessas culturas.

Em estudo intitulado *Biochar from Sugarcane Filtercake Reduces Soil CO₂ Emissions Relative to Raw Residue and Improves Water Retention and Nutrient Availability in a Highly Weathered*

Tropical Soil , Eykelbosh *et al.* (2014), examinaram os efeitos do biocarvão sobre as propriedades físico-químicas do solo ao se aplicar o resíduo torta de filtro *in natura*, comparando-a com o biocarvão, oriundo da referida torta. Este estudo foi realizado em uma usina localizada no Estado de Mato Grosso (Brasil), onde o material foi colhido, transformado e aplicado de duas maneiras, uma primeira aplicação deste produto na forma *in natura* e uma segunda, na forma de biocarvão. A torta de filtro, devido seu alto teor de umidade foi primeiramente secada para posteriormente ser pirolizada a 575°C por três horas. A composição final foi basicamente de cadeias de carbono aromático com algum resíduo de celulose e hemicelulose. Houve um aumento da porosidade e da área superficial das amostras de solo com biocarvão comparativamente aos com torta crua. Após aplicação do biocarvão no solo em 5% de massa seca, incubados por três semanas, houve neste solo monitorado um aumento de emissões de CO₂ em aproximadamente 4 vezes, sendo, porém, 23 vezes menores se comparados com a aplicação direta da torta *in natura* ao solo, sem pirólise. Neste mesmo trabalho, foi estudado a adição simultânea de vinhaça nas mesmas condições mencionadas, e os resultados tiveram a mesma tendência, com uma pequena diferença nos quantitativos, resultando emissões 20 vezes menores. Estes autores também inseriram misturas de 5 e de 10% em solos tropicais altamente degradados, e concluíram que este insumo aumenta significativamente a retenção de água no solo alterado e também melhoram a disponibilidade de nutrientes para a planta, fator este que pode certamente estar relacionado com a produtividade agrícola. Ao fim concluíram que a aplicação de biocarvão da torta de filtro (da cana-de-açúcar) satisfaz melhor os objetivos de manejo do solo que a aplicação deste insumo *in natura*. Também, este resíduo modificado (*biocarvão*), ao ser aplicado como condicionador de solo, pode ajudar a construir estoques de carbono em solos de regiões de cultivo da cana-de-açúcar (Tabela 4, Tabela 5 e Figura 15).

Tabela 4 - CO₂ emitido nas três semanas de incubação (adaptado Eykelbosh *et al.* 2014).

Tipo de tratamento	CO ₂ emitido (gramas)
S (solo sem tratamento)	0,24
SV (solo com vinhaça)	0,47
SB (solo com biocarvão)	1,04
SBV (solo com biocarvão+vinhaça)	1,17
ST (solo com torta crua)	23,9
STV (solo com torta+vinhaça)	20,8

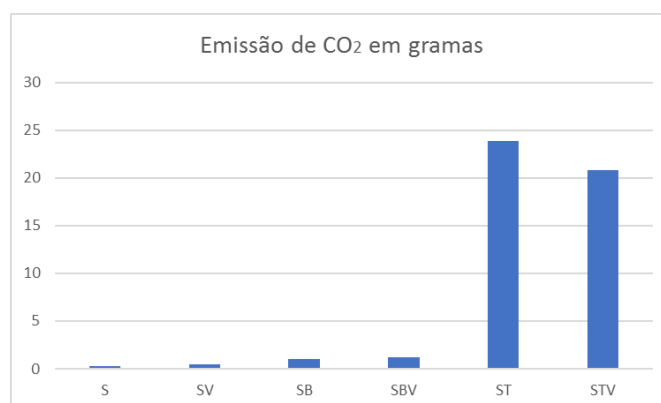


Figura 15 - Comparativo emissões solo puro e com biocarvão-vinhaça-torta crua.

Tabela 5 - Propriedades físico-químicas de solos modificados com biocarvão da torta.

Parâmetros	% Biocarvão		
	0%	2,5%	5%
pH	6,13	7,03	7,4
CEC (cmol _c dm ⁻³)	8,0	10,5	11,6
%C	1,48	---	2,65
%N	0,07	---	0,08
Macronutrientes			
P (mg dm ⁻³)	2,5	146,0	151,6
K (mg dm ⁻³)	46,7	164,3	151,6
Ca (cmol _c dm ⁻³)	3,1	6,1	6,7
Mg (cmol _c dm ⁻³)	1,5	2,7	3,5
S (cmol _c dm ⁻³)	13,1	13,1	13,2
Micronutrientes			
B (cmol _c dm ⁻³)	0,26	0,29	0,28
Fe (cmol _c dm ⁻³)	115,0	195,7	223,7
Mn (cmol _c dm ⁻³)	7,1	10,1	12,9
Zn (cmol _c dm ⁻³)	2,8	4,3	6,4

Eykelbosh *et al.* (2014) concluíram que, por ser um elemento mais estável, a aplicação de biocarvão de pirólise da torta de filtro apresentou melhores resultados no que se refere à emissões de CO₂. Por outro lado, no curto prazo a aplicação da torna de filtro *in natura* é matéria orgânica bem-vinda no aspecto de produtividade, mas, em contrapartida, pode aumentar as emissões, então, em um espectro temporal maior, a aplicação do biocarvão contempla positivamente tanto a produtividade quanto as emissões.

Um outro estudo, de Wang *et al.* (2012), em uma experimentação agrícola de campo no nordeste da China durante três anos, aplicou-se biocarvão de palha de milho para cultivo do próprio

milho, e concluiu-se que a aplicação de biocarvão é um método eficaz para melhorar o rendimento de grãos, e que também a absorção de “N” utilizando o indicador *Nitrogen Use Efficiency (NUE)*, aumentou de 10,2 % para 14,2%, trazendo além do referido aumento de rendimento, uma diminuição substancial da perda de $\text{NO}_3\text{-N}$ por lixiviação.

Outra abordagem do tema, foi realizada por Ramlow e Cotrufo (2017), em estudo intitulado “*Woody biochar’s green house gas mitigation potential across fertilized and unfertilized agricultural soil sand soil moisture regimes*”. A partir de um biocarvão de pinheiro pirolisado à 550°C aplicados em uma série de incubações em dois tipos de solos, os fertilizados e os não fertilizados, tiveram as emissões de gases de efeito estufa, somente no solo, sem plantio, devidamente monitoradas em laboratório cujo objetivo era o de se quantificar a potencialidade do biocarvão na mitigação de GEE. Esta pesquisa explorou a magnitude deste potencial de mitigação, e os resultados finais trouxeram uma redução anual (com biocarvão) de 580 até 1720 kg de $\text{CO}_2\text{-equivalente}$ por hectare a uma taxa de aplicação de 25 ton/ha. O maior potencial de mitigação de gases com efeito de estufa foi na redução de N_2O em adubação nitrogenada, e o menor potencial, ocorreu em solos não fertilizados, com menores reduções de emissões de N_2O , do próprio dióxido de carbono (CO_2) e também do metano (CH_4).

Nestes termos, apesar de promissoras a aplicação do biocarvão possui ainda resultados dispersos e em alguns casos de dificultosa explicação, muito disso pela quantidade de variáveis envolvidas, indicando a necessidade mais estudo do tema para um melhor entendimento do mesmo, conforme já indicado por vários pesquisadores.

No entanto, através da meta-análise estatística compilando os resultados de vários estudos, Jeffery *et al.* (2011) e de Cayuela *et al.* (2014) trouxeram resultados mesmo que na média estatística, bastante interessantes com a utilização do biocarvão. Trazendo respectivamente, um aumento na produtividade de 10% e uma diminuição nas emissões de óxido nitroso de 27%.

MÉTODOLOGIA

3.1 QUANTIFICAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA EM SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

Os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto ou mesmo serviço, com espectro que vai desde a aquisição da matéria-prima, passando pela produção, pelo seu uso até a disposição final, representando assim a história de um produto desde sua extração até a transformação em lixo ou resíduo são objeto de estudo de uma ACV. Os fluxos de matéria e energia envolvidos no ciclo de vida de um produto são medidos e relacionados a diversas categorias de impactos ambientais e ao final, é possível compreender quais danos ou benefícios da produção/fabricação e uso de um produto específico. Para se dar início a ACV um fluxograma do processo é construído, especificando todos os fluxos de material e energia que entram e saem do sistema, portanto é uma análise bastante complexa com muitas variáveis, por este motivo existe uma estrutura formal dividindo em etapas a realização da ACV (GIANNETTI e ALMEIDA, 2006).

Uma vez definido os limites bem com as fronteiras do sistema, deve ser escolhida uma Unidade Funcional (UF) para o cálculo de entradas e saídas. A unidade funcional é a referência segundo a qual são relacionadas as quantidades mencionadas no inventário.

Durante o inventário, são quantificadas entradas e saídas de energia e materiais relevantes para o estudo. Neste balanço de massa e energia, todos os fluxos de entrada e de saída devem corresponder às quantidades tipificadas como produto, resíduo ou emissão.

Ao avaliar os impactos, os fluxos definidos no inventário são convertidos em impactos ambientais através da multiplicação dos valores brutos por fatores de equivalência que remetem a resultados em unidades comuns, como por exemplo, kg de CO₂ equivalentes para a categoria, dentro das mudanças climáticas, o aquecimento global, que nesse estudo específico, é o que foi quantificado.

Na estrutura mencionada, foram inventariadas, a partir de valores de referência, o impacto ambiental durante a produção de bioenergia em uma agroindústria do sudeste do Brasil, tendo como base o estudo de Macedo *et al.* (2004, 2008) ao produzir etanol hidratado e também energia elétrica, sendo estes oriundos respectivamente do caldo e do bagaço/palha da cana-de-açúcar. Conforme já mencionado, no contexto deste estudo, foram comparados e correlacionados os impactos do que tange ao indicador para o a categoria do impacto nas

mudanças climáticas, na forma de geração de gases de efeito estufa (GEE). Para a análise exergética foi utilizada três métricas semelhantes, mas distintas.

Os limites deste sistema (volume de controle) em análise, foram os da agroindústria de sucroenergia, ou seja, desde a parte agrícola para produzir e transportar a cana, até o processamento industrial na destilaria, onde é produzido o etanol e gerado a eletricidade. Apesar deste limite físico ser bem delimitado, foram também tratados impactos mesmo que produzidos fora da fronteira deste sistema, que são os impactos indiretos.

Por se tratar de uma análise comparativa de resultados, foram utilizados os níveis de emissões de forma análoga ao cálculo do consumo de exergia acumulada (CExC) proposta por Szargut *et al.* (1988), como segue:

- Nível 1, são considerados apenas as emissões dos combustíveis consumidos ou a energia elétrica adquirida de fonte externa, caso existam. Como exemplo, o diesel consumido nas operações agrícolas, estas são as emissões associadas aos insumos energéticos diretos;

- Nível 2, são as emissões relativas aos insumos energéticos indiretos, onde são acrescentados ao primeiro nível as emissões relativas à energia necessária para a produção de outros insumos para a lavoura ou para o processo industrial. Como exemplo, as emissões relativas à energia fóssil consumida na durante a produção dos fertilizantes, que produzem impactos mesmo estando fora do volume de controle em estudo.

Nível 3, são acrescentados aos níveis anteriores as emissões relativas à energia necessária para a produção e manutenção de equipamentos e instalações. Neste trabalho, se trabalha com o nível 3, ou seja, são contemplados insumos energéticos diretos, indiretos e também para a produção e manutenção dos equipamentos.

Relacionadas aos três níveis recém elencados, as emissões de GEE estão sendo apresentadas em três grupos, que são:

- Grupo 1, mais relacionado ao segundo sub-indicador referenciado por Schryver *et al.* (2016), são os fluxos associados à fixação (captura) de carbono atmosférico por fotossíntese, e também pela sua liberação à atmosfera, seja gradualmente na oxidação dos resíduos do próprio campo, na fermentação da sacarose durante a produção do etanol, na queima do bagaço para a produção de calor e energia na usina e finalmente na queima do próprio etanol nos veículos. De maneira conservadora o fluxo do carbono foi considerado neutro, visto que o mesmo pode ser considerado até como ligeiramente positivo;

- Grupo 2, mais relacionado ao primeiro sub-indicador, são os fluxos associados aos usos de combustíveis fósseis na produção de todos os insumos agrícolas e industriais para a produção de cana e etanol, desde o combustível para os tratos culturais aos combustíveis fósseis usados na produção dos insumos, como fertilizantes, também na fabricação de insumos para a indústria, como a cal, e pôr fim a liberação de CO₂ durante a produção de equipamentos (agrícolas e industriais) e construção de prédios e instalações;

- Grupo 3, com pequena relação com o terceiro indicador, são os fluxos não associados ao uso de combustíveis fósseis são principalmente o óxido nitroso (N₂O) decorrente da adubação nitrogenada e o metano (CH₄), embora outros GEE de muito menor importância possam ocorrer.

A partir dos fluxos inventariados e com dados da literatura do seu potencial impactante, as emissões de GEE foram inventariadas em gramas de dióxido de carbono equivalente por megajoule de etanol hidratado produzido (g CO₂-equivalente / MJ etanol), sejam as mesmas associadas ao consumo fóssil tal qual nas operações agrícolas ou mesmo as não associadas a este recurso, caso das emissões durante o processo de fermentação, durante a produção do vinho. Ou seja, são todas as emissões associadas aos três grupos já referenciados para a produção do etanol e de eletricidade, tanto na agricultura, quanto na indústria.

A Figura 16 mostra em linhas gerais o fluxograma característico do setor sucroenergético que foram a base deste estudo, isto é, tanto as emissões quanto as exergias foram tratadas inicialmente de maneira simplificada para um posterior detalhamento. Destaca-se quanto ao reuso interno (agroindústria), a vinhaça, as cinzas e a torta de filtro, que no sistema de referência foi devolvido ao solo sem nenhum tratamento.

De um lado existe uma grande entrada de carbono biótico pelo processo de fotossíntese, ao transformá-lo em cana e palha, do outro lado (saídas), carbono biótico e não biótico são emitidos, como: a) no consumo de insumos agrícolas e industriais; b) na fermentação do vinho; c) na queima bagaço e palha caldeiras, além de emissões no solo, não detalhadas na referida figura.

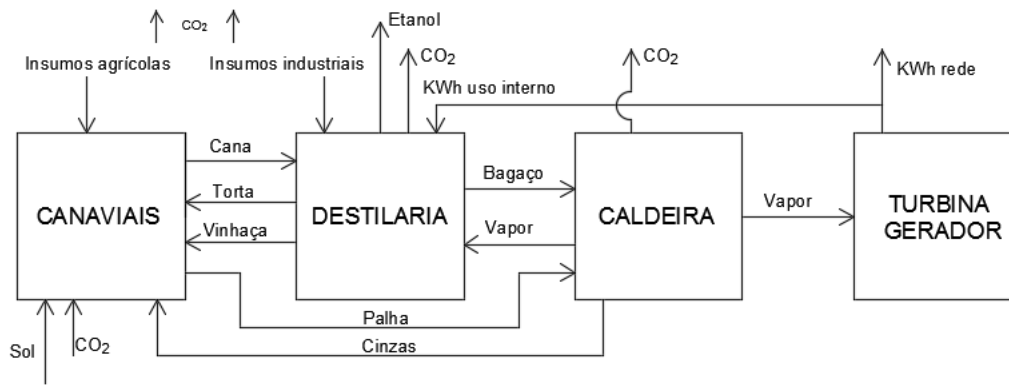


Figura 16 – Fluxograma geral massa e energia setor sucroenergia.

As emissões características durante a produção de biocombustíveis, relativas ao estudo em questão, dentro dos grupos e níveis já citados, bem como o ciclo de carbono na sucroenergia são representados de forma agrupada na Figura 17, que teve como referência o estudo de Macedo *et al.* (2004) e cujos valores resultantes são proporcionais aos tamanhos das setas (área). Os resultados destas emissões são ligeiramente diferentes do referido projeto devido à atualização de alguns quantitativos bem como fatores de impacto do processo.

Como entrada existe o próprio carbono capturado na fotossíntese e nas saídas estão representados tanto o carbono biótico quanto o não biótico. As emissões associadas ao carbono não biótico, assim como as que ocorrem durante o uso do solo representadas pelo N₂O da adubação nitrogenada são os principais agentes considerados neste inventário, nos moldes de uma ACV. Mesmo ao ser considerado de que o fluxo de carbono biótico seja “neutro”, as emissões ora contabilizadas trazem um bom parâmetro da qualidade do processo no que se refere a seu impacto no aquecimento global.

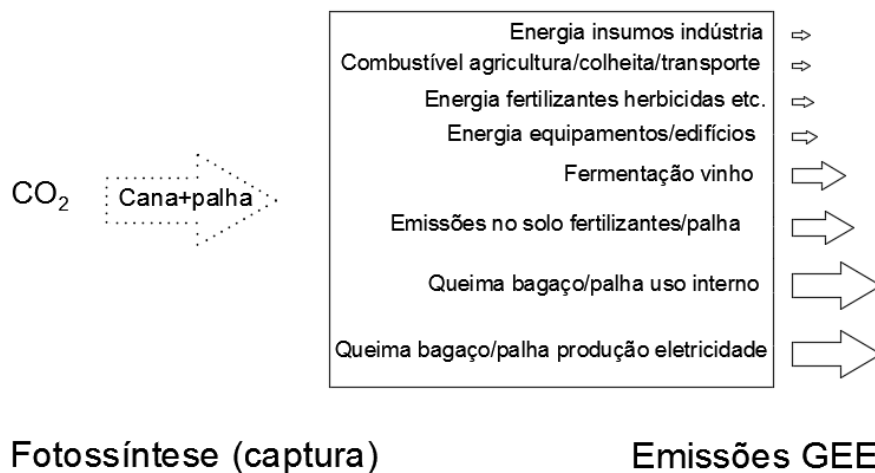


Figura 17 - Captura e emissões de CO₂ no setor da sucroenergia.

O Quadro 2 traz de forma mais detalhada, os fluxos tanto de emissões quanto de captura (fotossíntese) passíveis de inventário. Neste trabalho, que contemplou os setores agrícola e industrial, optou-se por contemplar sequencialmente a agricultura e a indústria dentro dos grupos 1, 2 e 3.

Quadro 2 - Detalhamento insumos e produtos associados às emissões.

Grupo	Setor	Nível / outros	Insumo/produto emissão
1	Agrícola	Nível 1 - Captura fotossíntese (cana/palha)	CO ₂ biótico
1	Industrial	Nível 1 - Saída energia/emissões	Queima bagaço e palha uso interno
1	Industrial	Nível 1 - Saída energia/emissões	Queima bagaço e palha produção eletricidade
1	Industrial	Nível 1 - Emissões	CO ₂ biótico fermentação
2	Agrícola	Nível 1 –uso energia/emissões	Operações agrícolas, colheita e transporte
2	Agrícola	Nível 2 –uso energia/emissões	Fertilizantes e calcário
2	Agrícola	Nível 2 –uso energia/emissões	Herbicidas, inseticidas e mudas
2	Industrial	Nível 2 –uso energia/emissões	Ácido sulfúrico, soda, lubrificantes, cal
2	Agrícola	Nível 3 –uso energia/emissões	Fabricação/manutenção equipamentos
2	Industrial	Nível 3 –uso energia/emissões	Fabricação/manutenção edifícios, equipamentos pesados e leves
3	Agrícola	Nível 1 - Emissões no solo	N ₂ O solo da adubação
3	Agrícola	Nível 1 - Emissões no solo	Oxidação resíduo palha

3.2 ANÁLISE EXERGÉTICA DE SISTEMAS BIOENERGÉTICOS

Para transformações termodinâmicas à temperatura e pressão constantes, Gibbs foi o primeiro a introduzir explicitamente a noção de trabalho disponível ou energia disponível. A variação da energia livre de Gibbs encontra-se diretamente associada ao trabalho útil realizado pelo sistema que é o mesmo que exergia (X), diferenciando apenas em sinal (SCIUBBA e WALL, 2007), conforme a Equação (7), em que:

$$X = -\Delta G^0 \quad (7)$$

Esta consideração é importante, pois através de dados disponíveis na literatura em termos de energia livre de Gibbs é possível que os mesmos possam ser utilizados igualmente como base de dados de exergia.

A exergia é tradicionalmente descrita em quatro parcelas distintas: a) a potencial que é associada a uma diferença de potencial (X_{pot}) que pode ser gravitacional ou mesmo magnético; b) a cinética (X_{cin}) que é associada ao movimento (velocidade); c) a física (X_{fis}) que ocorre em virtude de diferenças de temperatura e pressão com o ambiente de referência; d) a química ($X_{quím}$) que é decorrente das diferenças na composição química entre os estados inicial e final (KOTAS, 2013).

A exergia necessita de um nível de referência para o seu estado final, que é o estado considerado morto, quando a matéria modificada entra em equilíbrio com o meio ambiente de referência. Na exergia física, a temperatura e a pressão de referência são descritas com o índice *zero* na forma T_0 e P_0 , padronizadas em 298K e 1 bar respectivamente (SZARGUT *et al.*, 1988). Da mesma forma para esta mesma condição de T_0 e P_0 são referenciadas: a entalpia (H_0) e a entropia (S_0). Assim a exergia física pode ser calculada conforme a Equação (8).

$$X_{fis} = H - H_0 - T_0(S - S_0) = \Delta H_{fis} - T_0 \Delta S_{fis} \quad (8)$$

Onde,

X_{fis} : exergia física (J); H: entalpia na condição T, P (J); H_0 : entalpias na condição de referência T_0 , P_0 (J); S: entropia do fluxo no processo nas condições T, P, (JK^{-1}); S_0 : entropia do fluxo no processo nas condições T_0 , P_0 , (JK^{-1}); T_0 : temperatura de referência (K); P_0 : pressão de referência (100 KPa).

Na sua formulação conceitual e geral, a exergia química $X_{quím}$ associada ao calor e à temperatura de uma reação exotérmica é exibido na Equação (9). Este valor representa o máximo trabalho que o potencial químico de uma substância é capaz de realizar de seu estado inicial até um estado final considerado morto (T_0 , P_0 e produtos da reação).

$$X_{quím} = Q \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad (9)$$

Onde,

Q : calor produzido na reação exotérmica (J); T_0 : temperatura ambiente padrão (298 K); T : temperatura da reação química (K).

Em uma abordagem da exergia detalhada, ao serem considerados vários compostos químicos com suas fases, concentrações e composições, até que estes se apresentem na sua forma mais oxidada ou clorada ao entrar em equilíbrio com a atmosfera, hidrosfera e crosta terrestre, o valor total da exergia é a soma da exergia de cada composto químico, valendo tanto para os de baixa exergia (não energéticos) quanto para os de alta exergia (energéticos) (SZARGUT, 2005, HOANG e RAO, 2010; MAES e PASSEL, 2014).

A formulação geral proposta por Szargut (2005) para exergia química é exibida na Equação (10) e detalhada na Equação (11). O cálculo das exergias unitárias desta pesquisa, foram oriundos destas equações, mas de maneira indireta, visto que seus resultados já estão calculados e disponibilizados pela literatura e devidamente referenciados caso a caso.

$$X_{quím} = \sum_i n_i \tilde{b}_{quím,i} \quad (10)$$

Onde a parcela da exergia molar do componente i , $\tilde{b}_{ch,i}$ é calculado como:

$$\tilde{b}_{quím,i} = \tilde{b}_{quím,i}^0 + RT_0 \ln x_i \varphi_i \quad (11)$$

Onde,

$\tilde{b}_{quím,i}^0$: é a parcela molar da exergia do componente i nas condições de referência T_0 , P_0 em (Jmol^{-1}); R : constante dos gases ideais ($\text{Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$); x_i : composição molar do componente i ; coeficiente de fugacidade do componente i .

A quantificação das parcelas de exergia específica para diferentes fluxos de energia, bem como o equacionamento das grandezas envolvidas, estão mostradas na Tabela 6 na forma geral e simplificada. Como neste estudo as fronteiras do sistema são as da própria agroindústria, nem todas foram contabilizadas, seja por seus baixos quantitativos ou por serem de uso interno, mas seus impactos globais (irreversibilidades) foram contabilizados. A última coluna da referida tabela apresenta o denominado fator de qualidade, que é a relação entre o potencial exergético (exergia específica) e o consumo energético (energia específica) já um melhor detalhamento destes quantitativos estão *a posteriori*.

Tabela 6 – Energia e exergia específica de algumas fontes e fator de qualidade das mesmas (fontes: Sciubba e Wall, 2007, adaptado; Dincer e Rosen 2007, adaptado).

Tipo de energia	Energia específica (E)	Exergia específica (X)	Fonte	Obs.:	Fator de qualidade (X/E)
Cinética	$0,5V^2$	$0,5V^2$	/	J/kg	1
Potencial	$g\Delta z$	$g\Delta z$	/	J/kg	1
Calor	q	$q \left(1 - \frac{T_0}{T_q}\right)$	/	J/kg	~ 0,60 p/ vapor 600°C
Mecânica	w	w	/	J/kg	1
Elétrica	$I\Delta V$	$I\Delta V$	/	J (Joule)	1
Química, substância pura	Δg_G	$\mu - \mu_0 + RT_0 \ln \left(\frac{C}{C_0}\right)$	Wall, 1977	$\frac{J}{mol}$ $\mu - \mu_0 = \Delta g_G = g_G - g_{G,0}$	~ 1 p/ combustíveis
Radiação	I	$\sigma \left(T^4 - \frac{4T^3T_0}{3} + \frac{T_0^4}{3}\right)$	Petela, 1964	W/m ² para corpos negros	~0,9 luz solar

Para a exergia química dos combustíveis, como o óleo diesel consumido no setor agrícola, assim como o óleo combustível consumido durante a produção de alguns insumos, podem ser indicados através de seu poder calorífico inferior (PCI), que é uma aproximação referenciada pela Tabela 6. No caso de fluxos materiais não energéticos, as exergias devem ser calculadas pelo somatório da sua exergia química e da energia para produzi-lo. No caso das principais saídas de exergia, etanol e eletricidade, vale para o etanol a exergia química do mesmo e para a eletricidade, por se tratar de exergia pura, o próprio valor da eletricidade produzida.

Em um volume de controle em estudo, as alterações das propriedades termodinâmicas de um fluxo qualquer, ao combinar entradas e saídas de trabalho, calor e interações químicas da massa com outros sistemas, provocam mudança na sua exergia, que expressa não apenas a quantidade de trocas energéticas, mas também a sua qualidade.

Ao analisarmos este volume de controle, nas suas fronteiras podem atravessar calor, trabalho e massa. Simultaneamente à “travessia” destas grandezas, as mesmas carregam cada qual sua exergia associada, exibida de forma simplificada na Figura 18 (ÇENGEL e BOLES, 2013).

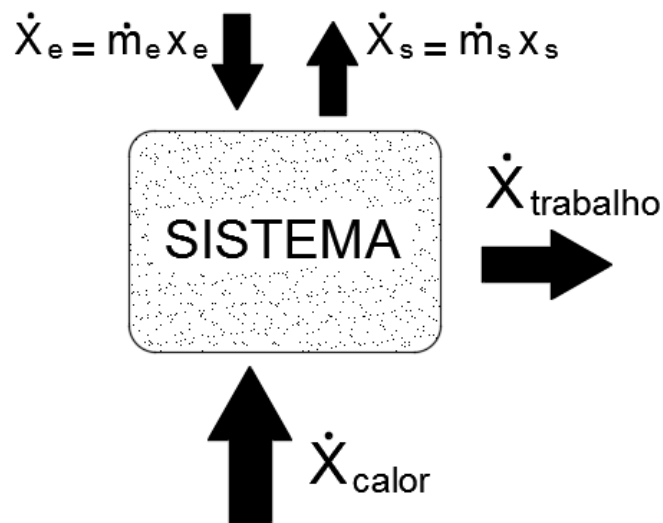


Figura 18 - Fluxos exergia em um volume de controle.

Onde:

- \dot{X}_e é a exergia de entrada no sistema, associada ao fluxo de massa (J/s);
- \dot{m}_e é o fluxo de massa na entrada do sistema (kg/s);
- x_e é o conteúdo exergético da massa de entrada (J/kg);
- \dot{X}_s é a exergia de saída no sistema, associada ao fluxo de massa (J/s);
- \dot{m}_s é o conteúdo exergético da massa de saída (J/kg);
- x_e é o conteúdo exergético da massa de entrada (J/kg);
- x_s é o conteúdo exergético da massa de saída (J/kg);
- $\dot{X}_{\text{trabalho}}$ é a exergia de saída no sistema, na forma de trabalho (J/s);
- \dot{X}_{calor} é a exergia de saída no sistema, na forma de calor (J/s).

No sistema de bioenergia deste estudo, e dentro desta abordagem, quando for contabilizada a entrada “sol”, a mesma pode ser considerada como uma entrada de fluxo de calor. Da mesma forma, a exergia de saída eletricidade, é considerada como um fluxo de trabalho.

Ao ser feito o balanço das exergias para este volume de controle, a termodinâmica nos traz a Equação (12), na sua forma generalizada.

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{vc}}{dt}\right) + \sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s - \dot{X}_{dest} = \frac{dX_{vc}}{dt} \quad (12)$$

Sendo as parcelas:

$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k$, a parcela de fluxo de calor (J/s);

$\left(\dot{W} - P_0 \frac{dV_{vc}}{dt}\right)$, a parcela de fluxo de trabalho (J/s);

$\sum \dot{m}_e x_e$ e $\sum \dot{m}_s x_s$, as parcelas de entrada e saída do fluxo de massa (J/s);

\dot{X}_{dest} , a parcela da exergia destruída por irreversibilidades (J/s);

$\frac{dX_{vc}}{dt}$, a taxa de variação da exergia do volume de controle, igual a zero para regime permanente (J/s).

Considerando o regime como permanente, a Equação (12) pode ser simplificada, gerando a Equação (13), como segue:

$$\sum \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) \dot{Q}_k - \dot{W} + \sum \dot{m}_e x_e - \sum \dot{m}_s x_s - \dot{X}_{dest} = 0 \quad (13)$$

Que, nominando as parcelas de exergia, pode ser representado pela Equação (14):

$$\dot{X}_{calor} - \dot{X}_{trabalho} + \dot{X}_{massa\ entrando} - \dot{X}_{massa\ saindo} - \dot{X}_{destruída} = 0 \quad (14)$$

Ao considerar a exergia do calor que entra e o trabalho que sai como positivas, ao contabilizar as mesmas como as exergias dos fluxos de massa, estes nos trazem como resultado o equacionamento simplificado denominado inventário das exergias, conforme a Equação (15). Assim, ao atravessar as fronteiras do sistema, calor, trabalho, assim como massa serão

contabilizados indistintamente, ou seja, apenas como exergias.

$$\Sigma \dot{X}_{destruída} = \Sigma \dot{X}_{entrando} - \Sigma \dot{X}_{saindo} \quad (15)$$

Em sistemas bioenergéticos, apesar deste cálculo ser aparentemente simples, muitas vezes se torna dificultoso se contabilizar todos os fluxos com suas devidas conversões e eficiências. Isto ocorre devido das inter-relações entre os vários fluxos nos sistemas dificultar estimar com exatidão esta contabilização.

Outra questão é a de que, no embasamento teórico, a perda total de exergia em um processo é composta, na verdade, por duas parcelas, uma denominada *exergia perdida* e uma outra de *exergia destruída*, sendo importante entender as suas distinções.

A irreversibilidade de um processo é a responsável pela quantidade de *exergia destruída* em um sistema fechado, em outras palavras, algum potencial de trabalho é desperdiçado, já os fluxos de exergia que deixam o sistema, sendo descartados ao ambiente sem nenhum aproveitamento, são identificados como *exergia perdida*. A perda total de exergia, conforme apresentado na Equação (16), é a soma da exergia perdida e da destruída.

$$X_{perda\ total} = X_{perdida} + X_{destruída} \quad (16)$$

Onde:

$X_{perda\ total}$ é a perda total de exergia em um processo (J);

$X_{perdida}$ é a exergia perdida/lançada no meio sem ser utilizada (J);

$X_{destruída}$ é a exergia destruída por irreversibilidades do processo (J).

Durante os cálculos, tanto da eficiência exergética, quanto da perda total de exergia de um processo, não se faz a distinção entre exergia perdida e exergia destruída, por se tratar da perda total de exergia do processo em questão. A perda total foi abordada simplesmente como perda de exergia, conforme a Equação (17). A referida equação foi multiplicada por (-1) para oferecer as irreversibilidades na forma usual, visto que já são mencionadas como perdas do sistema.

$$X_{perda} = (X_{saindo} - X_{entrando}) \quad (17)$$

Já a eficiência exergética Ψ , é definida como, a relação entre a exergia que sai, e a exergia que entra, representado pela Equação (18).

$$\Psi = \frac{X_{saídas}}{X_{entradas}} \quad (18)$$

A mesma coisa, pode ser expressa de outra maneira, conforme a Equação (19).

$$\Psi = \frac{\Sigma(\text{exergia dos produtos})}{\Sigma(\text{exergia das entradas})} \quad (19)$$

Referenciados também pelo estudo de Macedo *et al.* (2004), as exergias estão sendo agrupadas em cada item conforme o cálculo do consumo de exergia acumulada (CExC) proposta por Szargut *et al.* (1988), e de forma equivalente ao já apresentado agrupamento das emissões, constantes dos níveis 1, 2 e 3 inseridos nos grupos 1, 2 e 3 já mencionados.

Estas exergias estão elencadas de forma semelhantes às emissões de GEE, agora na Figura 19, onde são representados tanto os insumos quanto os produtos para o setor da sucroenergia em questão, em que os seus valores são proporcionais aos tamanhos das setas (área), exceto para a exergia do sol, cujo valor é bem maior. Constam para este cálculo, tanto para os fluxos de alta exergia, que é o caso dos combustíveis e também o sol em alguns casos, e como principais saídas o etanol e a eletricidade exportada para a rede. Esta produzida a partir do bagaço (e palha) excedentes, mas constam também alguns fluxos “não energéticos”, onde alguns insumos e produtos que possuam algum conteúdo de exergia são também contabilizados.

