



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Kairo Fernandes Martins

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO ETANOL DA CANA-DE-
AÇÚCAR PARA ESTIMAR O BIOGÁS GERADO DO RESÍDUO TORTA DE FIL-
TRO**

Goiânia, 2017.

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

Kairo Fernandes Martins

**INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA PRODUÇÃO DO ETANOL DA CANA-DE-
AÇÚCAR PARA ESTIMAR O BIOGÁS GERADO DO RESÍDUO TORTA DE FIL-
TRO**

Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPG-TPS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang

Coorientadora: Profa. Dra. Warde A. da F. Zang

Goiânia, 2017.

M3668i Martins, Kairo Fernandes.

Inventário do Ciclo de Vida da produção do etanol da cana-de-açúcar para estimar o biogás gerado do resíduo torta de filtro / Kairo Fernandes Martins. – Goiânia: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2017.

110 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Joachim Werner Zang.

Coorientadora: Profa. Dra. Warde A. da F. Zang.

Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Coordenação do Programa de Mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Inclui apêndice e anexos.

1. Etanol – cana-de-açúcar. 2. Biogás - biometano. 3. Torta de filtro - resíduo. I. Zang, Joachim Werner (orientador). II. Zang, Warde A. da F. (coorientadora). III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. IV. Título.

CDD 665.776

SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUACAO
IFG CAMPUS GOIÂNIA
MESTRADO EM TECNOLOGIA DE PROCESSOS SUSTENTÁVEIS

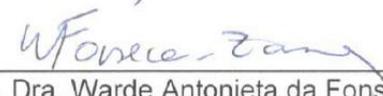
Kairo Fernandes Martins

Inventário do Ciclo de Vida da produção do etanol da cana-de-açúcar para estimar o biogás gerado do resíduo torta de filtro

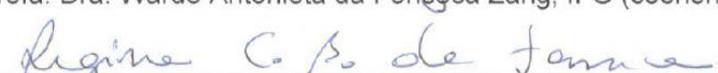
Programa de Pós-Graduação stricto sensu em Tecnologia de Processos Sustentáveis do IFG (PPG-TPS- IFG) - Dissertação de Mestrado Profissional. Área de Concentração: Tecnologia de Sistemas de Produção Limpa. Linha de Pesquisa: Tecnologia de Redução e Gerenciamento de Resíduos.



Prof. Dr. Joachim Werner Zang – IFG (orientador)



Profa. Dra. Warde Antonieta da Fonseca Zang, IFG (coorientadora)



Profa. Dra. Regina Celia Bueno da Fonseca – IFG (membro externo)

Aprovado em: 25 / 08 / 2017

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos que são fonte de inspiração e que mesmo pequenos,
me dão força para seguir buscando conquistas para nossa família.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, vitórias e conquistas.

À família, em especial a minha esposa pelo amor, apoio e compreensão em toda esta jornada de estudos e aos meus pais que mesmo de longe sempre estão torcendo e orando por mim.

Aos orientadores, professor Dr. Joachim Werner Zang e professora Dra. Warde Antonieta da Fonseca Zang, pelos seus ensinamentos, atenção e dedicação, guiando-me de modo a desenvolver este trabalho e obter mais este título.

À Usina Nova Gália Ltda. (USINOVA) e à NG Bioenergia, seus gestores e colaboradores, pela oportunidade, presteza e disponibilização de dados e informações e por sempre estarem disponíveis aos nossos questionamentos, o que foi essencial para a realização da pesquisa.

À Thinkstep AG, atual nome da PE *International Sustainability Performance*, empresa que disponibilizou a licença do *software GaBi Education®* para a modelagem e simulação dos dados e que prontamente atendeu a nossa solicitação de renovação da licença por mais oito meses para que pudéssemos concluir a pesquisa.

A todos os professores do mestrado em Tecnologia de Processos Sustentáveis do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) que contribuíram para os meus conhecimentos e desenvolvimento acadêmico.

Aos colegas de turma, que sem dúvida nenhuma, ajudaram muito nesta retomada aos estudos, pela amizade e troca de conhecimentos e partilha.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Goiás (Fapeg) pela concessão da bolsa de formação em nível de mestrado.

Ao Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), em especial ao ex-superintendente da Superintendência de Goiás (Surgo), Rogério Papalardo Arantes, pela liberação em vários momentos para frequentar o curso de mestrado e ao atual superintendente, André Luiz Abrão, pelo apoio à licença capacitação e à presidência e à Coordenação de Gestão de Pessoas do Inmetro/RJ pela concessão da licença.

“Tudo posso naquele que me fortalece”. Filipenses (4:13).

Título: Inventário do Ciclo de Vida da produção do etanol da cana-de-açúcar para estimar o biogás gerado do resíduo torta de filtro.

Autor: Kairo Fernandes Martins.

Orientador: Joachim Werner Zang.

Coorientadora: Warde Antonieta da Fonseca-Zang.

RESUMO

A preocupação com a sustentabilidade tem ganhado importância e foco em muitas pesquisas científicas. A necessidade de uma metodologia confiável para identificação dos fluxos de entrada e saída dos processos; do cálculo dos balanços mássicos e energéticos e mensuração dos impactos ambientais são tendências nas indústrias, em especial, na sucroenergética. Neste contexto, o presente trabalho mostra um estudo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) do etanol da cana-de-açúcar para estimar o biogás gerado da torta de filtro (resíduo). O ICV está sendo adotado por muitos pesquisadores para estudos da cadeia de produção do etanol e de outros produtos e reconhecido mundialmente por contribuir na tomada de decisão para melhoria dos processos de produção. A pesquisa incluiu uma ampla pesquisa bibliográfica em artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, sites da internet, dissertações, teses e trabalhos de campo. O estudo mostrou uma estimativa de diminuição de 22% dos recursos energéticos não renováveis; um aumento de 52% dos recursos energéticos renováveis quando da substituição de 50% do diesel pelo biogás gerado da torta de filtro na etapa agrícola e no transporte da cana e também um balanço energético positivo.

PALAVRAS-CHAVE: sustentabilidade, sucroenergética, inventário do ciclo de vida, etanol, biogás, torta de filtro.

TITLE: Life Cycle Inventory of the ethanol production from sugarcane to estimate the biogas from the filter cake residue.

AUTHOR: Kairo Fernandes Martins

ADVISER: Joachim Werner Zang

CO-ADVISER: Warde Antonieta da Fonseca Zang

ABSTRACT

The concern for sustainability has gained importance and focus on many scientific researches. The need for a reliable methodology to identify the input and output flows of the processes; the calculation of mass and energy balances and the measurement of the environmental impacts are industrial trends, especially, in sugarcane industry segments. In this context, the present work shows a study of the Life Cycle Inventory (LCI) of ethanol from sugarcane to estimate the biogas generated from the filter cake (residue). The LCI has been adopted by many researchers for studies of the production chain of ethanol and other products contributing for decision-making to improve production processes. The research included an extensive literature review in national and international journals, internet sites, studies, theses and field works. The study shows an estimated reduction of 22% in non-renewable energy resources; increase of 52% in renewable energy resources with 50% diesel replacement by the sugarcane crop and transport phases and also a positive energy balance.

KEYWORDS: sustainability, sugarcane industry segments, life cycle inventory, ethanol, biogas, filter cake.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa da produção de cana no Brasil.	22
Figura 2. Estrutura da cana-de-açúcar.	22
Figura 3. Usinas de etanol no Brasil.....	24
Figura 4. Estrutura das normas ISO 14000	45
Figura 5. Etapas de Avaliação de Ciclo de Vida	46
Figura 6. Fronteiras de um sistema de produção de biocombustíveis.....	48
Figura 7. Vista aérea da usina Nova Gália LTDA.....	67
Figura 8. Transporte da cana	67
Figura 9. Pesagem da cana.....	67
Figura 10. Mesas alimentadoras.....	69
Figura 11. Limpeza da cana.	69
Figura 12. Fragmentação da cana.....	69
Figura 13. Desfibrador.	69
Figura 14. Ternos de moenda.....	69
Figura 15. Produção de álcool.	69
Figura 16. Bagaço da cana quase seco.....	69
Figura 17. Esteira de transporte do bagaço.	69
Figura 18. Transporte do bagaço à caldeira.....	70
Figura 19. Caldeira.	70
Figura 20. Bagaço da cana-de-açúcar.....	70
Figura 21. Armazenamento do bagaço.....	70
Figura 22. Cubas de tratamento de fermento.	71
Figura 23. Colunas de destilação.....	72
Figura 24. Aquecimento para separação do álcool.....	72
Figura 25. Pressurização da vinhaça.....	73
Figura 26. Piscina de armazenamento da vinhaça.....	73
Figura 27. Fertirrigação do solo.	73
Figura 28. Torta de filtro.	74
Figura 29. Flegmaça.	74
Figura 30. Produção de energia.	75

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características da vinhaça coletada no período operacional da Usinova.....	28
Quadro 2: Características do bagaço coletado no período operacional da Usinova.	30
Quadro 3: Características da torta de filtro coletada no período operacional da Usinova.	32
Quadro 4: Conteúdo energético de alguns combustíveis.	62
Quadro 5: Gasto energético para alguns insumos do processo de produção do etanol.....	63
Quadro 6: Entradas e/ou saídas de energia e massa na produção de etanol e açúcar.....	63
Quadro 7: Balanço de massa da produção de etanol para 1000 kg de cana.	77
Quadro 8: Balanço de energia da produção de etanol para 1000 kg de cana.	78
Quadro 9: Balanço de massa da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 50% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.	78
Quadro 10: Balanço de energia da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 50% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.	79
Quadro 11: Balanço de massa da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 100% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.	79
Quadro 12: Balanço de energia da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 100% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.	80
Quadro 13: Relação dos balanços de massa com 50% do biogás gerado da torta de filtro. ...	80
Quadro 14: Relação dos balanços de energia com 50% do biogás gerado da torta de filtro. .	81
Quadro 15: Relação dos balanços de massa com 100% do biogás gerado da torta de filtro. .	81
Quadro 16: Relação dos balanços de energia com 100% do biogás gerado da torta de filtro.	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCV	Associação Brasileira de Ciclo de Vida
ABiogás	Associação Brasileira de Biogás e Biometano
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV	Avaliação do Ciclo de Vida
AICV	Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CCT	Corte, Carregamento e Transporte
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
Conmetro	Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DA	Digestão Anaeróbica/Anaeróbia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EBA	<i>European Biogas Association</i>
EISA	<i>Energy Independence and Security Act</i>
EPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FNQ	Fundação Nacional da Qualidade
GaBi	<i>Ganzheitliche Bilanzierung</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
GHG	<i>Greenhouse gases</i>
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNV	Gás Natural Veicular
IAA	Instituto do Açúcar e do Alcool
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBICT	Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia
ICV	Inventário de Ciclo de Vida
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IFG	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás
ILCD	<i>International Reference Life Cycle Data System</i>

Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCA	<i>Life Cycle Assessment</i>
NBR	Normas Brasileiras
PCI	Poder Calorífico Inferior
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
Proálcool	Programa Nacional do Alcool
RBS	Revisão Bibliográfica Sistemática
RSU	Resíduos sólidos urbanos
SCA	Sociedade Corretora de Alcool Ltda.
Scielo	<i>Scientific Electronic Library Online</i>
TCU	Tribunal de Contas da União
TTW	<i>Tank-to-Wheel</i>
UF	Unidade Funcional
UnB	Universidade de Brasília
UNICA	União da Indústria de Cana de Açúcar
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
UPs	Unidades Produtoras
USINOVA	Usina Nova Gália Ltda.
USP	Universidade de São Paulo
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
WTG	<i>Well-to- Gate</i>
WTT	<i>Well-to-Tank</i>
WTW	<i>Well-to-Wheel</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Compostos químicos / Elementos químicos

C	Carbono
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
C ₂ H ₅ OH	Etanol
CO ₂	Dióxido de Carbono
CH ₄	Metano
H ₂ O	Água
K	Potássio
N ou N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido Nitroso
O	Oxigênio
O ₂	Dioxigênio
P	Fósforo
S	Enxofre
SO ₂	Dióxido de Enxofre
TKN	Total de Nitrogênio Kjeldahl
PO ₄	Fosfato

Unidades/Símbolos de medida

bar	Unidade de pressão
°C	Graus Celsius
Eq/m ³	Metros cúbicos Equivalentes
°GL	Graus Gay-Lussac
GWh	Gigawatt-hora
h	Hora
ha	Hectare
H	Hidrogênio
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
Km	Quilômetro
kWh	Quilowatt-hora
L	Litros
m ³	Metros cúbicos
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
MWh	Megawatt-hora
pH	Potencial Hidrogeniônico
Tcana ou tc	Tonelada de cana
% v/v	Porcentagem em volume

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	16
OBJETIVO GERAL.....	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
1.1 A CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL	21
1.2 O ETANOL DA CANA.....	23
1.3 SUBPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL	26
1.3.1 VINHAÇA.....	27
1.3.2 BAGAÇO DA CANA.....	29
1.3.3 CALDO DE CANA	31
1.3.4 TORTA DE FILTRO	31
1.3.5 CINZAS, FULIGEM E MELAÇO	33
1.3.6 PALHA.....	33
1.4 O SETOR SUCROENERGÉTICO E O CONSUMO DE DIESEL.....	34
1.5 ENERGIA NO PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL	36
1.6 O ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA GERAÇÃO	39
1.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	41
1.7.1 CONCEITO DA ACV	42
1.7.2 ASPECTOS NORMATIVOS DA ACV E ICV.....	45
1.7.3 METODOLOGIA E ETAPAS DA ACV E DO ICV.....	46
1.7.3.1 Definição do Objetivo e Escopo	47
1.7.3.1.1 Limites ou Fronteiras do Sistema, Unidade Funcional e Fluxos	47
1.7.3.1.2 Sistema de Referência.....	49
1.7.3.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)	49
1.7.3.2.1 Etapas da análise do inventário	51
1.7.3.2.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)	51
1.7.3.2.4 Interpretação dos Resultados	52
1.8 O BIOGÁS.....	53
1.8.1 VANTAGENS, DESVANTAGENS E OBSTÁCULOS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA COM O USO DO BIOGÁS	56
1.9 O BIOMETANO	58
1.9.1 VANTAGENS E OBSTÁCULOS NO USO DO BIOMETANO	59
1.10 BALANÇO ENERGÉTICO.....	61
CAPÍTULO II – DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA	64
2.1 MATERIAL E MÉTODOS	64
2.2 PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL E A COGERAÇÃO NA USINOVA	66
2.2.1 RECEPÇÃO, MOAGEM DA CANA E TRATAMENTO DO CALDO	67
2.2.2 BAGAÇO.....	70
2.2.3 GERAÇÃO DO VAPOR.....	70
2.2.4 PRODUÇÃO DO ÁLCOOL.....	71
2.2.5 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	74
2.2.6 LABORATÓRIO DE ANÁLISES	75
2.3 O ICV DA USINOVA E O SOFTWARE GABI.....	76
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	85
REFERÊNCIAS	87
APÊNDICE – QUESTIONÁRIO DA ENTREVISTA	94
ANEXO A – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA USINOVA	96
ANEXO B – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL CRIADO NO SOFTWARE GABI – MASSA E ENERGIA.....	104
ANEXO C – FLUXOGRAMA CRIADO NO SOFTWARE GABI DO PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL COM BIOGÁS SUBSTITUINDO 50% DO DIESEL	105
ANEXO D – FLUXOGRAMA CRIADO NO SOFTWARE GABI DO PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL COM BIOGÁS SUBSTITUINDO 100% DO DIESEL	106
ANEXO E – TELAS DOS BALANÇOS MÁSSICO E ENERGÉTICO DA PLATAFORMA GABI.....	107
RESUMO DO CURRÍCULO LATTES	110

INTRODUÇÃO

A produção de biocombustíveis, a qual pode se dá com a utilização dos resíduos da agricultura como matéria-prima em biorrefinarias, é considerada uma opção para promover o desenvolvimento agrícola de forma sustentável; a minimização da poluição e como alternativa viável para suavizar as mudanças climáticas e melhorar a segurança energética, substituindo assim os recursos fósseis.

Caldeira-Pires *et al.* (2013) citam o crescente interesse pelas fontes renováveis, tais como os mitigadores de dióxido de carbono (CO₂) e sugere que a biomassa derivada de produtos agrícolas é uma importante fonte de matérias-primas para diversos produtos e biocombustíveis.

Manochio (2014) afirma que com a tecnologia atual tem-se que, para cada 100 milhões de toneladas de cana utilizadas para o setor energético, poderiam ser poupadas 12,6 toneladas de CO₂ emitidos para a atmosfera.

Considerando que 25% de etanol anidro são adicionados à gasolina, diminuindo a emissão de CO₂, a emissão líquida evitada, a qual é a diferença entre as emissões de CO₂ na produção e as evitadas, pode alcançar 1.900 kg CO₂ eq/m³ de etanol (BNDES; CGEE, 2008).

Em 2016, a participação da biomassa da cana-de-açúcar na matriz energética nacional foi de 17,5% contra 16,9% do ano anterior, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN 2017 – ano base 2016), divulgado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Esse é o melhor resultado desde 2009, quando esse percentual atingiu 18,1% (UNICA, 2016a).

A expansão e popularização do etanol da cana-de-açúcar no Brasil começaram na década de 70, com a criação do Proálcool (Programa Nacional do Álcool) - programa de combustível comercial renovável mais importante implantado no mundo até hoje - o qual visava à diminuição da dependência do petróleo pelo país.

O etanol é um álcool composto por um único tipo de molécula (C₂H₅OH) e é utilizado como combustível considerado ecologicamente correto, pois o cultivo de sua matéria-prima reduz a quantidade de gás carbônico na atmosfera através da fotossíntese (PETROBRAS, 2013 *apud* MANOCHIO, 2014).

Segundo Vilela (2013), o etanol no Brasil é usado em carros como um intensificador de octanas oxigenado e aditivo para gasolina e dedicado a motores a etanol hidratado ou em veículos *flex* abastecidos com até E-100 (Etanol 99% v/v).

As usinas de produção de etanol a partir da cana-de-açúcar geram empregos na cadeia sucroenergética; novas oportunidades de negócios e são autossuficientes em energia elétrica, visto que o bagaço gerado durante o processo, na etapa da moagem, é queimado em caldeiras gerando energia, geralmente em quantidade maior que a necessária à usina, podendo o excedente ser comercializado.

Manochio (2014) afirma que no Brasil, consome-se uma quantidade de etanol que representa metade da gasolina que seria utilizada. Esse sucesso é derivado de dois fatores fundamentais: a ampla cobertura geográfica e a comercialização do etanol hidratado e da gasolina C (gasolina comum com adição de álcool etílico anidro) em todos os postos de combustíveis do país.

O aproveitamento de subprodutos/coprodutos usando-se somente processos e equipamentos convencionais, amplamente utilizados pode aumentar muito a rentabilidade de usinas. O bagaço, a torta de filtro e a vinhaça são os coprodutos de maior capacidade de geração de renda para as usinas.

Para Haadel (2000), pode-se aumentar o valor do bagaço primeiro aumentando-se a fração de material seco e segundo, diversificando-se o uso do bagaço, por exemplo, como fonte de energia para geração de eletricidade e/ou calor e como matéria-prima de produção de chapas para paredes internas e isolamento acústico e térmico. Por outro lado, o vinhoto tem um enorme potencial: o material nele contido pode ser transformado em biogás pelo processo de digestão anaeróbia e o metano no biogás pode ser usado para a geração de energia elétrica e vapor. Estima-se que a potência de energia elétrica que pode ser gerada a partir do vinhoto é de 600 a 700 MW, sendo que aproximadamente metade seria consumida pelas usinas e a outra metade ficaria disponível para venda.

Porém, destaca-se que a produção de etanol, via qualquer fonte, só é considerada economicamente vantajosa, em comparação com a gasolina, quando o preço do barril de petróleo for superior a 40 dólares (KOHLHEPP, 2010). Para os consumidores, para que o etanol seja viável economicamente nos veículos *Flex-fuel*, a relação em quilometragem é de 0,7 litro de gasolina por litro de etanol, caso contrário, ainda é mais vantajoso comprar a gasolina como combustível (LEITE; LEAL, 2007).

Já a produção de biogás é um método de energia renovável e de produção de gerenciamento de resíduos em expansão que tem relevância para a reciclagem de nutrientes. Segundo a *European Biogas Association* - EBA (2016), os fabricantes de veículos e pesquisadores concentraram em grande parte seus recursos e esforços nas últimas décadas para desenvolver carros a diesel e a gasolina, o que consolidou ainda mais o domínio dos combustíveis

líquidos no setor de transportes. Porém, segundo a própria EBA (2016), esta tendência está mudando lentamente, pois os principais fabricantes de veículos desenvolveram um número crescente de modelos alimentados a gás, o que oferece mais opções aos consumidores.

Os sistemas futuros para produção de bicombustíveis, alimentos e consumo, necessitam ter base global, visão ecológica, mínimo impacto ambiental e eficiente utilização dos recursos naturais, juntamente com importantes critérios no desenvolvimento de produtos alimentares e na seleção dos sistemas alimentares (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

Os sistemas de produção atuais precisam de grandes quantidades de entradas de recursos que provocam inúmeros efeitos negativos para o meio ambiente, sendo esses sistemas planejados para suprirem as demandas econômicas.

Por isso, tornam-se indispensáveis novos conhecimentos para aplicação nas cadeias produtivas capazes de ajudar na tomada de decisão de forma sustentável e na melhoria dos processos de produção, como um estudo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) ou mesmo da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

O conceito de ACV emergiu na década de 1960 e desde a década de 1970 vários esforços vem sendo somados para aprimorar esta metodologia e suas etapas.

Para Huttunen, Manninen e Leskinen (2014), a ACV é um método pelo qual os impactos ambientais de um produto, processo ou sistema são sistematicamente avaliados desde a produção da matéria-prima à gestão de resíduos.

Em diversos projetos e estudos pesquisados, a metodologia ACV tem sido aplicada para produtos e processos industriais. Embora a maioria dos estudos de ciclo de vida realizados até agora envolva produção agrícola ou refino industrial, os vários estudos de ACV sobre produto agrícola têm incluído produção agrícola, processamento industrial, qualidade dos produtos alimentares e a inclusão de etanol (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

De acordo com Vilela (2013), o Inventário do Ciclo de Vida (ICV) consiste em um conjunto de ações com a coleta de dados primários, caracterização do modelo tecnológico, relação dos dados à unidade funcional e agregação (quando aplicável) e avanço no refinamento iterativo das informações incluídas na fronteira do sistema em estudo com base na coleta de dados.

Ruviaro *et al.* (2012) destacam que na produção agrícola, a aplicação de ACV é de grande relevância em todas as cadeias de produção, o que pode ser observado pelos seguintes efeitos externos de mercado: 1 - consumidores exigem produtos que respeitam o meio ambiente e estão dispostos a pagar mais por eles; 2 - os produtores que não são capazes de demonstrar que sua produção é cultivada de forma sustentável, têm dificuldades em acessar mercados

importantes e 3 - critérios ambientais estão sendo gradualmente adicionados pelos países para suas necessidades de importação de produtos agrícolas.

Os estudos sobre ACV ou mesmo do ICV ainda são incipientes e poucos são os dados disponíveis acerca da avaliação de impacto ambiental no Brasil. Por isso, é importante a realização de trabalhos locais, pois a metodologia da ACV surgiu na Europa e muitas das informações e aplicações nos estudos de casos e testes empíricos devem ser analisadas com uma abordagem regionalizada devido às características particulares de cada país, como: condições climáticas, fatores de produção, sistemas produtivos, sistemas de gerenciamento, reciclagem de resíduos, etc.

Há a necessidade também de mais pesquisas locais voltadas à etapa do ICV e conseqüentemente de toda ACV para produtos agrícolas, pois o desenvolvimento da ACV com abordagem nacional facilitaria a análise dos impactos de todas as ordens (ambientais, econômicas, políticas e financeiras) tornando-o uma fonte de estudo potencial a ser explorada em pesquisas científicas.

Estudar o Inventário do Ciclo de Vida da produção do etanol da cana-de-açúcar se justifica, visto que o etanol provém de material renovável; tem uma importância ambiental e econômica muito relevante para o país e para o mundo e reduz a emissão de gases que contribuem para o efeito estufa.

A produtividade do etanol de cana-de-açúcar ganha destaque ao se comparar a quantidade de biocombustível obtida por unidade de área, que possui resultados bastante superiores às demais culturas utilizadas como substrato para a produção de biocombustíveis. Quando utilizada apenas para a produção de etanol, considerando a tecnologia brasileira, 1 tonelada de cana é capaz de produzir cerca de 90 litros deste biocombustível. E se utilizada apenas para a produção de açúcar, 1 tonelada de cana produz 100 kg deste produto, além de gerar aproximadamente 20 litros de bioetanol a partir do melaço (MANOCHIO, 2014).

Todavia, muitas dificuldades são encontradas na condução dos estudos da ACV, pois um estudo completo deve incluir produção agrícola, refino industrial, estoque e distribuição, embalagem, consumo e gerenciamento de resíduo, tornando-se um sistema complexo e também por necessitar envolver áreas multidisciplinares.

Por isso, optou-se nesta pesquisa pelo estudo do Inventário do Ciclo de Vida (ICV), pois para Silva *et al.* (2016), dependendo do objetivo, pode-se realizar o estudo de ICV e interpretar os dados coletados, tais como, quantificar o consumo acumulado de energia e água, mencionando que esses indicadores não quantificam o impacto ambiental do produto, porque não mensuram a interação desses aspectos com a natureza.

A presente pesquisa realiza um estudo do ICV da produção do etanol da cana-de-açúcar na Usina Nova Gália, localizada na cidade de Paraúna – GO, com o intuito de levantar e analisar as entradas e saídas do processo produtivo do etanol e aplicá-lo para estimar o biogás gerado com um de seus coprodutos, a torta de filtro.

A motivação da pesquisa foi o estudo sobre o alto consumo anual de diesel para a produção do etanol, como 4.207.012 litros de diesel em 2016, segundo dados de consumo contidos em relatórios cedidos pela Usina. Além disso, o potencial de aproveitamento do resíduo torta de filtro para gerar biogás (produto) e biofertilizante (subproduto); sendo o biometano o principal componente do biogás, podendo substituir parte significativa do diesel, foi outro efeito motivador. Um sistema de geração de biogás substituindo o diesel, recurso fóssil (petróleo), na etapa agrícola e no transporte da cana-de-açúcar à usina, contribuiria significativamente para a redução dos recursos energéticos não-renováveis na produção do etanol.

OBJETIVO GERAL

Realizar o Inventário de Ciclo de Vida (ICV) da produção industrial do etanol da cana-de-açúcar, procedendo-se o levantamento das etapas do processo; a identificação e quantificação dos seus fluxos mássicos e energéticos e avaliar o biogás de resíduos do processo para geração de energia ou substituição do óleo diesel consumido.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Esquematizar uma concepção de trabalho de ICV aplicada nos processos unitários da indústria do etanol da cana-de-açúcar;
- Organizar o levantamento e a coleta de dados qualitativos e quantitativos, tais como de produção e produtividade da cana, de entradas e saídas nas unidades do processo industrial, consumos, tratamento e reuso de resíduos e efluente;
- Inventariar o ciclo de vida do processo industrial;
- Contabilizar os dados de balanço mássico e energético da produção industrial;
- Avaliar o biogás gerado de resíduos do processo para aproveitamento na substituição do óleo diesel.

CAPÍTULO I - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 A CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL

Desde os tempos coloniais, a cana tem sido um dos produtos agrícolas mais importantes do Brasil. Na verdade, a cana é uma das maiores culturas do Brasil e desempenha um papel importante na economia brasileira (SARTORI; FLORENTINO, 2007, DANTAS *et al.*, 2013 *apud* RENÓ *et al.*, 2014).

A União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), em conjunto com os demais sindicatos e associações de produtores do Centro-Sul e o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), concluiu a estimativa para a safra 2017/2018 de cana-de-açúcar. A projeção indica uma moagem de 585,00 milhões de toneladas, queda de 22,14 milhões de toneladas em relação as 607,14 milhões de toneladas processadas na safra anterior. Esta queda resulta, sobretudo, da ligeira retração na área disponível para colheita e da diminuição esperada na produtividade agrícola do canavial a ser colhido no ciclo 2017/2018 (UNICA, 2017).

A Sociedade Corretora de Álcool Ltda. – SCA (2014) afirma que devido aos estímulos recebidos pelas indústrias, pelos produtores e também pelas características para a produção como: clima, solo fértil e investimentos, o Estado de Goiás foi um dos Estados que mais desenvolveu a cultura da cana-de-açúcar nos últimos anos, em especial na última década.

A Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) divulgou a primeira estimativa da safra 2017/18 de cana-de-açúcar para o Estado de Goiás. O levantamento aponta para uma produção de 70.404,3 milhões de toneladas, aumento de 4,1% em relação à produção da safra 2016/2017, que havia sido de 67.626,8 milhões de toneladas. São Paulo permanece como a maior área plantada 51,57% (4.558,4 mil hectares), seguido por Goiás com 10,63% (939,7 mil hectares); Minas Gerais com 9,52% (841,7 mil hectares); Mato Grosso do Sul com 7,28% (643,6 mil hectares); Paraná com 7,27% (624,6 mil hectares); Alagoas com 3,41% (301,7 mil hectares) e Pernambuco com 2,94% (259,5 mil hectares). Os sete Estados são responsáveis por 92,62% da produção nacional. (CONAB, 2017).

O mapa da Figura 1 mostra a distribuição das regiões de produção da cana-de-açúcar no Brasil.

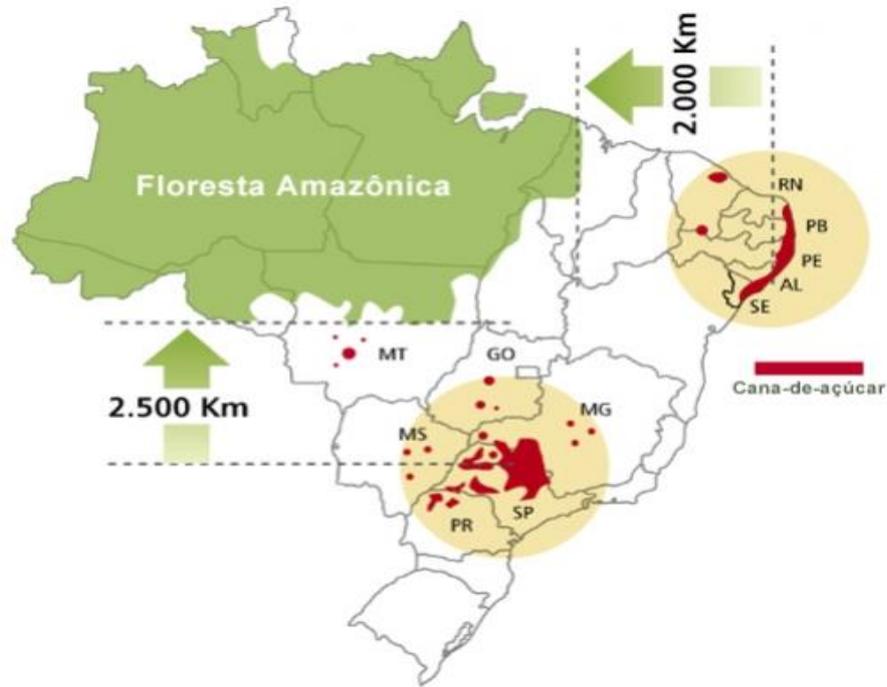


Figura 1. Mapa da produção de cana no Brasil.
Fonte: IBGE; Unicamp; CTC, 2016 *apud* UNICA, 2016b.

A cana-de-açúcar é uma planta semiperene da família das gramíneas e tem uma grande capacidade de converter a luz solar em biomassa (1,5-3%). A sacarose se concentra nos colmos, que compõe a parte aérea da planta, enquanto a palha da cana está em suas pontas e folhas, como mostra a Figura 2 (BNDES; CGEE, 2008).

Após o corte, a cana é transportada o mais rápido possível para a usina, a fim de evitar perdas de sacarose (SAMPAIO, 2013).

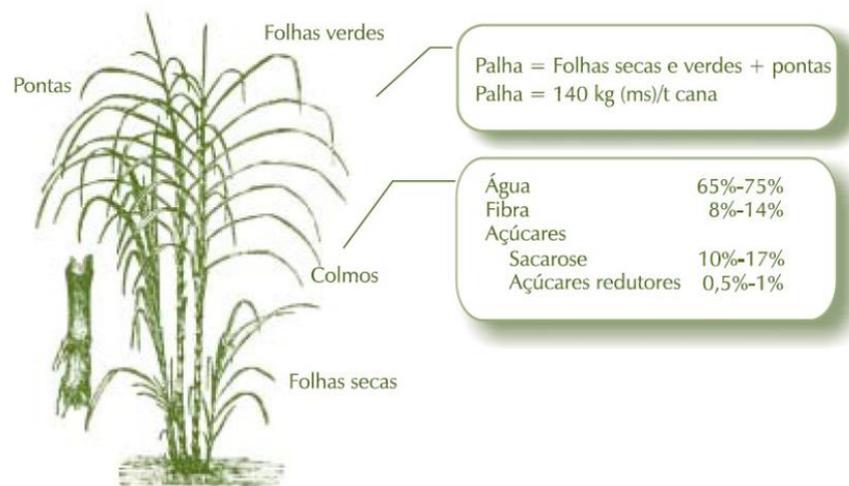


Figura 2. Estrutura da cana-de-açúcar.
Fonte: BNDES e CGEE (2008).

Alonso *et al.* (2008, *apud* Renó *et al.*, 2014) citam que o conteúdo total de energia da cana, com exclusão das cinzas (cerca de 2-3%) pode ser dividido em três partes principais: suco, resíduos fibrosos (bagaço) e resíduos de agricultura da cana. Tradicionalmente, o caldo de cana (H_2O + sacarose + melaço + insolúveis) é usado para a produção de açúcar e etanol, enquanto o bagaço é utilizado para atender as demandas de energia do processo de fabricação de açúcar e etanol.