Como no cálculo foi considerado o consumo acumulado de exergia, tendo-se como exemplo a exergia dos fertilizantes, fez-se o somatório do consumo energético para produzi-lo ao da exergia química do próprio fertilizante, sendo este último, de baixa exergia, chamado de fluxo não energético.

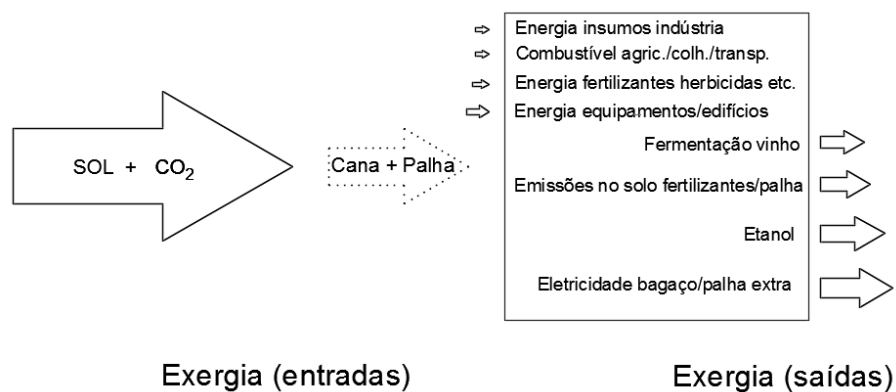


Figura 19 – Fluxos de exergia no setor da sucroenergia.

Conforme foi mencionado, de maneira análoga à análise das emissões de GEE dentro de uma ACV. No Quadro 3 são detalhados os principais fluxos de entrada e de saída de exergia característicos de sistemas sucroenergéticos contemplando ambos os setores, que são o agrícola e o industrial.

Os agentes inventariados na exergia são praticamente os mesmos que estão associados às emissões, bem como seu agrupamento, excetuando o principal insumo de exergia, que é o sol, que foi contabilizado em algumas análises.

No caso da radiação solar, existe uma maneira de incluir sua exergia solar indiretamente, através da exergia da biomassa fornecida pelo ecossistema ao processo industrial, e uma segunda, ao contabilizar a exergia proveniente do sol (MAES e PASSEL, 2014). Em três contabilizações deste estudo, a exergia da irradiação solar por unidade de área plantada foi incluída em duas, durante o cálculo total das perdas de exergia e também da eficiência exergética do sistema na forma CEENE (*Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment*), já no método de eficiência exergética *Breeding*, a exergia do sol não foi contabilizada. A contabilização por estes métodos está melhor detalhada no estudo de caso.

A tradicional saída de exergia do seguimento de biocombustíveis é o próprio etanol, que foi oriundo do caldo, mas há também uma grande saída proveniente do bagaço e da palha ao produzir eletricidade a ser exportada para a rede elétrica. Já a parcela de uso interno é usada para a geração de vapor nas caldeiras, seja para acionar as moendas, seja como vapor de processo ou mesmo para gerar a eletricidade consumida na indústria. No volume de controle considerado, a parcela de biomassa consumida pelo próprio processo entra como exergia consumida.

Observação válida para as cinzas e a vinhaça, como são reciclados na agroindústria, não se encontram na listagem, assim como a torta de filtro, transformada em biocarvão. Também não foi incluído o ciclo-hexano, de uso exclusivo na produção do etanol anidro.

Quadro 3 - Detalhamento insumos e produtos associados à exergia.

Grupo	Setor	Nível / outros	Insumo/produto exergia
(NA)	Agrícola	Nível 1 - energia	Radiação solar
1	Agrícola	Nível 1 - Captura fotossíntese (cana/palha)	CO ₂ biótico
1	Industrial	Nível 1 - energia	Energia elétrica-térmica (autossuficiente)
1	Industrial	Saída energia/emissões	Etanol
1	Industrial	Saída energia/emissões	Queima bagaço e palha, uso interno e produção eletricidade
1	Industrial	Saída energia	Energia elétrica
1	Industrial	Emissões	CO ₂ biótico fermentação
2	Agrícola	Nível 1 - energia/emissões	Operações agrícolas, colheita e transporte
2	Agrícola	Nível 2 - energia/emissões	Fertilizantes e calcário
2	Agrícola	Nível 2 - energia/emissões	Herbicidas, inseticidas e mudas
2	Industrial	Nível 2 - energia/emissões	Ácido sulfúrico, soda, lubrificantes, cal
2	Agrícola	Nível 3 - energia/emissões	Fabricação/manutenção equipamentos
2	Industrial	Nível 3 - energia/emissões	Fabricação/manutenção edifícios, equipamentos pesados e leves
3	Agrícola	Emissões no solo	N ₂ O solo da adubação
3	Agrícola	Emissões no solo	Oxidação resíduo palha

NA – Não Aplicável

3.3 BIOCÁRVÃO

O biocárvão ora aplicado é obtido a partir do resíduo torta de filtro, que no processamento da cana é um resíduo da filtragem/clarificação do caldo. Esta torta, após secagem é submetida ao processo de pirólise, e, aí então se produz o biocárvão, que é inserido no solo, conforme indicado o cenário 2, diferentemente do cenário 1 (de referência) em que a torta de filtro é aplicada no solo agrícola sem nenhum tratamento. Adicionalmente, a depender de disponibilidade e de demanda, é acrescentado biocárvão pirolizado diretamente da palhada ou mesmo do bagaço da cana-de-açúcar (Figura 20).

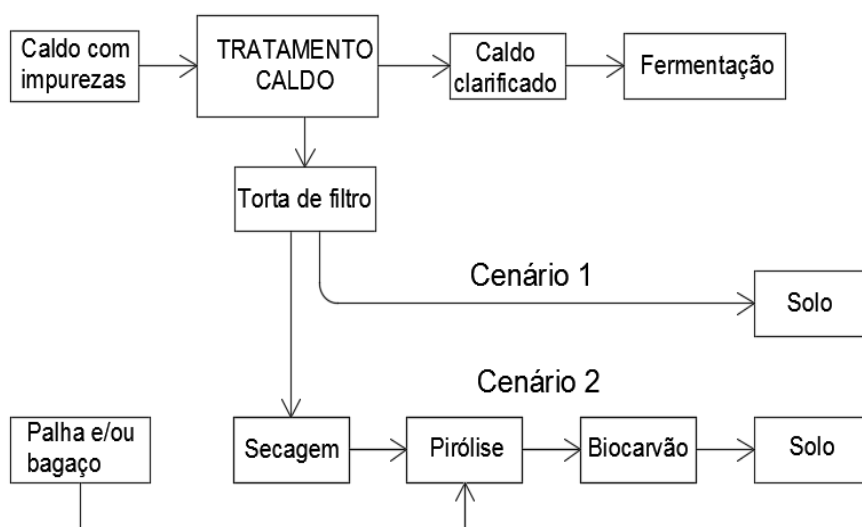


Figura 20 - Obtenção/destinação biocárvão em ambos os cenários.

3.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Posteriormente à análise anterior, foi realizada uma análise da sensibilidade dos parâmetros do sistema tendo como base uma análise gráfica. Abordado por Saltelli *et al.* (2008) e Hamby (1994), como análise global de sensibilidade, onde, a partir das variações percentuais nos valores de parâmetros das variáveis de entrada, são construídos gráficos com medidas em uma escala em comum, expressando o impacto sobre o resultado final, a partir das variações deste parâmetros. O intervalo de interesse aqui adotado é de 50% a 150% do valor base, onde 100% é o próprio valor base. Por comodidade e para se ter um tratamento universal, o eixo x , que representa a variação do valor base, pode se utilizar também o intervalo $+1 > x > -1$, onde:

$x = -1$, representa 0% do valor base de referência;

$x = 0$, representa o 100% do valor base de referência;

$x = +1$, representa 200% do valor base de referência.

No eixo y, β (*beta*) representa o valor resultante a partir das variáveis de entrada, que inseridas de maneira desacoplada uma a uma, que são manipuladas pelas equações, ao se alterar seus valores de entrada no entorno de seu valor base. A Figura 21 representa esta abordagem para duas variáveis de entrada, podendo-se observar que a variável x_3 é mais sensível que a x_4 , por possuir uma maior inclinação.

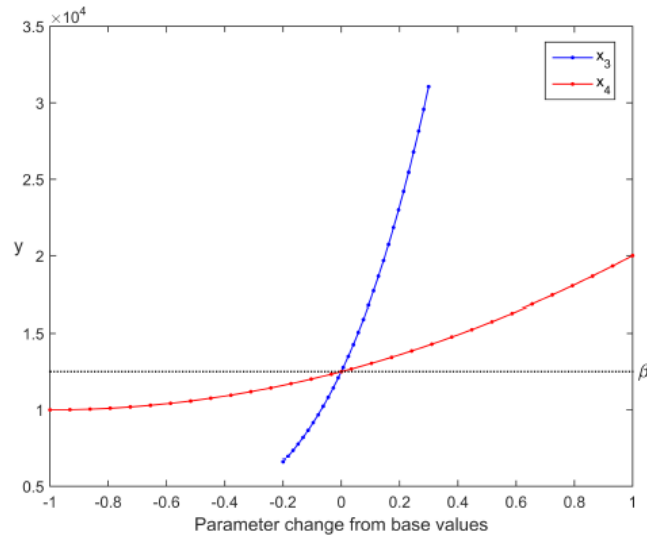


Figura 21 – Exemplo de gráfico resultante para dois valores base alterados (Fonte: Gomes *et al*, 2017).

Estes autores trabalharam para se comparar o comportamento da variável dependente de saída, alterando-se o valor da variável de entrada entre 0 e 200%. O comportamento entre a variação na entrada e da saída é que torna possível se quantificar a sensibilidade desta variável tanto em relação à outras variáveis quanto a outros pontos da varredura.

Na sensibilidade, quando existe uma relação algébrica explícita descrevendo a relação entre uma variável independente X_i (domínio) e uma variável dependente Y , que é a imagem de X_i . Esta análise é fácil de ser realizada, e neste caso o coeficiente de sensibilidade ϕ_i para uma variável independente em estudo pode ser calculado em função de uma variável X_i conforme a Equação (20).

$$\phi_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \left(\frac{X_i}{Y} \right) \quad (20)$$

Onde,

Φ_i : é o coeficiente de sensibilidade em i ; $\frac{\partial Y}{\partial X_i}$: é a derivada parcial em i ; $\left(\frac{X_i}{Y}\right)$: é o quociente que normaliza a sensibilidade dos efeitos das unidades utilizadas.

Para pequenas alterações dos parâmetros de entrada, a derivada parcial pode ser aproximada como uma diferença finita, onde as não linearidades são negligenciadas, e a derivada parcial pode ser aproximada na forma numérica conforme a Equação (21).

$$\Phi_i = \frac{\% \Delta Y}{\% \Delta X_i} \quad (21)$$

Onde,

Φ_i : é a sensibilidade em X_i ; $\% \Delta Y$: é a variação percentual da grandeza Y ; $\% \Delta X_i$: é a variação percentual da grandeza X_i .

ESTUDO DE CASO

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA TECNOLÓGICO AGROINDUSTRIAL

Os setores de todo o processo produtivo contemplando desde agricultura até a indústria estão representados na Figura 22. Dentro deste sistema foram abordados e quantificados tanto o uso de recursos através da exergia, quanto as emissões de gases de efeito estufa, modelados dentro de uma ACV.

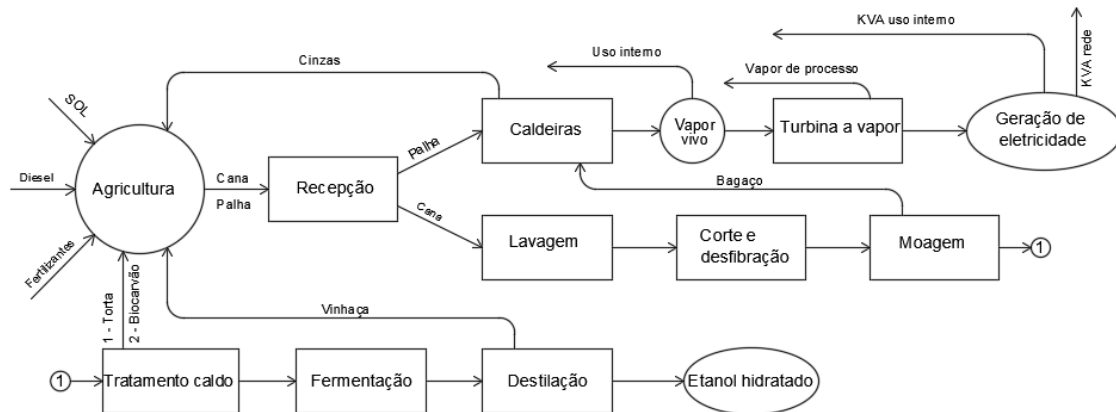


Figura 22 – Fluxograma do sistema produtivo.

A área agrícola é onde se produz o principal insumo do processo de produção de etanol que é a cana-de-açúcar, fracionada em caldo e bagaço. Possui insumos e produtos que serão melhor detalhados posteriormente, no entanto, de forma sintética o principal insumo de exergia é o sol, que é contabilizado em algumas metodologias. Além deste, outras entradas como o diesel e os fertilizantes são também importantes. Na saída (produtos) do setor agrícola tem-se basicamente a cana-de-açúcar juntamente com a palhada.

Após a colheita da cana, esta entra na indústria para ser processada, com as etapas que seguem:

- Recepção - depois de colhida e cortada, a cana-de-açúcar é transportada para a indústria em caminhões e tratores, cuja descarga é feita pelo tombador. Parcela de palhada já segue para as caldeiras;
- Lavagem - após a colocação da matéria-prima na mesa alimentadora, esta é devidamente lavada com água corrente para a remoção das impurezas;
- Corte e desfibrção - uma vez limpa, a matéria-prima é cortada e desfibrada, através de cortadeiras ou desfibradores;
- Moagem: ocorre a extração do caldo com o uso das moendas ou ternos;

- e) O bagaço, que é um dos resíduos da extração do caldo, segue para as caldeiras onde é queimado para a geração de vapor para a própria usina e o excedente gera energia elétrica, em que, parcela é utilizada internamente, e, o excedente exportado/comercializado, então, boa parte da energia consumida pela indústria, é gerada de forma local, reduzindo custos.
- f) Tratamento do caldo - o caldo extraído para a produção de etanol, é aplicada uma temperatura de até 100 °C durante 1 min, seguido do resfriamento até 35 °C, que elimina microorganismos indesejáveis para a posterior fermentação;
- i. Aquecimento - realizado pelos aquecedores ou trocadores de calor, com temperaturas de até 105 °C, onde o vapor saturado é aplicado na parte externa dos tubos onde há a circulação do caldo;
 - ii. Decantação e Filtragem – a decantação consiste na sedimentação das partículas através dos decantadores, assim, obtém-se o caldo clarificado que seguirá para o processo de concentração (evaporação), cujo produto (lodo) passará pela filtragem, onde a parte líquida retornará ao processo e a parte sólida (torta de filtro) poderá retornar para o campo. Neste estudo este “resíduo” retorna ao campo na forma de biocarvão, após esta torta ser secada e pirolisada;
 - iii. Evaporação e concentração - consiste na remoção da água através da evaporação do caldo, elevando a sua concentração de sólidos dissolvidos para a obtenção do maior teor alcoólico possível, além da obtenção do xarope, que serão fermentados.
- g) Fermentação - consiste na transformação do caldo clarificado em vinho, através de biofermentação, realizada nas dornas;
- h) Destilação - o vinho com teor alcoólico entre 8 e 9 °GL e isento de leveduras segue para a destilação, através das colunas de destilação ou similares, onde ocorre a concentração inicial de 50 °GL na primeira coluna, 96 °GL na segunda coluna que já é o etanol hidratado.

4.2 DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO / SISTEMA DE REFERÊNCIA

Neste estudo de caso foram utilizados dois métodos de análise para o setor da bioenergia, sendo o primeiro relacionado à ACV ao contabilizar o balanço de emissões de GEE, que descreve o desempenho ambiental do processo, e um segundo, a exergia, que descreve o desempenho entrópico deste mesmo processo. Ocorreu a esperada correlação entre os resultados destas duas análises, tornando passível se inferir que os fluxos de exergia possam ser utilizados também para descrever o desempenho ambiental. Ao final foi realizada uma análise de sensibilidade dos

principais insumos e produtos do processo para se estabelecer o grau de dependência desta relação.

Os limites do sistema em estudo são os próprios limites da agroindústria, isto é, contemplam a produção da biomassa na agricultura e o seu processamento na indústria.

Ao comparar o comportamento exergia e a sua dependência com o desempenho ambiental através das emissões de GEE, obteve-se quatro resultados principais, visto que as quantificações foram calculadas com dois indicadores (exergia e emissões) e em duas situações distintas, uma primeira que é o sistema de referência (SR) que é o Cenário 1, sem o uso do biocarvão e uma segunda situação, modificada, inserindo ao solo agrícola o biocarvão oriundo da torta de filtro do setor industrial, já devidamente pirolisado após sua secagem, que é o Cenário 2. Os quatro resultados que foram analisados, discutidos e comparados foram:

- a) Desempenho exergético atual (sistema de referência – Cenário 1);
- b) Desempenho exergético modificado (com biocarvão – Cenário 2);
- c) Desempenho ambiental atual em GEE (sistema de referência – Cenário 1);
- d) Desempenho ambiental modificado em GEE (com biocarvão – Cenário 2).

Como a exergia foi abordada em três formas semelhantes, mas distintas, a rigor foram oito resultados analisados, para ambos os cenários, seis exergias e duas emissões.

A partir dos fluxos de emissões mostrados na Figura 17, na página 57 e de exergias na Figura 19 na página 66, os dados inventariados desta pesquisa foram estruturados de maneira semelhante ao projeto de pesquisa no setor de sucroenergia para o estado de São Paulo, *Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil* (MACEDO *et al.*, 2004) e também em artigo “*Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020*” (MACEDO *et al.*, 2008). Os valores de referência, dependendo do caso, ratificados ou mesmo modificados para valores mais recentes.

Para ambos os cenários, os cálculos apresentados no decorrer deste trabalho foram tratados na forma vetorial no software numérico Scilab, versão 6.0.1, a partir dos valores do sistema de referência (SR) listados na Tabela 7. Os valores das energias consumidas e emissões associadas foram quantificados integralmente, onde os valores do consumo de energia, na forma de PCI (Poder Calorífico Inferior), foram aproximados como consumo de exergia, visto que seus insumos energéticos (combustíveis), possuem valores bastante próximos aos da exergia.

Tabela 7 – Valores de referência utilizados no cálculo do inventário.

Variável	Valor	Unidade	Descrição
<i>bagaco_tc</i>	270,0	kg/TC	Massa de bagaço umidade 50% (Macedo <i>et al</i> , 2008)
<i>carb_etanol</i>	0,4957	adimensional	Carbono no etanol hidratado (calculado)
<i>dens_diesel</i>	0,85	kg/L	Densidade diesel (ANP, 2015)
<i>dens_etanol</i>	0,79	kg/L	Densidade etanol hidratado (ANP)
<i>diesel_oac</i>	0,76	kg/TC	Diesel cons. nas operaç. agrícolas e colheita (NOVACANA)
<i>diesel_tr</i>	0,85	kg/TC	Diesel consumido no transporte da cana (NOVACANA)
<i>efic_kva</i>	0,28	adimensional	Eficiência térmica geração eletricidade (NOVACANA)
<i>emis_diesel_kg</i>	3,7	kgCO ₂ /kgDiesel	Fator de emissão do diesel (ANP, 2015)
<i>emis_oleo_mj</i>	0,07735	kgCO ₂ /MJ	Fator de emissão de óleo combustível (ANP)
<i>en_calc</i>	7,13	MJ/TC	Energia para aplicação do calcário (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>en_h2so4</i>	3,093	MJ/TC	Energia para fabricação H ₂ SO ₄ (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>en_herb</i>	11,24	MJ/TC	Energia para a aplicação de herbicidas (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>en_k</i>	6,69	MJ/kg	Energia para a prod. do fertilizante K ₂ O (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>en_mud</i>	5,88	MJ/TC	Energia para aplicação das mudas (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>en_n</i>	61,45	MJ/kg	Energia em MJ/kg prod. do fertiliz. N (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>en_p</i>	9,61	MJ/kg	Energia para a prod. do fertilizante P ₂ O ₅ (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>ex_bagaco_seco</i>	18,90	MJ/kg	Exergia do bagaço seco (Dirbeba <i>et al</i> .)
<i>ex_bagaco_umid</i>	9,89	MJ/kg	Exergia do bagaço 50% umid (Kamate, 2009)
<i>ex_biocarvao</i>	16,00	MJ/kg	Exergia do biocarvão de bagaço (Santos <i>et al.</i> , 2017)
<i>ex_cal</i>	0,72	MJ/kg	Exergia da cal (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_calcario</i>	0,08	MJ/kg	Exergia do calcário (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_cana</i>	5,76	MJ/kg	Exergia da cana-de-açúcar (Palacios-Bereche,2013)
<i>ex_co2</i>	0,45	MJ/kg	Exergia do CO ₂ (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_diesel</i>	42,70	MJ/kg	Exergia do diesel (ANP, 2015)
<i>ex_etanol</i>	27,64	MJ/kg	Exergia etanol hidratado (Palacios-Bereche,2013)
<i>ex_h2so4</i>	1,11	MJ/kg	Exergia do ácido sulfúrico (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_k2o5</i>	4,40	MJ/kg	Exergia fertilizante K ₂ O (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_nh3</i>	19,9	MJ/kg	Exergia fertilizante amônia (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_p2o5</i>	2,91	MJ/kg	Exergia fertilizante P ₂ O ₅ (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>ex_palha</i>	12,97	MJ/kg	Exergia da palha 15% umidade (Zhang, 2013)
<i>ex_soda</i>	0,18	MJ/kg	Exergia NaOH (Szargut <i>et al.</i> , 1988)
<i>palha_tc</i>	165	kg/TC	Massa de palha com umidade 15%
<i>parc_palha</i>	0,5	adimensional	Parcela da palha retirada do campo para indústria (arbitrado)
<i>pot_n2o</i>	296	adimensional	Potencial de efeito estufa do óxido nitroso (IPCC, 2014)
<i>prod_cana</i>	70,0	TC/ha	Produtividade da cana (Macedo <i>et al</i> , 2008)
<i>prod_etanol</i>	88,0	L/TC	Produtividade etanol hidratado (Macedo <i>et al</i> , 2008)
<i>rad_sol</i>	16,0	MJ/m ² dia	Radiação solar SP (Atlas Brasileiro Energia Solar, 2006)
<i>raz_co2carb</i>	3,666	adimensional	Razão massa CO ₂ massa carbono (calculado)
<i>rz_n_n</i>	0,01	adimensional	Razão N dissipado N utilizado na adub. (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>tx_cal</i>	0,65	kg/TC	Taxa anual de aplicação de cal (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>tx_k_ha</i>	100	kg/ha	Taxa de aplicação média anual do K ₂ O (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>tx_n_ha</i>	58,3	kg/ha	Taxa de aplicação média anual fert. N (Macedo <i>et al</i> , 2004)
<i>tx_p_ha</i>	36,7	kg/ha	Taxa de aplicação média anual do P ₂ O ₅ (Macedo <i>et al</i> , 2004)

Onde,

TC: tonelada de cana.

As alterações impostas ao Cenário 2, com a utilização do biocarvão, foram alteradas duas variáveis, a *prod_cana* (Produtividade da cana) e *rz_n_n* (Razão N dissipado N utilizado na adubação) dentro do algoritmo Scilab, aqui detalhadas:

- Variável *prod_cana*: Segundo Jeffery *et al.* (2011), relatando um aumento no rendimento de culturas, e através de uma meta-análise estatística compilando os resultados de vários estudos, foi possível avaliar a relação entre o biochar e a produtividade. Os resultados mostraram um benefício importante, com um aumento médio de 10%, aqui considerado;

- Variável *rz_n_n*: Cayuela *et al.* (2014), também utilizando metodologia de meta-análise, obtiveram um valor médio na redução de emissões de óxido nitroso de 27%, para baixas concentrações de biocarvão no solo.

Então, de forma resumida o cálculo das emissões e das exergias para o Cenário 2, presentes em todos os processos do sistema agroindustrial em estudo, foram considerados um aumento na produtividade em 10% e uma diminuição das emissões de óxido nitroso em 27%.

4.3 CONTABILIZANDO EMISSÕES E EXERGIA

Inicialmente exibe-se no Quadro 4 todas as parcelas inventariadas no sistema agroindustrial em estudo, contemplando tanto as exergias quanto as emissões. Para a contabilização final das exergias e emissões modelados dentro de uma ACV, não necessariamente todos os itens são contemplados.

Quadro 4 - Parcelas inventariadas, exergia e emissões.

Nº	Exergias	Emissões GEE	DESCRIÇÃO
1	Ex_1	ε_1	Sol
2	Ex_2	ε_2	Captura CO ₂ cana
3	Ex_3	ε_3	Captura CO ₂ palha
4	Ex_4	ε_4	Consumo interno Energia
5	Ex_5	ε_5	Etanol
6	Ex_6	ε_6	Bagaço caldeira uso interno
7	Ex_7	ε_7	Bagaço excedente caldeira
8	Ex_8	ε_8	Palha para caldeira
9	Ex_9	ε_9	Palha solo
10	Ex_{10}	ε_{10}	CO ₂ bagaço-palha caldeira
11	Ex_{11}	ε_{11}	Energia elétrica p/ rede
12	Ex_{12}	ε_{12}	CO ₂ fermentação
13	Ex_{13}	ε_{13}	Operações agrícolas e colheita
14	Ex_{14}	ε_{14}	Transporte
15	Ex_{15}	ε_{15}	Fertilizante N
16	Ex_{16}	ε_{16}	Fertilizante P ₂ O ₅
17	Ex_{17}	ε_{17}	Fertilizante K ₂ O
18	Ex_{18}	ε_{18}	Calcário
19	Ex_{19}	ε_{19}	Herbicidas
20	Ex_{20}	ε_{20}	Inseticidas
21	Ex_{21}	ε_{21}	Mudas
22	Ex_{22}	ε_{22}	Ácido sulfúrico
23	Ex_{23}	ε_{23}	Soda
24	Ex_{24}	ε_{24}	Lubrificantes
25	Ex_{25}	ε_{25}	Cal
26	Ex_{26}	ε_{26}	Fabricação/manutenção equipamentos agrícolas
27	Ex_{27}	ε_{27}	Fabricação/manutenção edifícios
28	Ex_{28}	ε_{28}	Equipamentos pesados indústria
29	Ex_{29}	ε_{29}	Equipamentos leves indústria
30	Ex_{30}	ε_{30}	Emissões - N ₂ O solo

4.3.1 Emissões de GEE

Modelado dentro do inventário de uma ACV, a contabilização das emissões, teve inicialmente os valores de CO₂ equivalente relacionados com cada tonelada de cana produzida, para posteriormente, considerando a produtividade da cana, serem adequados para cada hectare plantado e finalmente, ao considerar a produção e a exergia do etanol, resultar as emissões para a unidade funcional megajoules de etanol produzido (g CO₂-equivalente /MJ etanol), conforme Equação (22), cujas parcelas inventariadas estão indicadas no Quadro 4.

$$\varepsilon_{GEE} = \frac{g \text{ CO}_{2\text{-equivalente}}}{MJ \text{ etanol}} = \frac{1000 \left(\frac{kg \text{ CO}_2}{TC} \right) (prod_cana)}{(prod_etanol)(Ex_{etanol})} \quad (22)$$

ε_{GEE} : emissões de GEE em gramas de CO₂ equivalente por megajoule de etanol produzido; *prod_cana*: produtividade da cana por hectare (Mg/ha); *prod_etanol*: produtividade etanol por hectare (kg/ha); *Ex_{etanol}*: exergia do etanol hidratado (MJ/kg).

Como exemplo estará sendo detalhado como foi obtida a parcela emitida em CO₂-equivalente por tonelada de cana (Equação (23)), durante a utilização da adubação nitrogenada. Este resultado é inserido na Equação (22) que trará como resultado o item ε_{15} do Quadro 4.

$$\frac{\varepsilon_{GEE}}{TC} (15) = \frac{kg \text{ CO}_{2\text{-equivalente}}}{TC} (15) = m_{N/TC} R_{Z_{N/N}} CO_{2\text{-equivalente } N_2O} \quad (23)$$

m_{N-TC} : massa de Nitrogênio no adubo por tonelada de cana (kg/TC); $R_{Z_{N/N}}$: razão entre a massa de Nitrogênio transformada em N₂O e o da composição química do adubo (kg/kg); CO₂-equivalente do N₂O (IPCC, 2014).

A totalização das emissões por megajoule de etanol, ocorreu de duas maneiras:

- Cenário 1, sem o uso do biocarvão, conforme a Equação (24);
- Cenário 2, com o uso do biocarvão, conforme a Equação (25).

$$\sum \varepsilon_{(1)} = (\varepsilon_{13(1)} + \varepsilon_{14(1)} + \varepsilon_{15(1)} + \varepsilon_{16(1)} + \dots + \varepsilon_{27(1)} + \varepsilon_{28(1)} + \varepsilon_{29(1)} + \varepsilon_{30(1)}) \quad (24)$$

$$\sum \varepsilon_{(2)} = (\varepsilon_{13(2)} + \varepsilon_{14(2)} + \varepsilon_{15(2)} + \varepsilon_{16(2)} + \dots + \varepsilon_{27(2)} + \varepsilon_{28(2)} + \varepsilon_{29(2)} + \varepsilon_{30(2)}) \quad (25)$$

4.3.2 Exergias

Também modelado dentro do inventário de uma ACV, a contabilização das exergias teve inicialmente os valores de entrada ou de saída em megajoules (MJ) associados com cada tonelada de cana produzida, para posteriormente, considerando a produtividade da cana, serem adequados para cada hectare plantado e finalmente, ao considerar a produção e a exergia do

etanol, resultar as exergias para a unidade funcional megajoules de etanol produzido (MJ /MJ etanol), conforme Equação (27), cujas parcelas inventariadas estão também indicadas no Quadro 4.

Exemplificando a exergia consumida Ex_{15} durante a utilização da adubação nitrogenada, inicialmente por tonelada de cana, de acordo com a Equação (26), e em seguida transportando este valor para a Equação (27). Este item, assim como vários outros, possui a característica da necessidade de se somar a energia consumida na produção do adubo com a exergia química do próprio adubo, pois estes dois recursos estão sendo degradados.

$$\frac{\text{Exergia Consumida}_{(15)}}{TC} = m_{N/TC}E_N + m_{N/TC}X_N \quad \left(\text{em } \frac{MJ}{TC}\right) \quad (26)$$

Onde,

$m_{N/TC}$: massa de fertilizante nitrogenado por tonelada de cana (kg/TC); E_N : Energia (exergia) consumida na produção do fertilizante nitrogenado (MJ/kg); X_N : exergia química do fertilizante nitrogenado (MJ/kg).

$$Ex(15) = \frac{\left(\frac{\text{Exergia Consumida}}{TC}\right)}{(prod_etanol)(ex_etanol)} \quad \left(\text{em } \frac{MJ}{MJ \text{ etanol}}\right) \quad (27)$$

Onde,

$Ex(15)$: exergia consumida uso fertilizante nitrogenado por megajoule de etanol produzido (MJ/MJ); $prod_cana$: produtividade da cana em toneladas de cana por hectare (Mg/ha); $prod_etanol$: produtividade do etanol por hectare (kg/ha); Ex_{etanol} : exergia do etanol hidratado (MJ/kg).

Exemplificando como é contabilizada uma outra exergia, que é a exergia do sol (Ex_1), esta teve seu valor calculado a partir da Equação (28) para posterior inclusão deste resultado na Equação (29) conforme mostrado na sequência, tendo também o resultado final na unidade megajoules por megajoule de etanol (MJ /MJ etanol).

$$X_{sol} = (10.000)(365)(0,9) (RMA) \quad (28)$$

Onde,

X_{sol} : exergia solar absorvida por hectare no ciclo de um ano (MJ/ha); 10.000 m²= 1 ha; 365 dias no ano; RMA: radiação média anual para um dia do ano na região sudeste do Brasil (16 MJ/m².dia); “0,9”: fator de qualidade da luz solar.

$$Ex(1) = \frac{X_{sol}}{(prod_cana)(prod_etanol)(dens_etanol)(ex_etanol)} \quad (29)$$

$Ex(1)$: entrada exergia do sol por megajoule de etanol produzido (MJ/MJ); $prod_cana$: produtividade da cana em toneladas de cana por hectare (Mg/ha); $prod_etanol$: produtividade

do etanol por hectare (kg/ha); $dens_etanol$: densidade do etanol (kg/l); Ex_{etanol} : exergia do etanol hidratado (MJ/kg).

Na forma genérica, as exergias foram contabilizadas ao final, em megajoules por megajoule de etanol produzido (MJ/MJ etanol), conforme a Equação (30), a partir da contabilização de itens pertinentes do inventário.

$$CExC_i = Ex_i = \frac{MJ}{MJ\ etanol} = \frac{\left(\frac{MJ}{TC}\right)(prod_cana)}{(prod_etanol)(Ex_{etanol})} \quad (30)$$

Onde,

$CExC(i)$ ou Ex_i : exergia do item “i” do inventário por megajoule de etanol produzido (MJ/MJ); $prod_cana$: produtividade da cana em toneladas de cana por hectare (Mg/ha); $prod_etanol$: produtividade do etanol por hectare (kg/ha); Ex_{etanol} : exergia do etanol hidratado (MJ/kg).