O processamento de cana pode ser considerado como uma biorrefinaria, convertendo matéria-prima (cana) em uma variedade de produtos: açúcar, etanol, eletricidade e outros (RENÓ *et al.*, 2014).

Renó *et al.* (2014) ainda afirmam que o biodiesel, em suas principais características, é bastante semelhante ao combustível diesel derivado do petróleo e podem ser misturados em qualquer proporção.

Analisando os efeitos da produção e a industrialização da cana-de-açúcar, que é atualmente a principal fonte de energia renovável no Brasil e de grande importância na agroindústria, Seabra *et al.* (2011) realizaram estudo com o objetivo de analisar o ciclo de vida do uso de energia e emissões de gás carbônico relacionados à cana-de-açúcar e etanol, considerando também os excedentes de eletricidade e bagaço como subprodutos. Os pesquisadores realizaram um balanço completo para a região Centro-Sul brasileira adotando diferentes métodos para avaliar, separadamente, a produção de etanol e cana-de-açúcar. Como conclusão, a pesquisa apontou que os produtos derivados da cana-de-açúcar são mais vantajosos quando comparados com o açúcar de beterraba produzido na Europa (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

Ometto, Hauschild e Roma (2008) consideram que, devido à relevância do cultivo de cana-de-açúcar no país, é oportuna a inclusão das preocupações ambientais no planejamento do ciclo de vida deste produto para otimização produtiva e redução dos impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde humana visando desenvolver produtos finais mais sustentáveis.

1.2 O ETANOL DA CANA

Para Manochio (2014), a produção de etanol por base de açúcares, como é o caso da cana-de-açúcar, é mais simples do que quando comparada com a produção por meio de materiais amiláceos, como o trigo e o milho, e celulósica, como o bagaço da cana.

Goldemberg, Coelho e Guardabassi (2008) afirmam que entre os biocombustíveis, o etanol é o que até o momento atraiu mais atenção, já que é produzido em larga escala e pode ser facilmente misturado com gasolina para operar em motores de ignição por centelha, os quais requerem velas de ignição para iniciar a combustão.

O crescimento deste setor deve-se principalmente ao Programa Nacional do Álcool (PROÁLCOOL), criada em 1975 com a finalidade de reduzir as importações de petróleo através da produção de etanol a partir da cana (RENÓ *et al.*, 2014).

A expectativa da produção brasileira para o etanol total, no primeiro levantamento da safra 2017/18, é de 26,45 bilhões de litros, inferior em 4,9% em relação à safra passada, que atingiu 27,81 bilhões de litros. Esse decréscimo está relacionado ao aumento observado no consumo da gasolina em 2016, que respalda os preços do álcool anidro nas misturas de combustível, além dos preços favoráveis do açúcar que incentivaram a produção desta *commodity* em detrimento do etanol (CONAB, 2017).

É importante mencionar que o rendimento na produção de etanol envolve também a qualidade da cana e isso está diretamente ligado a sua etapa agrícola (BRONDANI, 2014).

A produção de etanol concentra-se na região Centro-Sul, conforme Figura 3. Na estimativa da Conab para a safra 2017/2018 a produção nacional de etanol deve atingir 26.451.194,3 mil litros. A região Centro-Sul corresponderá a 93,59% do total produzido no país. Os principais Estados produtores de etanol, os quais correspondem a 92,80% da produção são: São Paulo (48,45%), Goiás (15,99%), Mato Grosso do Sul (9,90%), Minas Gerais (9,31%), Paraná (4,96%) e Mato Grosso (4,19%) (CONAB, 2017).

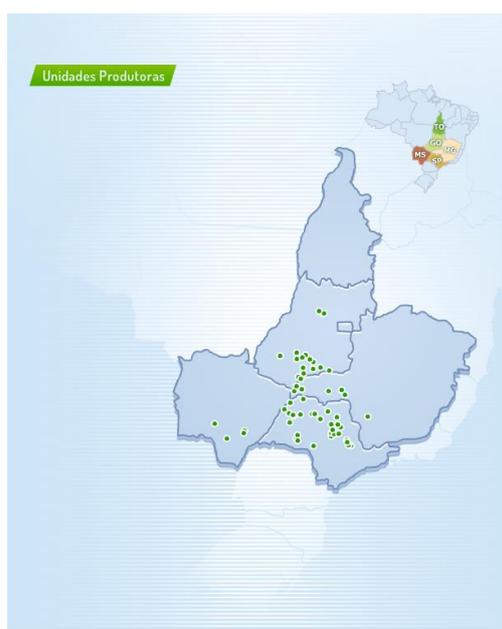


Figura 3. Usinas de etanol no Brasil
Fonte: SCA (2017).

Manochio (2014) afirma que os avanços nas pesquisas na área de biocombustíveis são de grande importância na atual conjuntura em virtude de uma preocupação maior com o desenvolvimento de fontes energéticas renováveis e mais limpas, as quais permitiram avançar na superação da necessidade de combustíveis fósseis. Neste contexto, o etanol ganha espaço por se tratar de um excelente substituto para a gasolina, o principal combustível usado em automóveis no mundo.

A utilização extensiva do etanol como combustível automotivo no Brasil, seja em mistura de 25% v/v com a gasolina, como combustível dos veículos equipados com motor a etanol ou, ainda, nos veículos com tecnologia *flex fuel* que operam com gasolina, etanol ou qualquer mistura desses combustíveis, confere ao país liderança no cenário internacional quanto ao sequestro de carbono e à mitigação do efeito estufa (MACEDO; LEAL; SILVA, 2004).

No entanto, a expansão da produção de etanol a partir da cana para atender um mercado em expansão, assim como as exportações para outros países, tem levantado preocupações sobre a sua sustentabilidade (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Para analisar as consequências negativas dos programas de biocombustíveis, como aqueles relacionados à competição com alimentos e sustentabilidade, Renó *et al.* (2011) buscaram contribuir para o desenvolvimento de indicadores de sustentabilidade como ferramenta para avaliação de desempenho. Os autores compararam na pesquisa vários indicadores enfatizando as vantagens e desvantagens. As principais limitações relacionadas pelas fronteiras estudadas, assim como a falta de dados confiáveis e seus efeitos, são discutidas com base em estudos de casos de ACV reais realizados pelos autores acerca do biodiesel de óleo de palma e diferentes alternativas para tratamento de vinhaça e descarte de resíduos.

Garcia e Sperling (2010) também pesquisaram a cadeia sucroenergética analisando as estimativas de emissões de gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O) nas etapas agrícolas e de industrialização da cana-de-açúcar no Estado de Minas Gerais e concluíram que a maior parte das emissões é proporcionada pela queima da cana-de-açúcar e pelo consumo de combustíveis.

O Brasil, além de ser um dos pioneiros no desenvolvimento de biocombustíveis é, atualmente, um dos grandes produtores mundiais e tem apresentado pesquisas relevantes baseadas no *framework* de ACV para combustíveis renováveis e subprodutos agrícolas como alternativas para a geração de energia e calor (CLAUDINO; TALAMINI, 2013). Neste contexto, Ometto e Roma (2010, *apud* Claudino e Talamini, 2013), elaboraram um estudo significativo na cadeia sucroenergética acerca da produção de etanol associada à

cogeração de eletricidade e concluíram que a atividade de maior emissão de gás carbônico para a atmosfera proveniente desta atividade é devida à colheita da cana, em virtude do metano emitido por ocasião da queima pré-colheita. Como melhoria da produção, os autores propuseram a realização da colheita da cana-de-açúcar sem queima, a utilização de combustíveis renováveis em tratores, caminhões e ônibus, ao invés de combustíveis fósseis, e a otimização da logística de transporte de produtos e insumos.

Como efeitos positivos da expansão do etanol têm-se a eliminação de compostos de chumbo da gasolina; a redução de emissões nocivas e a redução da emissão de CO₂, uma vez que o etanol requer apenas uma pequena quantidade de combustível fóssil para a sua produção, sendo, portanto, um combustível renovável (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDA-BASSI, 2008).

Atualmente o setor sucroenergético nacional possui 437 Unidades Produtoras (UPs), das quais 253 são mistas, produzindo tanto açúcar quanto etanol, 168 dedicam-se exclusivamente à produção de etanol e 16 à produção de açúcar (MDIC, 2012 *apud* KOGA, 2013). A predominância de unidades mistas, responsáveis pela moagem de cerca de 83% da cana colhida, prevalece nas duas principais regiões de produção: a região Centro-Sul e a região Norte-Nordeste (TCU, 2012).

1.3 SUBPRODUTOS DA PRODUÇÃO DE ETANOL

Os três principais produtos de resíduos da indústria de bioetanol à base de cana são bagaço, torta de filtro e vinhaça. Aproximadamente 280 kg de bagaço, 40 kg de torta de filtro, 1000 litros de vinhaça e 85 litros de bioetanol são produzidos por tonelada de cana-de-açúcar processada (LEITE *et al.*, 2015).

Com base na quantidade de cana processada durante os anos 2013 e 2014 (653×10^6 toneladas de cana) foram estimadas pela UNICA (2015 *apud* Janke *et al.*, 2015) a geração de 91×10^6 toneladas de palha (base seca), 169×10^6 toneladas de bagaço (base úmida), 22×10^6 toneladas de torta de filtro (base úmida) e 286×10^6 a 678×10^6 m³ de vinhaça.

Além do bagaço de cana, vinhaça e torta de filtro, a indústria sucroenergética produz também palhas e pontas, melaço (ou mel final), além de cinzas e fuligem provenientes da caldeira (VILELA, 2013).

Para Coelho *et al.* (2016), os resíduos do processo de produção de etanol, tais como a torta de filtro, vinhaça e bagaço, podem ser excelentes fontes alternativas de energia.

1.3.1 VINHAÇA

Vilela (2013) cita que a vinhaça é um resíduo gerado na etapa de destilação do vinho para produção de etanol.

Leite *et al.* (2015) também citam que a vinhaça é uma água residual marrom escura que vem do processo de destilação após a separação do bioetanol.

A aplicação de vinhaça no solo melhora as características físicas e químicas do solo; reduz o pH, neutralizando ou alcalinizando o solo; aumenta a capacidade de retenção de água; aumenta a capacidade de retenção mineral; conserva ou melhora a fertilidade e aumenta a microflora (ZANDBERGEN, 1993 *apud* VILELA, 2013).

A vinhaça demanda capacidade de armazenamento temporário (piscina de vinhaça) que permita variações no regime da aplicação ou mesmo interrupções durante a mudança dos equipamentos nas frentes de aplicação ou nos períodos de precipitação elevada, assim como realizar reparos e manutenção de equipamentos (BRAUNBECK; NETO, 2010).

Nunes (2010) destaca que o armazenamento da vinhaça é efetuado em locais estratégicos da lavoura que permitem atingir as áreas programadas para receber a fertirrigação.

Salomon e Lora (2009), em seu estudo sobre estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil, concluíram que 1 litro de álcool produz em média 13 litros de vinhaça e que 1 m³ de vinhaça libera 14,23m³ de CH₄.

1.3.1.1 Composição da Vinhaça

As características e composição da vinhaça foram identificadas com a coleta em um estudo anterior realizado por Leite *et al.* (2015), na própria Usinova, em três amostras (meses de maio, setembro e novembro). Os meses escolhidos pelos autores cobrem todo o período de funcionamento da usina. A média de cada parâmetro é apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Características da vinhaça coletada no período operacional da Usinova.
Fonte: Adaptado de Leite *et al.* (2015).

PARÂMETROS	UNIDADE	MÉDIA
pH		4,03
DQO ¹	g L ⁻¹	20,31
Sólidos Totais	g L ⁻¹	17,50
Sólidos Voláteis	g L ⁻¹	13,62
NH ₄ N	g L ⁻¹	0,02
TKN	mg L ⁻¹	133,86
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	mg L ⁻¹	869,80
Alumínio (Al)	mg L ⁻¹	19,74
Cobalto (Co)	mg L ⁻¹	0,01
Cobre (Cu)	mg L ⁻¹	0,27
Ferro (Fe)	mg L ⁻¹	21,36
Manganês (Mn)	mg L ⁻¹	5,65
Molibdênio (Mo)	mg L ⁻¹	0,02
Níquel (Ni)	mg L ⁻¹	0,02
Silício (Si)	mg L ⁻¹	48,75
Tungstênio (W)	mg L ⁻¹	NÃO DETECTADO
Zinco (Zn)	mg L ⁻¹	3,80
Cálcio (Ca)	mg L ⁻¹	257,80
Carbono (C)	mg L ⁻¹	9.758,00
Magnésio (Mg)	mg L ⁻¹	154,37
Nitrogênio (N)	mg L ⁻¹	589,67
Fósforo (P)	mg L ⁻¹	111,43
Potássio (K)	mg L ⁻¹	1.536,29
Sódio (Na)	mg L ⁻¹	7,03
Enxofre (S)	mg L ⁻¹	265,41
Relação C / N		18,00
Redução de açúcar	g L ⁻¹	2,09
Glicose	mg L ⁻¹	43,99
Álcool	mg L ⁻¹	408,62
Acético	mg L ⁻¹	600,55
Propiônico	mg L ⁻¹	6,14
Isobutírico	mg L ⁻¹	1,73
<i>n</i> -butírico	mg L ⁻¹	3,97
Isovaleric	mg L ⁻¹	0,80
Hexanóico	mg L ⁻¹	1,62
BMP	mL _N /g _{COD}	250,43

¹ A DQO é a quantidade de “O₂” necessária para a oxidação da matéria orgânica através de um agente químico (MEDEIROS *et al.*, 2006).

1.3.2 BAGAÇO DA CANA

Camargo *et al.* (1990, *apud* Vilela, 2013) conceituam o bagaço como uma biomassa fibrosa constituída de 50 a 60 % de celulose, 20 a 25 % de hemicelulose e 20 a 25 % de lignina e com uma umidade de cerca de 50% (PRIETO, 2003 *apud* VILELA, 2013).

O bagaço é gerado no processo de moagem da cana-de-açúcar e tem um alto conteúdo seco. Aproximadamente 280 kg de bagaço são produzidos por tonelada de cana-de-açúcar processada. A gestão de resíduos de bioetanol no Brasil é principalmente destinada a cogeração, no caso do bagaço, e aplicações de campo como fertilizantes (vinhaça e torta de filtro). O bagaço é queimado para produzir calor e eletricidade (LEITE *et al.*, 2015).

Geralmente um terço da cana-de-açúcar é bagaço. Assim, considerando os 60.000 ha de plantio da usina estudada por Anater *et al.* (2016), e a produtividade de 75 tc.ha⁻¹, os autores estimaram que 1.500.000 tc são correspondentes a bagaço. Considerando os Poderes Caloríficos Inferiores (PCIs) do etanol como 29,7 MJ.kg⁻¹ e o da gasolina como 44,8 MJ.kg⁻¹, tem-se que 1 litro de etanol tem o mesmo poder calorífico que 0,663 litro de gasolina. Assim, 150.000 m³ de etanol equivalem a 99.450 m³ de gasolina. Com os PCIs do bagaço da cana (50% de umidade), o qual é de 1.800 kcal.kg⁻¹ ou 7,542 MJ.kg⁻¹ (Macedo *et al.*, 2004 *apud* Anater *et al.*, 2016) e do óleo combustível, o qual é de 9.550 kcal.kg⁻¹ ou 40,014 MJ.kg⁻¹ (Ipcc, 2014 *apud* Anater *et al.*, 2016), tem-se que 1 kg de bagaço de cana equivale a 0,1885 kg de óleo combustível. Então, a quantidade de óleo combustível necessária para fornecer o mesmo equivalente energético que 1.500.000 toneladas de bagaço é 282.750 toneladas de óleo combustível.

Camargo *et al.* (1990 *apud* Vilela, 2013) afirmam que o bagaço é amplamente utilizado como combustível em outras indústrias localizadas nas proximidades. Além de servir como combustível pode ser utilizado como ração animal e na produção de celulose, papel, aglomerados e chapas semelhantes à madeira.

Pellegrini (2009) cita ainda que nos últimos anos desenvolveu-se a indústria de *pellets* para serem utilizados como combustível em outras indústrias.

Todo bagaço remanescente da produção é levado para a planta de energia da indústria para ser utilizado para a cogeração através de sua queima (BNDES; CGEE, 2008).

1.3.2.1 Composição do Bagaço

No Quadro 2 encontram-se as características e composições médias do bagaço coletado por Leite *et al.* (2015) na Usinova nos meses de maio e novembro.

Quadro 2: Características do bagaço coletado no período operacional da Usinova.

Fonte: Adaptado de Leite *et al.* (2015).

PARÂMETROS	UNIDADE	MÉDIA
Sólidos Totais	%	51,38
Sólidos Voláteis	% _{TS}	97,38
Celulose	%	44,49
Lignina	%	16,41
Hemicelulose	%	33,67
Extractivosa	%	5,44
Carboidratos e lignina	%	97,97
Proteína bruta	%	1,18
Fatc bruto	%	0,86
TNK	mg/g	3,60
Alumínio	mg/g	3,44
Cobalto (Co)	mg/g	0,00
Cobre (Cu)	mg/g	0,01
Ferro (Fe)	mg/g	4,37
Manganês (Mn)	mg/g	0,09
Molibdênio (Mo)	mg/g	0,00
Níquel (Ni)	mg/g	0,01
Silício (Si)	mg/g	15,20
Tungstênio (W)	mg/g	0,00
Zinco (Zn)	mg/g	0,03
Cálcio (Ca)	mg/g	2,35
Carbono (C)	mg/g	234.132,50
Magnésio (Mg)	mg/g	0,97
Nitrogênio (N)	mg/g	2.478,05
Fósforo (P)	mg/g	0,73
Potássio (K)	mg/g	5,71
Sódio (Na)	mg/g	0,02
Enxofre (S)	mg/g	920,04
Relação C / N	mg/g	95,50

1.3.3 CALDO DE CANA

O caldo de cana, proveniente das moendas ou dos difusores, é submetido a um peneiramento a fim de eliminar impurezas grosseiras. Esta etapa é importante considerando que não deve haver sobrecarga nas etapas de decantação e filtração (PROENG, 2010 *apud* MANOCHIO, 2014).

Além disso, o caldo deve ser encaminhado para tratamento com agentes químicos que visam à coagulação da matéria coloidal, correção do pH e a precipitação de algumas impurezas (ANDRADE; CASTRO, 2006 *apud* MANOCHIO, 2014).

1.3.4 TORTA DE FILTRO

A torta de filtro é gerada nos filtros rotativos para extração da sacarose residual na produção de açúcar e fósforo (P) adicionado ao processo de clarificação (BERTONCINI, 2008).

Segundo Leite *et al.* (2015), a torta de filtro, muitas vezes referida como lama prensada, é derivada do tratamento físico-químico do caldo de cana-de-açúcar e contém pequenas partículas sólidas da moagem, bem como carboidratos não-fibrosos na forma de açúcares dissolvidos. Aproximadamente 40 kg de torta de filtro são produzidos por tonelada de cana-de-açúcar processada e são espalhadas nos canaviais sem qualquer tratamento prévio ou dosagem adequada.

Em relação ao armazenamento da torta de filtro, os processos de aplicação e estocagem exigem processos de controle, visto que, pela sua elevada demanda bioquímica de oxigênio - DBO², pode-se transformar em fonte poluidora (RAMALHO; AMARAL-SOBRINHO, 2001).

O aproveitamento da torta de filtro, segundo Braunbeck e Neto (2010), implica na utilização de várias operações de armazenamento, mistura, secagem, transporte, carregamento e descarregamento, dosagem e distribuição. Essas operações acontecem desde a saída do material da moenda da usina até sua colocação em contato com o solo.

Com os dados coletados e calculados por Leite *et al.* (2015), encontrou-se para 40 kg de torta de filtro - referente à UF de 1000 kg de cana - um potencial de geração de biometano

² A DBO é um parâmetro que indica a quantidade de oxigênio consumida durante a degradação bioquímica da matéria orgânica juntamente com o oxigênio usado na oxidação de produtos inorgânicos em certo período de tempo (MEDEIROS *et al.*, 2006).

de 1,914 m³. Logo, a partir da produção anual de processamento de 1.244.148 toneladas de cana na Usinova, poderiam ser gerados 2,381 milhões de m³ de biometano.

1.3.4.1 Composição da Torta de Filtro

As características e composições médias da torta de filtro coletados por Leite *et al.* (2015) na Usinova nos meses de maio, setembro e novembro encontram-se no Quadro 3.

Quadro 3: Características da torta de filtro coletada no período operacional da Usinova. Fonte: Adaptado de Leite *et al.* (2015).

PARÂMETROS	UNIDADE	MÉDIA
Sólidos Totais	%	22,86
Sólidos Voláteis	% _{TS}	77,54
Celulose	%	31,05
Lignina	%	26,64
Hemicelulose	%	28,57
Extractivosa	%	13,74
Carboidratos e lignina	%	80,08
Proteína bruta	%	14,74
Fatc bruto	%	5,18
TNK	mg/g	80,13
Alumínio	mg/g	97,84
Cobalto (Co)	mg/g	0,03
Cobre (Cu)	mg/g	0,28
Ferro (Fe)	mg/g	86,31
Manganês (Mn)	mg/g	1,15
Molibdênio (Mo)	mg/g	0,01
Níquel (Ni)	mg/g	0,05
Silício (Si)	mg/g	70,74
Tungstênio (W)	mg/g	0,00
Zinco (Zn)	mg/g	1,23
Cálcio (Ca)	mg/g	43,18
Carbono (C)	mg/g	97.116,00
Magnésio (Mg)	mg/g	10,46
Nitrogênio (N)	mg/g	3.161,77
Fósforo (P)	mg/g	15,48
Potássio (K)	mg/g	60,70
Sódio (Na)	mg/g	5,69
Enxofre (S)	mg/g	1.205,72
Relação C / N	mg/g	32,00

1.3.5 CINZAS, FULIGEM E MELAÇO

As cinzas e fuligem geradas nas chaminés das caldeiras são lavadas normalmente com água de reuso aproveitada da lavagem de cana. A fuligem diferencia-se das cinzas pela quantidade de água em sua composição (ANDRADE; DINIZ, 2007).

A vinhaça, a torta de filtro e as cinzas são utilizadas diretamente em solos agrícolas, promovendo a reciclagem de quase 100 % dos nutrientes que entram no sistema produtivo, reduzindo o uso de fertilizantes químicos. A reciclagem destes produtos industriais, proporcionam resultados favoráveis quanto à otimização do uso de potássio, aumentando o suprimento de nutrientes no campo (COELHO; LORA; GUARDABASSI, 2010).

Além do uso diretamente no solo, as cinzas podem incrementar a composição química de compostos orgânicos. Sua geração depende da composição química elementar da biomassa e da quantidade de impurezas, não combustíveis, introduzidas na caldeira. Admite-se que há 5 kg de cinza por tonelada de cana, assumindo que toda a cinza presente no bagaço se transforme em resíduos na caldeira (ANDRADE; DINIZ, 2007).

Já o melaço é conceituado por Vilela (2013) como um insumo inserido no processo de fermentação.

O melaço (mel final), que não retorna ao processo de fabricação de açúcar, pode ser utilizado como matéria-prima na fermentação por ser rico em açúcares redutores e sacarose (BNDES; CGEE, 2008).

1.3.6 PALHA

A palha de cana de açúcar tem sido considerada um dos principais resíduos gerados fazendo parte do grupo dos materiais lignocelulósicos³. A palha é um resíduo obtido a partir da colheita da cana crua nas lavouras (SUPERBIA; PAULA, 2011 *apud* COELHO *et al.*, 2016).

Estima-se que para cada tonelada de cana colhida sejam gerados cerca de 200 kg de palha de cana-de-açúcar (SOUZA, 2012 *apud* COELHO *et al.*, 2016).

³ materiais fibrosos, que formam matrizes complexas constituídas de celulose, um rígido polímero de glicose, hemiceluloses, pectinas e outras gomas.

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar gera de 8 a 15 t/ha de palha que, depositada sobre a superfície do solo, representa melhoria na sua fertilidade (devido ao retorno de nutrientes por meio do processo de mineralização), controle de processos erosivos e maior retenção de água, além de propiciar aumento em sua microbiota (BERTONCINI, 2008 *apud* COELHO *et al.*, 2010).

1.4 O SETOR SUCROENERGÉTICO E O CONSUMO DE DIESEL

No início da década de 90, o setor sucroalcooleiro brasileiro, tradicionalmente caracterizado pela gestão familiar, iniciou um movimento de profissionalização e consolidação, que surge como uma resposta ao processo de desregulamentação da atividade. O setor, que até então sofria forte intervenção do Estado, principalmente por meio do Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), passou a enfrentar uma situação fortemente norteadada pela competitividade, que buscava ganhos de eficiência e escalas de produção (FNQ, 2008).

Tais mudanças do setor, atrelada ainda ao alto nível de investimento tecnológico; diversificação crescente do aproveitamento da cana, através da ampliação da produção do etanol e a entrada no setor energético com a bioeletricidade, levou à adoção da nova terminologia “sucroenergética” no lugar de “sucroalcooleira” (UNICA, 2009).

O setor sucroenergético há muito tempo é um dos sustentáculos da economia brasileira. A partir da introdução das primeiras mudas de cana-de-açúcar no país, por mais de dois séculos, o açúcar foi o principal produto brasileiro. Há cerca de 40 anos, teve início a transformação do setor. Além do açúcar, as usinas passaram a ter foco na produção do etanol e, mais recentemente, a atenção voltou-se à bioeletricidade, aos alcoolquímicos e à comercialização de créditos de carbono. Tudo isso com a possibilidade do emprego de tecnologias avançadas que aumentam a produtividade e reduzem custos (NEVES; TROMBIN; CONSOLI, 2010).

Em 2009, a questão sobre uma nova terminologia do setor foi colocada no Fórum Nacional Sucroalcooleiro, o qual passou a ser oficialmente Fórum Nacional Sucroenergético, e no 2º Encontro de Comunicação entre a União da Indústria de Cana de Açúcar (UNICA) e suas empresas associadas, onde representantes das usinas manifestaram-se favoravelmente sobre as mudanças (UNICA, 2009).

Após um longo período de controle estatal sobre o mercado de açúcar e álcool, o setor canavieiro enfrenta as consequências do processo de desregulamentação ocorrido no passado. Esta desregulamentação provocou modificações importantes na dinâmica deste setor, tendo, como algumas de suas consequências, a diminuição da competitividade das empresas do nordeste em relação às empresas do Centro-sul do Brasil (LIMA; SICSÚ, 2001; MORAES, 2002 *apud* PAIVA; MORABITO, 2007); o crescimento acelerado do volume de cana processada no Brasil e a modificação das estratégias competitivas adotadas pelas empresas ligadas à agroindústria canavieira.

A indústria sucroenergética é tida como uma importante solução no âmbito da diminuição da dependência sobre o petróleo, em resposta à exponencial elevação do seu preço nos últimos anos e do desenvolvimento de combustíveis capazes de reduzir as emissões dos gases do efeito estufa - GEE (CO₂, CH₄, e N₂O) quando comparados à gasolina e diesel derivados do petróleo (RODRÍGUEZ, 2010). Essas emissões de GEE são significativas em todo ciclo produtivo do etanol e açúcar, ou seja, na produção agrícola, na conversão industrial, no transporte e distribuição do etanol e em seu uso final (FILHO; MACEDO, 2010).

Paiva e Morabito (2007) citam que existe um esforço crescente em desenvolver e aplicar modelos e métodos quantitativos para auxiliar nas principais operações do setor sucroalcooleiro. O destaque é para os modelos de planejamento da colheita, modelos de programação do transporte de cana, de distribuição e armazenagem de açúcar e álcool, de seleção de variedades e de programação da reforma do canavial. Todos estes trabalhos são voltados para a etapa agrícola, etapa de corte, carregamento e transporte (CCT) e estoque de produtos finais.

Segundo Paiva e Morabito (2007), pode-se subdividir o processo agroindustrial de produção de açúcar, álcool, melação e subprodutos em três etapas principais: etapa agrícola, etapa CCT e etapa industrial.

Em seu estudo, Grisoli (2011) notou que as operações agrícolas para a produção de cana-de-açúcar apresentam consumos de diesel distintos, devido a sua utilização em diferentes máquinas agrícolas.

Em Macedo, Seabra e Silva (2008) foi considerado o consumo de 164 litros de diesel por hectare. Soares *et al.* (2009) fez um estudo detalhado do maquinário utilizado e da quantidade de combustível. Como a maior parte da utilização de tratores está na implantação da cultura, é nesta etapa que ocorre o maior consumo de óleo diesel, totalizando quase 100 l/ha. Nas operações de manutenção das soqueiras, a utilização de máquinas é bem menor, sendo menos de 9 l/ha. Na média, as máquinas consomem 22,3 litros de diesel por hectare.

De acordo com a referência utilizada na Diretiva Europeia, o valor estimado de diesel para a etapa de cultivo da cana-de-açúcar foi 0,797 l/tc (DREIER, 2000 *apud* Grisoli, 2011), calculado para uma produtividade de 80 tc/ha (CONAB, 2011 *apud* Grisoli, 2011). Obtendo-se assim, um valor estimado de 63,76 l/ha (GRISOLI, 2011).

1.5 ENERGIA NO PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL

Em relação à energia utilizada no processo, a localização de subestações de energia elétrica é uma variável importante, dado o potencial existente em uma usina ou destilaria de fornecer, além de açúcar e etanol, energia elétrica excedente do processo de fabricação (SETTEN, 2010).

Há aproximadamente quatro décadas, as discussões começaram ao longo de todo o mundo em relação à incorporação de ativos renováveis na matriz energética, quer devido à instabilidade econômica do petróleo bruto e de um aumento da taxa de esgotamento dos recursos fósseis, quer pelos efeitos ambientais resultantes. Assim, estava-se começando uma nova cultura ambiental, em que os processos industriais foram realizados sem se preocupar com o impacto ambiental (GIL; MOYA; DOMÍNGUES, 2013). Atualmente, a utilização de fontes de energia mais limpas tornou-se uma questão crucial para a sociedade moderna (GONZÁLES-GARCÍA *et al.*, 2012; LUO; VOET; HUPPES, 2008 *apud* GUERRA *et al.*, 2014).

Tecnologias foram desenvolvidas para mudar esta situação através da reutilização do bagaço da cana-de-açúcar para produzir vapor e eletricidade para os processos de produção de açúcar e álcool, tornando estas plantas autossuficientes no que diz respeito à energia. Assim, a cana é potencialmente importante. Além disso, a cogeração tornou-se uma das tecnologias mais eficientes para uso racional de combustível primário para produzir eletricidade e calor (BOCCI *et al.*, 2009; TINA; PASSARELLO, 2011 *apud* GUERRA *et al.*, 2014).

A produção de etanol via qualquer matéria-prima demanda uma grande quantidade de energia elétrica. O combustível fabricado a partir da cana-de-açúcar apresenta vantagem, pois o sistema de cogeração de energia elétrica utilizada na maioria das plantas, através da queima do bagaço, provê a energia necessária para o funcionamento da usina. Isto ocorre, pois para cada tonelada de cana são produzidos 140 kg de massa seca na forma de bagaço (MARCHIO, 2014).

Outros aspectos extremamente relevantes, quando se compara as diversas matérias-primas, segundo Sampaio (2013), são a termodinâmica envolvida e o balanço energético do biocombustível em relação aos combustíveis fósseis.

Quanto ao balanço energético, ou seja, a relação entre a energia gerada pelo biocombustível e a energia de origem fóssil utilizada para sua obtenção, é preciso que sejam realizadas “avaliações de ciclo de vida” (*Life Cycle Assessment – LCA*), as quais identificam os gastos de energia e as emissões de GEE, desde a produção da matéria-prima, até o uso final do combustível. Também são considerados os consumos de energia e emissões associados à produção dos insumos e equipamentos utilizados na cadeia produtiva do biocombustível. É importante notar que, em princípio, todo o CO₂ liberado na queima de produtos da biomassa é reciclado por meio da fotossíntese no crescimento da biomassa no próximo ciclo produtivo, mas a parcela correspondente aos combustíveis fósseis consumidos na produção do etanol significa um acréscimo líquido da quantidade desses gases na atmosfera (BNDES, 2008 *apud* SAMPAIO, 2013).

Estudo realizado pela *International Energy Agency* (IEA) demonstrou que o etanol de cana-de-açúcar reduz em 86% as emissões de GEE quando comparado à gasolina, além de também ter um excelente desempenho quando comparado a outros biocombustíveis de outras matérias-primas (SAMPALIO, 2013).

Já Goldemberg (2007) afirma que o etanol a partir do milho emite 18% menos GEE, quando comparado à gasolina, enquanto o etanol da cana emite 91% a menos de GEE.

Em 2010, a EPA (Agência Norte-Americana de Proteção Ambiental, do inglês, *United States Environmental Protection Agency*) anunciou que o etanol brasileiro de cana-de-açúcar reduz as emissões de GEE em 61% em relação à gasolina – o que o caracteriza, segundo a Lei Federal norte-americana *Energy Independence and Security Act* (EISA) de 2007, como um “biocombustível avançado”. Tal reconhecimento aumenta, ainda mais, a necessidade de investimentos em pesquisas relacionadas ao biocombustível no Brasil, segundo pesquisadores (FAPESP, 2010 *apud* SAMPAIO, 2013).

Segundo Sampaio (2013), o ano açucareiro, adotado internacionalmente, começa em setembro e termina em agosto do ano seguinte.

O ciclo completo da cana-de-açúcar é variável, dependendo do clima local, de variedades e práticas culturais. No Brasil, o ciclo é, geralmente, de seis anos, dentro do qual ocorrem cinco cortes, um para a cana planta e quatro tratos de soqueiras (SAMPALIO, 2013).