As exergias foram contabilizadas com três métodos, conforme descritos na sequência.

4.3.2.1 CEENE (Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment)

Ao considerar as entradas e as saídas das exergias inventariadas do Quadro 4, são calculadas a extração total de exergia do sistema, para os dois cenários, conforme Equação (31). Para o Cenário 1, que é o sistema de referência conforme a Equação (32) e para o Cenário 2 conforme a Equação (33).

$$CEENE = CExC_{(entradas)} - CExC_{(saídas)} \quad (31)$$

Onde:

$CExC_{(entradas)}$ é o conteúdo acumulado de exergia dos insumos (MJ/MJ etanol);

$CExC_{(saídas)}$ é o conteúdo acumulado de exergia dos produtos (MJ/MJ etanol);

$CEENE$ é a extração acumulada de exergia do meio ambiente em todo o processo (MJ/MJ etanol).

$$CEENE_1 = [(Ex_5 + Ex_{10} + Ex_{11} + Ex_{12}) - (Ex_1 + Ex_2 + Ex_3 + Ex_{13} + \dots + Ex_{30})]_1 \quad (32)$$

$$CEENE_2 = [(Ex_5 + Ex_{10} + Ex_{11} + Ex_{12}) - (Ex_1 + Ex_2 + Ex_3 + Ex_{13} + \dots + Ex_{30})]_2 \quad (33)$$

4.3.2.2 $\psi(CEENE)$ - Eficiência Exergética

Ao considerar as entradas e as saídas das exergias inventariadas do Quadro 4, foram calculadas a a eficiência exergética total do sistema, para os dois cenários, conforme Equação (34). Para o Cenário 1, que é o sistema de referência conforme a Equação (35) e para o Cenário 2 conforme a Equação (36).

$$\Psi(CEENE) = \frac{CExC_{(saídas)}}{CExC_{(entradas)}} \quad (34)$$

Onde:

$CExC_{(entradas)}$ é o conteúdo acumulado de exergia dos insumos (MJ/MJ etanol);

$CExC_{(saídas)}$ é o conteúdo acumulado de exergia dos produtos (MJ/MJ etanol);

$\Psi(CEENE)$ é a eficiência exergetica em todo o processo (adimensional).

$$\Psi(CEENE)_1 = \frac{[(Ex_5 + Ex_{10} + Ex_{11} + Ex_{12})]_1}{[(Ex_1 + Ex_2 + Ex_3 + Ex_{13} + \dots + Ex_{30})]_1} \quad (35)$$

$$\Psi(CEENE)_2 = \frac{[(Ex_5 + Ex_{10} + Ex_{11} + Ex_{12})]_1}{[(Ex_1 + Ex_2 + Ex_3 + Ex_{13} + \dots + Ex_{30})]_2} \quad (36)$$

4.3.2.3 Eficiência Exergetica Breeding (ExB)

Adicionalmente foi utilizada, por ser um indicador simples e bastante empregado na produção de biocombustíveis, que é o método *Exergy Breeding (ExB)*, ou “criação” de exergia, já definido na Equação (5) da página 33, aqui exibido de forma mais particularizada, na Equação (37).

$$ExB = \Psi(Breeding) = \frac{E_P}{(CExC)_{NR}} \quad (37)$$

Onde:

E_P é a exergia produzida na forma de biocombustível etanol (MJ);

$(CExC)_{NR}$ é a exergia consumida pelos insumos não renováveis em todo o processo (MJ);

$ExB = \Psi(breeding)$ é a eficiência exergetica pelo método Breeding (adimensional).

Ao considerar as entradas e as saídas das exergias inventariadas do Quadro 4, foram calculadas a eficiência exergetica *Breeding (ExB)* para os dois cenários, conforme Equação (37). Para o Cenário 1, que é o sistema de referência, conforme a Equação (38) e para o Cenário 2 conforme a Equação (39). Observa-se a inclusão de Ex_7 em ambas as contabilizações, devido este valor ser uma exergia adicional ao sistema, na forma de bagaço excedente, que atravessa as fronteiras do sistema da mesma forma que Ex_5 , que é a exergia do próprio etanol.

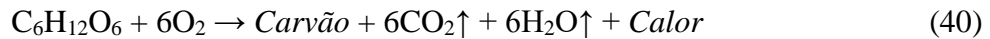
$$(ExB)_1 = \frac{[Ex_5 + Ex_7]_1}{[Ex_{13} + Ex_{14} + Ex_{15} \dots Ex_{23} + Ex_{24} + Ex_{25}]_1} \quad (38)$$

$$(ExB)_2 = \frac{[Ex_5 + Ex_7]_2}{[Ex_{13} + Ex_{14} + Ex_{15} \dots Ex_{23} + Ex_{24} + Ex_{25}]_2} \quad (39)$$

Então, a correlação emissões-exergia, dentro dos dois cenários, foi abordada e comparada de três maneiras distintas, isto é: emissões *versus* consumo de exergia (*CEENE*); emissões *versus* eficiência exérgica Ψ (*CEENE*) e emissões *versus* ExB (eficiência *Breeding* ou Ψ (*ExB*)).

4.3.2.4 Exergia do biocarvão

O biocarvão é obtido durante o processo de pirólise da biomassa torta de filtro após sua secagem, onde na referida pirólise, a fonte de calor da reação é o próprio carbono contido na biomassa, que ao reagir com O_2 é transformada em CO_2 e H_2O , ocasiona uma perda de massa durante esta reação, que pode atingir 50%. A representação desta perda, na forma de CO_2 , pode ser observada na Equação (40), de equilíbrio químico, durante a ‘queima’ de um carboidrato genérico.



No processo de secagem da torta de filtro é considerado um consumo energético nulo, por ser viável o aproveitamento de “resíduos” de calor da própria indústria, quando a umidade inicial de 75% é desumificada para 10%, quando então esta biomassa vai para pirólise. O poder calorífico inferior referenciado para este biocarvão final é 16 MJ/kg, e o rendimento mássico da pirólise em 50% da torta (KIMURA, 2009; SANTOS *et al.*, 2017). Com estas informações é inicialmente calculado pela Equação (41), a quantidade da massa de torta de filtro que é efetivamente transformada em biocarvão, e posteriormente, na Equação (42), a exergia do biocarvão, em função de cada quilograma massa de torta de filtro. O valor a ser considerado da exergia do biocarvão é o próprio valor do seu PCI, 16 MJ/kg, então:

$$m_{biocarvão} = (0,5)(0,275)m_{torta}$$

$$m_{biocarvão} = 0,1375 m_{torta} \quad kg \quad (41)$$

$$X_{biocarvão} = (0,1375)(16)m_{torta}$$

$$X_{biocarvão} = 2,2 m_{torta} \quad MJ \quad (42)$$

No entanto, durante o cálculo do balanço de exergia do sistema agroindustrial, como se trata do reuso do resíduo torta de filtro a ser transformado em biocarvão, dentro do volume de controle do sistema, mesmo que havendo a possibilidade de se adicionar biocarvão da palhada ou mesmo do bagaço com o objetivo de se alcançar uma taxa de aplicação da ordem de 10 Mgha^{-1} durante o ciclo da cana, seus valores de exergia não foram contabilizados por serem um “resíduos” de uso interno passíveis de serem aproveitados.

4.3.3 Base de Dados inventariadas

Na modelagem dentro de uma ACV deste sistema em estudo, com as emissões em gramas de $\text{CO}_2\text{-equivalente}$ por megajoule de etanol produzido e da mesma forma, agora as entradas e saídas de exergia em megajoules por megajoule de etanol produzido, estão disponíveis na Tabela 8 para ambos os cenários. As energias consumidas, foram em grande parte as responsáveis por estas emissões (vide maior detalhamento sobre os valores nos apêndices deste trabalho, nos sub-ítemos 6.1; 6.2; 6.3; 6.4 e 6.5; páginas 127 a 160. Estes valores, ajustados do estudo original de Macedo *et. al.* (2004), estão disponibilizados em unidade funcional diferente do transcrito para o texto, bem como algumas diferenças de valores de referência, como a produtividade da cana, de 70 Mgh^{-1} .

Tabela 8 – Contabilização exergia e emissões de CO₂-equivalente, cenários 1 e 2.

N°	Descrição/unidade	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 1	Cenário 2
		ε_{GEE} (g CO ₂ /MJ etanol)	ε_{GEE} (g CO ₂ /MJ etanol)	Ex _i (MJ/MJ etanol)	Ex _i (MJ/MJ etanol)
1	Sol	NA	NA	390,7595	355,2359
2	Captura CO ₂ pela cana	NA	NA	0,1095	0,1095
3	Captura CO ₂ pela palha	NA	NA	0,0365	0,0365
4	Consumo energia elétrica-térmica	NA	NA	0,0000	0,0000
5	Etanol	65,7466	NA	1,0000	1,0000
6	Bagaço para caldeira uso interno	21,9155	NA	1,2095	1,2095
7	Bagaço excedente para caldeira	NA	NA	0,1801	0,1801
8	Palha para caldeira	NA	NA	0,5569	0,5569
9	Palha solo	NA	NA	0,0000	0,0000
10	CO ₂ bagaço-palha caldeira	NA	NA	0,0997	0,0997
11	Energia elétrica p/ rede (bagaço excedente + palha)	NA	NA	0,1559	0,1559
12	CO ₂ fermentação	NA	NA	0,0156	0,0156
13	Operação agrícola e colheita	1,4571	1,4571	0,0143	0,0143
14	Transporte	1,6431	1,6431	0,0161	0,0161
15	Fertilizante N	2,1203	1,9275	0,0321	0,0292
16	Fertilizante P2O5	0,2028	0,1844	0,0034	0,0031
17	Fertilizante K2O	0,3847	0,3497	0,0082	0,0075
18	Calcário	0,2870	0,2870	0,0040	0,0040
19	Herbicidas	0,4525	0,4525	0,0058	0,0058
20	Inseticidas	0,0320	0,0320	0,0000	0,0004
21	Mudas	0,2367	0,2367	0,0031	0,0031
22	Ácido sulfúrico	0,1245	0,1245	0,0016	0,0016
23	Soda	0,0303	0,0303	0,0004	0,0004
24	Lubrificantes	0,0286	0,0286	0,0007	0,0007
25	Cal	0,0505	0,0505	0,0009	0,0009
26	Fab./man.equipamentos agrícolas	1,1778	1,1778	0,0152	0,0152
27	Fabricação/manutenção edifícios	0,4871	0,4871	0,0063	0,0063
28	Equipamentos pesados indústria	0,5877	0,5877	0,0076	0,0076
29	Equipamentos leves indústria	0,6722	0,6722	0,0087	0,0087
30	Emissões N ₂ O solo adubação	1,8576	1,3003	0,0000	0,0000
SOMA		11,8324	11,0289	NA	NA

4.3.4 Razão exergia-emissões

Para relacionar a grandeza exergia com as emissões neste estudo de caso, a razão entre as mesmas possui um denominador comum, que são as emissões, porém a exergia foi tratada em três formas distintas, as já mencionadas exergia CEENE; eficiência exérgica CEENE e a eficiência Breeding (ExB) na forma que segue:

- Primeiramente com a exergia CEENE, que entre os cenários foi feita conforme as Equações (43) e (44).

$$\kappa_i = \frac{CEENE_{(i)}}{\varepsilon_{GEE(i)}} \quad (43)$$

Onde,

κ_i : razão entre o consumo de exergia e as emissões no cenário i (em MJ/g CO₂-equivalente); $CEENE_i$: extração de exergia no cenário i (MJ/MJ etanol); ε_i : emissões de GEE, no cenário i (g CO₂-equivalente/ MJ etanol).

O uso desta mesma razão, de forma generalizada, ao se alterar n possíveis variáveis de entrada, pode ser apresentado como uma função dependente Y_k , conforme exibido na Equação (44).

$$Y_k(X_1, X_2 \dots X_n) = \frac{CEENE(X_1, X_2 \dots X_n)}{\varepsilon_{GEE}(X_1, X_2 \dots X_n)} \quad (44)$$

Onde,

Y_k : variável que representa a razão irreversibilidades-emissões GEE (MJ/gCO₂-equivalente); $X_1, X_2 \dots X_n$: são as variáveis de entrada; CEENE: extração de exergia do processo (MJ/MJ etanol); ε : emissões de GEE (g CO₂-equivalente/MJ etanol).

- Em seguida pela eficiência exérgica ψ (CEENE), ou eficiência CEENE, que entre os cenários foi feita conforme as Equações (45) e (46).

$$l_i = \frac{\psi CEENE_{(i)}}{\varepsilon_{GEE(i)}} \quad (45)$$

Onde,

l_i : razão entre a eficiência exérgica e as emissões no cenário i (g CO₂-equivalente/ MJ); $\psi CEENE_i$: eficiência exérgica CEENE no cenário i (adimensional); ε_i : emissões de GEE, no cenário i (g CO₂-equivalente/MJ etanol).

O uso desta mesma razão, de forma generalizada, ao se alterar n possíveis variáveis de entrada, pode ser apresentado como uma função dependente Y_l , conforme exibido na Equação (46).

$$Y_l(X_1, X_2 \dots X_n) = \frac{\Psi CEENE(X_1, X_2 \dots X_n)}{\varepsilon_{GEE}(X_1, X_2 \dots X_n)} \quad (46)$$

Onde,

Y_l : variável que representa a razão eficiência exergética CEENE com as emissões de GEE (g CO₂-equivalente/ MJ); $X_1, X_2 \dots X_n$: são as variáveis de entrada; CEENE: extração de exergia do processo (MJ/MJ etanol); ε : emissões de GEE (g CO₂-equivalente/MJ etanol).

- E por último a eficiência exergética *Breeding* (ExB), que entre os cenários foi feita conforme as Equações (47) e (48).

$$m_i = \frac{ExB_{(i)}}{\varepsilon_{GEE(i)}} \quad (47)$$

Onde,

m_i : razão entre a eficiência exergética *Breeding* e as emissões no cenário i (g CO₂-equivalente/ MJ); $ExB_{(i)}$: eficiência exergética *Breeding* no cenário i (adimensional); ε_i : emissões de GEE, no cenário i (g CO₂-equivalente/MJ etanol).

O uso desta mesma razão, de forma generalizada, ao se alterar n possíveis variáveis de entrada, pode ser apresentado como uma função dependente Y_l , conforme exibido na Equação (48).

$$Y_m(X_1, X_2 \dots X_n) = \frac{ExB(X_1, X_2 \dots X_n)}{\varepsilon_{GEE}(X_1, X_2 \dots X_n)} \quad (48)$$

Onde,

Y_m : variável que representa a razão eficiência exergética *Breeding* com as emissões de GEE (g CO₂-equivalente/ MJ); $X_1, X_2 \dots X_n$: são as variáveis de entrada; ExB: eficiência *Breeding* do processo (adimensional); ε : emissões de GEE (g CO₂-equivalente/MJ etanol).

Ao comparar os cenários 1 e 2, foi calculada também as variações das exergia relacionadas com as variações das respectivas emissões, descritos nas Equações (49), (50) e (51), onde valor numérico dessa variação está representado pela letra gama em maiúsculo (Γ).

$$\Gamma_1 = \frac{\Delta CEENE}{\Delta \varepsilon} \quad (49)$$

Onde:

$\Delta CEENE$ é a variação do consumo de exergia, entre os cenários 1 e 2 (em MJ/MJ etanol);

$\Delta \varepsilon$ é a variação das emissões, entre os cenários 1 e 2 (em g CO₂-equivalente/ MJ etanol);

Γ_1 é a razão desta variação (em MJ/g CO₂-equivalente)

$$\Gamma_2 = \frac{\Delta \Psi_{CEENE}}{\Delta \varepsilon} \quad (50)$$

Onde:

$\Delta \Psi_{CEENE}$ é a variação da eficiência exergética CEENE, entre os cenários 1 e 2 (adimensional);

$\Delta \varepsilon$ é a variação das emissões, entre os cenários 1 e 2 (em g CO₂-equivalente/ MJ etanol);

Γ_2 é a razão desta variação (em MJ etanol / g CO₂-equivalente).

$$\Gamma_3 = \frac{\Delta ExB}{\Delta \varepsilon} \quad (51)$$

Onde:

ΔExB é a variação da eficiência exergética *breeding*, entre os cenários 1 e 2 (adimensional);

$\Delta \varepsilon$ é a variação das emissões, entre os cenários 1 e 2 (em g CO₂-equivalente/ MJ etanol);

Γ_3 é a razão desta variação (em MJ etanol / g CO₂-equivalente).

De maneira semelhante foi realizada a correlação entre o aumento ou diminuição da grandeza exergia, conforme o tipo, aqui tratada em valores absolutos, com a diminuição das emissões de GEE, entre os cenários 1 e 2.

Em seguida, ao comparar os cenários 1 e 2, foram relacionadas também as variações percentuais das exergias com as variações percentuais das respectivas emissões, cujo intuito é verificar um maior ou menor alinhamento desta relação. Estas correlações estão apresentadas nas Equações (49), (50) e (51), onde o valor numérico dessa variação está representado pela letra gama em maiúsculo (Γ').

$$\Gamma'_1 = \frac{\Delta CEENE(\%)}{\Delta \varepsilon(\%)} \quad (52)$$

Onde:

$\Delta CEENE(\%)$ é a variação percentual do consumo de exergia, entre os cenários 1 e 2 (%);

$\Delta \varepsilon(\%)$ é a variação percentual das emissões, entre os cenários 1 e 2 (%);

Γ_1' é a razão desta variação (adimensional).

$$\Gamma_2' = \frac{\Delta \Psi_{CEENE}(\%)}{\Delta \varepsilon(\%)} \quad (53)$$

Onde:

$\Delta \Psi_{CEExC}(\%)$ é a variação percentual da eficiência exérgica, entre os cenários 1 e 2 (%);

$\Delta \varepsilon(\%)$ é a variação percentual das emissões, entre os cenários 1 e 2 (%);

Γ_2' é a razão desta variação (adimensional).

$$\Gamma_3' = \frac{\Delta ExB(\%)}{\Delta \varepsilon(\%)} \quad (54)$$

Onde:

$\Delta ExB(\%)$ é a variação percentual da eficiência exérgica *breeding*, entre os cenários 1 e 2 (%);

$\Delta \varepsilon(\%)$ é a variação percentual das emissões, entre os cenários 1 e 2 (%);

Γ_3' é a razão desta variação (adimensional).

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.4.1 Resultados preliminares

Os resultados preliminares são o comparativo dos resultantes entre o cenário 1, que é o sistema de referência (SR) e o cenário 2, com as alterações impostas ao sistema de referência com a utilização do biocarvão, que trouxeram simultaneamente um aumento de produtividade e uma diminuição de emissões óxido nítrico no solo.

Em um primeiro momento foram tratadas individualmente as alterações das emissões de GEE e de três tipos de exergia: CEENE, eficiência CEENE e eficiência *Breeding* (ExB) e em um segundo momento foram abordadas as alterações entre os dois cenários da razão exergia-emissões, tendo como numerador as três formas de exergia mencionadas, e como denominador as emissões de GEE.

4.4.1.1 Comparando a variação exergia e emissões entre cenários

As alterações impactadas pelo uso do biocarvão, entre os cenários, trouxeram alterações nos três tipos de exergia: a exergia CEENE, equações (32) e (33), apresentado na Figura 23; a eficiência exérgica CEENE, equações (35) e (36), exibido na Figura 24 e a eficiência *Breeding* (ExB), equações (38) e (39), apresentado na Figura 25, bem como nas emissões de GEE, equações (24) e (25), mostrado na Figura 26.

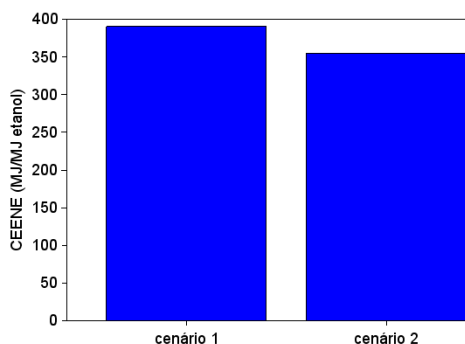


Figura 23 – Variação da exergia CEENE entre os cenários (1-sem biocarvão; 2-com biocarvão).

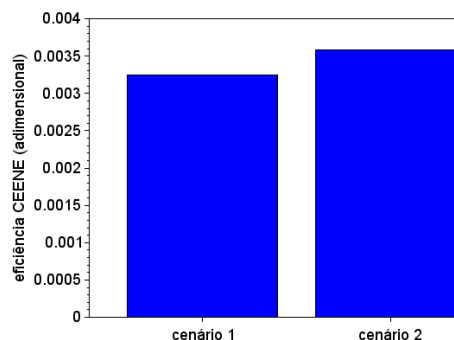


Figura 24 – Variação da eficiência CEENE entre os cenários (1-sem biocarvão; 2-com biocarvão).

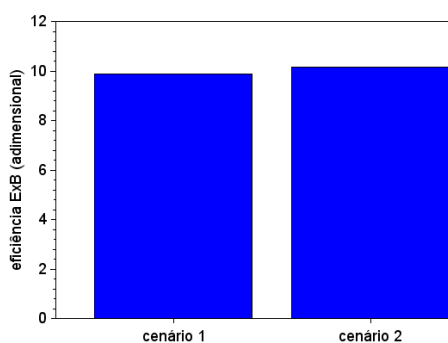


Figura 25 – Variação eficiência ExB entre cenários (1-sem biocarvão; 2-com biocarvão).

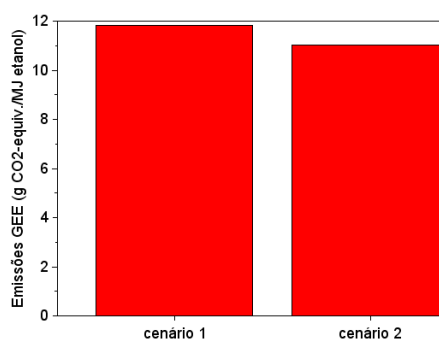


Figura 26 – Variação das emissões de GEE entre cenários (1-sem biocarvão; 2-com biocarvão).

A alteração destes resultados foram consequência da utilização do biocarvão, que trouxeram um aumento na produtividade da cana-de-açúcar, em 10%, e uma redução nas emissões de óxido

nitroso em 27%. Essas duas variáveis acarretaram simultaneamente do cenário 1 para o cenário e 2, uma redução da exergia destruída na forma CEENE, de 390,3 para 354,8 MJ/MJ de etanol (-9,1%, valor intermediário), Figura 23. Na eficiência CEENE (adimensional) de 0,00325 para 0,00358 (+10,15%, mais sensível), Figura 24. Na eficiência *Breeding* (adimensional), de 9,89 para 10,16 (+2,73%, menos sensível), Figura 25. Simultaneamente houve alteração nas emissões de GEE de 11,83 para 11,03 g de CO₂-equivalente / MJ etanol (-6,76%), Figura 26. Deve ser destacado que o alto consumo de energia dos insumos combustíveis tanto nas operações agrícolas e transporte quanto durante a produção de fertilizantes, foram responsáveis, em ambos cenários, por grande parcela destas emissões.

4.4.1.2 Comparando a variação da razão exergia-emissões entre os cenários

Por ordem, foram tratadas, conforme já mencionado, as alterações da razão exergia-emissões para as exergias: a) CEENE; b) eficiência CEENE e c) eficiência *Breeding* (ExB).

A razão entre a exergia CEENE e as emissões, mostrado na Figura 27, sofreu uma pequena alteração entre os cenários, do valor de 32,9 MJ/g CO₂-equivalente no cenário 1, para o valor de 32,2 MJ/g CO₂-equivalente no cenário 2. Esta pequena diminuição, de 2,5%, ocorreu pelo fato de que mesmo não sendo na mesma proporção, houve simultaneamente uma diminuição das irreversibilidades e das emissões, conforme apresentado na Figura 23 e na Figura 26.

A razão eficiência exérgica CEENE e as emissões, mostrado na Figura 28, em MJ etanol/g CO₂-equivalente, sofreu uma alteração entre os cenários, do valor de 0,00027 para 0,00032 na unidade referenciada, um aumento de 18,1%. Ao contrário da exergia CEENE, que diminuiu no cenário 2, a eficiência CEENE aumentou, Figura 24, que é o numerador da razão exergia-emissões e como ocorreu uma diminuição do denominador (emissões, Figura 26), como consequência esta razão sofreu uma maior alteração.

A razão eficiência *Breeding* as emissões, apresentado na Figura 29, em MJ etanol/g CO₂-equivalente, sofreu uma alteração entre os cenários, do valor de 0,84 para 0,92 na unidade referenciada, um aumento de 10,2%. Da mesma forma que a razão anterior, sofreu uma maior alteração que na exergia CEENE, por ter ocorrido simultaneamente um aumento no numerador e uma diminuição do denominador.

Como se trata de uma razão modelada a partir de três diferentes exergias, sendo contabilizadas somente a grandeza emissões no denominador, o que diferencia as alterações desta razão entre os cenários são as exergias. Estas alterações são exibidas na Figura 30, que por ordem crescente

em valores absolutos, são respectivamente: eficiência *Breeding*, exergia CEENE e a eficiência CEENE. Assim, esta última se apresentou como a mais sensível, no entanto, deve ser observado que a modificação destes resultados entre os cenários, foi calculada através da alteração simultânea de duas variáveis: da produtividade agrícola e das emissões de óxido nitroso no solo, ou seja, são resultados dentro deste contexto.

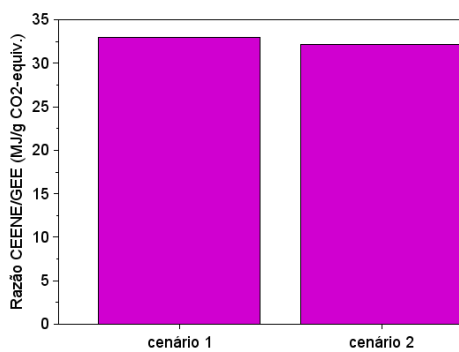


Figura 27 – Razão entre a exergia CEENE⁽¹⁾ e as emissões GEE⁽⁴⁾ entre cenários

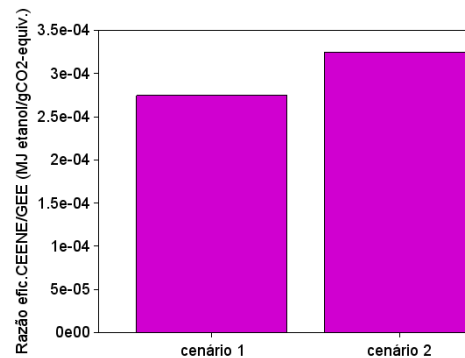


Figura 28– Razão entre a eficiência exergética CEENE⁽²⁾ e as emissões de GEE⁽⁴⁾ entre cenários

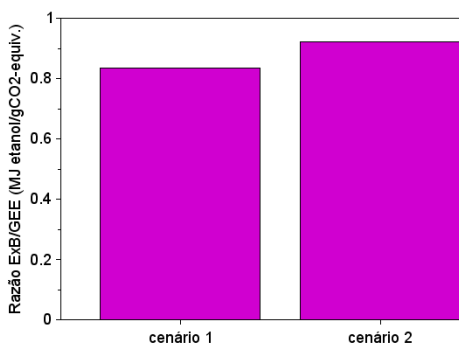


Figura 29 - Razão entre a ExB⁽³⁾ e as emissões GEE⁽⁴⁾ entre cenários.

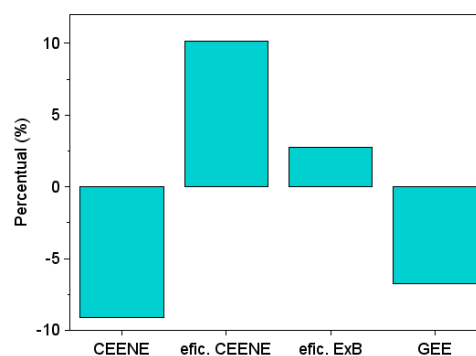


Figura 30 – Aumento ou diminuição grandezas entre cenários (%).

⁽¹⁾ CEENE: Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (MJ/MJ etanol)

⁽²⁾ Eficiência CEENE: Eficiência Cumulative Exergy Extraction from the Natural Environment (adimensional)

⁽³⁾ ExB: exergia *Breeding* ou eficiência *Breeding* (adimensional)

⁽⁴⁾ GEE: Gases de efeito estufa (g CO₂-equivalente/MJ etanol)

A partir das alterações da razão exergia-emissões apresentadas na Figura 27, Figura 28 e Figura 29, calculadas nas pelas equações (49), (50) e (51) foi possível de se abordar percentualmente estas alterações, com resultados oferecidos na Figura 31. A maior alteração ocorreu com a razão

entre a eficiência CEENE e as emissões e a menor com a exergia CEENE-emissões. Com a exergia CEENE houve uma alteração em -2,5% (menos sensível), para eficiência CEENE em 18,1% (mais sensível) e para exergia Breeding (ExB) em 10,18% (intermediário).

Em seguida, ao comparar os cenários 1 e 2, através das equações (52), (53) e (54) foram relacionadas também as variações percentuais das exergias com as variações percentuais das respectivas emissões, cujo intuito é verificar um maior ou menor alinhamento desta relação. Estas alterações estão exibidas na Figura 32 e a razão ExB-emissões é a que possui o menor valor, mas deve ser lembrado que a mesma foi calculada através da alteração simultânea de duas variáveis, e que estas alterações foram impactadas também pelas alterações do denominador emissões, entre os cenários 1 e 2. Este resultado, mesmo que de forma isolada, indica que na contabilização através da exergia *Breeding* (ExB), a razão exergia-emissões sofre menores alterações quando relacionada com as emissões do sistema em estudo.

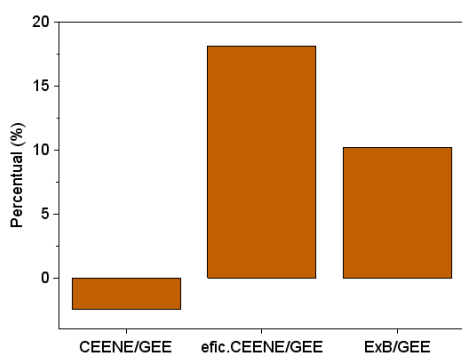


Figura 31 – Alteração percentual da razão exergia-emissões entre cenários.

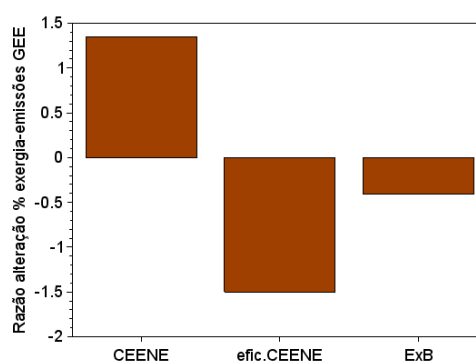


Figura 32 – Alteração da razão exergias-emissões em função da alteração GEE entre cenários.

Estes resultados preliminares já mostram o biocarvão como uma alternativa positiva de melhoria do sistema agroindustrial, ao aumentar a produtividade e diminuir a geração de GEE durante a produção de bioenergia.

4.4.2 Sensibilidade adimensional com 5 indicadores

Os resultados preliminares abordados anteriormente trouxeram valores importantes, mas os dois indicadores, produtividade cana e emissões N₂O foram inseridos simultaneamente no equacionamento, onde toda a contabilização ocorreu a partir de dois valores de referência para cenário 1, e dois valores alterados pelo biocarvão, para o cenário 2. Apesar de já indicarem os efeitos positivos da utilização do biocarvão, tratar duas variáveis simultaneamente somente em

duas condições (cenários) pontuais, não viabilizam o estudo do comportamento do sistema de forma mais abrangente.

A partir de então, o comportamento das emissões e das exergias que estão exibidas na Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36, Figura 37 e Figura 38, passaram a tratar do comportamento das exergias CEENE, eficiência CEENE e Breeding (ExB), bem como as emissões, ao se fazer uma varredura com 5 indicadores. Diferentemente dos resultados preliminares, em que o cálculo ocorreu com duas variáveis atuando de forma simultânea, o agora comportamento é abordado de forma individualizada com 5 indicadores, elencados a seguir.

- Produtividade da cana;
- Emissões no solo, na forma de óxido nitroso (N₂O);
- Emissões pelo uso da adubação nitrogenada;
- Consumo de diesel nas operações agrícolas e transporte (da cana);
- Produção final de etanol.

Os valores plotados são propositadamente adimensionais, onde o valor unitário em ambos os eixos representa 100% da grandeza em questão, que tornou possível trabalhar diferentes grandezas em um mesmo gráfico, dividindo-se o valor resultante calculado pelo valor de referência, tanto para o eixo X , quanto eixo Y (valor de β), aqui denominados de X' e Y' .

O cálculo do valor das grandezas foi realizado dentro do Scilab, através das Equações (22), (31), (34) e (37), com espectro entre 50 e 150%.

O comportamento da função resultante Y notadamente em torno do valor base ($X=1$ ou 100%) é o que representa a maior ou menor sensibilidade de cada indicador.

Ao relacionar exergia com a produtividade da cana, na Figura 33, mostra uma sensibilidade de -0,49 para CEENE, +0,39 para eficiência CEENE e de 0,34 para ExB. A declividade simétrica da CEENE em relação às demais é natural, aumento de irreversibilidades são sinônimos de diminuição de eficiências. Este resultado apresentou a exergia CEENE como a mais sensível.