De forma geral, o primeiro corte é feito 12 ou 18 meses após o plantio (dependendo da época do plantio), quando se colhe a chamada cana-planta. Os demais cortes, quando se

colhe a cana-soca resultante da rebrota, são feitos uma vez por ano, ao longo dos quatro anos consecutivos, com redução gradual da produtividade, até que se torne economicamente mais interessante reformar o canavial do que efetuar um novo corte. Substitui-se, então, a cana antiga por um novo plantio e inicia-se um novo ciclo produtivo. Nessa reforma do canavial, a área cultivada fica, alguns meses, em descanso e pode receber outros cultivos de ciclo curto, como leguminosas (BNDES; CGEE, 2008).

Grande parte das unidades consumidoras de energia durante a fase agrícola da produção do etanol advém de fertilizantes e agrotóxicos, que não só apresentam a problemática financeira como também são responsáveis por um dilema ambiental. Para se ter um balanço energético mais positivo seria necessária a adição de maior quantidade de fertilizantes objetivando o aumento da produção. Entretanto, a questão ambiental necessita que sejam reaproveitados resíduos, principalmente orgânicos, para melhorar o aproveitamento de adubos e fertilizantes (OLIVEIRA, 2010).

Em relação a outras matérias-primas, o processo de produção de etanol a partir da beterraba açucareira, por exemplo, requer a utilização anual de 28.940 GWh de energia elétrica, 94 milhões de m³ de água e 1265 milhões de kg de vapor. Já para a produção do milho, são necessários uma longa lista de utilitários, entre eles gás natural e torre de resfriamento. Estima-se que por ano, a produção de milho demanda 29.400 GWh de energia elétrica, 59,3 milhões m³ de água e 11,8 milhões de kg de gás (BOWEN; KENNEDY; MIRANDA, 2010 *apud* MANOCHIO, 2014).

Segundo Leal (2010), o sistema de cogeração de energia é basicamente constituído de caldeiras que queimam bagaço (podendo adicionar palha); turbinas de contrapressão de acionamento de turbogeradores de energia elétrica e dos equipamentos mais pesados, como moendas, desfibradores, picadores, exaustores e bombas de água de alimentação das caldeiras. O vapor de saída das turbinas de contrapressão, com pressão em torno de 2,5 bar, é encaminhado para o processo para suprir a demanda por energia térmica.

Pellegrini (2009) cita que os sistemas de cogeração utilizados na maioria das usinas são baseados em caldeiras de geração de vapor a 1 bar e turbinas de contrapressão (escape a 2,5 bar). Aproximadamente, 50% do vapor necessário no processo é expandido nas turbinas de acionamento das moendas, cuja eficiência isoentrópica é inferior a 60% (consumo específico entre 14 a 16 kg/kWh).

Apenas uma fração de energia primária do bagaço (585 kWh/tcana) é convertida em energia útil, de forma a atingir a energia de 28 kWh/tcana na eletromecânica, 330 kWh/tcana na térmica e 58 kWh/tcana com a sobra de bagaço (LEAL, 2010).

A intenção da descentralização do setor elétrico brasileiro, associado com a crise de abastecimento de energia elétrica interna tem incentivado as empresas na indústria de cana-de-açúcar para produzir energia elétrica através da queima do bagaço da cana em usinas de cogeração. Essa abordagem reduz o impacto ambiental da produção de cana e abriu oportunidades para destilarias e usinas anexas aumentarem o seu produto nos cenários potenciais. Para melhorar tecnicamente e ambientalmente o desempenho na cogeração foram utilizadas análise termodinâmica e Avaliação do Ciclo de Vida (GUERRA *et al.*, 2014).

Para Guerra *et al.* (2014), a partir da ACV, observou-se que o desempenho melhorado de energia do sistema é acompanhado por impactos ambientais reduzidos para todas as categorias de impactos já avaliadas. Além da produção de vapor a 100 bar e 520 °C, resulta em maiores ganhos ambientais, tanto em termos absolutos quanto relativos.

A produção de eletricidade é uma importante fonte de receitas na indústria de açúcar e etanol (JAVALAGI; PATIL; BHUSHI, 2010). Para otimização da indústria de cana, vários fatores ajudam na produção de excedentes de eletricidade como as porcentagens de bagaço de cana, de fibra de cana, de umidade do bagaço, a eficiência da caldeira, o consumo de vapor de processo e consumo de energia elétrica na moagem (CHOHFI, 2004). Para a geração de energia elétrica na indústria do açúcar, os combustíveis básicos são o petróleo, o carvão, o gás, a energia hídrica, bagaço e casca de arroz (AL-AMIN; SIWAR; JAAFAR, 2009).

Guerra *et al.* (2014) afirmam ainda que a perspectiva de exportação de eletricidade para a rede nacional também durante os períodos ociosos de destilarias e usinas anexas motiva o setor brasileiro de açúcar e álcool para investir nesses sistemas.

No Brasil, muitas vezes, há energia excedente que pode ser exportada para a rede elétrica, melhorando o rendimento da indústria e gerando valor econômico (MANOCHIO, 2014).

1.6 O ETANOL DE PRIMEIRA E SEGUNDA GERAÇÃO

O etanol pode ser produzido a partir de diversas fontes, tanto renovável quanto fósseis. No entanto, a maior parte do etanol é produzida a partir de matérias-primas renováveis (biomassa) que contenham quantidades significativas de carboidratos na forma de açúcares, amidos e materiais lignocelulósicos (SAMPAIO, 2013).

É importante mencionar que o rendimento na produção de etanol envolve também a qualidade da cana-de-açúcar utilizada e isso está diretamente ligado a seu processo agrícola (BRONDANI, 2014).

As tecnologias de produção de etanol a partir de materiais ricos em açúcares ou amidos são chamadas de primeira geração, enquanto que os processos de produção de etanol e outros biocombustíveis a partir de materiais lignocelulósicos são chamados de segunda geração (LEAL *et al.*, 2010).

Conforme Vilela (2013), o etanol de segunda geração, produzido a partir da celulose presente nos resíduos da cana-de-açúcar e em outras matérias-primas vegetais, é uma alternativa fundamental aos cerca de cem países capazes de produzir o combustível renovável e que desejam fazê-lo sem prejudicar a produção de alimentos.

A preocupação em torno dos impactos gerados pelos biocombustíveis iniciou-se com a crescente demanda pelos mesmos. Tornou-se necessária a ampliação da utilização de terras devido o esgotamento da produtividade em terras tradicionais para evitar a migração das culturas para coberturas florestais, resultando, também, no aumento dos preços dos alimentos. Também a busca pela sustentabilidade ligada ao aumento da emissão de gases do efeito estufa vem motivando a conquista por novas alternativas bioenergéticas. Neste contexto, surgiu um grande interesse em todo o mundo pela utilização de resíduos celulósicos (como por exemplo, o bagaço da cana de açúcar e a palha do milho) para a produção de biocombustíveis, chamados de biocombustíveis de 2ª geração (NYKO *et al.*, 2010).

Manochio (2014) destaca que parte considerável de um vegetal não são amido nem açúcar, mas sim fibras que não são digeridas pelos fermentos tradicionais, como é o caso da cana-de-açúcar, que apresenta 2/3 de sua massa na forma de fibra não fermentável.

Outra preocupação relevante relatada por outros autores e comum em estudos, principalmente nos europeus, realizados para a produção de combustíveis renováveis, aponta a problemática com o desmatamento de florestas para o uso do solo visando à implantação de programas de biodiesel em países tropicais. Alguns exemplos são as plantações de palma para a produção de óleo na Malásia, Indonésia, escudo guianês colombiano e Amazônia brasileira, além da produção de soja no extremo norte do Brasil, trazendo impacto para o uso do solo e para a biodiversidade (RENÓ *et al.*, 2011; MONTEIRO, 2011 *apud* CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

Os impactos positivos dos biocombustíveis são particularmente visíveis na melhoria da qualidade do ar das áreas metropolitanas, mas também em áreas rurais, onde a colheita mecanizada de cana crua eliminou a queima da cana (MALÇA; FREIRE, 2006).

Impactos negativos, tais como a produção de etanol em larga escala a partir da cana pode levar à destruição ou danificação de áreas de alta biodiversidade, desmatamento, degra-

dação dos solos, e competição e esgotamento de recursos, causando um agravamento das condições de trabalho nos campos (GOLDEMBERG; COELHO; GUARDABASSI, 2008).

Segundo Elbehri, Segerstedt e Liu (2013), embora a produção combinada de açúcar e etanol à base de cana-de-açúcar seja reconhecida como um dos sistemas mais eficientes para a produção de biocombustíveis (rendimento por hectare), a indústria de cana-de-açúcar brasileira é responsável pela geração de diferentes tipos de resíduos orgânicos que, na maioria dos casos, não estão sendo ainda devidamente tratados, especialmente do ponto de vista energético.

1.7 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

Para Brondani (2014) qualquer produto manufaturado possui um ciclo de vida, ou seja, o produto é originado de matérias-primas, em seguida é usado pelos consumidores e posteriormente é disposto ou eliminado.

Os estudos de ACV tiveram início na década de 60 (ACV da Coca-Cola), com a crise do petróleo, que levou a sociedade a se questionar sobre o limite da extração dos recursos naturais, especialmente de combustíveis fósseis e de recursos minerais (ZAPPAROLI; SILVA, 2011).

Brondani (2014) também afirma que os primeiros estudos envolvendo, ainda que de uma forma embrionária o que hoje se chama de Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos, tiveram início durante a primeira crise do petróleo. A crise provocou uma busca por alternativas de energia e pela melhor utilização dos recursos naturais.

Os primeiros estudos tinham por objetivo calcular o consumo de energia e, por isso, eram conhecidos como “análise de energia” (*energy analysis*). O interesse por estudos de ACV acabou se enfraquecendo no decorrer da crise do petróleo. Porém, a ACV ressurgiu na década de 80 em decorrência do crescente interesse pelo meio ambiente. A partir de 1990, os estudos de ACV se expandiram muito e foram impulsionados pela normalização proporcionada pela série de normas ISO 14040 (ZAPPAROLI; SILVA, 2011).

Chehebe (1998 *apud* Brondani, 2014) enfatiza que apesar do principal enfoque desses estudos iniciais terem sido a questão energética, alguns deles chegaram a considerar, ainda que de forma tímida, vários aspectos ligados à questão ambiental, incluindo estimativas de emissões sólidas, líquidas e gasosas.

Os primeiros estudos de ACV no Brasil começaram nos anos 2000 e a partir daí várias iniciativas estão sendo realizadas para consolidar essa importante ferramenta de gestão ambiental. Dentre essas iniciativas, destacam-se: o Projeto Brasileiro de Inventário de Ciclo de Vida (ICV), desenvolvido pelo Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro), Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), Universidade de Brasília (UnB), Universidade de São Paulo (USP) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); o Programa Brasileiro de Ciclo de Vida estabelecido pelo Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (Conmetro); e o Projeto do Centro Regional (América Latina) de Ciclo de Vida, que busca facilitar o intercâmbio de informações em ACV e facilitar o desenvolvimento de ICVs regionalizados (ZAPPAROLI; SILVA, 2011).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) publicou as versões em português das seguintes normas brasileiras (NBR) da série ISO (*International Organization for Standardization*) sobre o tema ACV:

- ISO 14040 - *Life Cycle Assessment: Principles and Framework* (2009) (Avaliação do Ciclo de Vida: Princípios e Estrutura).
- ISO 14044 - *Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines* (2009). (Avaliação do Ciclo de Vida: Requisitos e Orientações).

Silva *et al.* (2016) afirmam que a ACV é uma técnica iterativa, sendo necessárias sucessivas análises críticas e eventuais revisões de fases anteriores para garantir a consistência do estudo.

1.7.1 CONCEITO DA ACV

O termo "ciclo de vida" para Renó *et al.* (2011), refere-se às principais atividades no decorrer da vida de um produto, desde o seu fabrico, a sua utilização e a sua manutenção, até sua disposição final, incluindo a aquisição de matéria-prima necessária para fabricar o produto.

Lim e Park (2009 *apud* Graef; Bezerra, 2017) afirmam que a ACV é uma metodologia utilizada para avaliar quantitativamente a importância dos potenciais impactos ambientais e identificar de forma sistemática os impactos ambientais de um produto.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um método baseado nas normas ABNT NBR ISO 14040:2009 e ABNT NBR ISO 14044:2009 que visam avaliar vários impactos ambientais potenciais de um produto ou de um serviço durante todo o seu ciclo de vida. Esta aborda-

gem leva em conta todas as etapas do ciclo de vida de um produto: a partir da extração de recursos naturais necessários à sua produção (petróleo, carvão, gás, etc.) ao seu fim de vida ou destruição (análise do "berço ao túmulo") (MENTEN *et al.*, 2013).

Como ciclo de vida, entende-se “estágios consecutivos e encadeados de um sistema de produto, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais até a disposição final” (ABNT, 2009b).

Silva *et al.* (2016) afirmam que é necessário que o desenvolvimento de estudos de ACV esteja pautado por aspectos metodológicos adequados. Um exemplo é o uso de dados compatíveis com o contexto retratado, pois estudos de ACV requerem uma quantidade significativa de informações.

Para Júnior e Demajorovic (2010), o conceito de ciclo de vida pode ser considerado como o conjunto de todas as etapas necessárias para que um produto cumpra sua função, desde a obtenção dos recursos naturais usados na sua fabricação até sua disposição final após o cumprimento dessa função.

Renó *et al.* (2011) ainda dizem que a ACV é uma metodologia que avalia os impactos ambientais de todas as fases da vida de um produto (do berço ao túmulo).

De acordo com Capaz (2009), a análise “do berço ao túmulo” (*Cradle to Grave*) abrange todo o ciclo de vida do produto, ou seja, desde a etapa de obtenção das matérias-primas usadas no processamento, até a disposição dos resíduos gerados pelo uso final do produto.

Para Rojas (2012), “a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) é uma ferramenta analítica para estimar, avaliar e interpretar os impactos ambientais atribuíveis ao ciclo de vida de um produto. ACV é uma ferramenta da área de ecologia industrial padronizada pela Organização Internacional para Normalização nas séries da norma ISO 14040, que visa apoiar decisões com respeito a políticas públicas, *design* de produtos, compras, melhorias nos processos produtivos e projetos numa perspectiva ambiental”.

A ACV oferece uma visão abrangente dos diferentes aspectos ambientais do produto ou processo e um quadro mais preciso das verdadeiras compensações ambientais em produto e processo de seleção, a fim de apoiar o processo de tomada de decisão (AZAPAGIC, 1999; THEODOSIOU; KORONEOS; MOUSSIOPOULOS, 2005 *apud* RENÓ *et al.*, 2011).

A ACV é uma técnica para avaliar o desempenho ambiental de determinado produto incluindo a identificação e a quantificação da energia e das matérias-primas utilizadas no seu ciclo de fabricação. Também são analisadas as emissões para água, solo e ar decorrentes da produção, utilização e disposição final avaliando-se o impacto ambiental associado ao uso dos recursos naturais (energia e matérias), emissões de poluentes e identificação de oportunidades

para melhorar o sistema de forma a otimizar o desempenho ambiental do produto (QUEIROZ; GARCIA, 2010).

De acordo com *International Reference Life Cycle Data System - ILCD* (2010), a ACV é uma estrutura abrangente e padronizada internacionalmente, que quantifica as emissões relevantes de resíduos e consumo de recursos ambientalmente relacionados com os impactos ambientais e esgotamento de recursos, que são associados com os produtos e serviços. Esta ferramenta dá suporte às decisões necessárias para a eficácia e eficiência de um consumo de produto mais sustentável, além de informar os níveis gerenciais sobre o desempenho ambiental dos processos e produtos (THORESEN, 1999 *apud* GRAEL; BEZERRA, 2017).

De acordo com a Associação Brasileira de Ciclo de Vida – ABCV (2011 *apud* Claudino e Talamini, 2013) no Brasil, o acrônimo ACV significa, usualmente, Análise de Ciclo de Vida, mas a tradução do inglês “*Life Cycle Assessment (LCA)*” também admite o significado: Avaliação de Ciclo de Vida e em alguns países europeus se usa o termo “*Ecobalance*”, ou “Ecoequilíbrio”.

Basicamente, esta técnica faz uma análise ou compilação de dados de um sistema de produto cujo resultado é avaliado posteriormente. Portanto, a ACV é uma análise (*analysis*) ao detalhar os fluxos de um sistema de produto e é uma avaliação (*assessment*) ao interpretar os fluxos (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

A Avaliação do Ciclo de Vida de Produtos é, na realidade, uma ferramenta técnica que pode ser utilizada em uma grande variedade de propósitos. As informações coletadas na ACV e os resultados de suas análises e interpretações podem ser úteis para tomadas de decisão, na seleção de indicadores ambientais relevantes para avaliação da performance de projetos e reprojatos de produtos ou processos e/ou planejamento estratégico (CHEHEBE, 1998 *apud* BRONDANI, 2014).

Conforme definição da *United States Environmental Protection Agency (EPA)*, a ACV emprega uma abordagem sistêmica para avaliar sistemas industriais em toda a sua vida útil. O objetivo é estudar as consequências ambientais de um determinado produto, processo ou atividade desde a sua criação (extração de matéria-prima), até a sua disposição final. (VILELA, 2013).

Segundo Weidema e Meeusen (2000 *apud* Brondani, 2014) e Mendonça (2007), a ACV é definida como uma técnica para determinar os potenciais impactos associados a um produto pela compilação de um inventário das intervenções relevantes em todo seu ciclo de vida, desde a retirada das matérias-primas necessárias a sua produção até sua disposição final no meio ambiente.

Claudino e Talamini (2013) afirmam que os estudos de ACV aplicados com o propósito de identificar impactos na biodiversidade podem ser de grande importância para o Brasil, haja vista que o país ainda possui áreas de floresta nativa e de preservação ambiental permanente a serem exploradas, inclusive com muitas áreas que podem combinar atividades de produção com a conservação de florestas.

1.7.2 ASPECTOS NORMATIVOS DA ACV E ICV

A ACV está diretamente ligada à gestão ambiental onde as normas da série ISO 14000 (Figura 4) certificam o estudo ambiental, podendo ser implementadas de modo isolado, dependendo do objetivo e necessidade do estudo.

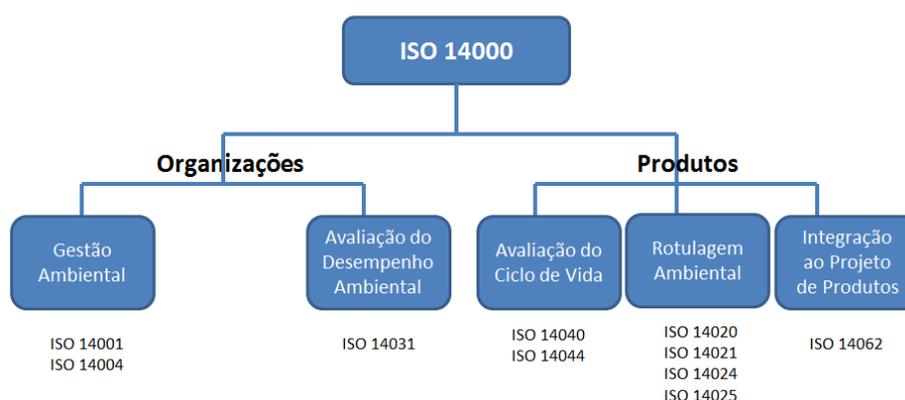


Figura 4. Estrutura das normas ISO 14000.
Fonte: Adaptado de Brondani, 2014.

Para entender e aplicar a ACV ou mesmo o ICV as seguintes normas foram publicadas:

- ISO 14040 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e Estrutura Básica, a qual descreve os princípios e a estrutura para ACV, incluindo a definição do objetivo e escopo, a fase de análise do inventário de ciclo de vida, a fase de avaliação do impacto de ciclo de vida, a fase de interpretação do ciclo de vida, elaboração do relatório e análise crítica da ACV, as limitações da ACV e a relação entre as fases da ACV.
- ISO 14044 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Diretrizes.

Brondani (2014) afirma que além das normas acima, foram publicados dois Relatórios Técnicos (*Technical Report*) e uma Especificação Técnica (*Technical Specification*) relacionados à ACV:

- ISO TR 14047:2012 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Exemplos de Aplicação da ISO 14044 para avaliação de situações de impactos.
- ISO TR 14049:2012 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Exemplos de Aplicação da ISO 14044 para a definição de objetivos e escopo e análise de inventário.
- ISO TS 14048:2002 Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Formato da Apresentação de Dados.

1.7.3 METODOLOGIA E ETAPAS DA ACV E DO ICV

Numata e Ugaya (2016) consideram a ACV a metodologia mais consistente de avaliar o desempenho ambiental dos produtos.

De acordo com a ABNT NBR ISO 14040 (2009a), as quatro fases de uma ACV são: Definição do Objetivo e Escopo; Inventário do Ciclo de Vida (ICV); Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e Interpretação.

O método ACV tem uma estrutura hierárquica de composição de dados para medir os efeitos ambientais. No entanto, esta sistemática é complexa na organização de dados, especialmente na fase de dados do inventário. Este passo é complicado pelas incertezas e dificuldades na coleta de dados para análise e quantificação dos recursos que são críticos na geração dos efeitos ambientais e certas informações que às vezes, não estão disponíveis facilmente. A incerteza de informações na ACV deve ser trabalhada de forma sistemática para minimizar o grau de incerteza gerado pelos vários fatores que podem influenciar a qualidade dos resultados desta análise do inventário do ciclo de vida (ICV) e afetar o escopo do estudo da ACV (NUMATA; UGAYA, 2016).

A Figura 5 mostra as etapas da ACV de forma esquemática.

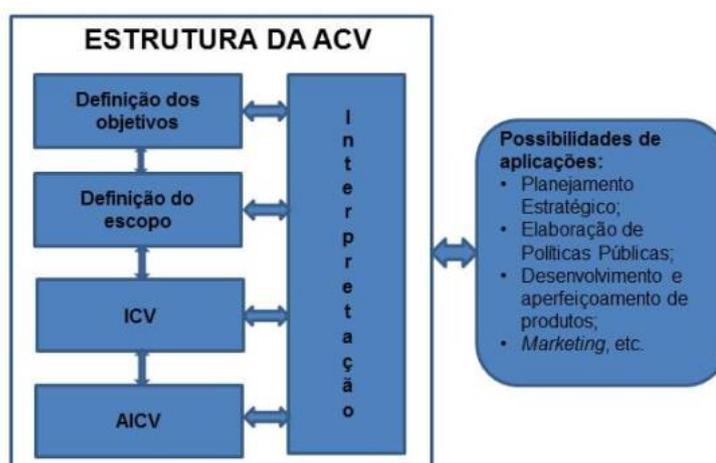


Figura 5. Etapas de Avaliação de Ciclo de Vida.

Fonte: Adaptado da ABNT NBR ISO 14040:2009 Versão Corrigida 2014.

1.7.3.1 Definição do Objetivo e Escopo

É uma das fases mais importantes, visto que o estudo é realizado de acordo com o estabelecido nesta etapa, que define o propósito do estudo, o resultado esperado, os limites do sistema, unidade funcional (UF) e as suposições (ROY *et al.*, 2009 *apud* CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

A definição do objetivo deve incluir, de forma clara, os propósitos pretendidos e conter todos os aspectos considerados relevantes para direcionar as ações que deverão ser realizadas. É preciso definir se o almejado no estudo é a comparação de produtos ou somente uma relação com um padrão; se existe a intenção de promover alguma melhoria ambiental em um determinado produto existente ou projetar um produto completamente novo; ou se pretende obter mais informações sobre seu produto (BRONDANI, 2014).

Na determinação das fronteiras do sistema deve se levar em consideração vários tipos de parâmetros e fatores, tais como: os fluxos de matéria e de energia na sequência de produção; a produção e a utilização de combustíveis, eletricidades e calor; a distribuição e o transporte; a utilização dos produtos, a eliminação do processo e dos produtos; a recuperação dos produtos já utilizados (reutilização e reciclagem); utilização de recursos naturais e o fabrico e manutenção de equipamentos. O sistema de produto representa o ciclo de vida completo de um produto ou processo (BRONDANI, 2014).

1.7.3.1.1 Limites ou Fronteiras do Sistema, Unidade Funcional e Fluxos

A análise “do berço ao portão” (*Cradle to Gate*) considera a etapa de obtenção da matéria-prima até o processamento do produto desejado, neste caso, a análise de biocombustíveis ficaria restrita apenas à etapa agrícola e à etapa industrial. Já, a “análise portão-portão” (*Gate to Gate*), é usada quando se pretende estudar processos mais específicos, considerando apenas uma etapa ou processo do ciclo de vida (BRONDANI, 2014).

Há a análise WTT (*Well-to-Tank*), a qual abrange o ciclo de vida do combustível entre a produção da matéria-prima e a disponibilização do produto final para o consumidor. Alguns autores usam esta análise até a obtenção do produto final, sem considerar a etapa de distribuição, ou seja, WTG (*Well-to- Gate*).

A análise TTW (*Tank-to-Wheel*) estuda apenas uso do combustível no automóvel.

As análises WTT e TTW, juntas, configuram a então análise WTW (*Well-to-Wheel*) que abrange todas as etapas do ciclo de vida de um combustível, desde sua produção até seu uso final, isto é, “do berço ao túmulo” (BRONDANI, 2014).

Os limites das fronteiras consideradas em uma ACV ou ICV e suas denominações são apresentadas na Figura 6.

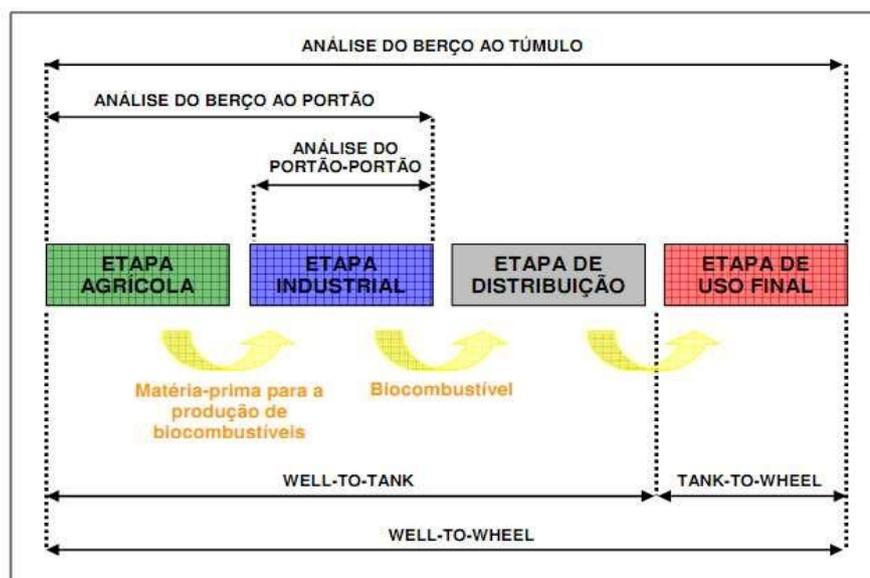


Figura 6. Fronteiras de um sistema de produção de biocombustíveis.
Fonte: CAPAZ, 2009 *apud* Brondani, 2014.

Menten *et al.* (2013) afirmam que geralmente se faz uma distinção entre "Well-to-Tank" (WTT) limites que incluem todos os passos da produção de matérias-primas de biomassa para o transporte e distribuição de combustível, e limites "Well-to-Wheel" (WTW) que incluem as etapas WTT e o uso de combustível (*end-of-life*). Infraestruturas podem ou não ser incluídas dentro dos limites do sistema.

Conforme Capaz (2009), a maioria das análises da produção de biocombustíveis é do tipo “berço ao portão” (*Cradle to Gate*) ou do tipo WTT (*Well-to-Tank*), contabilizando apenas a energia consumida no cultivo da biomassa, no seu processamento e, talvez, na distribuição do combustível.

Pieragostini, Mussati e Aguirre (2012) também consideram que a análise “berço ao portão” (*Cradle to Gate*) é a mais utilizada em estudos aplicando a ACV em processos.

Em relação à Unidade funcional (UF), é uma medida da função do sistema estudado. Todos os resultados da ACV ou do ICV do mesmo estudo devem ser expressas na mesma unidade funcional para permitir a comparação (MENTEN *et al.*, 2013).

A unidade funcional é o desempenho quantificado do sistema de produto, utilizada como unidade de referência (ABNT, 2009a). Entretanto, quando o escopo não cobre todo o

ciclo de vida do produto, adota-se o termo “unidade declarada” (ISO, 2007 *apud* SILVA *et al.*, 2016).

O fluxo de referência é o fluxo (ou os fluxos, no caso de processos multifuncionais⁴) ao qual todos os demais fluxos de insumos e saídas (por exemplo, todos os fluxos elementares⁵ e fluxos de produtos⁶ não referenciados e fluxos de resíduos⁷) estão quantitativamente relacionados. O fluxo de referência concretiza a unidade funcional e pode ser expresso em relação direta à unidade funcional ou de uma forma mais orientada ao produto (IBICT, 2014).

1.7.3.1.2 Sistema de Referência

Resultados do sistema estudado têm que ser em comparação com os resultados de um sistema de referência (geralmente um combustível fóssil). Este sistema de referência tem que ser definido de acordo com fins do estudo e das escolhas metodológicas; em especial, deve ter limites semelhantes, a mesma unidade funcional e contexto geográfico e temporal similar (MENTEN *et al.*, 2013).

1.7.3.2 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

É a fase mais trabalhosa e demorada comparada com outras fases, sobretudo pela coleta de dados. Esta coleta pode consumir pouco tempo em caso de existirem boas bases de dados e se clientes e fornecedores estiverem dispostos a ajudar. Informações de bases de dados podem ser utilizadas para processos que não são de produtos específicos, tais como dados gerais sobre a produção de eletricidade, carvão e embalagem (ROY *et al.*, 2009).

Para Marvuglia *et al.* (2013), Inventários de Ciclo de Vida convencionais são modelos estáticos não considerando qualquer mecanismo de maximização das receitas e equilíbrio de preços sob restrições externas.

Vilela (2013) cita que o inventário é a fase da ACV onde os dados são coletados, os sistemas são modelados, e os resultados de ICV são obtidos. Com a definição do objetivo e

⁴ Processos que têm mais de um produto como saída (coprodução, por exemplo, de diferentes produtos químicos em um processo de síntese com subprodutos valiosos) ou trata mais de um resíduo no lado da entrada (coserviços) (IBICT, 2014).

⁵ Materiais ou energia retirados do meio ambiente e que entram no sistema em estudo sem sofrer transformação prévia por interferência humana, ou materiais ou energia que são liberados no meio ambiente pelo sistema em estudo sem sofrer transformação subsequente por interferência humana (ABNT, 2009a).

⁶ Bens e serviços tanto como um “produto” de um processo quanto insumos/materiais de consumo que vinculam o processo analisado a outros processos (IBICT, 2014).

⁷ Águas servidas como resíduos sólidos/líquidos que precisam ser vinculados a processos de gestão de resíduos para garantir uma modelagem completa dos esforços e impactos ambientais relacionados (IBICT, 2014).

escopo do estudo, um plano inicial para a realização da fase de inventário da ACV pode ser elaborado.

Silva *et al.* (2016) também afirmam que a coleta de dados é a etapa que mais demanda esforço e tempo no estudo de ACV e se divide entre dados primários, ou seja, obtidos diretamente dos locais de produção, e dados secundários (bases de dados internacionais, considerando que o sistema nacional de inventários de ciclo de vida ainda está em desenvolvimento).

Tenório e Santos (2010) afirmam que o ICV tem como objetivo quantificar todos os aspectos ambientais representativos relativos às entradas e saídas de um sistema de produto, às categorias de impacto e às fronteiras e relacionar esses dados à unidade funcional.

Para Brondani (2014), geralmente o inventário inicia-se com a análise seletiva, ou seja, uma coleta grosseira de dados e pontos mais importantes do processo. Depois, ajustam-se as próximas coletas de forma a aperfeiçoar a investigação.

De acordo com o Manual ILCD, uma análise baseada exclusivamente no ICV, sem uma avaliação de impactos, pode ser justificável em alguns casos, dependendo do objetivo do estudo (IBICT, 2014).

Segundo Silva *et al.* (2016), a base nacional de inventários de ciclo de vida (ICV) ainda se encontra em estágio inicial de desenvolvimento, sendo necessário recorrer a bases de dados internacionais.

Dois princípios principais de modelagem de ICV são utilizados na prática de ACV: modelagem atribucional, a qual representa a cadeia de abastecimento real ou prevista, específica ou média, e também sua cadeia de valor de uso e fim de vida (o sistema existente ou previsto é incorporado a uma tecnosfera⁸ estática) e a modelagem consequencial, a qual representa a cadeia de abastecimento genérica como é esperada teoricamente em consequência da decisão analisada (o sistema interage com os mercados e são representadas as alterações que uma demanda adicional pelo sistema analisado pode produzir em uma tecnosfera dinâmica que está reagindo a essa demanda adicional) (IBICT, 2014).

⁸ Refere-se ao campo gerenciado (IBICT, 2014).

1.7.3.2.1 Etapas da análise do inventário

A análise do ICV, segundo Brondani (2014), pode seguir as seguintes etapas:

1. Preparação para a coleta de dados;
2. Coleta de dados;
3. Refinamento dos limites do sistema;
4. Esquematização do diagrama de blocos representativo do sistema;
5. Determinação dos procedimentos de cálculo;
6. Procedimentos de alocação.

É possível que o produto para o qual o estudo de ACV está sendo desenvolvido seja proveniente de um processo de fabricação que gere outros produtos (o que na nomenclatura de ACV é denominado como “coprodutos”) e que não seja viável coletar as informações de inventário separadamente para cada produto. Neste caso, torna-se necessária a divisão “artificial” das entradas e saídas entre os coprodutos, o que é denominado “alocação” (SILVA *et al.*, 2016).