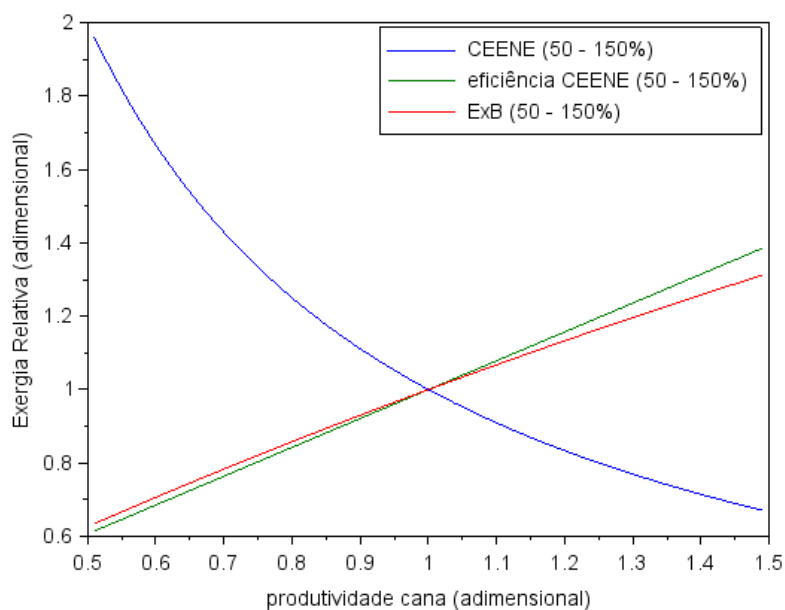


Figura 33—Indicadores de exergia para a produtividade da cana, X_1' (50 a 150%).

Ao relacionar exergia com as emissões de óxido nitroso no solo, Figura 34, estes indicadores possuem sensibilidade iguais a zero. O baixo conteúdo exergético deste gás trouxe pouco ou mesmo nenhuma alteração na contabilização da exergia.

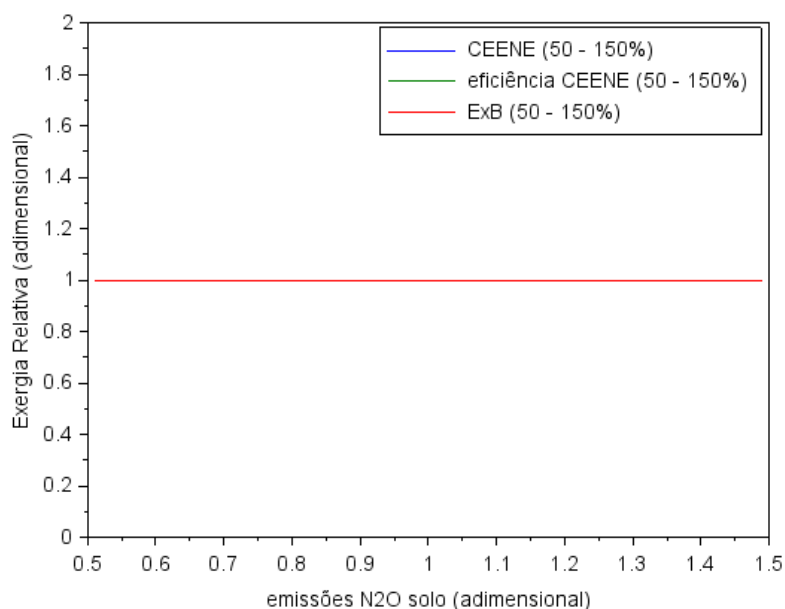


Figura 34 - Indicadores de exergia para as emissões de N_2O no solo, X_2' (50 a 150%).

Ao relacionar exergia com o consumo de adubo nitrogenado, Figura 35, a maior sensibilidade ocorreu com a exergia Breeding (-0,11) e os demais valores são próximos de zero.

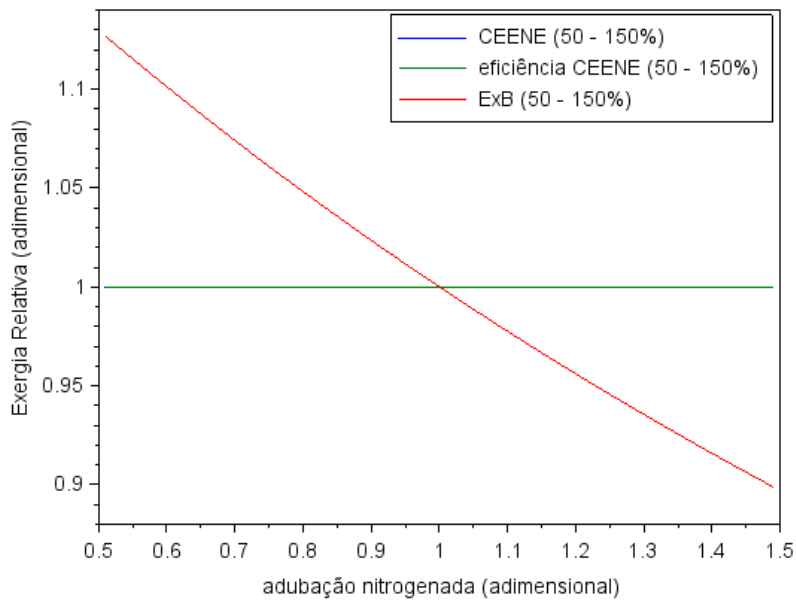


Figura 35 - Indicadores de exergia para a adubação nitrogenada, X_3' (50 a 150%).

Ao relacionar exergia com o uso do diesel nas operações agrícolas e colheita, Figura 36, em ordem decrescente de sensibilidade, CEENE (-0,49), ExB (-0,125) e eficiência CEENE próxima de zero, isto é, a exergia CEENE foi a mais sensível.

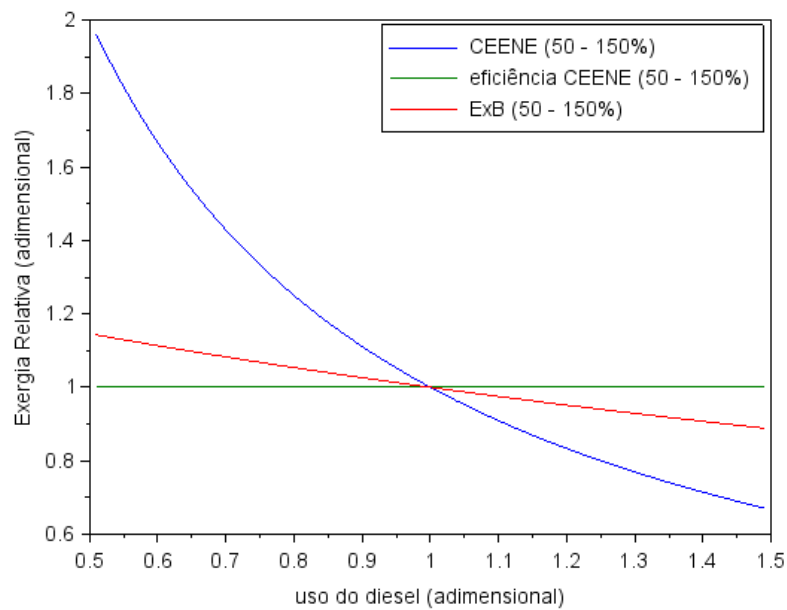


Figura 36 - Indicadores de exergia para o uso do diesel, X_4' (50 a 150%).

Ao relacionar exergia com a produção de etanol, Figura 37, as sensibilidades em ordem decrescente são: CEENE (-0,49), ExB (0,42) e eficiência CEENE (0,39), ou seja, a exergia CEENE foi a mais sensível.

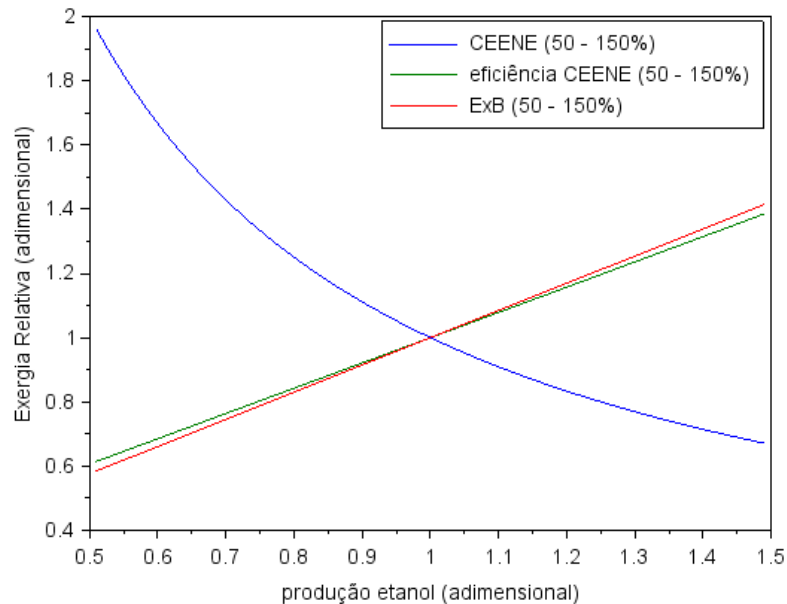


Figura 37 - Indicadores de exergia para a produção de etanol, X_5' (50 a 150%).

Diferentemente da abordagem anterior, é possível se relacionar as emissões com os todos oscinco indicadores anteriores, conforme mostrado na Figura 38, que em ordem decrescente de sensibilidade temos: produtividade da cana (-0,41), consumo diesel (0,129), adubação nitrogenada (0,088), óxido nitroso (0,077), e produção de etanol (zero).

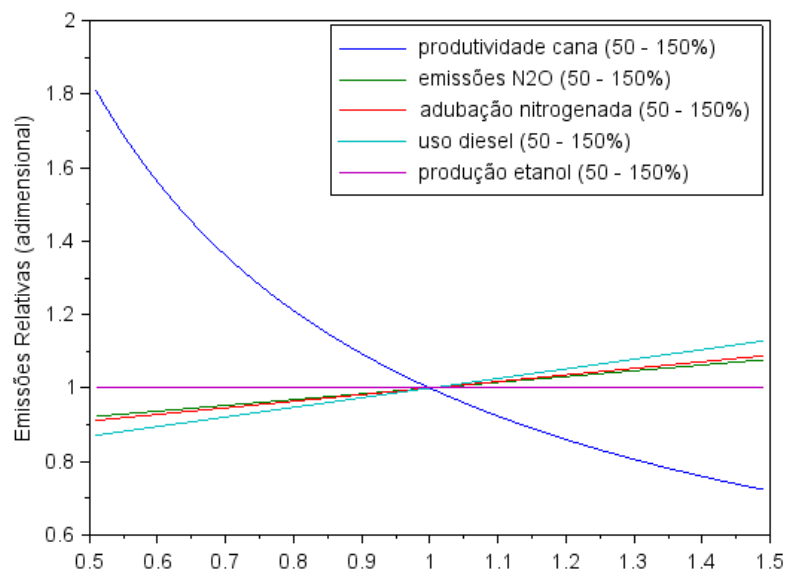


Figura 38 - Emissões relativas para os indicadores, X_1' , X_2' , X_3' , X_4' e X_5' (50 a 150%).

De forma resumida, o maior impacto nas emissões decorreu da produtividade da cana, e no que diz respeito à sensibilidade das exergias em relação aos vários indicadores, temos para cada indicador, descritos os de maior influência:

- Para a produtividade da cana, a exergia CEENE;
- Para as emissões de óxido nitroso, nenhuma das exergias são sensíveis;
- Para a adubação nitrogenada, a exergia *Breeding*;
- Para o uso de diesel, a exergia CEENE;
- Para a produção de etanol, a exergia CEENE.

4.4.3 Resultados exergia *versus* emissões com 5 indicadores

Também com o uso do software numérico Scilab e no entorno dos valores do sistema de referência (SR), com varredura entre 50 e 150%, agora com as unidades funcionais próprias, isto é, não relativizadas, foram modelados o comportamento das grandezas que relacionam exergias *versus* emissões em um mesmo gráfico, através das equações (22), (44), (46) e (48), que representam respectivamente as emissões totais e as exergias: CEENE, a eficiência exérgica CEENE e a eficiência *Breeding*. Os indicadores são os mesmos da análise adimensional anterior: a produtividade da cana; as emissões no solo, na forma de óxido nitroso (N₂O); as emissões pelo uso da adubação nitrogenada; o consumo de diesel nas operações agrícolas e transporte (da cana) e a produção final de etanol.

4.4.3.1 Abordagem CEENE para 5 indicadores

Apresentado na Figura 39, para exergia CEENE, uso do diesel e produtividade da cana são sensíveis, sendo o uso do diesel mais sensível. As emissões de N₂O no solo e da adubação nitrogenada são insensíveis, já a produção de etanol, por ser exergia pura do sistema, possui sensibilidade altíssima, aqui tratado matematicamente, entre 0 e 150%, mas este possui grande limitação no seu *range*.

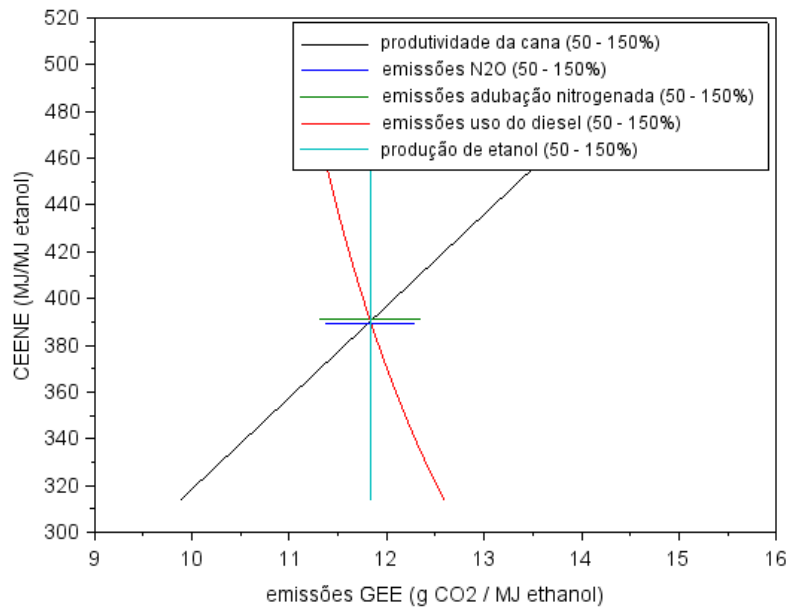


Figura 39 – Comportamento CEENE-GEE com 5 indicadores.

4.4.3.2 Abordagem eficiência CEENE para 5 indicadores

Mostrado na Figura 40, para a eficiência exergética CEENE, a produtividade da cana é sensível. Os demais indicadores são insensíveis, exceto o a produção de etanol, por ser exergia pura do sistema, este possui sensibilidade altíssima, aqui tratado matematicamente, entre 0 e 150%, mas possui grande limitação no seu *range*.

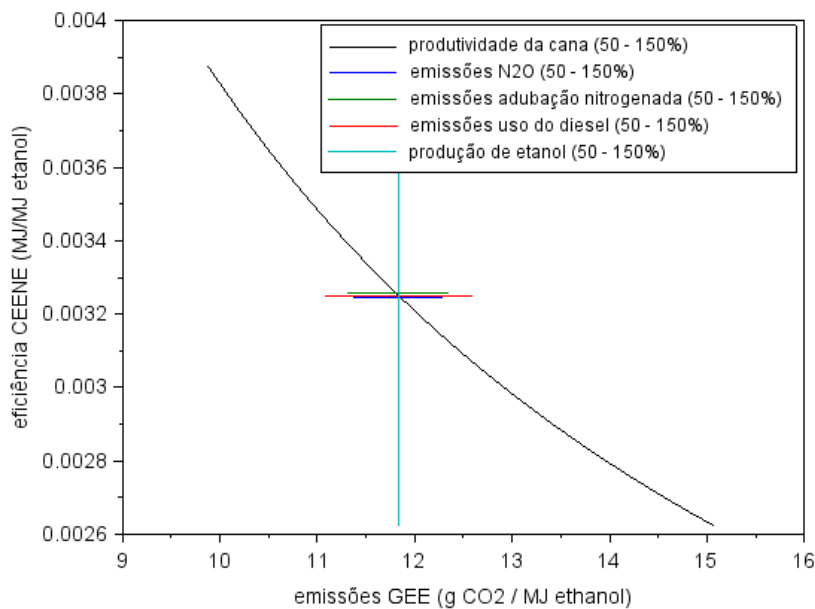


Figura 40 - Comportamento eficiência CEENE-GEE com 5 indicadores.

4.4.3.3 Abordagem ExB versus GEE para 5 indicadores

Exibido na Figura 41, para a eficiência *Breeding* (ExB), quase todos os indicadores foram sensíveis, exceto para as emissões no solo pelo N₂O., sendo a adubação nitrogenada um pouco maior que as demais. A produção de etanol, da mesma forma que nas abordagens anteriores, abordado matematicamente, foi bastante sensível, mas possui grandes limitações no seu *range*.

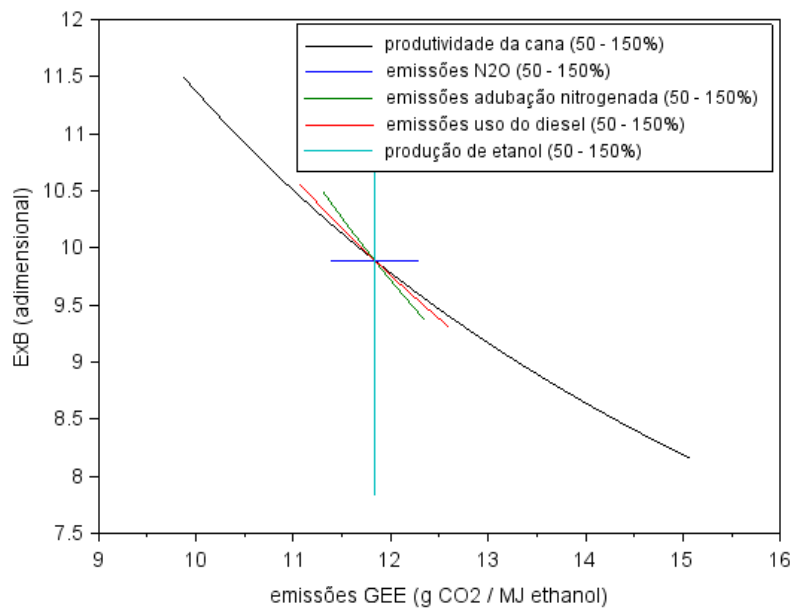


Figura 41 - Comportamento ExB-GEE com 5 indicadores.

De todas as exergias, a que se apresentou sensível a um maior número de indicadores, foi a exergia *Breeding* apresentada na Figura 41, sendo insensível apenas às emissões de óxido nítrico pelo solo.

A partir deste ponto, as análises foram realizadas com valores próprios das suas unidades funcionais, e somente com as variáveis impactantes com o uso do biocarvão, que são a produtividades da cana e as emissões de N₂O no solo.

4.4.3.4 CEENE versus GEE

Mostrado na Figura 42 – Relação entre CEENE e emissões GEE com: a) a variação da produtividade da cana; b) variações de N₂O emitido pelo solo. Onde a produtividade é sensível e as emissões de óxido nitroso no solo não.

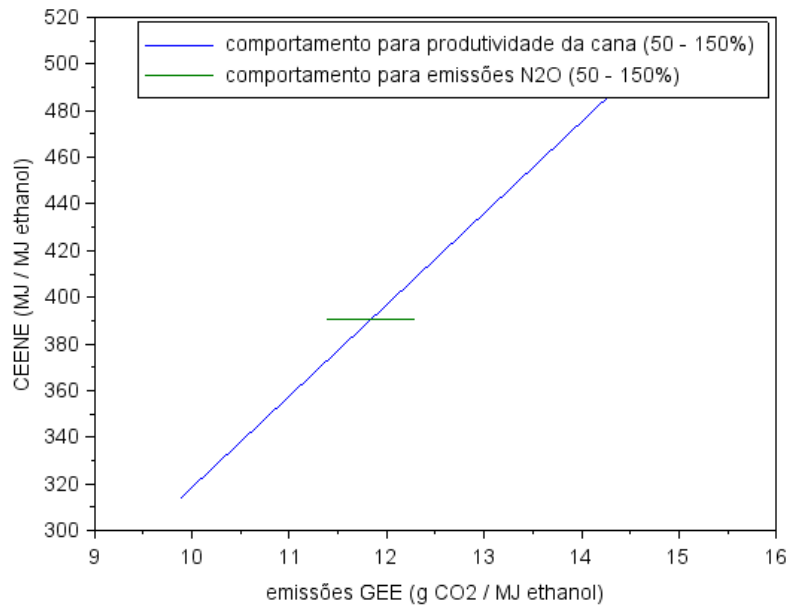


Figura 42 – Relação entre CEENE e emissões GEE com: a) a variação da produtividade da cana; b) variações de N₂O emitido pelo solo.

4.4.3.5 Eficiência CEENE versus GEE

Apresentado na Figura 43 Figura 42 – Relação entre CEENE e emissões GEE com: a) a variação da produtividade da cana; b) variações de N₂O emitido pelo solo. Onde a produtividade é sensível e as emissões de óxido nitroso no solo não.

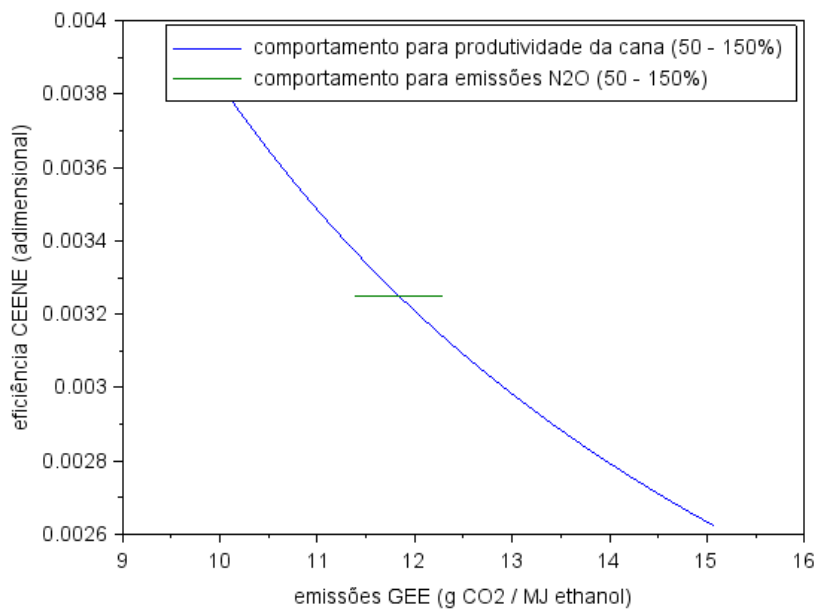


Figura 43 - Relação entre eficiência CEENE e emissões GEE com: a) a variação da produtividade da cana; b) variações de N₂O emitido pelo solo.

4.4.3.6 ExB versus GEE

Apresentado na Figura 44 Figura 42 – Relação entre CEENE e emissões GEE com: a) a variação da produtividade da cana; b) variações de N₂O emitido pelo solo. Onde a produtividade é sensível e as emissões de óxido nitroso no solo não.

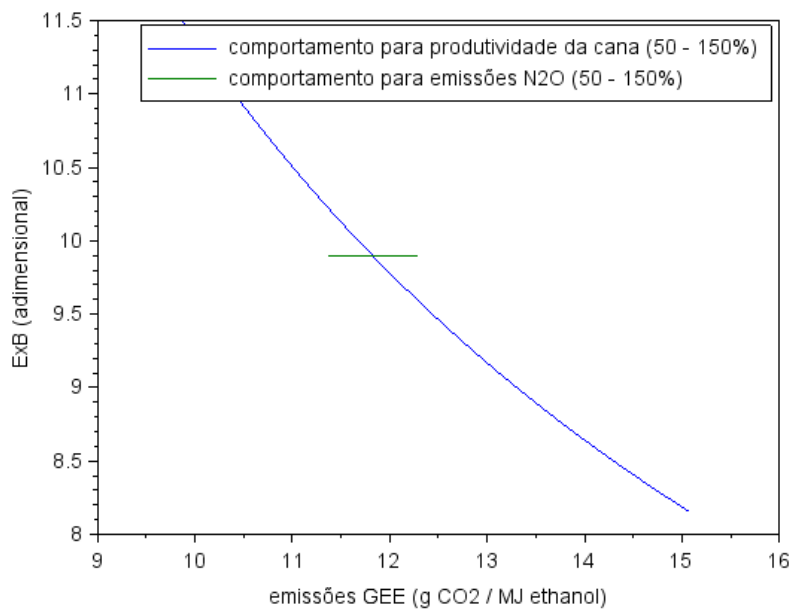


Figura 44 - Relação entre ExB e emissões GEE com: a) a variação da produtividade da cana; b) variações de N₂O emitido pelo solo.

Com as unidades funcionais padrão deste estudo, a Figura 42, Figura 43 e Figura 44, de forma mais individualizada ratificam o comportamento já abordado anteriormente com 5 indicadores a respeito da existência de sensibilidade para a produtividade da cana e inexistência de sensibilidade emissões no solo ao se quantificar quaisquer das três exergias deste estudo.

4.4.4 Resultados exergias e emissões

Da forma semelhante à abordagem adimensional, também em algoritmo próprio dentro do software de programação numérica Scilab, utilizando-se da Equação (46), fez-se aqui o estudo do comportamento somente das variáveis X_1 e X_2 , representando respectivamente a produtividade da cana e as emissões de N₂O e de suas respectivas imagens, que são os valores, respectivamente, de Y_1 e Y_2 , agora em suas unidades próprias. Exemplificando X_1 , que é a produtividade da cana (*prod_cana*), ao inserir este nas equações (23), (43), (45) e (47), onde o valor de $X_1=100\%$ representa o valor base, que é a produtividade de 70 toneladas por hectare.

Fez-se então uma varredura entre 50 e 150%, que representa o *range* de 35 até 105 toneladas por hectare, que via de regra altera o resultado da imagem Y . Mais do que isso, trouxe o comportamento de Y_i com a alteração de X_i , e a partir deste comportamento foi possível se calcular a sensibilidade de X nos resultados de Y , que é o Φ_i da Equação (21), número adimensional que representa a razão entre a variação percentual em Y e a variação percentual

em X .

4.4.4.1 Para a exergia CEENE

A Figura 45 exibe o comportamento das irreversibilidades (exergia CEENE) em função das variáveis de entrada: produtividade da cana (X_1) e emissões de óxido nitroso no solo (X_2). No entorno do valor base, as sensibilidades são:

- Sensibilidade da exergia CEENE em relação à produtividade (X_1), $\Phi_1 = -0,49$;
- Sensibilidade da exergia CEENE em relação às emissões à N_2O no solo (X_2), Φ_2 é próximo de zero.

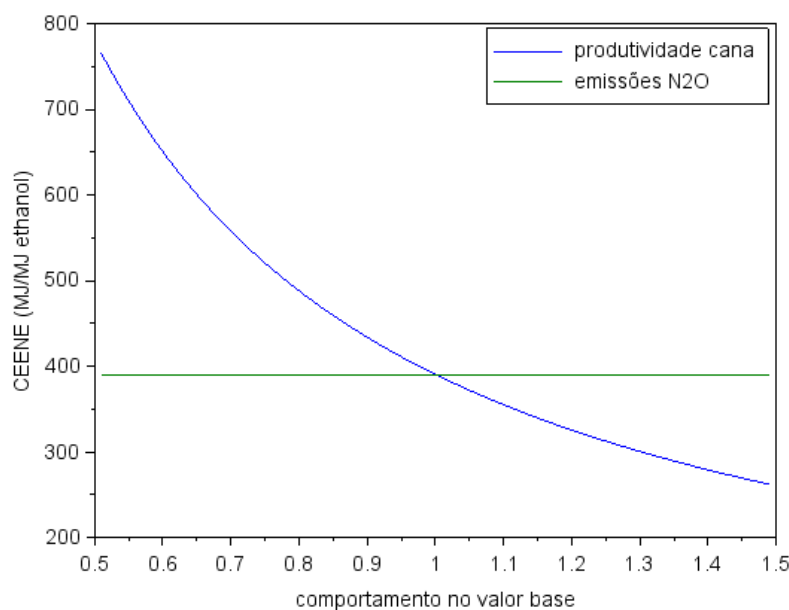


Figura 45 – Comportamento CEENE para as variáveis produtividade da cana e emissões de N_2O solo (50 - 150%).

4.4.4.2 Para eficiência exérgica CEENE

A Figura 46 apresenta comportamento da eficiência exérgica CEENE em função das variáveis de entrada: produtividade da cana (X_1) e emissões de óxido nitroso no solo (X_2). No entorno do valor base, as sensibilidades foram:

- Sensibilidade da eficiência CEENE em relação à produtividade (X_1), $\Phi_1 = 0,39$;
- Sensibilidade da eficiência CEENE em relação às emissões à N_2O no solo (X_2), Φ_2 é próximo de zero.

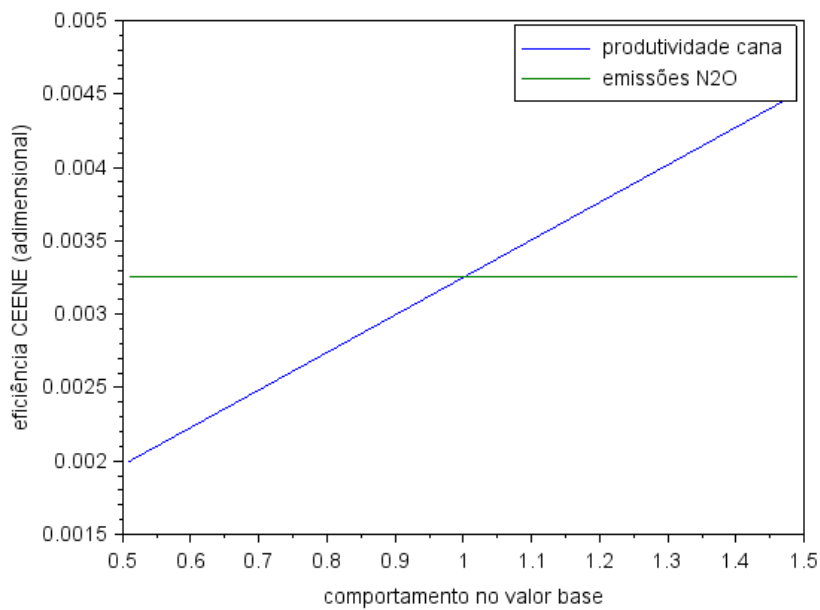


Figura 46 - Comportamento eficiência CEENE para as variáveis produtividade da cana e emissões de N₂O (50 - 150%).

4.4.4.3 Para eficiência exergética *Breeding* (ExB)

A Figura 47 mostra comportamento da eficiência exergética *Breeding* (ExB) em função das variáveis de entrada: produtividade da cana (X_1') e emissões de óxido nitroso no solo (X_2'). No entorno do valor base, as sensibilidades foram:

- Sensibilidade da eficiência *Breeding* em relação à produtividade (X_1'), $\Phi_1 = 0,34$;
- Sensibilidade da eficiência *Breeding* em relação às emissões à N₂O no solo (X_2'), Φ_2 é próximo de zero.

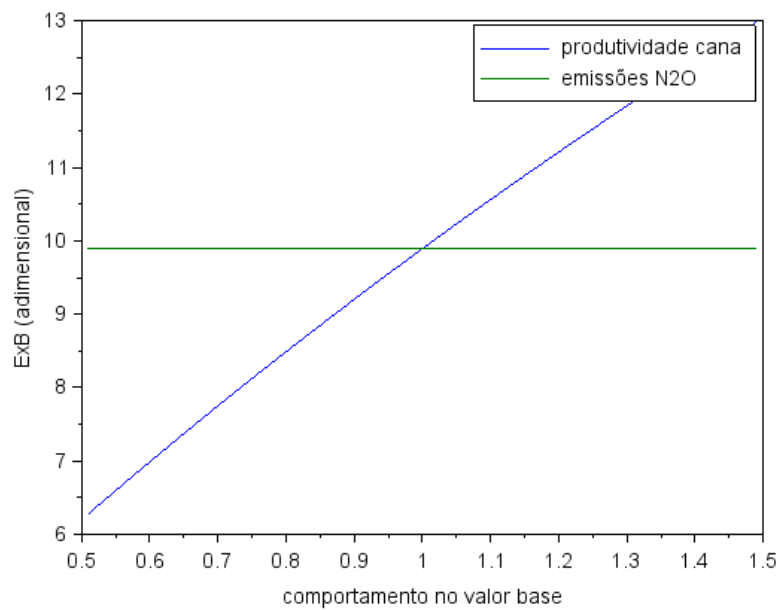


Figura 47 - Comportamento eficiência Breeding (ExB) para as variáveis produtividade cana e emissões de N₂O (50 - 150%).

4.4.4.4 Para o total de emissões de GEE

A Figura 48 apresenta este resultado, onde no entorno do valor base, a sensibilidade em relação à produtividade foi de -0,41 e em relação às emissões de 0,077.

A Figura 48 mostra o comportamento do total de emissões de GEE em função das variáveis de entrada: produtividade da cana (X_1) e emissões de óxido nitroso no solo (X_2). No entorno do valor base, as sensibilidades foram:

- Sensibilidade das emissões de GEE em relação à produtividade (X_1), $\Phi_1 = -0,41$;
- Sensibilidade das emissões de GEE em relação às emissões à N₂O no solo (X_2), $\Phi_2 = 0,077$.

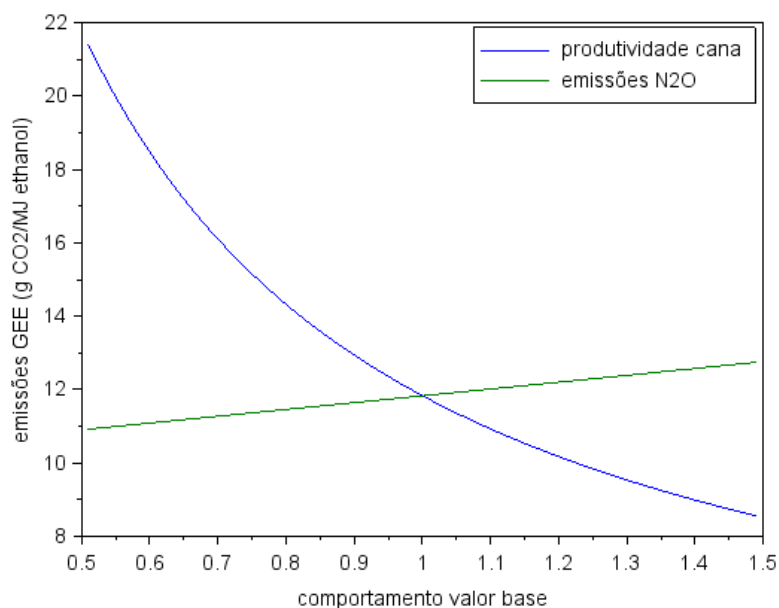


Figura 48–Comportamento emissões GEE para as variáveis produtividade da cana e emissões de N₂O (50 - 150%).

Ao se tratar o comportamento somente com os indicadores alterados com o biocarvão, que são a produtividade da cana e as emissões de N₂O no solo, agora quantificados em Y com a unidade funcional própria, Figura 45, Figura 46, Figura 47, Figura 48 que de certa forma já foram comentados, de forma resumida a produtividade foi sensível nas três exergias abordadas, sendo um pouco maior na CEENE (-0,49) e de 0,39 e 0,34 para a eficiência CEENE e para a ExB, respectivamente. Estes resultados trouxeram uma mesma ordem de grandeza para a produtividade da cana e os indicadores de alta exergia, enquanto isso, a sensibilidade do óxido nitroso foi nula para estas três exergias.

Menores emissões de CO₂-equivalente por megajoule de etanol foram conseguidos ao diminuir as emissões no solo (N₂O) ou com o aumento da produtividade (Figura 48). Esta figura, em suma representa de maneira direta o comportamento destas variáveis quanto ao melhor uso do carbono, que é a grande questão ambiental no que tange aos GEE.

4.4.5 Equacionamento linear da razão exergia-emissões

Individualmente, os resultados das três exergias e das emissões de GEE durante a varredura entre 50 e 150% dos indicadores alterados com o uso do biocarvão, tiveram comportamentos distintos, alguns aparentemente lineares outros nem tanto. Já na razão exergia-emissões observou-se para estes mesmos indicadores um comportamento mais linear, o que tornou possível se acoplar analiticamente o comportamento destes indicadores na razão exergia-

emissões, através de uma regressão linear resultante dos pontos do vetor original. Os valores de a e b da equação do primeiro grau da regressão linear simples (RLS) bem como a média o coeficiente de determinação padrão foram tratados com o comando *reglin[a,b,sig]*, dentro do software Scilab.

Com outros indicadores, mas de maneira equivalente, Porthaa *et. al.* (2010), também trouxeram um acoplamento entre a exergia e as emissões.

4.4.5.1 Para razão exergia CEENE/GEE

Com o uso do biocarvão, a produtividade da cana e o uso da adubação nitrogenada, são alterados. Estas alterações foram tratadas de início de forma individual no algoritmo do Scilab. O vetor original e a função linear $Y_k(X_1)$ são mostrados na Figura 49, da mesma forma o vetor original e a função linear $Y_k(X_2)$ na Figura 50, sendo X_1 a produtividade da cana e X_2 a adubação nitrogenada aplicada no campo.

As Equações (55) e (56), são resultados desta linearização, respectivamente para a produtividade da cana e para as emissões de óxido nitroso no solo.

Logo após às equações são também apresentados a média e o coeficiente de determinação R^2 bem como suas respectivas plotagens, na Figura 49 e Figura 50.

Para a produtividade da cana temos,

$$Y_k(X_1) = (-0,075)X_1 + 38,3 \quad (55)$$

$$\text{Média} = 33,1 \text{ (MJ/g CO}_2\text{)}$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 = 0,997$$

Onde,

$Y_k(X_1)$: é a função que relaciona a extração de exergia com as emissões de GHG em função da produtividade de cana (MJ/g CO₂); X_1 : é a variável produtividade da cana (TC/ha).

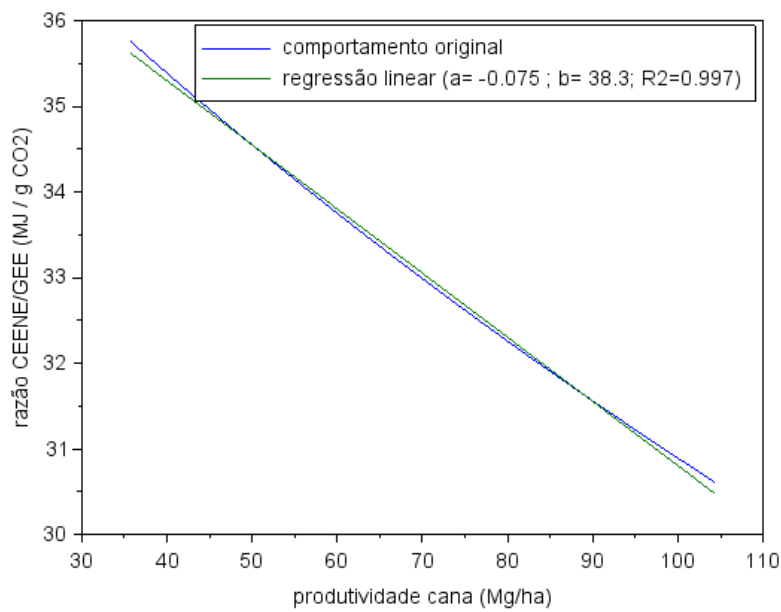


Figura 49 - Comportamento função Y_k para a produtividade da cana (50 a 150%).

Para as emissões de oxido nitroso temos,

$$Y_k(X_2) = (-3,71)X_2 + 38,3 \quad (56)$$

$$\text{Média} = 33,1 \text{ (MJ/g CO}_2\text{)}$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 = 0,995$$

Onde,

$Y_k(X_2)$:é a função que relaciona a extração de exergia com as emissões de GHG em função da adubação nitrogenada (MJ/g CO₂); X_2 : é a variável da taxa de aplicação da adubação nitrogenada (kg/ha).

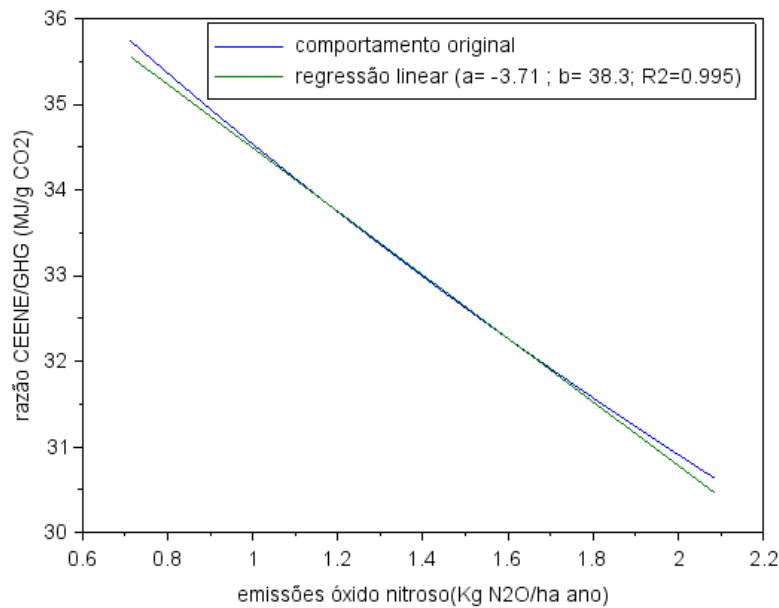


Figura 50 - Comportamento função Y_k para adubação nitrogenada (50 a 150%).

4.4.5.2 Para razão eficiência CEENE/GEE

A modificação dos resultados da razão entre eficiência exergética CEENE e GHG ocorreu da mesma forma que a anterior, com a variação das variáveis em algoritmo próprio dentro do software de programação numérica Scilab, ao se fazer uma varredura entre 50 e 150% da grandeza em estudo em torno do valor base, que é o valor de referência (eixo X). O vetor original e a função linear $Y_l(X_1)$ são exibidos na Figura 51, da mesma forma o vetor original e a função linear $Y_l(X_2)$ na Figura 52, sendo X_1 a produtividade da cana e X_2 as emissões de óxido nitroso no campo.

As Equações (57) e (58), são resultados desta linearização, respectivamente para a produtividade da cana e para as emissões de oxido nitroso no solo. Logo após às equações são também apresentados a média e o coeficiente de determinação R^2 bem como suas respectivas plotagens.

Para a produtividade da cana temos,

$$Y_l(X_1) = (6,34)(10^{-6})X_1 + 38,3 \quad (57)$$

$$\text{Média} = 2,75 (10^{-4}) \text{ (MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2)$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 = 0,993$$

$Y_l(X_1)$: é a função que relaciona a eficiência exergética CEENE com as emissões de GHG em função da produtividade de cana ($\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2$); X_1 : é a variável produtividade da cana (TC/ha).

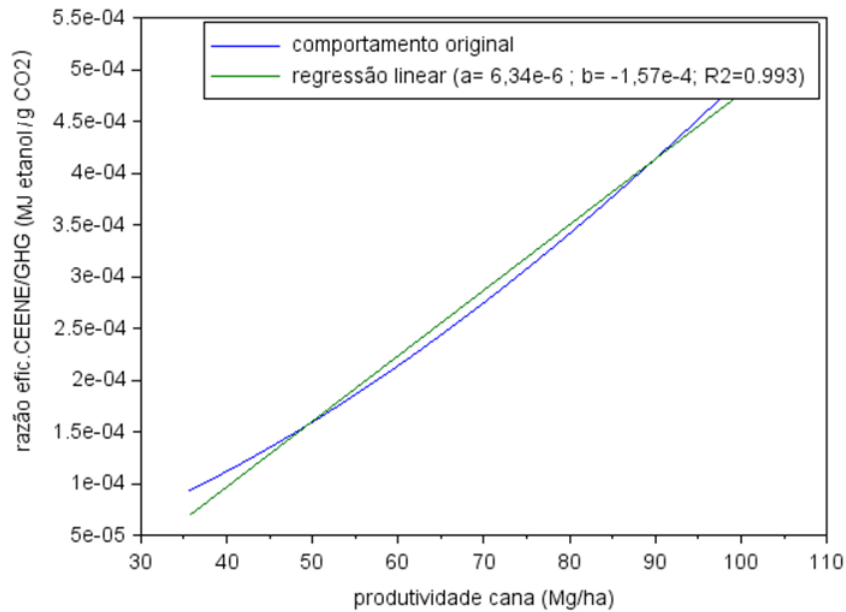


Figura 51 - Comportamento função Y_l para a produtividade da cana (50 a 150%).

Para as emissões de óxido nítrico temos,

$$Y_l(X_2) = (-3,1)(10^{-5})X_1 + (3,19)(10^{-4}) \quad (58)$$

$$\text{Média} = 2,75 (10^{-4}) \quad (\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2)$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 = 0,998$$

$Y_l(X_2)$:é a função que relaciona a eficiência exergética CEENE com as emissões de GHG em função adubação nitrogenada ($\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2$); X_2 : é a variável da taxa de aplicação da adubação nitrogenada (kg/ha).

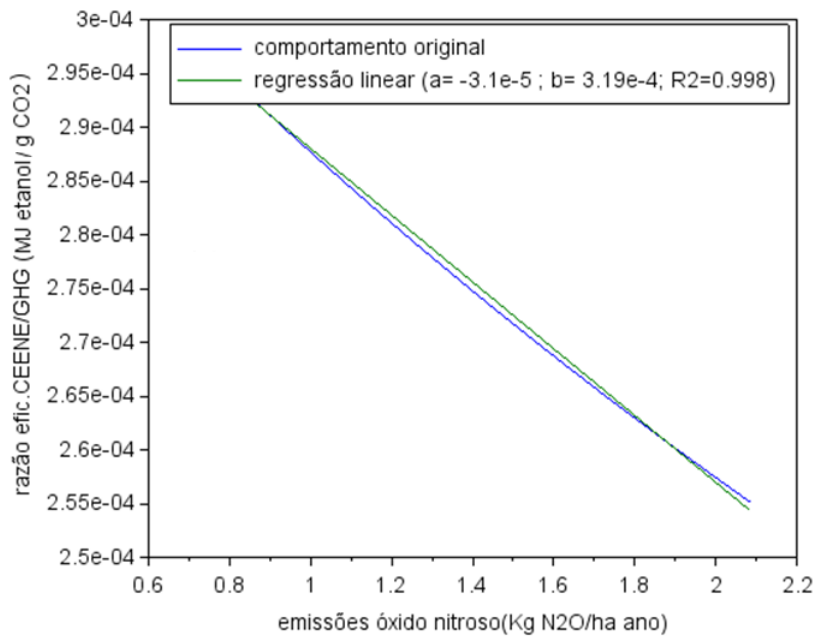


Figura 52 - Comportamento função Y_1 para adubação nitrogenada (50 a 150%).

4.4.5.3 Pararazão eficiência *Breeding* (ExB)/ GEE

Da mesma forma, agora com o vetor original e a função linear $Y_1(X_1)$ apresentados na Figura 53, e o vetor original e a função linear $Y_1(X_2)$ na Figura 54, sendo X_1 a produtividade da cana e X_2 as emissões de óxido nítrico no campo.

Para a produtividade da cana temos,

$$Y_m(X_1) = 0,018 X_1 - 1,40 \quad (59)$$

$$\text{Média} = 0,836 \quad (\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2)$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 = 0,997$$

$Y_m(X_1)$:é a função que relaciona a eficiência exergética *Breeding* (ExB) com as emissões de GHG em função da produtividade de cana ($\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2$); X_1 : é a variável produtividade da cana (TC/ha).

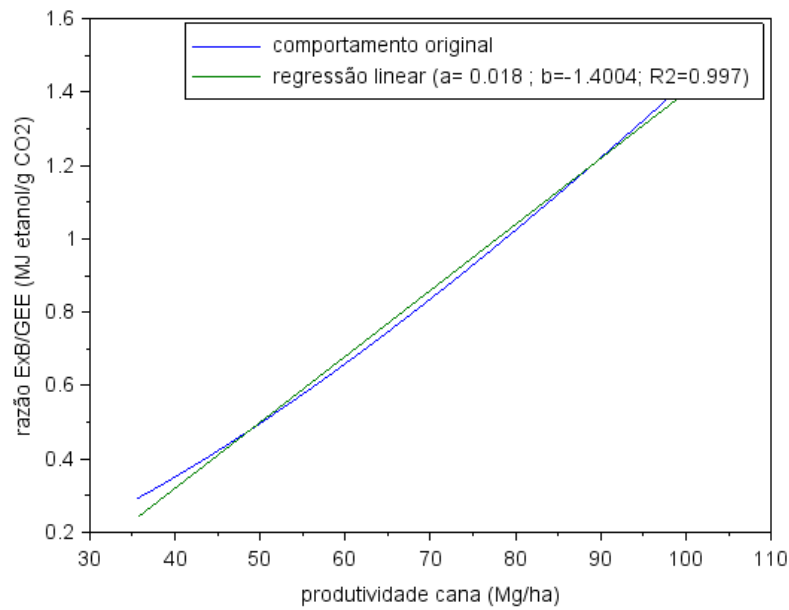


Figura 53 – Comportamento função Y_m para a produtividade da cana (50 a 150%).

Para as emissões de óxido nítrico temos,

$$Y_m(X_2) = -0,0941 X_1 + 0,97 \quad (60)$$

$$\text{Média} = 0,836 \quad (\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2)$$

$$\text{Coeficiente de determinação } R^2 = 0,997$$

$Y_m(X_2)$: é a função que relaciona a eficiência Breeding (ExB) com as emissões de GHG em função adubação nitrogenada ($\text{MJ}_{\text{etanol}}/\text{g CO}_2$); X_2 : é a variável da taxa de aplicação da adubação nitrogenada (kg/ha).

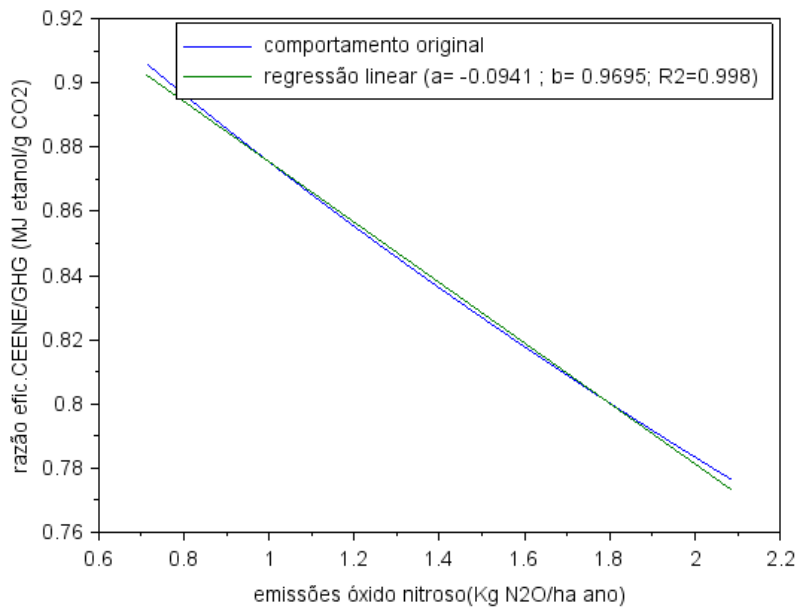


Figura 54 - Comportamento função Y_m para adubação nitrogenada (50 a 150%).

A razão exergia-emissões, que enfim infere matematicamente a relação existente entre a métrica exergia e os impactos ambientais ocasionados com a geração de gases de efeito estufa, trouxe individualmente para as três exergias e dois indicadores alterados com o uso do biocarvão, a produtividade da cana e as emissões de N_2O no solo, as equações (55) e (56) para a exergia CEENE (Figura 49 e Figura 50), as equações (57) e (58) para eficiência exergética CEENE (Figura 51 e Figura 52) e as equações (59) e (60) para a exergia *Breeding* (Figura 53 e Figura 54).

Sobre estas equações é importante observar que toda a variação ocorre em torno de um valor, no eixo Y , seja Y_k , Y_l ou Y_m que é o valor de *beta* da função. As variáveis que representam produtividade e emissões de N_2O foram trabalhadas especificamente nesses gráficos por serem as que sofreram alterações com o uso do biochar, mas outros indicadores poderiam ser utilizados trazendo outras equações, não necessariamente lineares”.

Como se trata de uma razão e os numeradores das equações plotadas na Figura 50, Figura 52 e Figura 54 possuem como indicadores as exergias do óxido nitroso, e estes são insensíveis a este indicador, o comportamento desta razão são impactados apenas pelo denominador, ao contabilizar as emissões (vide Tabela 9). Para estes casos, maiores emissões trazem menores valores de Y , e menores emissões de N_2O aumentam esta razão, que é um indício do melhor uso do carbono.

Na Tabela 9 são exibidos os valores das sensibilidades das exergias CEENE, eficiência exergética CEENE, eficiência Breeding e também das emissões de GEE no entorno do valor base, que é $x=1$ ou 100% do indicador que foi abordado. São dois estes indicadores, a produtividade da cana e as emissões de óxido nitroso pelo solo.

Tabela 9–Sensibilidades exergias e emissões GEE para produtividade da cana e emissões N₂O pelo solo

Indicador (variável varredura eixo X)		
Sensibilidade	Produtividade da cana	Emissões de N₂O solo
Φ_{CEENE}	-0,490	0,00
Φ_{efic_CEENE}	0,389	0,00
$\Phi_{Breeding}$	0,340	0,00
$\Phi_{emissões}$	-0,413	0,077

Onde,

Φ_{CEENE} : é a sensibilidade à exergia CEENE no valor base (adimensional);

Φ_{efic_CEENE} : é a sensibilidade à eficiência exergética CEENE no valor base (adimensional);

$\Phi_{Breeding}$: é a sensibilidade à exergia Breeding no valor base (adimensional);

$\Phi_{emissões}$: é a sensibilidade às emissões de GEE no valor base (adimensional).

O uso da exergia é usualmente associado ao uso eficiente de recursos, que é uma verdade. No entanto deve ser observado que na agricultura, ao se incluir o sol como fonte de exergia, recurso natural que através da fotossíntese induz a captura do carbono (produção), seria mais adequado se utilizar para o carbono, nosso principal recurso, o termo “uso/produção eficiente de carbono”, visto que a abordagem deste estudo é de ponta a ponta, e o termo “uso eficiente do carbono” seria mais apropriado durante seu inventário, após a referida fotossíntese, que não invalida a sua utilização ao longo do texto.

A razão exergia-emissões para a exergia CEENE, na Tabela 9 apresenta o indicador produtividade da cana com maior sensibilidade que as emissões. Menores valores desta razão (decréscimos) indicam menos irreversibilidades para o mesmo uso/produção do carbono, isto é, o carbono foi melhor utilizado (Figura 49, página 107).

Mesmo que com pequena a diferença, para a eficiência exergética CEENE e para a *Breeding* (Tabela 9), a sensibilidade das emissões é maior que das exergias, então, ao contrário da CEENE, o aumento desta razão, do valor de Y , representa um melhor uso do carbono (Figura 51 e Figura 53).

Estas equações, cujo principal objetivo é relacionar exergia com emissões, de uma forma ou de outra podem também representar o comportamento do melhor uso do carbono, mas nem sempre de fácil interpretação. O melhor e mais direto indicador deste comportamento são as próprias emissões na unidade funcional aqui trabalhada, em gramas de CO_2 -equivalente por megajoule de etanol, exibidos na Figura 48, página 105.

Utilizando-se tão somente as duas variáveis impactadas com o uso do biocarvão, a produtividade da cana e as emissões de óxido nitroso, chega a ser indiferente qual dentre as exergias tratadas neste estudo é a melhor, visto que as três tiveram resultados consistentes, cada qual trazendo um equacionamento linear da razão exergia-emissões. No entanto, durante a simulação de resultados com a utilização de 5 indicadores, ficou claro que, dentre as exergias abordadas, a exergia *Breeding*, por ser sensível a uma quantidade maior destes indicadores, se apresenta como o melhor modelo de avaliação para sistemas bioenergéticos.

4.5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A respeito do biocarvão, pesquisas atuais trazem que o uso do mesmo resulta em ganhos de produtividade e mitigação das emissões em variadas culturas e solos. Além disso, por ser um produto de baixa reatividade química com o meio solo, este possui um ciclo mais duradouro na estocagem do elemento químico carbono, o que resulta adicionalmente em benefícios ambientais.

Ao analisar o sistema bioenergético, em uma modelagem dentro de uma ACV, existe, em maior ou menor grau, uma relação estreita entre os balanços de exergia e os impactos ambientais na forma de emissões de GEE. Esta relação foi atestada através das mesmas variáveis impactantes durante o uso do biocarvão, onde foi possível inferir, a partir de um sistema de referência, um equacionamento linear que relaciona a métrica exergia com as emissões de GEE. Pelo fato de ser sensível a uma maior gama de indicadores, na razão exergia-emissões, a exergia Breeding se oferece como a mais adequada para a este setor da bioenergia.

As equações modeladas representam também o uso mais eficiente do recurso carbono mostrando que a termodinâmica pode ser uma ferramenta adequada na gestão sustentável dos recursos, e que, concomitantemente ao uso de ferramentas direcionadas a outros impactos, como os sociais e econômicos, podem trazer uma abordagem mais quantitativa para a sustentabilidade em processos industriais.

Além de possibilitar a quantificação dos fluxos de massa e energia em uma unidade comum, a métrica exergia pode certamente ser utilizada para avaliar sustentabilidade ambiental, especialmente em setores em que os fluxos inventariados possuam alta exergia, como é o caso da sucroenergia. Este setor possui a variável (indicador) emissões de óxido nitroso no solo, mesmo que não possuindo um comportamento contrário, esta variável possui pouca sensibilidade com a exergia, no entanto seu efeito global nas emissões é próximo de 18%, relativamente pequeno, o que ratifica o uso da exergia na avaliação ambiental no tocante à geração de GEE, ao trazer um indicador global do sistema não apenas qualitativo, mas quantitativo.

Para trabalhos futuros se recomenda uma análise exérgica bem como as emissões associadas em outras rotas das bioenergias brasileiras, na produção de etanol e eletricidade utilizando-se: da fermentação do milho e da cana; através da supercana na produção de etanol de segunda

geração. Estas análises podem ser também abordadas com o aproveitamento de outros “resíduos” industriais, além do biocarvão, como o hidrocarvão ou mesmo com a utilização de outro tipo de condicionador de solos, que é o Hidrogel. Também, uma abordagem pode ser feita com novas tecnologias no campo para a fixação do nitrogênio nas raízes da cana-de-açúcar. Todos estes, aliados à novas tecnologias na parcela industrial deste setor, trarão novos resultados de balanço de emissões e de exergias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, T.; ABBASI, S.A. - *Biomass energy and the environmental impacts associated with its production and utilization* - Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 919- 937, 2010.
- ALVARENGA, R.A.F.; DEWU LF, J.; VAN LANGENHOVE, H. - *Exergy-based accounting for land as a natural resource in life cycle assessment* - International Journal Life Cycle Assess, pp. 939–947, 2013.
- ANP (Agência Nacional de Petróleo, Brasil) –Fatores de conversão, densidades e poder /calorífico inferior, 2015, disponível em www.anp.gov.br/?dw=82253, acesso em 17/10/2018.
- ANWAR, F.; CHAUDHRY, N.; NAZEER, S.; ZAMAN, N.; AZAM, S. - *Causes of Ozone Layer Depletion and Its Effects on Human: Review* - Atmospheric and Climate Sciences - vol. 6, pp. 129-134, 2016.
- ATLAS BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR - Enio Bueno Pereira; Fernando Ramos Martins; Samuel Luna de Abreu e Ricardo Rüther – São José dos Campos, INPE, 2006.
- AYRES, R. A.; AYRES, E. H. - *Crossing the energy divide: Moving from fossil fuel dependence to a clean-energy future* - Wharton School Publishing, 2010.
- BALDOCK, J.; SMERNIK, R. - *Biochar for Environmental Management Science and Technology* – Earthscan London, 2002.
- BEJAN, A. – *Entropy Generation Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-Size Systems and Finite-Time Processes* - CRC Press, New York, 1995.
- BERTHIAUME, R.; BOUCHARD, C.; ROSEN, D. - *Exergetic evaluation of the renewability of a biofuels* - Exergy, An International Journal, vol. 1, pp. 256-268, 2001.
- BP Energy Outlook - 2017 edition (British Petroleum), disponível em <http://www.bp.com/energyoutlook#BPstats>.
- CALDEIRA-PIRES, A.; LUZ, S. M.; SILVÉRIO, V. C.; SILVEIRA, C. M.; MACHADO F. S. - *Implications of removing straw from soil for bioenergy: An LCA of ethanol production using total sugarcane biomass* - Journal of Cleaner Production, vol. 181, pp. 249-259, 2018.
- CARVALHO, M. T. M. – *The impact of bichar as a soil amendment in aerobic rice systems of the Brazilian Savannah* – PhD thesis, Wageningen University, Wageningen NL, 2015.

- CAYUELA, M.L.; VAN ZWIETEN, B.L.; SINGHB, B.P.; JEFFERY, C.S.; ROIGA, A.; SÁNCHEZ-MONEDERO, M.A. - *Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis* - Agriculture, Ecosystems and Environment vol. 191, pp. 5–16, 2014.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. – *Termodinâmica* – 7. Ed. – Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CHAPMAN, P.F.; LEACH, G.; SLESSER, M. - *The energy cost of fuels* - Energy Policy Magazine, vol. 2, September 1974, pp. 231-243.
- CHEMOSPHERE JOURNAL (Editorial) - *Biochars multifunctional role as a novel technology in the agricultural, environmental, and industrial sectors* – vol. 142, pp. 1-3, 2016.
- CHEN, B.; DAIA, J.; SCIUBBA, E. - *Ecological accounting for China based on extended exergy* - Journal & Books, vol. 37, pp. 334-347, 2014.
- CHERUBINI, F.; BIRDA, N.; COWIE, A.; JUNGMEIER, G.; SCHLAMADINGER, B.; WOESSGALLASCH, S. - *Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations* - Conservation and Recycling Resources, vol. 53, pp. 434–447, 2009.
- COELLI, T.; LAUWERS, L.; VAN HUYLENBROECK, G. - *Environmental efficiency measurement and the materials balance condition* - Journal of Productivity Analysis 2007, vol. 28, pp. 3–12, 2007.
- CORNELISSEN, R.L. - *Thermodynamics and Sustainable Development* - Ph.D. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 1997.
- COSTA JÚNIOR, C.; PIATTO, M. - Documento de análise emissões de GEE do setor agropecuário *IMAFLORA* - Instituto de Manejo e Certificação Florestal e Agrícola, Setembro 2016.
- DAVIS, S.C.; ANDERSON-TEIXEIRA, K.J.; DELUCIA, E.H. - *Life-cycle analysis and the ecology of biofuels* - Trends in Plant Science, vol. 14, pp. 140–146, 2009.
- DE MEESTER, R.; DEWULF, J.; JANSSENS, A.; VAN LANGENHOVE, H. - *An Improved Calculation of Exergy of Natural Resources for Exergetic Life Cycle Assessment (ELCA)* - Environmental Science. Technology, vol. 40, pp. 6844-6851, 2006.
- DECRETO Nº 4.954, de 14 de Janeiro de 2004, disponível em www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d4954.htm, acesso em 24/07/2016.

- DEWULF, J.; BÖSCH, M. E.; DE MEESTER, B. ; VAN DER VORST, G.; VAN LANGENHOVE, H.; HELLWEG, S.; HUIJBREGTS, M. A. J. – *Cumulative exergy extraction from the natural environment (CEENE): a comprehensive life cycle impact assessment method for resource accounting* - Environmental science & technology - vol. 41, pp. 8477-83, 2007.
- DEWULF, J.; VAN LANGENHOVE, H.; VAN DE VELDE, B. - *Exergy-Based Efficiency and Renewability Assessment of Biofuel Production* - Environmental. Science. Technology, vol. 39, pp. 3878–3882, 2005.
- DINCER, I.; ROSEN, M. - *Exergy: energy, environment and sustainable development* - Elsevier Science & Technology Digital, 2007.
- EYKELBOSH, A. J.; JOHNSON, M. S.; QUEIROZ, E. S.; DALMAGRO, H. J.; COUTO, E. G. - *Biochar from Sugarcane Filtercake Reduces Soil CO₂ Emissions Relative to Raw Residue and Improves Water Retention and Nutrient Availability in a Highly Weathered Tropical Soil* - PLOS ONE, www.plosone.org , vol. 9, Issue 6, June 2014.
- FARINE, D.R.; O'CONNELL, D.A.; RAISON, R.J.; MAY, B.M.; O'CONNOR, M.H.; CRAWFORD, D.F.; HERR, A.; TAYLOR, J.A.; JOVANOVIC, T.; CAMPBELL, P.K.; DUNLOP, M.I.A.; RODRIGUEZ, L.C.; POOLE, M.L.; BRAID, A.L.; KRITICOS, D. - *An assessment of biomass for bioelectricity and biofuel, and for greenhouse gas emission reduction in Australia* - GCB Bioenergy vol. 4, 148–175, 2012.
- FAZIO S.; MONTI, A. - *Life cycle assessment of different bioenergy production systems including perennial and annual crops* - Biomass & Bioenergy, vol. 35, pp. 4868–4878, 2011.
- FLÓREZ-ORREGO, D.; SILVA, J. A. M.; VELÁSQUEZ, H.; OLIVEIRA JR.; SILVA - *Renewable and non-renewable exergy costs and CO₂ emissions in the production of fuels for Brazilian transportation sector* - Energy, vol. 88, pp. 18-36, 2015.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. - *The Entropy Law and the Economic Process* - Cambridge, Massachusetts; EUA: Harvard University Press, 1971.
- GEORGESCU-ROEGEN, N. - *The entropy law and the economic process in retrospect* - Eastern Economic Journal, vol. 3, pp. 425, 1986.
- GIANNETTI, B. F.; ALMEIDA, M. V. B. – *Ecologia industrial: conceitos, ferramentas e aplicações* – São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

- GIUNTOLI, J.; BOULAMANTI, A.K.; CORRADO, S.; MOTEGH, M.; AGOSTINI, A.; BAXTER, D. - *Environmental impacts of future bioenergy pathways: the case of electricity from wheat straw bales and pellets* - GCB Bioenergy, vol. 5, pp. 497–512, 2013.
- GLASER, B.; BIRK, J. J. - *State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia* - Geochimica et Cosmochimica Acta, vol. 82, pp. 39–51, 2012.
- GOMES, V.M.; ASSIS, A.O.; MATIAS, C.A.; SARAIVA, J.P. ; GOMES, F.A. - *Analytical method for calculating the sensitivity index of system parameters* - IEEE CHILECON/2017 – pp.757-762. Pucón, Chile, 18 al 20 de Octubre 2017.
- GRAEDEL, T.E.; ALLENBY, B.R. - *Industrial Ecology* - Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 2003.
- HAGEMANN, N.; HARTER, J.; KALDAMUKOVA, R.; GUZMAN-BUSTAMANTE, I.; RUSER, R.; GRAEFF, S.; KAPPLER, A.; BEHRENS, S. - *Does soil aging affect the N₂O mitigation potential of biochar: a combined microcosm and field study* - GCB Bioenergy , vol. 8, pp. 849-1024, September 2016.
- HAMBY, D.M. - *A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models* - Environmental Monitoring and Assessment, September 1994, vol. 32, pp. 135–154.
- HOANG, V.N.; RAO, D.S.P - *Measuring and decomposing sustainable efficiency in agricultural production: A cumulative exergy balance approach* - Ecological Economics (magazine), vol. 69, pp. 1765–1776, 2010.
- HU, B.; WANG, K.; WU, S.H. - *Engineering Carbon Materials from the Hydrothermal Carbonization Process of Biomass* - Advanced Materials, 2010, vol. 22, pp. 813-828.
- IPCC 2014 - *Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers I* - Disponível em www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf, acesso em 11/08/2016.
- JEFFERY, S.; VERHEIJEN, F.G.A.; VELDE, M.; BASTOS, A.C. - *A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis* - Agriculture, Ecosystems and Environment, vol. 144, pp. 175–187, 2011.
- JOHNSON, E. - *Goodbye to carbon neutral: Getting biomass footprints right* - Environmental Impact Assessment Review, vol. 29, pp. 165-168, 2009.