Para Vilela (2013), o ICV se baseia principalmente na análise de sistema tratando a cadeia de processos como uma sequência de subsistemas que interagem entre as entradas e saídas.

A descrição do sistema por meio de um diagrama de blocos permite representar os processos mais relevantes incluídos no estudo do ciclo de vida de forma clara e simples, bem como a relação entre eles e os processos. Dessa forma, possibilita uma visão global do processo (BRONDANI, 2014).

É importante, segundo a ABNT (2009b), documentar a memória de cálculo do inventário, para permitir sua verificação por alguém que não tenha participado diretamente da coleta de dados ou mesmo por uma terceira parte, o que é necessário quando se fazem afirmações comparativas divulgadas publicamente.

1.7.3.3 Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A AICV visa compreender e avaliar os impactos ambientais com base na análise de inventário no âmbito da meta e no escopo do estudo, fase em que os resultados do inventário são

atribuídos a diferentes categorias de impacto com base nos tipos de impactos esperados ao meio ambiente. A avaliação dos impactos na ACV geralmente consiste dos seguintes elementos: classificação, caracterização, normatização e avaliação (ROY *et al.*, 2009).

1.7.3.4 Interpretação dos Resultados

O propósito de uma ACV ou ICV é se obter conclusões que possam apoiar uma decisão ou fornecer um resultado facilmente compreensível. O Inventário do Ciclo de Vida e os resultados da avaliação de impacto são discutidos juntos, no caso de uma AICV, ou unicamente do inventário, no caso da análise ICV e significativas questões ambientais são identificadas para conclusão e recomendações compatíveis com os objetivos e escopo do estudo (ROY *et al.*, 2009).

A ABNT (2009b) cita que dependendo do objetivo, o estudo pode não incluir a fase de avaliação de impacto e, neste caso, é denominado estudo de ICV.

A realização de um estudo de ICV ou ACV é quase sempre um processo iterativo: uma vez definido o objetivo do trabalho, são derivadas as definições de escopo inicial que estipulam os requisitos para o trabalho subsequente. No entanto, como há maior disponibilidade de informações na fase do inventário de ciclo de vida de coleta de dados e na etapa subsequente de avaliação de impactos e interpretação, as definições do escopo inicial normalmente precisam ser refinadas e, por vezes, também revisadas (IBICT, 2014).

O objetivo da fase de interpretação é analisar os resultados, tirar conclusões, explicar as limitações e fornecer recomendações para um estudo do Inventário do Ciclo de Vida ou uma análise completa do ciclo de vida. Deve-se, nesse estágio, consultar os objetivos e o escopo definidos inicialmente para o estudo (BRONDANI, 2014).

Cherubini e Ulgiati (2009) elaboraram um estudo referente ao conceito de biorrefinaria, que produz bioetanol, bioenergia e bioquímicos com dois tipos diferentes de resíduos agrícolas: palha de milho e palha de trigo, utilizando a abordagem de ACV que leva em conta todos os fluxos de entrada e saída que ocorrem ao longo da cadeia de produção. As conclusões mostraram que o uso de resíduos de colheitas em uma biorrefinaria poupa cerca de 50% de emissões de gases de efeito estufa (*greenhouse gases* - GHG) e reduzem a demanda de energia fóssil em cerca de 80%.

1.8 O BIOGÁS

A Associação Brasileira de Biogás e Biometano – Abiogás (2015) conceitua biogás como uma mistura de gases resultante do processo de degradação da matéria orgânica na ausência de oxigênio, ou seja, em um processo anaeróbico. O principal componente desta mistura é o metano, um gás com alto potencial energético, o que faz do biogás uma fonte renovável de energia.

A produção de biogás, ou digestão anaeróbica (DA), é um método de produção de gestão de resíduos em expansão e de energias renováveis que tem relevância para a reciclagem de nutrientes (LANTZ *et al.*, 2007; NEGRO *et al.*, 2007; LUBAEK *et al.*, 2012 *apud* HUTTUNEN; MANNINEN; LESKINEN, 2014).

O biogás é produzido a partir da decomposição da matéria orgânica (resíduos orgânicos) por ação de bactérias. Tal processo denomina-se biodigestão anaeróbica. O biogás pode ser também produzido a partir de resíduos sólidos urbanos contidos em aterros sanitários ou do esgoto sanitário em estações de tratamento de esgoto, sendo, em ambos os casos, também sob a ação de bactérias por biodigestão anaeróbica (ANP, 2017).

Para a Abiogás (2015), dentre as fontes de biogás, pode-se citar especialmente: fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (RSU); resíduos da produção de açúcar e álcool; efluentes sanitários; dejetos de animais e efluentes industriais diversos.

A digestão anaeróbia dos resíduos de cana-de-açúcar pode ser considerada uma estratégia promissora; digerido, pode ser utilizado para substituir parcialmente os adubos minerais nos campos do biogás; produzido, pode ser melhorado na forma de biometano e vendido como um novo produto energético proveniente da cana-de-açúcar (JANKE *et al.*, 2015).

Na visão da Abiogás, o mercado de biogás pode se desenvolver com alto índice de nacionalização e preços extremamente competitivos (ABIOGÁS, 2017).

A digestão anaeróbica é uma tecnologia madura e bem testada. Isso resulta em altos níveis de produção de energia e boa previsibilidade, bem como em grande versatilidade (dependendo da demanda, o biogás pode ser usado para produzir biometano ou eletricidade e calor). As estações de serviço de gás natural veicular (GNV) e gás natural liquefeito (GNL) não são tão dominantes quanto as suas contrapartes de combustível líquido, mas estão mais disponíveis do que as instalações de reabastecimento para outros combustíveis alternativos, como o transporte elétrico e hidrogênio (H) (EBA, 2016).

No entanto, para Janke *et al.* (2015), antes de ser implementado em grande escala, o processo DA deve ser cuidadosamente avaliado, especialmente no que se referem às características dos substratos, nutrientes, macronutrientes, oligoelementos e produção específica de biogás. Esses parâmetros influenciam diretamente alguns outros parâmetros importantes do processo, como o pH, inibidores potenciais, macronutrientes potenciais e deficiências de oligoelementos, bem como taxas de degradação.

O biogás é um gás agressivo em termos de corrosão, os equipamentos utilizados exigem cuidados especiais. Esta característica é uma consequência da presença de vestígios de sulfureto de hidrogênio (SALOMON; LORA, 2009).

Franchetti (2013) afirma que para a gestão de resíduos, a digestão anaeróbia oferece um método energeticamente equilibrado, que pode ser economicamente competitivo com a compostagem e incineração de resíduos. Uma característica única da DA é a possibilidade de produção de fertilizantes orgânicos a partir de uma grande variedade de fontes de resíduos orgânicos (HOLM-NIELSEN; AL SEADI; OLESKOWICZ-POPIEL, 2009).

Tseng, Lin e Chiu (2009 *apud* Grael; Bezerra, 2017), comentam sobre o efeito positivo em toda cadeia de suprimentos de um produto da necessidade de diminuição na geração de resíduos, além do desenvolvimento de produtos que causam um impacto ambiental reduzido durante todo seu ciclo de vida. E os estudos de ACV são fundamentais para dar suporte às decisões de questões relacionadas a desenvolvimento de produtos (ILCD, 2010).

O biogás apresenta uma forma crescente de produção de energia nos municípios e localidades rurais e também é uma opção de gerenciamento de resíduos viável. Em termos de análise do ciclo de vida ambiental (ACV), a produção de biogás parece oferecer uma oportunidade única para combinar a reciclagem de nutrientes na produção de energia usando vários recursos subutilizados como biorresíduos municipais ou estrume. As ACVs de produção de biogás sugerem benefícios relacionados, por exemplo, com a redução das emissões de CO₂ e à substituição dos adubos químicos (HUTTUNEN; MANNINEN; LESKINEN, 2014).

Como composição média, o biogás, segundo Salomon e Lora (2009), tem valor calorífico de 22,5 a 25 MJ/m³, sendo 35.800 kJ/m³ de metano, ou seja, 6,25 a 10kWh/m³.

O potencial de geração de eletricidade a partir do biogás corresponde a 0,9% do total da eletricidade gerada no país, a qual de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) 2017 (ano base 2016) é de 578.898 GWh (EPE, 2017).

Para Huttunen, Manninen e Leskinen (2014), a adoção de tecnologias de produção de biogás é geralmente promovida com base em razões ambientais, que são fundamentadas em Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

Os principais resíduos disponíveis que poderiam produzir biogás no Brasil são: resíduos domésticos sólidos, esgoto, vinhaça do etanol e resíduos de gado. A avaliação das quantidades de resíduos, produção específica de biogás e tecnologias de conversão de mercado maduras permitiram a Salomon e Lora (2009) concluir que o Brasil tem um potencial de geração de eletricidade do biogás, obtido a partir da digestão anaeróbia de resíduo, de cerca de 1,05 GW - 1,13 GW.

De acordo com Claudino e Talamini (2013), a geração de resíduos dos sistemas industriais, resíduos urbanos e resíduos dos sistemas agrícolas podem gerar graves efeitos a longo prazo e, em muitos casos, necessitar de complexos e caros processos de recomposição e reutilização para serem descartados ou reaproveitados no meio ambiente.

Os resíduos orgânicos gerados durante as produções de açúcar e / ou etanol têm, segundo Janke *et al.* (2015), características que devem ser levadas em conta durante o projeto do processo de digestão anaeróbia.

As pesquisas científicas direcionam para importantes caminhos, sobretudo para a reciclagem de resíduos agrícolas destinados à produção de biocombustíveis de segunda geração, os quais podem ter seu volume ampliado em todos os padrões que convertem resíduos lignocelulósicos em bioenergia e bioquímicos. Esta alternativa torna possível utilizar-se uma infinidade de plantas e resíduos agrícolas como matéria-prima, além de muitos resíduos possibilitarem alternativas locais de reaproveitamento para a geração de biogás e incineração como fonte de energia (CLAUDINO; TALAMINI, 2013).

Enquanto alguns destes resíduos orgânicos na produção do etanol são aplicados diretamente como fertilizantes orgânicos nos campos para reciclagem de nutrientes, sem utilização de energia prévia (ou seja, vinhaça e torta de filtro), a outra parte dos resíduos é utilizada principalmente como combustível em sistemas de baixa eficiência de cogeração (ou seja, o bagaço) ou mesmo deixado para a deterioração sobre os campos (isto é, palha) devido a uma falta de incentivos para produzir a partir deles bioenergia (JANKE *et al.*, 2015).

A quantidade de biogás gerado, por exemplo, a partir da vinhaça é de 2.739.610.425 N.m³/colheita e a vinhaça gera anualmente 819,27 MW em microturbinas (30 KW) e 879,96 MW em geradores de 80 KW (SALOMON; LORA, 2009).

As políticas centradas exclusivamente em específicos benefícios ambientais, tais como, a redução das emissões de carbono fóssil, podem criar surpresas em relação à sustentabilidade global. Na Alemanha, por exemplo, os incentivos econômicos para a produção de energia renovável (*Renewable Energy Sources Act*) aumentaram a produção de biogás, cau-

sando conflitos locais relacionados com a mudança nas paisagens agrícolas, aumentando os preços da terra e perda experiente de qualidade de vida (SPERLING, 2012).

Outros aspectos, segundo Janke *et al.* (2015), que devem ser levados em conta quanto ao conceito de biogás na agroindústria e que está em desenvolvimento é a sazonalidade das lavouras e a viabilidade de minimização dos efeitos negativos, conservação e armazenamento de parte dos substratos a serem utilizados durante o período de baixa temporada, permitindo uma maior utilização do sistema de biogás durante todo o ano.

Salomon e Lora (2009) demonstraram que o indicador de conversão de metano da vinhaça é de $14,23 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ m}^{-1}$ de vinhaça.

1.8.1 VANTAGENS, DESVANTAGENS E OBSTÁCULOS NA PRODUÇÃO DE ENERGIA COM O USO DO BIOGÁS

Para Salomon e Lora (2009), as vantagens de produzir energia elétrica a partir de biogás são:

- (a) a geração descentralizada, realizada próxima aos consumidores e que pode ser produzida a partir de fonte que foi tratada como resíduo;
- (b) a possibilidade de renda extra da energia gerada do biogás e vendida aos serviços de energia;
- (c) uma redução no montante de compra compensada da eletricidade consumida;
- (d) a possibilidade de utilizar processos de cogeração;
- (e) a redução das emissões de metano para a atmosfera, uma vez que este é um gás de efeito estufa importante, gerando créditos de carbono e reduções de odores, etc.

Para a Abiogás (2017), as externalidades positivas do biogás são: geração descentralizada local/regional; sustentabilidade das atividades geradoras (resíduos – substratos); produção de biofertilizantes; rota de produção de hidrogênio (CH_4); incorporação do capital privado em energia; energia renovável não intermitente; geração de economia e renda; capacitação e treinamento; interiorização do metano e redução de GEEs.

A produção de biogás pode ser implementada com a finalidade de gerenciamento de resíduos ou para a produção de energia. Isso pode resultar em diferentes tipos de otimização de custos e pode causar significativas diferenças para os impactos do ciclo de vida de produção de biogás (HUTTUNEN; MANNINEN; LESKINEN, 2014).

A vantagem de utilizar o biogás como fonte de energia não é apenas a geração de energia, mas também uma possível solução se utilizado na instalação onde o gás é produzido e a outro parte poderia ser vendida para a rede elétrica local (SALOMON; LORA, 2009).

A própria produção de biogás tem vários efeitos sociais e econômicos, que podem até mesmo criar *trade-offs*⁹ com os efeitos ambientais da atividade (SPERLING, 2012; MAGNANI, 2012 *apud* HUTTUNEN; MANNINEN; LESKINEN, 2014).

Por outro lado, Salomon e Lora (2009), afirmam que existem alguns desafios no uso pleno de biogás que deve ser superado, como por exemplo: necessidades de tecnologias nacionais de produção de limpeza do biogás, a viabilidade econômica e a de inspeção e sanções para possíveis danos.

A digestão não controlada de resíduos nos campos pode levar à libertação de grandes quantidades de metano, o que pode dificultar o efeito positivo da utilização de bioenergia na mitigação das alterações climáticas (JANKE *et al.*, 2015).

Salomon e Lora (2009) afirmam que os principais obstáculos sobre o uso do biogás no Brasil são:

- (a) elevados custos de investimento;
- (b) insuficientes programas de investigação e financiamento da digestão anaeróbica;
- (c) falta de um programa nacional de biogás, financiamento específico e incentivos do governo;
- (d) dificuldades para as pequenas fábricas de biogás comercializarem créditos de carbono;
- (e) falta de informação e fundos para os criadores de gado;
- (f) necessidade de definir tecnologia de biodigestão para cada caso separadamente e falta de materiais educacionais e orientadores para seleção e avaliação de viabilidade econômica.
- (g) a disseminação do uso da vinhaça para fertirrigação.

Salomon e Lora (2009) ainda citam que as principais restrições à produção de eletricidade através da biomassa no Brasil são: a falta de um programa nacional de biogás, financiamento, incentivos, pesquisas e desenvolvimento tecnológico nas áreas de digestão anaeróbica e geração de eletricidade de biogás. Os elevados custos de investimentos e a utilização de vinhaça como adubo também são limitações.

Em seu estudo Janke *et al.*(2015) concluíram que:

- (1) Os desafios da utilização de palha e bagaço como substratos para a produção de biogás são evidentes e foram identificadas potenciais deficiências nutricionais para esses substratos.

⁹ *Trade-off* pode ser entendido como a relação entre os custos/benefícios para melhoria de algo que trará benefícios futuros para uma organização, quando duas decisões entram em conflito mútuo (VILELA, 2013).

A suplementação de ureia poderia não só equilibrar a relação Carbono/Nitrogênio (C:N), mas também aumentar a capacidade tampão do sistema e melhorar a qualidade do digestato para posterior utilização como fertilizante nos campos de cana-de-açúcar.

(2) A torta de filtro pode desempenhar um papel importante para reduzir os efeitos negativos da sazonalidade da cana-de-açúcar no sistema de biogás, se utilizada como substrato alternativo da vinhaça durante a entressafra. Esse conceito ainda precisa ser tecnicamente comprovado, especialmente em relação à viabilidade do armazenamento da torta de filtro e do ganho líquido de energia que um procedimento de pré-tratamento poderia fornecer ao sistema.

1.9 O BIOMETANO

Para a *European Biogas Association* – EBA (2016), o biometano é um combustível renovável produzido através do aprimoramento do biogás e gás de síntese para a qualidade do gás natural. O biometano pode atender a todos os requisitos técnicos estabelecidos pelos fabricantes de veículos e operadores de sistemas de transporte de gás natural e - de forma correspondente - pode ser usado em todos os lugares da mesma forma que o próprio gás natural. O biometano, a alternativa renovável ao gás natural, é produzido principalmente a partir de duas tecnologias complementares: digestão e gaseificação anaeróbica.