- KIMURA, L. M. - Uma contribuição à pirólise de biomassa: avaliação de alguns resíduos da agroindústria como fonte de energia alternativa - Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- KOTAS, T.J. - *The Exergy Method of thermal plant analysis* - ISBN 0-408-01350, 2013.
- KRAHL, I. M.; PINTO, M. A. C. - Indicadores de sustentabilidade baseados em exergia e sua relação com gestão ambiental. VI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2010.
- LAUWERS, L. - *Justifying the incorporation of the materials balance principle into frontier-based eco-efficiency models* - Ecological Economics – vol. 68, pp. 1605-1614, 2009.
- LEHMANN, J.; JOSEPH, S. - *Biochar for environmental management : science and technology* - ISBN: 978-1-84407-658-1, 2009.
- LUCIA, U. - *Entropy and exergy in irreversible renewable energy systems* - Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 20, pp. 559-564, 2013.
- MACEDO, I. C.; LEAL, M.R.L.V.; SILVA, J.E.A.R. - Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil; Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Universidade Estadual de Campinas; NIPE/UNICAMP, abril, 2004.
- MACEDO, I.C.; SEABRA, J.E.A.; SILVA, J.E.A.R. - *Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020* – Biomass and Bioenergy, vol. 32, July 2008, pp. 582-59.
- MAES, D.; PAssel, S. V. - *Advantages and limitations of exergy indicators to assess sustainability of bioenergy and biobased materials* - Environmental Impact Assessment Review, vol. 45, pp. 19-29, 2014.
- MARTINS, G.C.; BRASIL, A.; PERIN, R.; PINTO, W. - Estoque de Carbono em Terra Preta do Índio no Município de Iranduba-AM - XIX Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do solo e Água, 29 junho a 03 de agosto de 2012, Lages-SC, disponível em: www.embrapa.br/web/mobile/publicacoes/-/publicacao/937247/estoque-de-carbono-em-terra-preta-de-indio-no-municipio-de-iranduba-am.
- MCMANUS, M. C.; TAYLOR, C. M. - *The changing nature of life cycle assessment* - Biomass and Bioenergy, November 2015, vol. 82, pp.13-26.
- MEADOWS, D.; MEADOWS, D.; RANDERS, J.; BEHRENS, W. W. – *Limits to Growth* - Universe Books, 381 Park Avenue South, New York, 1972.

- MEYER, L.; TSATSARONIS, G.; BUCHGEISTER, J.; SCHEBEK, L. - *Exergoenvironmental analysis for evaluation of the environmental impact of energy conversion systems* – Energy, vol. 34, pp. 75-89, 2009.
- MUENCH, S.; GUENTHER, E. - *A systematic review of bioenergy life cycle assessments* - Applied Energy, vol. 112, pp. 257-273, December 2013.
- MUKHERJEE, A.; LAL, R.- Biochar and Soil Quality - Encyclopedia of Soil Science, Third Edition, Taylor & Francis 2016.
- NBR 14.040 - Gestão ambiental, avaliação do ciclo de vida, princípios e estrutura. ABNT– Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.
- NOVACANA, disponível em <https://www.novacana.com/cana/glossario-de-indicadores-de-pd-na-cadeia-produtiva-cana-etanol>.
- NOVAK, J.; LIMA, I.; XING, B.; GASKIN J.W.; STEINER, C.; DAS, K.C.; AHMEDNA, M.; REHRAH, D.; WATTS, D.W.; BUSSCHER, W.J. and SCHOMBERG, H. – *Characterization of Designer Biochar Produced at Different Temperatures and their Effects on a Loamy Sand* - Annals of Environmental Science – vol. 3, 195-206, 2009.
- OLIVEIRA JR.; S. - *Exergy Production, Cost and Renewability* - Springer London Heidelberg New York Dordrecht.
- OMETTO, A. R. - Avaliação do ciclo de vida do álcool etílico hidratado pelos métodos EDIP, Exergia e Emergia. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- PALACIOS-BERECHE, R.; MOSQUEIRA-SALAZAR, K.J.; MODESTO, M.; ENSINAS, V.A. – *Exergetic analysis of the integrated first and second-generation ethanol production from sugarcane* - Energy 62, pp. 46-61, 2013.
- PATTERSON, R.; - *World Energy 2016-2050: Annual Report, 2016* - disponível em <http://peakoilbarrel.com/world-energy-2016-2050-annual-report/>, acesso em 24/04/2017.
- PATZEK, T.; PIMENTEL, D. - *Thermodynamics of Energy Production from Biomass* - Critical Reviews in Plant Sciences, vol. 24, pp. 327-364, 2005.
- Plano ABC (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono) - Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura - MAPA / MDA, Brasília-DF, 2012.

- PLEVIN, R. J.; DELUCCHI, M. A.; CREUTZIG, F. - *Using Attributional Life Cycle Assessment to Estimate Climate - Change Mitigation Benefits Misleads Policy Makers* - Journal of Industrial Ecology, 2013, vol. 18, pp. 73-83.
- PORTHAA, J.F.; LOURETB, S.; PONSAS, M.N.; JAUBERTC, J. N. - *Estimation of the environmental impact of a petrochemical process using coupled LCA and exergy analysis* - Resources, Conservation and Recycling vol. 54, pp. 291–298, 2010.
- PRATHER, M. J. AND HSU, J. – *NF₃, the greenhouse gas missing from Kyoto* - Geophysical Research Letters, vol. 35, L12810, doi:10.1029/2008GL034542, 2008.
- PTASINSKI, K. J.; - *EFFICIENCY OF BIOMASS ENERGY: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries* - John Wiley & Sons, Inc.; Hoboken, New Jersey, 2016.
- PUIG-ARNAVAT, M.; BRUNO, J.C.; CORONAS, A. - *Review and analysis of biomass gasification models* - Renewable Sustainable Energy Reviews, vol. 14, pp. 2841–2851, 2010.
- RAMLOW, M.; COTRUFO, M. F. - *Woody biochar's greenhouse gas mitigation potential across fertilized and unfertilized agricultural soils and soil moisture regimes* - doi: 10.1111/gcbb.12474, 2017.
- REIJNDERS, L. - *Biofuels for road transport: a seed to wheel perspective (Brief article of Book review)* - Journal of Academic Libraries - vol. 46, pp. 2359, 2009.
- Relatório de Pesquisa: Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvipastoril e Agroindústrias Associadas - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, (IPEA, 2012).
- RESOLUÇÃO CONAMA 375, de 29 de Agosto de 2006, disponível em www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf, acesso em 21/07/2016.
- RIFKIN, J. – *Entropy: a New World View* – The Viking Press, NY, 1980, 305 pages.
- RIFKIN, J. - *The Industrial Revolution* - Publisher: St. Martin Griffin, 304 pp.; 2013.
- RIFKIN, J.; HOWARD, T. - *Entropy into the greenhouse world* - ISBN-10: 0553347179, ISBN-13: 978-0553347173, New Age Book, 1990.
- ROBERTS, K.; GLOY, B.; JOSEPH, S.; SCOTT, N.; LEHMANN, J. - *Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential* – Environmental Science Technology, vol. 44, pp. 827–833, 2010.

- RODRIGUES, J. A. R. - Do engenho à biorrefinaria - a usina de açúcar como empreendimento industrial para a geração de produtos bioquímicos e biocombustível. *Revista Química Nova*, vol. 34, No. 7, pp. 1242-1254, 2011.
- ROSEN, M. A. - *Exergy and government policy: Is there a link?* - *Exergy, An International Journal*, vol. 2, pp. 224-226, 2002.
- ROSEN, M.; DINCER, I.; KANOGLU, M. - *Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact* - *Energy Policy*, vol. 36, pp. 128–137, 2008.
- ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. - Agência Embrapa de Informação Tecnológica – dispon. em: www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_39_711200516717.html .
- SAITO, M. L. - O uso do lodo de esgoto na agricultura: precauções com os contaminantes orgânicos, Jaguariúna - Embrapa Meio Ambiente, 2007. Disponível em http://www.cnpma.embrapa.br/download/documentos_64.pdf .
- SALTELLI, A.; RATTO, M.; ANDRES, T.; CAMPOLONGO, F.; CARIBONI, J.; GATELLI, D.; SAISANA, M.; TARANTOLA, S. – *Global sensitivity analysis* – John Wiley & Sons, Ltda.; 2008.
- SANTOS, N. A. V.; VIEIRA, S. S.; MENDONÇA, F. G.; NAPOLITANO, M. N.; NUNES, D. M.; FERREIRA, R. A. R.; SOARES, R. R.; MAGRIOTIS, Z. M.; ARAUJO, M. H.; LAGO, R. M. - Rejeitos de Biomassas Oriundas da Cadeia de Biocombustíveis no Brasil: Produção de Bio-óleo e Sub-produtos - *Revista Virtual Química*, 9 (1), pp. 52-72, 2017.
- SARMA, B.; GOGOI, N.; BHARALI, M.; MALI, P. - *Field Evaluation Of Soil And Wheat Responses To Combined Application Of Hardwood Biochar And Inorganic Fertilizers In Acidic Sandy Loam Soil* - DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479717000205>. Published online: 13 June 2017.
- SCHRYVER, A.; GALATOLA, M.; SCHAU, E. M.; BENINI, L.; PANT, R. - *Guidance and requirements for biogenic carbon modelling in PEFCEs* - Version 2.2, February 2016.
- SCIUBBA, E.; WALL, G.; - *A brief Commented History of Exergy From the Beginnings to 2004* - *International Journal of Chemical Thermodynamics*, vol. 10, pp. 1-26, March 2007.

- SEABRA, J. E. A. - Avaliação técnico-econômica de opções para aproveitamento integral da biomassa de cana no Brasil - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008, Tese de doutorado.
- SILVA, J. - Adubação Orgânica - Agência Embrapa de Informação Tecnológica, disponível em www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/pimenta/arvore/CONT000gn0k9bxa02wx5ok0liq1mq28xtscp.html, acesso em 09/2016.
- SPARKES, J.; STOUTJESDIJK, P. - *Biochar: implications for agricultural productivity* - Research by the Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences Technical Report, December 2011.
- SZARGUT, J. - *Exergy Method – Technical and Ecological Applications* – WIT Press 2005.
- SZARGUT, J. - *International progress in second law analysis* – Energy, vol. 5, pp. 709-718, Pergamon Press Ltd.; 1980.
- SZARGUT, J.; MORRIS, D. R.; STEWARD, F.R. - *Exergy analysis of thermal, chemical and metallurgical processes* - Hemisphere Publishing - New York 1988.
- VAN SCHIJNDEL, P. - *Exergy analysis as a tool for energy efficiency improvements in the Tanzanian and Zambian industries* - International Conference on Engineering for Sustainable Development, July 27–29, Tanzania, 1998.
- VELÁSQUEZ H.I.; DE OLIVEIRA, S.; BENJUMEA, P.; PELLEGRINI, L.F. - *Exergo-environmental evaluation of liquid biofuel production processes* – Energy, vol. 54, pp. 97-103, 2013.
- WALL, G. - *Exergy: a useful concept within resource accounting* - Institute of Theoretical Physics, Chalmers University of Technology and University of Göteborg, Report n° 77/42, Göteborg, Sweden, 1977.
- WALL, G.; GONG, M. - *On exergy and sustainable development - Part 1: Conditions and concepts* - Exergy International Journal, vol. 1, pp. 128–145, 2001.
- WANG, J.; PAN, X.; LIU, Y.; ZHANG, X.; XIONG, Z. - *Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production* - Plant Soil DOI 10.1007/s11104-012-1250-3, 2012.

- XIAO, Q.; ZHU, L.; SHEN, Y-F; TANG, L. - *Responses of crop nitrogen partitioning, translocation and soil nitrogen residue to biochar addition in a temperate dryland agricultural soil* - doi:10.1007/s11104-017-3304-z-Plant Soil, 2017.
- ZHANG, B; PENGFEI, J; QIAO, H.; HAYAT, T. - *Exergy analysis of Chinese agriculture - Ecological Indicators* (2017), emhttp://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.08.054, acesso em 28/03/2018.
- ZHENG, J.; HAN, J.; LIU, Z.; XIA, W.; ZHANG, X.; LI, L.; LIU, X.; BIAN, R.; CHENG, K.; PAN, G. - *Biochar compound fertilizer increases nitrogen productivity and economic benefits but decreases carbon emission of maize production – Revista Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 241, pp.70–78, 2017.
- ZISOPOULOS, F. K.; Overmars, L.; Goot, A. J. - *A conceptual exergy-based framework for assessing, monitoring, and designing a resource eficiente agri-food sector – Journal of Cleaner Production*, vol. 158, pp. 38-50, 2017.
- ZISOPOULOS, F.K. - *Exergy analysis in industrial food processing* - Tesena Wageningen University - ISBN 9789462578326, 2016.

APÊNDICES

6.1 PROGRAMAÇÃO NUMÉRICA SCILAB

NOTA: diversas linhas se iniciam com “//”, que é a forma de se inserir um comentário no Scilab, no entanto, várias assim estão para sua retirada no momento oportuno de se trazer algum resultado específico do que se deseja, notadamente nas plotagens.

```
//UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
//PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
//DOUTORANDO:JAIR DINOAH DE ARAÚJO JÚNIOR
//ORIENTADOR:PROF.DR.ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA-PIRES
//CO-ORIENTADOR:PROF.DR. SÉRGIO BOTELHO DA SILVA
//TÍTULO DA TESE:
//CORRELAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA COM A EXERGIA: UM ESTUDO DE CASO COM O BIOCARVÃO
//
//PROGRAMAÇÃO EM SCILAB VERSÃO 6.0.1
clc
clear all
close
//
//PLOTAGEM EM GRÁFICO DE BARRAS COMPORTAMENTO CENÁRIOS 1 e 2
//
CEENE=[390.3,354.8]
efic_CEENE=[0.00325,0.00358]
ExB=[9.89,10.16]
emis=[11.83,11.03]
x2b=[1,2]
x3b=[1,2,3]
x4b=[1,2,3,4]
//
//bar(x2b,emis)
//
y2b1=[CEENE]
y2b2=[efic_CEENE]
y2b3=[ExB]
y2b4=[emis]
//individualmente exergia e emissões cenários 1 e 2, total de 4
//bar(x2b,CEENE)
//bar(x2b,efic_CEENE)
//bar(x2b,ExB)
//bar(x2b,emis)
```

```

//
//Razão exergias com emissões, total de 3
y2br1=y2b1./y2b4
y2br2=y2b2./y2b4
y2br3=y2b3./y2b4
//bar(x2b,y2br1)
//bar(x2b,y2br2)
//bar(x2b,y2br3)
//
//Aumento/diminuição percentual grandezas entre cenários
rampa_12_CEENE=(CEENE(2)-CEENE(1))/CEENE(1)
rampa_12_efic_CEENE=(efic_CEENE(2)-efic_CEENE(1))/efic_CEENE(1)
rampa_12_ExB=(ExB(2)-ExB(1))/ExB(1)
rampa_12_emis=(emis(2)-emis(1))/emis(1)
perc_4G=[rampa_12_CEENE,rampa_12_efic_CEENE,rampa_12_ExB,rampa_12_emis]
//bar(x4b,(perc_4G)*100)
//
//Aumento/diminuição percentual razão exergia-emissões entre cenários
rampa_12_CEENE_emis=(y2br1(2)-y2br1(1))/y2br1(1)
rampa_12_efic_CEENE_emis=(y2br2(2)-y2br2(1))/y2br2(1)
rampa_12_ExB_emis=(y2br3(2)-y2br3(1))/y2br3(1)
perc_3G=[rampa_12_CEENE_emis,rampa_12_efic_CEENE_emis,rampa_12_ExB_emis]
//bar(x3b,(perc_3G)*100)
//
//Correlação alteração exergias e alteração emissões entre cenários
rampa_12cor_CEENE_emis=rampa_12_CEENE/rampa_12_emis
rampa_12cor_efic_CEENE_emis=rampa_12_efic_CEENE/rampa_12_emis
rampa_12cor_ExB_emis=rampa_12_ExB/rampa_12_emis
perc_3Gcor=[rampa_12cor_CEENE_emis,rampa_12cor_efic_CEENE_emis,rampa_12cor_ExB_emis]
//bar(x3b,(perc_3Gcor))
//

//
np=5
for i=1:np
    L_CEENE(i)=abs(rampa_12_CEENE)*100
    L_efic_CEENE(i)=abs(rampa_12_efic_CEENE)*100
    L_ExB(i)=abs(rampa_12_ExB)*100
    L_emis(i)=abs(rampa_12_emis)*100
//
    cor_1(i)=L_CEENE(i)/L_emis(i)*100

```

```

cor_2(i)=L_efic_CEENE(i)/L_emis(i)*100
cor_3(i)=L_ExB(i)/L_emis(i)*100
x=[1,2,3,4,5]
end
//
//Vetores para plotagem em Barras
//
x1=[1, 2, 3, 4]
y1=[max(L_CEENE),max(L_efic_CEENE),max(L_ExB),max(L_emis)]
//
x2=[1,2,3]
y2=[max(L_CEENE)/max(L_emis)*100,max(L_efic_CEENE)/max(L_emis)*100,max(L_ExB)/max(L_emis)*100]
//
//GRÁFICO 1 emissões x exergias
//plot(emis,CEENE/1000,"k^:",emis,efic_CEENE*1000,"v:",emis,ExB,"+.");xlabel("<< cenário 2          Emissões na ACV
cenário 1 >>");ylabel("Exergias");legend("CEENE(e+3)","eficiência_CEENE(e-3)","eficiência Breeding")
//
//GRÁFICO 2 - Diminuição ou aumento relativo entre os cenários 1 e 2
//plot(x,L_CEENE,"k^:",x,L_efic_CEENE,"v:",x,L_ExB,"+:",x,L_emis,"*.");xlabel("");ylabel("Percentual
(%");title("Comportamento entre os cenários 1 e 2");legend("diminuição relativa CEENE","aumento relativo eficiência
CEENE","aumento relativo eficiência Breeding","diminuição relativa emissões")
//
//bar(x1,y1);title("Comportamento entre os cenários 1 e 2");ylabel("Percentual (%");xlabel("aa","bb","cc","dd")
//
//GRÁFICO 3 Correlacionando exergia com emissões na ACV
//plot(x,cor_1,"k^:",x,cor_2,"v:",x,cor_3,"+.");xlabel("");ylabel("Correlação (%");title("Correlação com as
emissões");legend("CEENE - emissões","eficiência CEENE - emissões","eficiência Breeding - emissões")
//bar(x2,y2);title("Comportamento entre os cenários 1 e 2");ylabel("Correlação com as emissões
(%");xlabel("aa","bb","cc","dd")
//

```

```

//UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
//PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MECÂNICAS
//DOUTORANDO:JAIR DINOAH DE ARAÚJO JÚNIOR
//ORIENTADOR:PROF.DR.ARMANDO DE AZEVEDO CALDEIRA-PIRES
//CO-ORIENTADOR:PROF.DR. SÉRGIO BOTELHO DA SILVA
//TÍTULO DA TESE:
//CORRELAÇÃO DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA COM A EXERGIA: UM ESTUDO DE CASO COM O BIOCÁRVÃO
//
//PROGRAMAÇÃO EM SCILAB VERSÃO 6.0.1
clc
clear all
close
//
np=101// np é o número de pontos da varredura para análise de sensibilidade
centro=(np-1)/2 //é o centro da varredura, valor base igual a 100% da variável "x"
//DADOS INSUMOS E/OU PRODUTOS CONSTANTES NO SISTEMA DE REFERENCIA
//
carb_cana=127.58 //Carbono na cana em Kg/TC (Calculado)
carb_sacarose=0.4210 //Carbono na sacarose adimensional (Ferreira, 2006 - ISSN 1518-2932)
carb_torta=8.04 //Carbono na torta de filtro em% (Paranhos,1987; Vitti et al. ,2006)
carb_vinhaca=10.00 //Carbono na vinhaça em g/l (Marques, 2006)
carb_fibras=44.30 //Carbono nas fibras em % (Ferreira, 2006 - ISSN 1518-2932)
carb_etanol=0.4957 //Carbono no etanol hidratado adimensional (Calculado)
emis_diesel_kg=3.7 // é o fator de emissão do diesel em Kg CO2-equiv. por Kg de diesel
dens_diesel=0.85 //Densidade diesel em Kg/l (ANP, 2015)
emis_oleo_mj=0.07735 //é o fator de emissão de óleo combustível em kg CO2 por MJ óleo
dens_etanol=0.79 //Densidade etanol hidratado (95,1-96 GL) Kg/l (ANP, 2015)
dens_vinhaca=1.14 //Densidade vinhaça em kg/l
raz_co2carb=3.666 /// é a razão entre a massa do dióxido de carbono e carbono no CO2
efic_KVA=0.28 //Eficiência térmica Geração eletricidade valor adimensional (Souza e Azevedo, 2003 ISSN 1806-9479)
rad_sol=16.00//Radiação solar média anual região SP em MJ/m2.dia (Atlas Solar Brasileiro)
prod_etanol=88 //Produtividade etanol hidratado em litros por tonelada de cana
pot_n2o=265 // antigo 296 //Potencial de efeito estufa do óxido nitroso
bagaco_tc=270 //é a massa de bagaço umidade 50% por tonelada de cana
palha_tc=165 //é a massa de palha com umidade 15% por tonelada de cana
parc_palha=0.5 // é a parcela da palha retirada do campo e utilizada na indústria
bagaco_proces=235 // é a massa de bagaço utilizada para uso interno por tonelada de cana
bagaco_exced=bagaco_tc-bagaco_proces // é a massa de bagaço excedente para gerar eletricidade por tonelada de cana
diesel_tot=1.61 //é a quantidade em litros de diesel consumida nas operações agrícolas, colheita e transporte por tonelada de cana
diesel_oac=0.47*diesel_tot // é a quantidade de diesel consumida nas operações agrícolas e colheita por tonelada de cana (47%)

```

```

diesel_tr=0.53*diesel_tot // é a quantidade de diesel consumida no transporte da cana por tonelada de cana (53%)
prod_cana=70////////////////////////////////////
////////////////////////////////////
//tx_n_ha(3)=29.15
//tx_n_ha(3)=43.7
tx_n_ha=60//é a taxa de aplicação média anual por hectare em quilogramas do macronutriente N
////////////////////////////////////
//tx_n_ha(3)=72.9
//tx_n_ha(3)=87.45
tx_cal=0.65 // é a taxa anual de aplicação de cal por tonelada de cana
ene_n=61.45 //é a energia em MJ/kg para a produção do fertilizante N
tx_p_ha=36.7 //é a taxa de aplicação média anual por hectare em quilogramas do macronutriente P2O5
ene_p= 9.61 //é a energia em MJ/kg para a produção do fertilizante P2O5
tx_k_ha=100 //é a taxa de aplicação média anual por hectare em quilogramas do macronutriente K2O
ene_k=6.69 //é a energia em MJ/kg para a produção do fertilizante K2O
ene_calc=7.13 //é a energia em MJ/TC para aplicação do calcário
ene_herb=11.24 // é a energia em MJ/TC para a aplicação de herbicidas
ene_ins=0.794 // é a energia em MJ/TC para aplicação de inseticidas
ene_mud=5.88 // é a energia em MJ/TC para aplicação das mudas
ene_h2so4=3.093 // é a energia em MJ/TC para fabricação H2SO4
ene_soda=0.752 // é a energia em MJ/TC para fabricação soda
ene_lubr=0.711 // é a energia em MJ/TC para fabricação lubrificantes
ene_cal=1.254 // é a energia em MJ/TC para fabricação cal
ene_fme_ag=29.26 // é a energia em MJ/TC para fabricação/manutenção equipamentos agrícolas
ene_fmed=12.1 // é a energia em MJ/TC para fabricação/manutenção edifícios
ene_fmep=14.6 // é a energia em MJ/TC para equipamentos pesados indústria
ene_fmcl=16.7 // é a energia em MJ/TC para equipamentos leves indústria
rz_n_n=0.010// é a razão nitrogênio perdido nitrogênio utilizado na adubação
nitrogenada////////////////////////////////////
//
//EXERGIAS QUÍMICAS
//
Ex_1=6.34 //Ácido Fórmico em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_2=2.96 //Ácido Levulínico em MJ/kg (Calculado)
Ex_3=1.11 //Ácido Sulfúrico (H2SO4) em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_4=17.55 //Açúcar em MJ/kg (Ensinas, 2009)
Ex_5=0.05 //Água em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_6=21.58 //Algas secas em MJ/kg (Calculado)
Ex_bagaco=9.89 //Bagaço 50% umidade em MJ/kg (Kamate, 2009)
Ex_cal=0.72 //Cal Ca(OH)2 em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_calc=0.08 //Calcário CaCO3.MgCO3 em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_co2=0.45 //CO2 em MJ/kg (Szargut, 1988)

```

Ex_diesel=42.70 //exergia do diesel em MJ/kg (ANP, 2015)
Ex_etanol=27.64 //Etanol hidratado em MJ/kg (Palacios-Bereche, 2013)
Ex_k=4.40 //Fertilizante K2O em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_n=3.68 //Fertilizante NH4NO3 em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_p=2.91 //Fertilizante P2O5 em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_soda=0.18 //Hidróxido de sódio (NaOH) em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_amonia=19.9 //Amônia NH3 em MJ/kg (Szargut, 1988)
Ex_palha=12.97 //Palha (umidade 15%) em MJ/kg (xxx)

//

//POSIÇÃO VETORES ANALIZADOS QUANTO À EXERGIA E ÀS EMISSÕES

//

//1 - Sol

//2 - Captura CO2 pela cana

//3 - Captura CO2 pela palha

//4 - Consumo energia elétrica-térmica

//5 - Etanol

//6 - Bagaço para caldeira 1

//7 - Bagaço para caldeira 2

//8 - Palha para caldeira

//9 - Palha solo

//10 - CO2 bagaço-palha caldeira

//11 - Energia elétrica

//12 - CO2 fermentação

//13 - Operação agrícola e colheita

//14 - Transporte

//15 - Fertilizante N

//16 - Fertilizante P2O5

//17 - Fertilizante K2O

//18 - Calcário

//19 - Herbicidas

//20 - Inseticidas

//21 - Mudas

//22 - Ácido sulfúrico

//23 - Soda

//24 - Lubrificantes

//25 - Cal

//26 - Fabricação/manutenção equipamentos agric.

//27 - Fabricação/manutenção edifícios

//28 - Equipamentos pesados indústria

//29 - Equipamentos leves indústria

//30 - Emissões não CO2 - N2O solo adubação

```

//
// CÁLCULO DAS EXERGIAS DE INSUMOS OU PRODUTOS ENERGÉTICOS (MJ/ha)
//
// Exergia da radiação solar
X_ene(1)=-10000*365*0.9*rad_sol//ciclo de 365 dias em 10.000 metros quadrados = 1 hectare (0.9 é o fator de
qualidade )
X_ene(2)=0 // é a exergia do CO2 capturado pela cana na fotossintese (=0, não energético)
X_ene(3)=0 // é a exergia do CO2 capturado pela palha na fotossintese (não energético)
X_ene(4)= 0 // é o consumo de energia elétrica/térmica na usina (autosuficiente)
X_ene(5)=prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol // é a exergia do etanol produzido por hectare
X_ene(6)= prod_cana*bagaco_proces*Ex_bagaco //é a exergia do bagaço de uso interno
X_ene(7)= prod_cana*bagaco_exced*Ex_bagaco //é a exergia do bagaço excedente
X_ene(8)=0
X_ene(9)=0
X_ene(10)=0
X_ene(11)=0
X_ene(12)=0
X_ene(13)= -diesel_oac*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel
X_ene(14)= -diesel_tr*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel
X_ene(15)= -tx_n_ha*ene_n
X_ene(16)= -tx_p_ha*ene_p
X_ene(17)= -tx_k_ha*ene_k
X_ene(18)= -ene_calc*prod_cana
X_ene(19)= -ene_herb*prod_cana
X_ene(20)= -ene_ins*prod_cana
X_ene(21)= -ene_mud*prod_cana
X_ene(22)= -ene_h2so4*prod_cana
X_ene(23)= -ene_soda*prod_cana
X_ene(24)= -ene_lubr*prod_cana
X_ene(25)= -ene_cal*prod_cana
X_ene(26)= -ene_fme_ag*prod_cana
X_ene(27)= -ene_fmep*prod_cana
X_ene(28)= -ene_fmep*prod_cana
X_ene(29)= -ene_fmep*prod_cana
X_ene(30)=0
//
// CÁLCULO DAS EXERGIAS ACUMULADAS = INSUMOS/PRODUTOS ENERGÉTICOS + MATÉRIA PRIMA BAIXA EXERGIA
(QUÍMICA)
//
X_cum(1)=-10000*365*0.9*rad_sol//365 dias 10.000 metros quadrados = 1 hectares
X_cum(2)= -prod_cana*raz_co2carb*carb_cana*Ex_co2 // é a exergia do CO2 capturado pela cana na fotossintese (não
energético)

```

$X_{cum}(3)=0$ // é a exergia do CO2 capturado pela palha na fotossíntese (não energético)
 $X_{cum}(4)= 0+0$ // é o consumo de energia elétrica/térmica na usina (autosuficiente)
 $X_{cum}(5)=prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol + 0$ // é a exergia do etanol produzido por hectare
 $X_{cum}(6)= prod_cana*bagaco_proces*Ex_bagaco + 0$ // é a exergia do bagaço de uso interno
 $X_{cum}(7)= prod_cana*bagaco_exced*Ex_bagaco + 0$ // é a exergia do bagaço excedente
 $X_{cum}(8)=palha_tc*parc_palha*prod_cana*Ex_palha$
 $X_{cum}(9)=0 + 0$ // exergia da palha no solo é perdida
 $X_{cum}(10)=0 +$
 $raz_co2carb*(0.5*0.488*prod_cana*bagaco_proces+0.5*prod_cana*bagaco_exced+0.5*prod_cana*palha_tc*parc_palha)$
 $*Ex_co2$ //CO2 bagaço-palha caldeira
 $X_{cum}(11)=0 + efic_KVA*palha_tc*parc_palha*Ex_palha*prod_cana$
 $X_{cum}(12)=0 + (88/92)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_co2$
 $X_{cum}(13)= -diesel_oac*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel + 0$
 $X_{cum}(14)= -diesel_tr*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel + 0$
 $X_{cum}(15)= -(tx_n_ha*ene_n + tx_n_ha*80/28*Ex_n)$ // considerar amonia com taxa de 1,366 kg/ha vezes exergia amonia
 $X_{cum}(16)= -(tx_p_ha*ene_p + tx_p_ha*Ex_p)$
 $X_{cum}(17)= -(tx_k_ha*ene_k + tx_k_ha*Ex_k)$
 $X_{cum}(18)= -(ene_calc*prod_cana + 7.13*prod_cana*Ex_calc)$
 $X_{cum}(19)= -ene_herb*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(20)= -ene_ins*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(21)= -ene_mud*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(22)= -(ene_h2so4*prod_cana + 0.07708*prod_cana)$
 $X_{cum}(23)= -(ene_soda*prod_cana + prod_cana*0.6*Ex_soda)$
 $X_{cum}(24)= -(ene_lubr*prod_cana + 0.01337*prod_cana*Ex_diesel)$
 $X_{cum}(25)= -(ene_cal*prod_cana + tx_cal*prod_cana*Ex_cal)$
 $X_{cum}(26)= -ene_fme_ag*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(27)= -ene_fmed*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(28)= -ene_fmep*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(29)= -ene_fme1*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(30)=0 + 0$ // irrelevante, próxima de zero
//
// CÁLCULO DAS EMISSÕES ASSOCIADAS (CO2 equivalente por hectare)
//
 $Emis(1)= 0$
 $Emis(2)= 0$
 $Emis(3)= 0$
 $Emis(4)= 0$
 $Emis(5)= raz_co2carb*prod_cana*prod_etanol*dens_etanol*carb_etanol$
 $Emis(6)= (raz_co2carb*prod_cana*prod_etanol*dens_etanol*carb_etanol)/3$
 $Emis(7)= 0$
 $Emis(8)= 0$


```

Emis(9)= 0
Emis(10)= 0
Emis(11)= 0
Emis(12)= 0
Emis(13)= diesel_oac*emis_diesel_kg*prod_cana
Emis(14)= diesel_tr*emis_diesel_kg*prod_cana
Emis(15)= tx_n_ha*ene_n*emis_oleo_mj // 1,5% perda; (massa molécula)/(massa nitrogênio)
Emis(16)= tx_p_ha*ene_p*emis_oleo_mj // A4+figura 2
Emis(17)= tx_k_ha*ene_k*emis_oleo_mj // A4+figura 2
Emis(18)= ene_calc*prod_cana*emis_oleo_mj// A5+figura 2
Emis(19)= ene_herb*prod_cana*emis_oleo_mj // A5+figura 2
Emis(20)= ene_ins*prod_cana*emis_oleo_mj // A5+figura 2
Emis(21)= ene_mud*prod_cana*emis_oleo_mj // A6+figura 2
Emis(22)= ene_h2so4*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(23)= ene_soda*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(24)= ene_lubr*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(25)= ene_cal*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(26)= ene_fme_ag*prod_cana*emis_oleo_mj//2.3*prod_cana // A7 figura 2 PIMENTEL
Emis(27)= ene_fmed*prod_cana*emis_oleo_mj // A10 figura 2
Emis(28)= ene_fmep*prod_cana*emis_oleo_mj // A10 figura 2
Emis(29)= ene_fmcl*prod_cana*emis_oleo_mj // A10 figura 2
Emis(30)= tx_n_ha*rz_n_n*44/28*pot_n2o //nota 5 página 35
//
// CÁLCULO DOS RESULTADOS PRINCIPAIS SEM VARREDURA
//
//CONTABILIZAÇÃO EXERGIAS E EMISSÕES
//
//JÁ EXISTE MAIS À FRENTE
//
CEENE =abs(sum(X_cum(1:4)+sum(X_cum(10:29))))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // em MJ/MJ
etanol
efic_CEENE=abs((X_cum(5)+sum(X_cum(10:12)))/(sum(X_cum(1:3))+sum(X_cum(13:29)))) // adimensional
ExB=abs((X_ene(5)+X_ene(7))/sum(X_ene(13:29))) // adimensional
Emis_tot=1000*sum(Emis(13:30))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // em gramas CO2-equiv./MJ
etanol
//
Emis_UF=1000*Emis/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)//// em gramas CO2-equiv./MJ etanol
X_cum_UF=X_cum/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)// em MJ/MJ etanol
y0=[CEENE,efic_CEENE,ExB,Emis_tot]
//bar(x4B,y0)
ratio_Ex_GHG=CEENE/Emis_tot//é a razão entre a exergia CEENE e as emissões
//

```

// CÁLCULO DAS EXERGIAS DE INSUMOS OU PRODUTOS ENERGÉTICOS

//

// Exergia da radiação solar por hectare

//X_ene=[1,2,2,2,2]

X_ene(1)=-10000*365*0.9*rad_sol//ciclo de 365 dias em 10.000 metros quadrados = 1 hectare

X_ene(2)=0 // é a exergia do CO2 capturado pela cana na fotossíntese (=0, não energético)

X_ene(3)=0 // é a exergia do CO2 capturado pela palha na fotossíntese (não energético)

X_ene(4)=0 // é o consumo de energia elétrica/térmica na usina (autosuficiente)

X_ene(5)=prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol // é a exergia do etanol produzido por hectare

X_ene(6)= prod_cana*bagaco_proces*Ex_bagaco //é a exergia do bagaço de uso interno

X_ene(7)= prod_cana*bagaco_exced*Ex_bagaco //é a exergia do bagaço excedente

X_ene(8)=0

X_ene(9)=0

X_ene(10)=0

X_ene(11)=0

X_ene(12)=0

X_ene(13)= -diesel_oac*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel

X_ene(14)= -diesel_tr*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel

X_ene(15)= -tx_n_ha*ene_n

X_ene(16)= -tx_p_ha*ene_p

X_ene(17)= -tx_k_ha*ene_k

X_ene(18)= -ene_calc*prod_cana

X_ene(19)= -ene_herb*prod_cana

X_ene(20)= -ene_ins*prod_cana

X_ene(21)= -ene_mud*prod_cana

X_ene(22)= -ene_h2so4*prod_cana

X_ene(23)= -ene_soda*prod_cana

X_ene(24)= -ene_lubr*prod_cana

X_ene(25)= -ene_cal*prod_cana

X_ene(26)= -ene_fme_ag*prod_cana

X_ene(27)= -ene_fmep*prod_cana

X_ene(28)= -ene_fmep*prod_cana

X_ene(29)= -ene_fmep*prod_cana

X_ene(30)=0

//

// CÁLCULO DAS EXERGIAS ACUMULADAS = INSUMOS/PRODUTOS ENERGÉTICOS + MATÉRIA PRIMA NÃO ENERGÉTICA

//

// Exergia da radiação solar por hectare

//

X_cum(1)=-10000*365*0.9*rad_sol//365 dias 10.000 metros quadrados = 1 hectare, 0.9 é fator de qualidade

X_cum(2)= -prod_cana*raz_co2carb*carb_cana*Ex_co2 // é a exergia do CO2 capturado pela cana na fotossíntese (não energético)

$X_{cum}(3)=0$ // é a exergia do CO2 capturado pela palha na fotossíntese (não energético)
 $X_{cum}(4)= 0+0$ // é o consumo de energia elétrica/térmica na usina (autosuficiente)
 $X_{cum}(5)=prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol + 0$ // é a exergia do etanol produzido por hectare
 $X_{cum}(6)= prod_cana*bagaco_proces*Ex_bagaco + 0$ //é a exergia do bagaço de uso interno
 $X_{cum}(7)= prod_cana*bagaco_exced*Ex_bagaco + 0$ //é a exergia do bagaço excedente
 $X_{cum}(8)=palha_tc*parc_palha*prod_cana*Ex_palha$
 $X_{cum}(9)=0 + 0$ // exergia da palha no solo é perdida
 $X_{cum}(10)=0 +$
 $raz_co2carb*(0.5*0.488*prod_cana*bagaco_proces+0.5*prod_cana*bagaco_exced+0.5*prod_cana*palha_tc*parc_palha)$
 $*Ex_co2$ //CO2 bagaço-palha caldeira
 $X_{cum}(11)=0 + efic_KVA*palha_tc*parc_palha*Ex_palha*prod_cana$
 $X_{cum}(12)=0 + (88/92)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_co2$
 $X_{cum}(13)= -diesel_oac*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel + 0$
 $X_{cum}(14)= -diesel_tr*dens_diesel*prod_cana*Ex_diesel + 0$
 $X_{cum}(15)= -(tx_n_ha*ene_n + tx_n_ha*80/28*Ex_n)$ // considerar amonia com taxa de 1,366 kg/ha vezes exergia amonia
 $X_{cum}(16)= -(tx_p_ha*ene_p + tx_p_ha*Ex_p)$
 $X_{cum}(17)= -(tx_k_ha*ene_k + tx_k_ha*Ex_k)$
 $X_{cum}(18)= -(ene_calc*prod_cana + 7.13*prod_cana*Ex_calc)$
 $X_{cum}(19)= -ene_herb*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(20)= -ene_ins*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(21)= -ene_mud*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(22)= -(ene_h2so4*prod_cana + 0.07708*prod_cana)$
 $X_{cum}(23)= -(ene_soda*prod_cana + prod_cana*0.6*Ex_soda)$
 $X_{cum}(24)= -(ene_lubr*prod_cana + 0.01337*prod_cana*Ex_diesel)$
 $X_{cum}(25)= -(ene_cal*prod_cana + tx_cal*prod_cana*Ex_cal)$ //
 $X_{cum}(26)= -ene_fme_ag*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(27)= -ene_fmed*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(28)= -ene_fmep*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(29)= -ene_fmed*prod_cana + 0$
 $X_{cum}(30)=0 + 0$ // irrelevante, próxima de zero
//
// CÁLCULO DAS EMISSÕES ASSOCIADAS (CO2 equivalente por hectare)
//
 $Emis(1)= 0$
 $Emis(2)= 0$
 $Emis(3)= 0$
 $Emis(4)= 0$
 $Emis(5)= raz_co2carb*prod_cana*prod_etanol*dens_etanol*carb_etanol$
 $Emis(6)= 0$
 $Emis(7)= 0$
 $Emis(8)= 0$

```

Emis(9)= 0
Emis(10)= 0
Emis(11)= 0
Emis(12)= 0
Emis(13)= diesel_oac*emis_diesel_kg*prod_cana
Emis(14)= diesel_tr*emis_diesel_kg*prod_cana
Emis(15)= tx_n_ha*ene_n*emis_oleo_mj // 1,5% perda; (massa molécula)/(massa nitrogênio)
Emis(16)= tx_p_ha*ene_p*emis_oleo_mj // A4+figura 2 ene_p =9,61
Emis(17)= tx_k_ha*ene_k*emis_oleo_mj // A4+figura 2
Emis(18)= ene_calc*prod_cana*emis_oleo_mj// A5+figura 2
Emis(19)= ene_herb*prod_cana*emis_oleo_mj // A5+figura 2
Emis(20)= ene_ins*prod_cana*emis_oleo_mj // A5+figura 2
Emis(21)= ene_mud*prod_cana*emis_oleo_mj // A6+figura 2
Emis(22)= ene_h2so4*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(23)= ene_soda*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(24)= ene_lubr*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(25)= ene_cal*prod_cana*emis_oleo_mj // tab. 16 / figura 2
Emis(26)= ene_fme_ag*prod_cana*emis_oleo_mj//2.3*prod_cana // A7 figura 2 PIMENTEL
Emis(27)= ene_fmed*prod_cana*emis_oleo_mj // A10 figura 2
Emis(28)= ene_fmep*prod_cana*emis_oleo_mj // A10 figura 2
Emis(29)= ene_fmeh*prod_cana*emis_oleo_mj // A10 figura 2
Emis(30)= tx_n_ha*rz_n_n*44/28*pot_n2o //nota 5 página 35
Emis(31)= 6.6*prod_cana*parc_palha*palha_tc/101 // IPCC tabela 22
Emis(32)= 2.4*prod_cana*parc_palha*palha_tc/101 // IPCC após tabela 22
//
// CÁLCULO DOS RESULTADOS PRINCIPAIS SEM VARREDURA
//
//GERANDO O VETOR PARA GRÁFICO DE BARRAS
//
x1b=[1]
x2b=[1,2]
x3b=[1,2,3]
x4b=[1,2,3,4]
x5b=[1,2,3,4,5]
//
CEENE=abs(sum(X_cum(1:4))+sum(X_cum(10:29)))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // em MJ/MJ
etanol
efic_CEENE=abs((X_cum(5)+sum(X_cum(10:12)))/(sum(X_cum(1:3))+sum(X_cum(13:29)))) // adimensional
ExB=abs((X_ene(5)+X_ene(7))/sum(X_ene(13:29))) // adimensional
Emis_tot=1000*sum(Emis(13:30))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // em gramas de CO2-equiv./MJ
etanol
y0=[CEENE,efic_CEENE,ExB,Emis_tot]

```

```

//bar(x4B,y0)//para plotagem resultado na forma de barras
ratio_Ex_GHG=CEENE/Emis_tot//é o vetor que relaciona a exigia CEENE com as emissões
//
// GERANDO RESULTADOS COMPORTAMENTO EXERGIAS E EMISSÕES COM VARREDURA DE 7 VARIÁVEIS entre 0 e
200%
// PARA AS EXERGIAS: CEENE, eficiência CEENE, BREEDING (ExB) e EMISSÕES
// PARA AS VARIÁVEIS:
// 1-Produtividade da cana
// 2-Adubação nitrogenada
// 3-Emissões de n2O no solo
// 4-Produção de etanol
// 5-CO2 fermentação
// 6-Consumo diesel
// 7-KVA excedente
//
// 1 - PRODUTIVIDADE DE CANA
for k=1:np
    for m=1:np-1
        //Gerando eixo "x" (principal) e "xd" (derivada) ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
        //x(k)=2*k/(np+1)-1
        x(k)=k/(np+1)+0.5
        //xd(m)=2*m/(np)-1
        xd(m)=m/(np)+0.5
    end
    //var(k)=2*k/(np+1)
    var(k)=k/(np+1)+0.5
    for i=1:32
        if (i==5) | (i==14) | (i==22) | (i==23) | (i==24) | (i==25)
            X_ene_prod(i,k)=X_ene(i)*var(k)
            X_cum_prod(i,k)=X_cum(i)*var(k)
            Emis_prod(i,k)=Emis(i)*var(k)
        else
            X_ene_prod(i,k)=X_ene(i)
            X_cum_prod(i,k)=X_cum(i)
            Emis_prod(i,k)=Emis(i)
        end
    end
    CEENE_prod(k)
    =abs(sum(X_cum_prod(1:4,k)+sum(X_cum_prod(10:29,k))))/(var(k)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)
    // MJ/MJ etanol
    efic_CEENE_prod(k)=abs((X_cum_prod(5,k)+sum(X_cum_prod(10:12,k)))/(sum(X_cum_prod(1:3,k))+sum(X_cum_pro
d(13:29,k)))) // adimensional
    ExB_prod(k)=abs((X_ene_prod(5,k)+X_ene_prod(7,k))/sum(X_ene_prod(13:29,k))) // adimensional

```

```

Emis_tot_prod(k)=1000*sum(Emis_prod(13:30,k)/(var(k)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)) // g CO2-
equiv./MJ etanol
end
//
// 2 - ADUBAÇÃO NITRIGENADA
for k=1:np
//Gerando eixo "x" ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
x(k)=k/(np+1)+0.5
var(k)=k/(np+1)+0.5
    for i=1:32
        if i==15
            X_ene_nh3(i,k)=X_ene(i)*var(k)
            X_cum_nh3(i,k)=X_cum(i)*var(k)
            Emis_nh3(i,k)=Emis(i)*var(k)
        else
            X_ene_nh3(i,k)=X_ene(i)
            X_cum_nh3(i,k)=X_cum(i)
            Emis_nh3(i,k)=Emis(i)
        end
    end
CEENE_nh3(k)
=abs(sum(X_cum_nh3(1:4,k)+sum(X_cum_nh3(10:29,k))))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // MJ/MJ
etanol
efic_CEENE_nh3(k)=abs((X_cum_nh3(5,k)+sum(X_cum_nh3(10:12,k)))/(sum(X_cum_nh3(1:3,k))+sum(X_cum_nh3(13:
29,k)))) // adimensional
ExB_nh3(k)=abs((X_ene_nh3(5,k)+X_ene_nh3(7,k))/sum(X_ene_nh3(13:29,k))) // adimensional
Emis_tot_nh3(k)=1000*sum(Emis_nh3(13:30,k)/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)) // g CO2-equiv./MJ
etanol
end
//
// 3 - EMISSÕES N2O SOLO
for k=1:np
//Gerando eixo "x" ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
x(k)=k/(np+1)+0.5
var(k)=k/(np+1)+0.5
    for i=1:32
        if i==30
            X_ene_n2o(i,k)=X_ene(i)*var(k)
            X_cum_n2o(i,k)=X_cum(i)*var(k)
            Emis_n2o(i,k)=Emis(i)*var(k)
        else
            X_ene_n2o(i,k)=X_ene(i)
            X_cum_n2o(i,k)=X_cum(i)
        end
    end
end

```

```

    Emis_n2o(i,k)=Emis(i)
end
end
CEENE_n2o(k)
=abs(sum(X_cum_n2o(1:4,k)+sum(X_cum_n2o(10:29,k))))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // MJ/MJ
etanol
efic_CEENE_n2o(k)=abs((X_cum_n2o(5,k)+sum(X_cum_n2o(10:12,k)))/(sum(X_cum_n2o(1:3,k))+sum(X_cum_n2o(13:
29,k)))) // adimensional
ExB_n2o(k)=abs((X_ene_n2o(5,k)+X_ene_n2o(7,k))/sum(X_ene_n2o(13:29,k))) // adimensional
Emis_tot_n2o(k)=1000*sum(Emis_n2o(13:30,k))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // g CO2-equiv./MJ
etanol
end
//
// 4 - PRODUÇÃO DE ETANOL
for k=1:np
//Gerando eixo "x" ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
x(k)=k/(np+1)+0.5
var(k)=k/(np+1)+0.5
    for i=1:32
        if i==5
            X_ene_etanol(i,k)=X_ene(i)*var(k)
            X_cum_etanol(i,k)=X_cum(i)*var(k)
            Emis_etanol(i,k)=Emis(i)*var(k)
        else
            X_ene_etanol(i,k)=X_ene(i)
            X_cum_etanol(i,k)=X_cum(i)
            Emis_etanol(i,k)=Emis(i)
        end
    end
CEENE_etanol(k)
=abs(sum(X_cum_etanol(1:4,k)+sum(X_cum_etanol(10:29,k))))/(var(k)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // MJ/MJ etanol // OBSERVAR QUESTÃO DA DIVISÃO PRODUÇÃO ETANOL
efic_CEENE_etanol(k)=abs((X_cum_etanol(5,k)+sum(X_cum_etanol(10:12,k)))/(sum(X_cum_etanol(1:3,k))+sum(X_cum_
etanol(13:29,k)))) // adimensional
ExB_etanol(k)=abs((X_ene_etanol(5,k)+X_ene_etanol(7,k))/sum(X_ene_etanol(13:29,k))) // adimensional
Emis_tot_etanol(k)=1000*sum(Emis_etanol(13:30,k))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // g CO2-
equiv./MJ etanol
end
//
// 5 - CO2 FERMENTAÇÃO
for k=1:np
//Gerando eixo "x" ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
x(k)=k/(np+1)+0.5
var(k)=k/(np+1)+0.5

```

```

for i=1:32
if i==12
X_ene_ferm(i,k)=X_ene(i)*var(k)
X_cum_ferm(i,k)=X_cum(i)*var(k)

Emis_ferm(i,k)=Emis(i)*var(k)
else
X_ene_ferm(i,k)=X_ene(i)
X_cum_ferm(i,k)=X_cum(i)
Emis_ferm(i,k)=Emis(i)
end
end

CEENE_ferm(k)
=abs(sum(X_cum_ferm(1:4,k)+sum(X_cum_ferm(10:29,k))))/(var(k)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)
// MJ/MJ etanol //  OBSERVAR QUESTÃO DA DIVISÃO PRODUÇÃO ETANOL
efic_CEENE_ferm(k)=abs((X_cum_ferm(5,k)+sum(X_cum_ferm(10:12,k)))/(sum(X_cum_ferm(1:3,k))+sum(X_cum_ferm(13:29,k)))) // adimensional
ExB_ferm(k)=abs((X_ene_ferm(5,k)+X_ene_ferm(7,k))/sum(X_ene_ferm(13:29,k))) // adimensional
Emis_tot_ferm(k)=1000*sum(Emis_ferm(13:30,k))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // g CO2-
equiv./MJ etanol
end
//
// 6 - CONSUMO DIESEL
for k=1:np
//Gerando eixo "x" ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
x(k)=k/(np+1)+0.5
//Coeficiente a ser aplicado ao valor base do vetor, variando de 0 a 200%
var(k)=k/(np+1)+0.5
for i=1:32
if (i==13) | (i==14)
X_ene_diesel(i,k)=X_ene(i)*var(k)
X_cum_diesel(i,k)=X_cum(i)*var(k)
emis_diesel_kg(i,k)=Emis(i)*var(k)
else
X_ene_diesel(i,k)=X_ene(i)
X_cum_diesel(i,k)=X_cum(i)
emis_diesel_kg(i,k)=Emis(i)
end
end

CEENE_diesel(k)
=abs(sum(X_cum_diesel(1:4,k)+sum(X_cum_diesel(10:29,k))))/(var(k)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol)
// MJ/MJ etanol //
efic_CEENE_diesel(k)=abs((X_cum_diesel(5,k)+sum(X_cum_diesel(10:12,k)))/(sum(X_cum_diesel(1:3,k))+sum(X_cum_diesel(13:29,k)))) // adimensional

```



```

ExB_diesel(k)=abs((X_ene_diesel(5,k)+X_ene_diesel(7,k))/sum(X_ene_diesel(13:29,k))) // adimensional
Emis_tot_diesel(k)=1000*sum(emis_diesel_kg(13:30,k))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // g CO2-
equiv./MJ etanol
end
//
// 7 - KVA EXCEDENTE
for k=1:np
//Gerando eixo "x" ao variar o valor base e o incremento da varredura de 0 a 200%
x(k)=k/(np+1)+0.5
var(k)=k/(np+1)+0.5
    for i=1:32
        if (i==13) or (i==14)
            X_ene_kva_rede(i,k)=X_ene(i)*var(k)
            X_cum_kva_rede(i,k)=X_cum(i)*var(k)
            Emis_kva_rede(i,k)=Emis(i)*var(k)
        else
            X_ene_kva_rede(i,k)=X_ene(i)
            X_cum_kva_rede(i,k)=X_cum(i)
            Emis_kva_rede(i,k)=Emis(i)
        end
    end
CEENE_kva_rede(k)
=abs(sum(X_cum_kva_rede(1:4,k)+sum(X_cum_kva_rede(10:29,k))))/(var(k)*prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_
etanol) // MJ/MJ etanol //  OBSERVAR QUESTÃO DA DIVISÃO PRODUÇÃO ETANOL
efic_CEENE_kva_rede(k)=abs((X_cum_kva_rede(5,k)+sum(X_cum_kva_rede(10:12,k)))/(sum(X_cum_kva_rede(1:3,k))+
sum(X_cum_kva_rede(13:29,k)))) // adimensional
ExB_kva_rede(k)=abs((X_ene_kva_rede(5,k)+X_ene_kva_rede(7,k))/sum(X_ene_kva_rede(13:29,k))) // adimensional
Emis_tot_kva_rede(k)=1000*sum(Emis_kva_rede(13:30,k))/(prod_etanol*dens_etanol*prod_cana*Ex_etanol) // g CO2-
equiv./MJ etanol
end
//
// IRREVERSIBILIDADES CEENE PARA AS 7 VARIÁVEIS
//plot(x,CEENE_prod,x,CEENE_nh3,x,CEENE_n2o,x,CEENE_etanol,x,CEENE_ferm,x,CEENE_diesel,x,CEENE_kva_rede);legen
d("produtividade cana","adubação nitrogenada","Emissões N2O solo","produção etanol","CO2 fermentação","diesel","KVA
excedente");xlabel("Variação do valor base");ylabel("CEENE - irreversibilidades");//*****para todos os variantes
//plot(x,CEENE_prod,x,CEENE_nh3);legend("cane productivity","fertilizer N");xlabel("base value
behavior");ylabel("CEENE (MJ/MJ ethanol)");// somente 3
//plot(x,CEENE_prod,x,CEENE_n2o);legend("cane productivity","N2O emissions");xlabel("base value
behavior");ylabel("CEENE (MJ/MJ ethanol)");// somente 3
//portugues
//plot(x,CEENE_prod,x,CEENE_n2o);legend("produtividade cana","emissões N2O");xlabel("comportamento no valor
base");ylabel("CEENE (MJ/MJ ethanol)")
//SENSIBILIDADE NO VALOR BASE
s_CEENE_prod=(CEENE_prod(centro+1)-CEENE_prod(centro))/(CEENE_prod(centro)/(np-1))/2
s_CEENE_nh3=(CEENE_nh3(centro+1)-CEENE_nh3(centro))/(CEENE_nh3(centro)/(np-1))/2

```

```

s_CEENE_n2o=(CEENE_n2o(centro+1)-CEENE_n2o(centro))/(CEENE_n2o(centro)/(np-1))/2
s_CEENE_etanol=(CEENE_etanol(centro+1)-CEENE_etanol(centro))/(CEENE_etanol(centro)/(np-1))/2
//s_CEENE_ferm=(CEENE_ferm(centro+1)-CEENE_ferm(centro))/(CEENE_ferm(centro)/(np-1))/2
s_CEENE_diesel=(CEENE_diesel(centro+1)-CEENE_diesel(centro))/(CEENE_diesel(centro)/(np-1))/2
//s_CEENE_kva_rede=(CEENE_kva_rede(centro+1)-CEENE_kva_rede(centro))/(CEENE_kva_rede(centro)/(np-1))/2
//sy=[s_CEENE_prod,s_CEENE_n2o]
//bar(x2b,sy)

// EFICIÊNCIA CEENE PARA 7 VARIÁVEIS
//plot(x,efic_CEENE_prod,x,efic_CEENE_nh3,x,efic_CEENE_n2o,x,efic_CEENE_etanol,x,efic_CEENE_ferm,x,efic_CEENE_diesel
,x,efic_CEENE_kva_rede);legend("produtividade cana","adubação nitrogenada","Emissões N2O solo","produção
etanol","CO2 fermentação","diesel","KVA excedente");xlabel("Variação do valor base");ylabel("Eficiência CEENE");
//plot(x,efic_CEENE_prod,x,efic_CEENE_n2o);legend("produtividade cana","emissões N2O");xlabel("comportamento no
valor base");ylabel("eficiência CEENE (adimensional)")
// SENSIBILIDADE NO VALOR BASE
s_efic_CEENE_prod=(efic_CEENE_prod(centro+1)-efic_CEENE_prod(centro))/(efic_CEENE_prod(centro)/(np-1))/2
s_efic_CEENE_nh3=(efic_CEENE_nh3(centro+1)-efic_CEENE_nh3(centro))/(efic_CEENE_nh3(centro)/(np-1))/2
s_efic_CEENE_n2o=(efic_CEENE_n2o(centro+1)-efic_CEENE_n2o(centro))/(efic_CEENE_n2o(centro)/(np-1))/2
s_efic_CEENE_etanol=(efic_CEENE_etanol(centro+1)-efic_CEENE_etanol(centro))/(efic_CEENE_etanol(centro)/(np-
1))/2
//s_efic_CEENE_ferm=(efic_CEENE_ferm(centro+1)-efic_CEENE_ferm(centro))/(efic_CEENE_ferm(centro)/(np-1))/2
s_efic_CEENE_diesel=(efic_CEENE_diesel(centro+1)-efic_CEENE_diesel(centro))/(efic_CEENE_diesel(centro)/(np-
1))/2
//s_efic_CEENE_kva_rede=(efic_CEENE_kva_rede(centro+1)-
efic_CEENE_kva_rede(centro))/(efic_CEENE_kva_rede(centro)/(np-1))/2
//bar(x7b,y2)
//
// EFICIÊNCIA BREEDING PARA 7 VARIÁVEIS
//plot(x,ExB_prod,x,ExB_nh3,x,ExB_n2o,x,ExB_etanol,x,ExB_ferm,x,ExB_diesel,x,ExB_kva_rede);legend("produtividade
cana","adubação nitrogenada","Emissões N2O solo","produção etanol","CO2 fermentação","diesel","KVA
excedente");xlabel("Variação do valor base");ylabel("Eficiência Breeding");
//plot(x,ExB_prod,x,ExB_n2o);legend("produtividade cana","emissões N2O");xlabel("comportamento no valor
base");ylabel("ExB (adimensional)")
//
s_ExB_prod=(ExB_prod(centro+1)-ExB_prod(centro))/(ExB_prod(centro)/(np-1))/2
s_ExB_nh3=(ExB_nh3(centro+1)-ExB_nh3(centro))/(ExB_nh3(centro)/(np-1))/2
s_ExB_n2o=(ExB_n2o(centro+1)-ExB_n2o(centro))/(ExB_n2o(centro)/(np-1))/2
s_ExB_etanol=(ExB_etanol(centro+1)-ExB_etanol(centro))/(ExB_etanol(centro)/(np-1))/2
//s_ExB_ferm=(ExB_ferm(centro+1)-ExB_ferm(centro))/(ExB_ferm(centro)/(np-1))/2
s_ExB_diesel=(ExB_diesel(centro+1)-ExB_diesel(centro))/(ExB_diesel(centro)/(np-1))/2
//s_ExB_kva_rede=(ExB_kva_rede(centro+1)-ExB_kva_rede(centro))/(ExB_kva_rede(centro)/(np-1))/2
//bar(x7b,y3)
//
// EMISSÕES PARA 7 VARIÁVEIS

```

```

//plot(x,Emis_tot_prod,x,Emis_tot_nh3,x,Emis_tot_n2o,x,Emis_tot_etanol,x,Emis_tot_ferm,x,Emis_tot_diesel,x,Emis_tot_kva_rede);legend("produtividade cana","adubação nitrogenada","Emissões N2O solo","produção etanol","CO2 fermentação","diesel","KVA excedente");xlabel("Variação do valor base");ylabel("Emissões");

//plot(x,Emis_tot_prod,x,Emis_tot_nh3);legend("cane productivity","fertilizer N");xlabel("base value behavior");ylabel("GHG emissions (g CO2/MJ ethanol)");

//plot(x,Emis_tot_prod,x,Emis_tot_n2o);legend("cane productivity","N2O emissions");xlabel("base value behavior");ylabel("GHG emissions (g CO2/MJ ethanol)");

//portugues

//plot(x,Emis_tot_prod,x,Emis_tot_n2o);legend("produtividade cana","emissões N2O");xlabel("comportamento valor base");ylabel("emissões GEE (g CO2/MJ ethanol)");

//

//SENSIBILIDADE NO VALOR BASE

s_Emis_tot_prod=(Emis_tot_prod(centro+1)-Emis_tot_prod(centro))/(Emis_tot_prod(centro)/(np-1))/2
s_Emis_tot_nh3=(Emis_tot_nh3(centro+1)-Emis_tot_nh3(centro))/(Emis_tot_nh3(centro)/(np-1))/2
s_Emis_tot_n2o=(Emis_tot_n2o(centro+1)-Emis_tot_n2o(centro))/(Emis_tot_n2o(centro)/(np-1))/2
s_Emis_tot_etanol=(Emis_tot_etanol(centro+1)-Emis_tot_etanol(centro))/(Emis_tot_etanol(centro)/(np-1))/2
//s_Emis_tot_ferm=(Emis_tot_ferm(centro+1)-Emis_tot_ferm(centro))/(Emis_tot_ferm(centro)/(np-1))/2
s_Emis_tot_diesel=(Emis_tot_diesel(centro+1)-Emis_tot_diesel(centro))/(Emis_tot_diesel(centro)/(np-1))/2
//s_Emis_tot_kva_rede=(Emis_tot_kva_rede(centro+1)-Emis_tot_kva_rede(centro))/(Emis_tot_kva_rede(centro)/(np-1))/2
//y4=[s_Emis_tot_prod,s_Emis_tot_nh3]
//bar (x2b,y4)

//

// RAZÃO EXERGIA-EMISSÕES PARA 7 VARIÁVEIS

//

s_ratio_prod=s_CEENE_prod/s_Emis_tot_prod
//s_ratio_nh3=s_CEENE_nh3/s_Emis_tot_nh3
s_ratio_n2o=s_CEENE_n2o/s_Emis_tot_n2o
//s_ratio_etanol=s_CEENE_etanol/s_Emis_tot_etanol
//s_ratio_ferm=s_CEENE_ferm/s_Emis_tot_ferm
//s_ratio_diesel=s_CEENE_diesel/s_Emis_tot_diesel
//s_ratio_kva_rede=s_CEENE_kva_rede/s_Emis_tot_kva_rede

//

s_ratio1_prod=s_CEENE_prod/s_Emis_tot_prod
s_ratio1_n2o=s_CEENE_n2o/s_Emis_tot_n2o
s_ratio1_nh3=s_CEENE_nh3/s_Emis_tot_nh3
s_ratio1_diesel=s_CEENE_diesel/s_Emis_tot_diesel
s_ratio1_etanol=s_CEENE_etanol/s_Emis_tot_etanol

//

s_ratio2_prod=s_efic_CEENE_prod/s_Emis_tot_prod
s_ratio2_n2o=s_efic_CEENE_n2o/s_Emis_tot_n2o
s_ratio3_prod=s_ExB_prod/s_Emis_tot_prod
s_ratio3_n2o=s_ExB_n2o/s_Emis_tot_n2o

```

```

//VALOR DA FUNÇÃO Y (razão) para 3 EXERGIAS e 7 VARIÁVEIS DE ENTRADA
//
//EXERGIA CEENE
Y_prod_1=CEENE_prod./Emis_tot_prod
Y_nh3_1=CEENE_nh3./Emis_tot_nh3
Y_n2o_1=CEENE_n2o./Emis_tot_n2o
Y_etanol_1=CEENE_etanol./Emis_tot_etanol
Y_ferm_1=CEENE_ferm./Emis_tot_ferm
Y_diesel_1=CEENE_diesel./Emis_tot_diesel
Y_kva_rede_1=CEENE_kva_rede./Emis_tot_kva_rede
//
//EFICIÊNCIA EXERGÉTICA CEENE
Y_prod_2=efic_CEENE_prod./Emis_tot_prod
Y_nh3_2=efic_CEENE_nh3./Emis_tot_nh3
Y_n2o_2=efic_CEENE_n2o./Emis_tot_n2o
Y_etanol_2=efic_CEENE_etanol./Emis_tot_etanol
Y_ferm_2=efic_CEENE_ferm./Emis_tot_ferm
Y_diesel_2=efic_CEENE_diesel./Emis_tot_diesel
Y_kva_rede_2=efic_CEENE_kva_rede./Emis_tot_kva_rede
//
//EFICIÊNCIA EXERGÉTICA BREEDING
Y_prod_3=ExB_prod./Emis_tot_prod
Y_nh3_3=ExB_nh3./Emis_tot_nh3
Y_n2o_3=ExB_n2o./Emis_tot_n2o
Y_etanol_3=ExB_etanol./Emis_tot_etanol
Y_ferm_3=ExB_ferm./Emis_tot_ferm
Y_diesel_3=ExB_diesel./Emis_tot_diesel
Y_kva_rede_3=ExB_kva_rede./Emis_tot_kva_rede
//
// 1 >> produtividade
// 2 >> nh3
// 3 >> n2o
// 4 >> etanol
// 5 >> fermentação
// 6 >> diesel
// 7 >> kva

//plot((i,j)26:76),Y_prod_1(26:76),x(26:76),Y_nh3_1(26:76),x(26:76),Y_n2o_1(26:76),x(26:76),Y_etanol_1(26:76),"",x(26:
76),Y_ferm_1(26:76),"",x(26:76),Y_diesel_1(26:76),"",x(26:76),Y_kva_rede_1(26:76),"")
//plot(Emis_tot_prod,CEENE_prod,Emis_tot_nh3,CEENE_nh3,Emis_tot_n2o,CEENE_n2o,Emis_tot_etanol,CEENE_etanol,Em
is_tot_ferm,CEENE_ferm,"",Emis_tot_diesel,CEENE_diesel,Emis_tot_kva_rede,CEENE_kva_rede)
//modificado

```

```

//CEENE
//plot(Emis_tot_prod,CEENE_prod,Emis_tot_nh3,CEENE_nh3,Emis_tot_n2o,CEENE_n2o,Emis_tot_etanol,CEENE_etanol,Em
is_tot_diesel,CEENE_diesel,"*",Emis_tot_kva_rede,CEENE_kva_rede)
//efic_CEENE
//plot(Emis_tot_prod,efic_CEENE_prod,Emis_tot_nh3,efic_CEENE_nh3,Emis_tot_n2o,efic_CEENE_n2o,Emis_tot_etanol,efic_
CEENE_etanol,Emis_tot_diesel,efic_CEENE_diesel,Emis_tot_kva_rede,efic_CEENE_kva_rede)
//ExB
//plot(Emis_tot_prod,ExB_prod,Emis_tot_nh3,ExB_nh3,Emis_tot_n2o,ExB_n2o,Emis_tot_etanol,ExB_etanol,Emis_tot_diesel,
ExB_diesel,Emis_tot_kva_rede,ExB_kva_rede)
//
//plot(Emis_tot_prod,ExB_prod,Emis_tot_nh3,ExB_nh3,Emis_tot_n2o,ExB_n2o,Emis_tot_etanol,ExB_etanol,Emis_tot_diesel,
ExB_diesel,Emis_tot_kva_rede,ExB_kva_rede)
//plot(Emis_tot_prod(26:76),CEENE_prod(26:76),Emis_tot_n2o(26:76),CEENE_n2o(26:76));xlabel("GHG emissions (g CO2
/ MJ ethanol)");ylabel("CEENE (MJ / MJ ethanol)");legend("behavior for sugarcane productivity (50 - 150%)", "behavior
for N2O emissions (50 - 150%)")
//2 variáveis para CEENE
//plot(Emis_tot_prod(26:76),CEENE_prod(26:76),Emis_tot_n2o(26:76),CEENE_n2o(26:76));xlabel("emissões GEE (g CO2
/ MJ ethanol)");ylabel("CEENE (MJ / MJ ethanol)");legend("comportamento para produtividade da cana (50 -
150%)", "comportamento para emissões N2O (50 - 150%)")
//2 variáveis para efic_CEENE
//plot(Emis_tot_prod(26:76),efic_CEENE_prod(26:76),Emis_tot_n2o(26:76),efic_CEENE_n2o(26:76));xlabel("emissões
GEE (g CO2 / MJ ethanol)");ylabel("eficiência CEENE (adimensional)");legend("comportamento para produtividade da
cana (50 - 150%)", "comportamento para emissões N2O (50 - 150%)")
//2 variáveis para ExB
//plot(Emis_tot_prod(26:76),ExB_prod(26:76),Emis_tot_n2o(26:76),ExB_n2o(26:76));xlabel("emissões GEE (g CO2 / MJ
ethanol)");ylabel("ExB (adimensional)");legend("comportamento para produtividade da cana (50 -
150%)", "comportamento para emissões N2O (50 - 150%)")
//
//CEENE para os 5 indicadores
//plot(Emis_tot_prod(26:76),CEENE_prod(26:76),"k",Emis_tot_n2o(26:76),CEENE_n2o(26:76)*0.998,Emis_tot_nh3(26:76
),CEENE_nh3(26:76)*1.002,Emis_tot_diesel(26:76),CEENE_diesel(26:76),Emis_tot_etanol(26:76),CEENE_etanol(26:76));xl
abel("emissões GEE (g CO2 / MJ ethanol)");ylabel("CEENE (MJ/MJ etanol)");legend("produtividade da cana (50 -
150%)", "emissões N2O (50 - 150%)", "emissões adubação nitrogenada (50 - 150%)", "emissões uso do diesel (50 -
150%)", "produção de etanol (50 - 150%)")
//
//eficiência CEENE para 5 indicadores
//plot(Emis_tot_prod(26:76),efic_CEENE_prod(26:76),"k",Emis_tot_n2o(26:76),efic_CEENE_n2o(26:76)*0.998,Emis_tot_n
h3(26:76),efic_CEENE_nh3(26:76)*1.002,Emis_tot_diesel(26:76),efic_CEENE_diesel(26:76),Emis_tot_etanol(26:76),efic_CE
ENE_etanol(26:76));xlabel("emissões GEE (g CO2 / MJ ethanol)");ylabel("eficiência CEENE (MJ/MJ
etanol)");legend("produtividade da cana (50 - 150%)", "emissões N2O (50 - 150%)", "emissões adubação nitrogenada (50 -
150%)", "emissões uso do diesel (50 - 150%)", "produção de etanol (50 - 150%)")
//
//ExB para 5 indicadores
//plot(Emis_tot_prod(26:76),ExB_prod(26:76),"k",Emis_tot_n2o(26:76),ExB_n2o(26:76),Emis_tot_nh3(26:76),ExB_nh3(26
:76),Emis_tot_diesel(26:76),ExB_diesel(26:76),Emis_tot_etanol(26:76),ExB_etanol(26:76));xlabel("emissões GEE (g CO2 /
MJ ethanol)");ylabel("ExB (adimensional)");legend("produtividade da cana (50 - 150%)", "emissões N2O (50 -
150%)", "emissões adubação nitrogenada (50 - 150%)", "emissões uso do diesel (50 - 150%)", "produção de etanol (50 -
150%)")
//
//Para produtividade da cana

```

```

//plot(x,CEENE_prod/CEENE,x,efic_CEENE_prod/efic_CEENE,x,ExB_prod/ExB);xlabel("produtividade cana
(adimensional)");ylabel("Exergia Relativa (adimensional)");legend("CEENE (50 - 150%)","eficiência CEENE (50 -
150%)","ExB (50 - 150%)")

//N2O solo
//plot(x,CEENE_n2o/CEENE,x,efic_CEENE_n2o/efic_CEENE,x,ExB_n2o/ExB);xlabel("emissões N2O solo
(adimensional)");ylabel("Exergia Relativa (adimensional)");legend("CEENE (50 - 150%)","eficiência CEENE (50 -
150%)","ExB (50 - 150%)")

//adubação nitrogenada
//plot(x,CEENE_nh3/CEENE,x,efic_CEENE_nh3/efic_CEENE,x,ExB_nh3/ExB);xlabel("adubação nitrogenada
(adimensional)");ylabel("Exergia Relativa (adimensional)");legend("CEENE (50 - 150%)","eficiência CEENE (50 -
150%)","ExB (50 - 150%)")

//emissões uso do diesel
//plot(x,CEENE_diesel/CEENE,x,efic_CEENE_diesel/efic_CEENE,x,ExB_diesel/ExB);xlabel("uso do diesel
(adimensional)");ylabel("Exergia Relativa (adimensional)");legend("CEENE (50 - 150%)","eficiência CEENE (50 -
150%)","ExB (50 - 150%)")

//produção etanol
//plot(x,CEENE_etanol/CEENE,x,efic_CEENE_etanol/efic_CEENE,x,ExB_etanol/ExB);xlabel("produção etanol
(adimensional)");ylabel("Exergia Relativa (adimensional)");legend("CEENE (50 - 150%)","eficiência CEENE (50 -
150%)","ExB (50 - 150%)")

//emissões para 5 variáveis
//plot(x,Emis_tot_prod/Emis_tot,x,Emis_tot_n2o/Emis_tot,x,Emis_tot_nh3/Emis_tot,x,Emis_tot_diesel/Emis_tot,x,Emis_tot_
etanol/Emis_tot);xlabel(" ");ylabel("Emissões Relativas (adimensional)");legend("produtividade cana (50 -
150%)","emissões N2O (50 - 150%)","adubação nitrogenada (50 - 150%)","uso diesel (50 - 150%)","produção etanol (50 -
150%)")

//TESTE RAMPA??
//yy(2)=(Y_nh3_1(centro+1)-Y_nh3_1(centro))/(Y_nh3_1(centro)/(np-1))/2
//bar(x2b,yy)
//DERIVADA (sensibilidade não somente no centro - valor base)
dY_prod_1=diff(Y_prod_1)
//dY_nh3_1=diff(Y_nh3_1)
//dY_n2o_1=diff(Y_n2o_1)
//dY_etanol_1=diff(Y_etanol_1)
//dY_ferm_1=diff(Y_ferm_1)
//dY_diesel_1=diff(Y_diesel_1)
//dY_kva_rede_1=diff(Y_kva_rede_1)
//plot(xd(26:76),dY_prod_1(26:76),xd(26:76),dY_nh3_1(26:76),xd(26:76),dY_n2o_1(26:76),xd(26:76),dY_etanol_1(26:76),
xd(26:76),dY_ferm_1(26:76),xd(26:76),dY_diesel_1(26:76),xd(26:76),dY_kva_rede_1(26:76))
//x70=(x+1)*70
//
//CALCULANDO A REGRESSÃO LINEAR PARA PRODUTIVIDADE CANA
x70=x*70
//
//[a11,b11,sig]=reglin(x70,Y_prod_1)
//PLOTANDO GRÁFICO EM INGLES
//plot(x70,Y_prod_1,x70,(-0.075*x70+38.3));xlabel("cane productivity (Mg/ha)");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions
(MJ/gCO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -0.075 ; b= 38.3; R2=0.997)")
//PLOTANDO GRÁFICO EM PORTUGUES

```

```

//plot(x70,Y_prod_1,x70,(-0.075*x70+38.3));xlabel("produtividade cana (Mg/ha)");ylabel("razão CEENE/GEE (MJ / g CO2)");legend("comportamento original","regressão linear (a= -0.075 ; b= 38.3; R2=0.997)")
//CÁLCULO DA MÉDIA E DO R-quadrado
med_Y_prod_1=mean(Y_prod_1)
//SStot1=0
//SSres1=0
//for i=1:np
//SStot1=(med_Y_prod_1(i)-Y_prod_1(i))^2+SStot1
//SSres1=(-0.075*x70(i)+38.3)-Y_prod_1(i)^2+SSres1
//R_square1=1-SSres1/SStot1
//end
//CALCULANDO A REGRESSÃO LINEAR ADUBAÇÃO NITROGENADA
x60=x*60
//[a12,b12,sig]=reglin(x60',Y_nh3_1')
//med_Y_nh3_1=mean(Y_nh3_1)
//plot(x60,Y_nh3_1,x60,(-0.0966*x60+38.9));xlabel("fertilizer N");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -0.097 ; b= 38.9)")
//CALCULANDO A REGRESSÃO LINEAR PARA EMISSÕES N2O
x14=x*1.4
//[a13,b13,sig]=reglin(x14,Y_n2o_1)
//GRÁFICO EM INGLES
//plot(x14,Y_n2o_1,x14,(-3.71*x14+38.2));xlabel("nitrous oxide emissions (Kg N2O/ha year)");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -3.71 ; b= 38.2; R2=0.995)")
//GRÁFICO EM PORTUGUES
//plot(x14,Y_n2o_1,x14,(-3.71*x14+38.2));xlabel("emissões óxido nitroso(Kg N2O/ha ano)");ylabel("razão CEENE/GHG (MJ/g CO2)");legend("comportamento original","regressão linear (a= -3.71 ; b= 38.3; R2=0.995)")
//CÁLCULO DA MÉDIA E DO R-quadrado
med_Y_n2o_1=mean(Y_n2o_1)
//SStot2=0
//SSres2=0
//for j=1:np
//SStot2=(med_Y_n2o_1(j)-Y_n2o_1(j))^2+SStot2
//SSres2=(-3.71*x14(j)+38.2)-Y_n2o_1(j)^2+SSres2
//R_square2=1-SSres2/SStot2
//end
//
//plot(x(26:76),Y_prod_1(26:76),"*",x(26:76),Y_nh3_1(26:76),x(26:76),Y_n2o_1(26:76))
//plot(x,Y_prod_1,"*",x,Y_nh3_1,x,Y_n2o_1)
//
//plot(x(20:80),CEENE_nh3(20:80),"b",x(20:80),Emis_tot_nh3(20:80),"b",x(20:80),CEENE_nh3(20:80)./Emis_tot_nh3(20:80),"*");xlabel("base value behavior");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -2.97 , b= 22.6)")
//

```

```

//REPETINDO PARA ALTERAR CENNE PARA EFICIÊNCIA CEENE
//XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
//PARA PRODUTIVIDADE CANA
//x70=x*70
//
//[a21,b21,sig]=reglin(x70,Y_prod_2)
//GRÁFICO EM INGLES
//plot(x70,Y_prod_2,x70,(6.34e-6*x70-1.57e-4));xlabel("produtividade cana (Mg/ha)");ylabel("razão efíc.CEENE/GHG (g CO2/MJ etanol)");legend("comportamento original","regressão linear (a= 6,34e-6 ; b= -1,57e-4; R2=0.993)")
//GRÁFICO EM PORTUGUES
//plot(x70,Y_prod_2,x70,(-0.075*x70+38.3));xlabel("produtividade cana (Mg/ha)");ylabel("razão CEENE/GEE (MJ / g CO2)");legend("comportamento original","regressão linear (a= -0.075 ; b= 38.3; R2=0.997)")
//GRÁFICO EM PORTUGUES
med_Y_prod_2=mean(Y_prod_2)
//SStot1=0
//SSres1=0
//for i=1:np
//SStot1=(med_Y_prod_2(i)-Y_prod_2(i))^2+SStot1
//SSres1=(-0.075*x70(i)+38.3)-Y_prod_2(i)^2+SSres1
//R_square1=1-SSres1/SStot1
//end
//PARA USO ADUBO NITROGENADO
x60=x*60
//[a22,b22,sig]=reglin(x60,Y_nh3_2)
//med_Y_nh3_1=mean(Y_nh3_2)
//plot(x60,Y_nh3_1,x60,(-0.0966*x60+38.9));xlabel("fertilizer N");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -0.097 ; b= 38.9)")
//PARA EMISSÕES N2O
x14=x*1.4
//[a23,b23,sig]=reglin(x14,Y_n2o_2)
//GRÁFICO EM INGLES
//plot(x14,Y_n2o_2,x14,(-3.71*x14+38.2));xlabel("nitrous oxide emissions (Kg N2O/ha year)");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -3.71 ; b= 38.2; R2=0.995)")
//GRÁFICO EM PORTUGUES
//plot(x14,Y_n2o_2,x14,(-3.1e-5*x14+0.000319));xlabel("emissões óxido nitroso(Kg N2O/ha ano)");ylabel("razão efíc.CEENE/GHG (g CO2/MJ etanol)");legend("comportamento original","regressão linear (a= -3.1e-5 ; b= 3.19e-4; R2=0.998)")
med_Y_n2o_2=mean(Y_n2o_2)
SStot2=0
SSres2=0
//for j=1:np
//SStot2=(med_Y_n2o_2(j)-Y_n2o_2(j))^2+SStot2
//SSres2=(-3.71*x14(j)+38.2)-Y_n2o_2(j)^2+SSres2

```



```

//R_square2=1-SSres2/SSStot2
//end
//
//plot(x(26:76),Y_prod_2(26:76),"*",x(26:76),Y_nh3_1(26:76),x(26:76),Y_n2o_2(26:76))
//plot(x,Y_prod_2,"*",x,Y_nh3_1,x,Y_n2o_2)
//
//plot(x(20:80),CEENE_nh3(20:80),"b",x(20:80),Emis_tot_nh3(20:80),"b",x(20:80),CEENE_nh3(20:80)./Emis_tot_nh3(20:
80),"b");//xlabel("base value behavior");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original
behavior","linear regression (a= -2.97, b= 22.6)")
//XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
//FINAL DA REPETIÇÃO PARA EFICIÊNCIA CEENE
//
//XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
//
//REPETINDO PARA ALTERAR EFICIÊNCIA CEENE PARA BREEDING
//XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
//PARA PRODUTIVIDADE CANA
//x70=x*70
//
//[a31,b31,sig]=reglin(x70,Y_prod_3)
//GRÁFICO EM INGLES
//plot(x70,Y_prod_3,x70,(6.34e-6*x70-1.57e-4));xlabel("produtividade cana (Mg/ha)");ylabel("razão efic.CEENE/GHG
(MJ ethanol/g CO2)");legend("comportamento original","regressão linear (a= 6,34e-6 ; b= -1,57e-4; R2=0.993)")
//GRÁFICO EM PORTUGUES
//plot(x70,Y_prod_3,x70,(0.018*x70-0.4004));xlabel("produtividade cana (Mg/ha)");ylabel("razão ExB/GEE (MJ etanol/g
CO2)");legend("comportamento original","regressão linear (a= 0.018 ; b=-1.4004; R2=0.997)")
//CÁLCULO DA MÉDIA E DO R-quadrado
med_Y_prod_3=mean(Y_prod_3)
//SSStot1=0
//SSres1=0
//for i=1:np
//SSStot1=(med_Y_prod_3(i)-Y_prod_3(i))^2+SSStot1
//SSres1=(-0.075*x70(i)+38.3)-Y_prod_3(i))^2+SSres1
//R_square1=1-SSres1/SSStot1
//end
//PARA USO ADUBO NITROGENADO
x60=x*60
//[a22,b22,sig]=reglin(x60',Y_nh3_2')
//med_Y_nh3_1=mean(Y_nh3_2)
//plot(x60,Y_nh3_1,x60,(-0.0966*x60+38.9));xlabel("fertilizer N");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g
CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -0.097 ; b= 38.9)")
//PARA EMISSÕES N2O
x14=x*1.4

```

```

//[a33,b33,sig]=reglin(x14,Y_n2o_3)
//GRÁFICO EM INGLES
//plot(x14,Y_n2o_2,x14,(-3.71*x14+38.2));xlabel("nitrous oxide emissions (Kg N2O/ha year)");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -3.71 ; b= 38.2; R2=0.995)")
//GRÁFICO EM PORTUGUES
//plot(x14,Y_n2o_3,x14,(-0.0941*x14+0.9695));xlabel("emissões óxido nitroso(Kg N2O/ha ano)");ylabel("razão efic.CEENE/GHG (MJ etanol/g CO2)");legend("comportamento original","regressão linear (a= -0.0941 ; b= 0.9695; R2=0.998)")
med_Y_n2o_2=mean(Y_n2o_2) -3e-5*x14+0.0003
SStot2=0
SSres2=0
//for j=1:np
//SStot2=(med_Y_n2o_2(j)-Y_n2o_2(j))^2+SStot2
//SSres2=(-3.71*x14(j)+38.2)-Y_n2o_2(j))^2+SSres2
//R_square2=1-SSres2/SStot2
//end
//
//plot(x(26:76),Y_prod_3(26:76),"*",x(26:76),Y_nh3_1(26:76),x(26:76),Y_n2o_2(26:76))
//plot(x,Y_prod_3,"*",x,Y_nh3_1,x,Y_n2o_2)
//
//plot(x(20:80),CEENE_nh3(20:80),"b",x(20:80),Emis_tot_nh3(20:80),"b",x(20:80),CEENE_nh3(20:80)./Emis_tot_nh3(20:80),"b");//xlabel("base value behavior");ylabel("ratio CEENE/GHG emissions (MJ/g CO2)");legend("original behavior","linear regression (a= -2.97 , b= 22.6)")
//
//FINAL DA REPETIÇÃO PARA EFICIÊNCIA BREEDING
//
//DERIVANDO ALGUMAS VARIÁVEIS DE ENTRADA DURANTE A VARREDURA
z1=diff(CEENE_prod)
z2=diff(Emis_tot_prod)
z3=diff(CEENE_nh3)
z4=diff(Emis_tot_nh3)
z5=diff(CEENE_n2o)
z6=diff(Emis_tot_n2o)
z7=diff(CEENE_etanol)
z8=diff(Emis_tot_etanol)
z9=diff(CEENE_ferm)
z10=diff(Emis_tot_ferm)
z11=diff(CEENE_diesel)
z12=diff(Emis_tot_diesel)
z13=diff(CEENE_kva_rede)
z14=diff(Emis_tot_kva_rede)

//plot(xd,z1,"*",xd,z3,xd,z5,xd,z7,xd,z9,xd,z11,xd,z13)

```

```
//plot(xd,z2,xd,z4,xd,z6,xd,z8,xd,z10,xd,z12,xd,z14)
//DERIVANDO ALGUMAS RAZÕES ENTRE VARIÁVEIS DE ENTRADA DURANTE A VARREDURA
zz12=z1/z2
zz34=z3/z4
zz56=z5/z6
zz78=z7/z8
zz910=z9/z10
zz1112=z11/z12
zz1314=z13/z14
//plot(xd,zz12,"*",xd,zz34,xd,zz56,xd,zz78,xd,zz910,xd,zz1112,xd,zz1314)
```

6.2 DETALHAMENTO ACV SETOR AGRÍCOLA, por hectare

(Dados primários referenciados do projeto de de pesquisa de Macedo et al. (2004),
Esta numeração não coincide com a descrita no texto da tese)

	DESCRIÇÃO	ENERGIA (MJ/ha)	EMISSÕES (kg CO ₂ /ha)
1	Operação agrícola e colheita	2616,67	193,73
2	Transporte	2951,09	218,47
3	Fertilizante N	4227,32	327,49
4	Fertilizante P ₂ O ₅	353,72	27,33
5	Fertilizante K ₂ O	626,9	49
6	Calcário	490,67	38,08
7	Herbicidas	773,59	59,99
8	Inseticidas	54,67	4,39
9	Mudas	403,76	31,21
10	Fabricação/manutenção equipamentos	2004,42	158,01
11	N ₂ O solo da adubação	NA	432,81
12	Oxidação resíduo palha	NA	5586

- 1) O consumo de energia, de acordo com dados do projeto mencionado, são 9,1 Mcal/TC, que multiplicados por 68,7, e também por 4,186, de Mcal para MJoules, tem-se o valor de 2616 MJ/ha.
- 2) Para o Transporte, de acordo com os dados do projeto citado, o consumo de energia equivale a 10,3 Mcal/TC. Multiplicando-se esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e também por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), obtém-se o valor de 2962,055 MJ/ha.
- 3) No caso do Fertilizante N, o projeto mencionado estabelece que o consumo de energia equivale a 12,48 Mcal/TC, que multiplicado por 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), gera um valor de 3588,976 MJ/ha.
- 4) No Fertilizante P₂O₅, o projeto determina o valor de 1,23 Mcal/TC para o consumo de energia. Ao se multiplicar esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), têm-se o valor de 353,72 MJ/ha.
- 5) Para o Fertilizante K₂O, de acordo com os dados do projeto citado, o consumo de energia equivale a 2,18 Mcal/TC. Multiplicando-se esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha

e também por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), obtém-se o valor de 626,92 MJ/ha.

- 6) No caso do Calcário, o projeto mencionado estabelece que o consumo de energia equivale a 1,706 Mcal/TC, que multiplicado por 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), gera um valor de 490,608 MJ/ha.
- 7) Nos Herbicidas, o projeto determina o valor de 2,69 Mcal/TC para o consumo de energia. Ao se multiplicar esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), têm-se o valor de 773,59 MJ/ha.
- 8) Para os Inseticidas, de acordo com os dados do projeto citado, o consumo de energia equivale a 0,19 Mcal/TC. Multiplicando-se esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e também por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), obtém-se o valor de 54,64 MJ/ha.
- 9) No caso das Mudanças, o projeto mencionado estabelece que o consumo de energia equivale a 1,404 Mcal/TC, que multiplicado por 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), gera um valor de 403,76 MJ/ha.
- 10) Na Fabricação e Manutenção de Equipamentos, o projeto determina o valor de 6,97 Mcal/TC para o consumo de energia. Ao se multiplicar esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), têm-se o valor de 2004,42 MJ/ha.
- 11) Não aplicável.
- 12) Não aplicável.

6.3 DETALHAMENTO ACV SETOR INDUSTRIAL, por hectare

(Dados primários referenciados do projeto de de pesquisa de Macedo et al. (2004), Esta numeração não coincide com a descrita no texto da tese)

DESCRIÇÃO		ENERGIA	EMISSÕES
		(MJ/ha)	(kg CO ₂ /ha)
1	→ Cana-de-açúcar	395.849	NA
2	Energia elétrica-térmica	0	0
3	Ácido sulfúrico	234,2	20,11
4	Soda	56,97	4,91
5	Lubrificantes	53,8	4,61
6	Cal	94,94	8,16
7	Fabricação/manutenção edifícios	822,52	231,52
8	Equipamentos pesados	997,89	280,3
9	Equipamentos leves	1135,93	319,46
10	Etanol	145287,56	9553,89
11	Bagaço uso interno 92%	185705,93	16797,93
12	Bagaço excedente 8%	16148,34	1460,69
13	Palha 25%	24739,34	4198,82
14	CO ₂ biótico fermentação		5028,79

- 1) Considerada igual à exergia da mesma massa, isto é, de 68,7 TC, multiplicado pela exergia da cana, que é 5,76 MJ/kg.
- 2) No caso da Energia Elétrica-Térmica, o projeto mencionado estabelece que o consumo de energia equivale zero, pela produção interna.
- 3) No caso do Ácido Sulfúrico, o projeto determina o valor de 0,74 Mcal/TC para o consumo de energia. Ao se multiplicar esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), têm-se o valor de 212,808 MJ/ha.
- 4) Para a Soda, de acordo com os dados do projeto citado, o consumo de energia equivale a 0,18 Mcal/TC. Multiplicando-se esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e também por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), obtém-se o valor de 51,764 MJ/ha.
- 5) No caso dos Lubrificantes, o projeto mencionado estabelece que o consumo de energia equivale a 0,17 Mcal/TC, que multiplicado por 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), gera um valor de 48,888 MJ/ha.

- 6) No caso da Cal, o projeto determina o valor de 0,30 Mcal/TC para o consumo de energia. Ao se multiplicar esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), têm-se o valor de 86,273 MJ/ha.
- 7) Para a Fabricação e Manutenção de Edifícios, de acordo com os dados do projeto citado, o consumo de energia equivale a 2,86 Mcal/TC. Multiplicando-se esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e também por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), obtém-se o valor de 822,474 MJ/ha.

- 8) No caso dos Equipamentos Pesados, o projeto mencionado estabelece que o consumo de energia equivale a 3,474 Mcal/TC, que multiplicado por 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), gera um valor de 999,047 MJ/ha.
- 9) No caso dos Equipamentos Leves, o projeto determina o valor de 3,953 Mcal/TC para o consumo de energia. Ao se multiplicar esse valor pela produtividade de 68,7 ton/ha e por 4,186 (coeficiente de transformação de Mcal para MJoules), têm-se o valor de 1136,797 MJ/ha.
- 10)
- 11)
- 12)
- 13)
- 14)

6.4 DETALHAMENTO EXERGIA SETOR AGRÍCOLA, por hectare

(Dados primários referenciados do projeto de de pesquisa de Macedo et al. (2004),
Esta numeração não coincide com a descrita no texto da tese)

DESCRIÇÃO		MASSA	X
		(kg/ha)	(MJ/ha)
1	Sol	NA	52560000
2	→ Cinzas	824,4	684,25
3	→ Biocarvão	226,71	3627,36
4	→ Vinhaça	89973,89	39858,43
5	Captura CO ₂ biótico	32132,21	14491,63
6	Captura CO ₂ biótico	3469,35	1564,68
7	Operação agrícola e colheita	61,28	2616,67
8	Transporte	69,11	2951,09
9	Fertilizante N	68,7	722,92
10	Fertilizante P ₂ O ₅	36,69	106,76
11	Fertilizante K ₂ O	1000	4394,99
12	Calcário	366,17	29,85
13	Herbicidas	1,85	NA
14	Inseticidas	1,36	NA
15	Mudas	10,03	NA
16	Fabricação/manutenção equipamentos	49,88	NA
17	N ₂ O solo da adubação	NA	NA
18	Oxidação resíduo palha	5204,03	NA
19	Cana-de-açúcar →	68700	395849,4
20	Palha →	1734,68	17154,2

- 1) Calculado na equação 20.
- 2) No caso das Cinzas, a exergia vale 0,83 MJ/kg, multiplicando-se esse valor pela massa de 824,4 kg/ha, têm-se o resultado de 684,25 MJ/ha.
- 3) O valor da exergia do Biocarvão é de 16,00 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 226,71 kg/ha, obtém-se o valor de 3627,36 MJ/ha.
- 4) Para a Vinhaça, têm-se que o valor da exergia é de 0,44 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 89973,89 kg/ha, gera um resultado de 39588,51 MJ/ha.
- 5) No caso da Captura do CO₂ Biótico da Cana, a exergia vale 0,45 MJ/kg, multiplicando-se esse valor pela massa de 32132,21 kg/ha, têm-se o resultado de 14459,49 MJ/ha.

- 6) O valor da exergia do CO₂ Biótico advindo da Palha é de 0,45 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 3469,35 kg/ha, obtém-se o valor de 1561,207 MJ/ha.
- 7) Para a Operação Agrícolas e Colheita, têm-se que o valor do PCI do Diesel é de 42,70 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 61,28 kg/ha, gera um resultado de 2616,67 MJ/ha.
- 8) No caso do Transporte, o PCI do Diesel vale 42,70 MJ/kg, multiplicando-se esse valor pela massa de 69,11 kg/ha, têm-se o resultado de 2951,00 MJ/ha.
- 9) O valor da exergia do Fertilizante N é de 3,68 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 68,7 kg/ha, obtém-se o valor de 252,816 MJ/ha.
- 10) Para o Fertilizante P₂O₅, têm-se que o valor da exergia é de 2,91 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 36,69 kg/ha, gera um resultado de 106,76 MJ/ha.
- 11) No caso do Fertilizante K₂O, a exergia vale 4,40 KJ, multiplicando-se esse valor pela massa de 1000 kg/ha, têm-se o resultado de 4400,00 MJ/ha.
- 12) O valor da exergia do Calcário é de 0,082 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 366,17 kg/ha, obtém-se o valor de 30,026 MJ/ha.
- 13) Não existe Exergia.
- 14) Não existe Exergia.
- 15) Não existe Exergia.
- 16) Não existe Exergia.
- 17) Não existe Exergia.
- 18) Não existe Exergia.
- 19) Para a Cana-de-açúcar, têm-se que o valor da exergia é de 5,76 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 68700 kg/ha, gera um resultado de 395712 MJ/ha.
- 20) No caso da Palha, a exergia do bagaço úmido vale 9,89 KJ, multiplicando-se esse valor pela massa de 1734,68 kg/ha, têm-se o resultado de 17155,985 MJ/ha.

6.5 DETALHAMENTO EXERGIA SETOR INDUSTRIAL, por hectare

(Dados primários referenciados do projeto de de pesquisa de Macedo et al. (2004),

Esta numeração não coincide com a descrita no texto da tese)

	DESCRIÇÃO	MASSA (kg/ha)	X (MJ/ha)
1	→ Cana-de-açúcar	68700	395849,4
2	Energia elétrica-térmica	0	0
3	Ácido sulfúrico	5,3	0
4	Soda	1,29	7,56
5	Lubrificantes	0,92	38,58
6	Cal	63,89	32,37
7	Fabricação/manutenção edifícios	20,47	822,52
8	Equipamentos pesados	24,83	997,89
9	Equipamentos leves	28,26	1135,93
10	Vinhaça	89973,89	39858,43
11	Torta de filtro →	1648,8	5152,5
12	Cinzas →	824,4	684,25
13	Etanol	4777,54	132027,19
14	Bagaço uso interno	17065,08	168756,58
15	Bagaço excedente	1483,92	14674,48
16	Palha	1734,68	22481,39
17	Energia elétrica	NA	10032,09
18	CO ₂ biótico fermentação	4569,82	2060,99

- 1) Considerada igual à exergia da mesma massa, isto é, de 68,7 TC, multiplicado pela exergia da cana, que é 5,76 MJ/kg.
- 2) Não existe entrada da exergia, produção é interna.
- 3) Não existe Exergia.
- 4)
- 5) No caso dos Lubrificantes, o PCI vale 42,00 MJ/kg, multiplicando-se esse valor pela massa de 0,92 kg/ha, têm-se o resultado de 38,64 MJ/ha.
- 6)
- 7) O valor da exergia da Fabricação e Manutenção de Edifícios é de 40,19 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 20,47 kg/ha, obtém-se o valor de 822,689 MJ/ha.

- 8) Para os Equipamentos Pesados, têm-se que o valor da exergia é de 40,192 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 24,83 kg/ha, gera um resultado de 997,967 MJ/ha.
- 9) No caso dos Equipamentos Leves, a exergia vale 40,191 MJ/kg, multiplicando-se esse valor pela massa de 28,26 kg/ha, têm-se o resultado de 1135,798 MJ/ha.
- 10) O valor da exergia da Vinhaça é de 0,44 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 89973,89 kg/ha, obtém-se o valor de 39588,512 MJ/ha.
- 11)
- 12) Para as Cinzas, têm-se que o valor da exergia é de 0,83 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 824,40 kg/ha, gera um resultado de 684,25 MJ/ha.
- 13) No caso do Etanol, a exergia vale 27,64 MJ/kg, multiplicando-se esse valor pela massa de 4777,54 kg/ha, têm-se o resultado de 132051,206 MJ/ha.
- 14) O valor da exergia do Bagaço de uso interno é de 9,89 MJ/kg, ao se multiplicar esse valor pela massa de 17065,08 kg/ha, obtém-se o valor de 168773,641 MJ/ha.
- 15)
- 16) Para a Palha, têm-se que o valor do PCI é de 12,96 MJ/kg, que, multiplicado pela massa de 1734,68 kg/ha, gera um resultado de 22481,453 MJ/ha.
- 17)
- 18)