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP (2017) conceitua biometano como um biocombustível gasoso oriundo do biogás.

O biometano, para a Abiogás (2015), é resultado do processo de purificação do biogás até características similares ao do gás natural. Para chegar a essa condição, é necessária a remoção da umidade, do dióxido de carbono e do sulfeto do hidrogênio, resultando então um combustível de alto poder calorífico e que pode ser utilizado em substituição ao Gás Natural Veicular (GNV).

Segundo a EBA (2016), é importante notar que, por definição, o biometano é um combustível produzido exclusivamente a partir de fontes renováveis, enquanto outros transportadores de energia em transportes como eletricidade ou hidrogênio, podem vir do mix energético do país (geralmente incluindo o carvão), a menos que seja especificado que foram gerados a partir de energia renovável.

O biometano pode ser adaptado às particularidades de veículos muito diferentes. O biometano comprimido é um combustível renovável seguro, flexível e amplamente disponível para carros particulares e veículos ligeiros semelhantes. O biometano liquefeito é mais denso

em energia e, portanto, é ideal para alimentar grandes motores (tanto na estrada como no mar) para longas distâncias com espaço e peso mínimos (EBA, 2016).

Ainda segundo a EBA (2016), o setor de biometano merece toda atenção e apoio e estima que nos próximos anos, a participação do biometano no transporte aumentará rapidamente.

1.9.1 VANTAGENS E OBSTÁCULOS NO USO DO BIOMETANO

O uso de biomassa no transporte tem a vantagem ambiental indireta de contribuir para uma economia circular. Além da energia, a digestão anaeróbica também fornece digestor (uma substância orgânica valiosa que pode ser usada como fertilizante orgânico na agricultura), o que por sua vez substitui a necessidade de produzir milhões de toneladas de fertilizante mineral intensivo em CO₂. Digerir o desperdício é uma alternativa muito melhor para o aterro e a incineração, pois dá ao material usado uma segunda vida (EBA, 2016).

Alternativas de uso do biogás como a sua transformação em metano automotivo podem ser consideradas dependendo do preço de energia elétrica e do combustível automotivo (HAADEL, 2000).

Além de usar o biometano puro em veículos, uma maneira inteligente e econômica de reduzir as emissões de GEE para atingir metas nacionais, segundo a EBA (2016), é misturando-o com gás natural. Combinando os dois, mesmo usando uma relação de baixo teor de biometano para gás natural, pode resultar em combustível que tem emissões substancialmente mais baixas que o gás natural simples.

O uso de biometano e gás natural reduzem significativamente as emissões de poluentes (hidrocarbonetos, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e partículas) em comparação com a gasolina e aos motores a diesel, e também está bem abaixo dos níveis de biodiesel e bioetanol (FACHVERBAND BIOGAS E.V., 2011).

O biometano é uma arma poderosa contra a mudança climática. A digestão anaeróbica de estrume e materiais similares capta emissões de metano que são até 23 vezes mais nocivas que o CO₂. Na ausência da tecnologia de biogás, o metano é emitido para a atmosfera devido à estiagem e resíduos de decomposição, como lodo de esgoto, resíduos urbanos, efluentes agroindustriais e resíduos agrícolas. Portanto, as emissões de CO₂ provenientes da queima de biometano são uma pequena fração das emissões evitadas de metano de decomposição de estrume e resíduos. Como resultado, a pegada de carbono total é muito baixa, quando comparada com seus equivalentes fósseis (EBA, 2016).

Outras vantagens ambientais do biometano, segundo a Abiogás (2017) são: redução na emissão de particulados de efeito local; saneamento ambiental; recuperação dos corpos hídricos; impacto direto na saúde pública, com redução no número de mortes por doenças cardiorrespiratórias.

As culturas energéticas para a produção de biometano (como o milho) têm uma baixa pegada de carbono devido aos seus altos rendimentos de produção, que podem aumentar o dobro do rendimento por hectare em comparação com outras culturas destinadas a produzir biocombustíveis líquidos. Portanto, nas condições adequadas, o biometano de culturas energéticas pode economizar 66% -70% em emissões em relação aos produtos petrolíferos e mais de 50% em comparação com a mistura de combustíveis fósseis da União Europeia, incluindo carvão e gás natural. Além disso, se as culturas são co-digeridas com estrume, como é frequentemente o caso, as economias de GEE são significativamente maiores (EBA, 2016).

O biometano de procedência qualificada pode ser misturado ao gás natural e comercializado por meio de conexão à rede de distribuição de gás canalizado, ou então, na forma de gás comprimido (ANP, 2017).

À medida que as reservas de combustível fóssil no mundo diminuem e a sua dependência energética piora, o biometano oferece uma oportunidade única para compensar o equilíbrio com uma fonte doméstica de gás que não só é sustentável, mas também renovável e, portanto, não é finita (EBA, 2016).

A mistura de biometano com gás natural pode combinar as vantagens ambientais do primeiro com os preços competitivos deste último, o que resultaria em um combustível significativamente mais barato e limpo do que o que está atualmente disponível. Esta possibilidade evitará aumentos de preços para o transporte a gás, algo que é crucial, já que os consumidores pesam as vantagens desse combustível alternativo. À medida que os volumes de biometano aumentam e os custos de produção diminuem, será possível aumentar sua participação na mistura de combustível e, desse modo, avançar para o transporte renovável completamente descarbonizado (EBA, 2016).

Como desafios, segundo a EBA (2016), o biometano, semelhante a outros combustíveis, requer infraestrutura de distribuição e o desenvolvimento da indústria de biometano, em conjunto com todo o setor de transportes de baixo carbono e depende fortemente das políticas públicas.

1.10 BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético é um termo utilizado para indicar a relação entre a energia investida na produção e a contida, no caso, no biocombustível. Na maioria das culturas, a energia investida provém quase que totalmente de origem fóssil, e com a diminuição das reservas destes combustíveis é cada vez maior a necessidade de um estudo desta relação energética (ANATER *et al.*, 2016).

No balanço energético, segundo Claudino e Talamini (2013), geralmente são considerados: a energia empregada na produção do biocombustível, a demandada nos processos de fabricação e a requerida na obtenção de outros insumos utilizados no processo.

No Brasil, os resultados existentes sobre o balanço energético da produção de etanol de cana-de-açúcar indicam um balanço positivo no valor de 9:1, em média. Isso significa que para cada unidade de energia fóssil utilizada no processo, por exemplo, 9 unidades de energia renovável são produzidas (MACEDO; SEABRA; SILVA, 2008).

Analisando uma usina sucroenergética e baseados em referências bibliográficas, Anater *et al.* (2016) calcularam o gasto energético total para a produção de etanol e obtiveram como resultado 21.787,8 MJ.ha⁻¹. Já a produção energética total resultou em 134.400 MJ.ha⁻¹.

Para Turdera (2013), um dos maiores exemplos de dependência de combustíveis fósseis para a produção de biocombustíveis é a utilização de adubos químicos nitrogenados que são derivados do petróleo. Ao longo da cadeia do etanol, são necessários inúmeros insumos, como potássio, fósforo, nitrogênio, herbicidas para o preparo da terra, e gasto de combustível para transporte da cana à usina e com transporte entre a usina e o centro de distribuição do combustível.

Para Santos *et al.* (2012), o etanol de primeira geração, obtido por meio do caldo de cana-de-açúcar, é o único combustível, que atualmente tem potencial para atender a crescente demanda mundial com um custo relativamente baixo e com menores teores de poluentes. Os processos que mais emitem gases de efeito estufa na cadeia de produção do etanol dizem respeito à produção da cana, como transporte, colheita e plantio, decomposição de fertilizantes, e em muitas vezes, queima da palha (MACEDO *et al.* 2004 *apud* ANATER *et al.*, 2016).

Várias estimativas baseadas no ciclo de vida do etanol mostram que o etanol reduz em até 90% as emissões quando comparado com a gasolina (ABRAMOVAY, 2009).

O bagaço é um dos resíduos mais importantes, já que pode ser utilizado na queima em caldeiras, gerando calor e eletricidade no processo de cogeração. Ao utilizar esses resí-

duos, o balanço energético torna-se ainda mais positivo, já que a energia investida na produção da cana é aproveitada ao máximo (COELHO *et al.*, 2016).

O biogás, segundo a Abiogás (2017), supre 24% da demanda de energia elétrica nacional, a qual é de 473.395 GWh e dos 60 bilhões de litros de diesel demandados no Brasil, o biometano supre 44%.

Segundo a Abiogás (2017), o potencial brasileiro de biometano por fonte é de 50 milhões m³/dia no setor sucroenergético; 14 milhões m³/dia do setor alimentício e 6 milhões m³/dia da área de saneamento e a equivalência energética para 80 milhões m³/dia de biometano corresponde à potência instalada de 14,64 GW com fator de capacidade de 90%.

Em uma proporção de consumo de 47% de biometano e de 53% de diesel, houve em 2015, no Brasil, uma redução de 74% em emissões de gases do efeito estufa por queima de diesel (ABILOGÁS, 2017).

A planta de biometano *Nordvästra Skånes Renhållning AB* (NSR) em Helsingborg, Suécia, é um excelente exemplo de uma planta que produz biometano e fertilizante orgânico de alta qualidade a partir de resíduos alimentares. A fábrica atua desde 1996 e atualmente produz 80 GWh de biometano por ano de 160 mil toneladas de resíduos alimentares separados por origem, o que equivale a 60% do lixo doméstico ou 55 kg por habitante da área (EBA, 2016).

O Quadro 4 mostra alguns combustíveis, entre eles o biometano, e seus conteúdos energéticos em kWh.

Quadro 4: Conteúdo energético de alguns combustíveis.

Fonte: ABiogás (2015).

COMBUSTÍVEL	CONTEÚDO ENERGÉTICO (kWh)
1Nm ³ de biometano	9,97
1 Nm ³ de gás natural	11,00
1 litro de petróleo	9,06
1 litro de diesel	9,80

Nos estudos realizados por Anater *et al.*(2016) e Turdera (2013) em uma usina sucroenergética que possui uma área de plantio de 60.000 ha, produzindo 4,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em média por safra, foram encontradas as quantidades por hectare de insumos para o processo de produção do etanol, além da demanda de energia em MJ e o gasto energético em MJ. ha⁻¹ de tais insumos, conforme exibido no Quadro 5.

Quadro 5: Gasto energético para alguns insumos do processo de produção do etanol.Fonte: Adaptado de Anater *et al.* (2016).

INSUMOS	QTD POR HECTARE	DEMANDA DE ENERGIA (MJ/kg)	GASTO ENERGÉTICO (MJ. ha ⁻¹)
Nitrogênio (N)	100,00 kg	56,300	5.630,00
Fosfato (P ₂ O ₅)	25,00 kg	7,5000	187,50
Óxido de Potássio (K ₂ O)	140,00 kg	7,0000	980,00
Calcário	4.000,00 kg	1,7100	6.840,00
Sementes	1.620,00 kg	0,0156	25,27

Vilela (2013), em seu estudo de ACV da produção industrial de etanol e açúcar em outra usina localizada no Estado de Goiás, identificou entradas e saídas de energia e massa para uma unidade funcional também de 1000 kg de cana-de-açúcar. Os principais dados extraídos de Vilela (2013) encontram-se no Quadro 6 e, assim como as informações do Quadro 5, serviram de referência para complementar o Inventário do Ciclo de Vida desta pesquisa.

Quadro 6: Entradas e/ou saídas de energia e massa na produção de etanol e açúcar.

Fonte: Adaptado de Vilela (2013).

ETAPAS	FLUXO DE ENTRADA	FLUXO DE SAÍDA	QUANTIDADE PARA 1 TC
Tratamento do Caldo/Caixa de Caldo Misto	Energia		3,69 MJ
	Vapor de média pressão		2,55 kg
		Vapor de média pressão	2,55 kg
Fermentação	Energia		2,97 MJ
Armazenamento da vinhaça	Energia		351,00 MJ

CAPÍTULO II – DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

2.1 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na usina sucroenergética Nova Gália Ltda. (USINOVA), localizada na Zona rural da cidade de Paraúna - município do Estado de Goiás - a uma distância de Goiânia, capital do Estado, de 156 km.

As etapas da pesquisa compreenderam à revisão bibliográfica sistemática (RBS) sobre Avaliação do Ciclo de Vida (ACV); Inventário do Ciclo de Vida (ICV); biogás e biometano com consultas a livros, manuais e periódicos presentes na biblioteca do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG) – Campus Goiânia, bem como em monografias, dissertações, teses e artigos científicos selecionados através de busca no banco de dados do portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), no *Scientific Electronic Library Online* (SciELO) e no *Science Direct* e *Web of Science*.

A metodologia da RBS incluiu um planejamento para as buscas dos trabalhos com palavras-chave e após seleção da área e das bases do conhecimento, resultou em um determinado número de artigos e trabalhos encontrados, que selecionados e excluídos, deram sequência a refinamentos de buscas e à análise e discussão dos documentos encontrados.

Na revisão (RBS), as buscas e subsequentes refinamentos foram feitos utilizando as palavras-chave: etanol da cana, indústria sucroenergética, Avaliação do Ciclo de Vida, ACV, Inventário do Ciclo de Vida, ICV, Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida, AICV, etanol, cana-de-açúcar, setor sucroenergético, biogás e biometano, com uso da terminologia comum em português, inglês e espanhol. Os comandos de busca *AND*, *OR*, *AND NOT* e *SAME* foram incluídos nas pesquisas dos artigos e trabalhos acadêmicos.

Nas bases da *SciELO*, *Science Direct* e *Web of Science*, as palavras-chave foram priorizadas no idioma inglês: *Life Cycle Assessment*, *LCA*, *Life Cycle Inventory*, *LCI*, *Life Cycle Impact Assessment*, *LCIA*, *ethanol*, *sugarcane*; *sugarcane industry*; *biogas and biomethane*.

Aprofundou-se o tema através da utilização das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) - ABNT NBR ISO 14040:2009 e da ABNT NBR ISO 14044:2009, versões corrigidas em 2014 - e com a consulta ao Manual do Sistema Internacional de Dados de Referência sobre Ciclo de Vida de Produtos e Processos (ILCD, na sua sigla em inglês).

Uma ACV completa deve seguir as quatro fases principais da metodologia: (a) definição dos objetivos e do escopo do estudo; (b) análise do inventário do ciclo de vida; (c) avaliação dos impactos ambientais associados ao sistema; e (d) interpretação dos resultados, feita com base nos objetivos expressos na primeira etapa.

Para o estudo do ICV, o qual é o objeto de estudo desta pesquisa, realizou-se as etapas a), b) e d) mostradas acima e utilizou-se dados reais da usina para a modelagem atribucional. O ICV completo da pesquisa, com todas as entradas e saídas das etapas do processo de produção do etanol encontra-se no Anexo A.

No escopo, desenhou-se a abrangência do sistema através do fluxograma do processo de produção do etanol (Anexo B) e as condições de realização da pesquisa como já descritas acima e detalhadas nos objetivos; a identificação da fronteira do sistema e da unidade funcional. Para a pesquisa foram definidos os usos das etapas agrícola e industrial da produção do etanol (análise do berço ao portão).

As fronteiras do sistema foram identificadas, considerando um raio de 20 Km da usina, os quais correspondem aos canaviais e à distância do transporte da cana à usina. Em seguida, identificou-se a delimitação dos processos, fluxos e operações.

Ainda como etapa a) foi definida a Unidade Funcional em 1000 kg de cana-de-açúcar; os objetivos com os propósitos pretendidos; a representatividade do estudo, bem como as informações necessárias para sua condução e a forma de interpretação de seus resultados.

A análise de Inventário do Ciclo de Vida (etapa b) consiste basicamente em duas etapas: coleta de dados e tratamento dos dados. Na análise do Inventário foram quantificadas todas as entradas e saídas do sistema estudado. Em geral, as entradas são representadas pela energia e matéria-prima consumida, e as saídas pelos produtos ou coprodutos¹⁰, emissões atmosféricas, efluentes líquidos e resíduos sólidos.

A obtenção dos dados e a identificação dos processos iniciaram-se pelo trabalho de campo, através da primeira visita técnica ocorrida em 21/09/2016 – período final do ciclo de produção da cana – onde foi possível realizar entrevistas gravadas e também através de questionário (Apêndice) com os técnicos, especialistas e responsáveis dos processos. Em momentos posteriores e nas visitas realizadas no final de 2016 e no primeiro semestre de 2017 foi aplicado o formulário do ICV (Anexo A) para refinar os dados do inventário.

Os coprodutos gerados no processo também foram levantados nesta etapa de inventário.

¹⁰ Qualquer um entre dois ou mais produtos procedentes do mesmo processo unitário ou sistema (ABNT, 2009a).

A Interpretação dos resultados (etapa d) constitui a última etapa do estudo de uma ACV ou um ICV e encontra-se no capítulo “Resultados e Discussão”.

Na etapa final também foi avaliada a possibilidade de inclusão do biogás gerado da torta de filtro como forma de substituição de 50% e também de 100% do diesel pelo biogás na etapa agrícola e no transporte da cana-de-açúcar dos canaviais à usina.

Para criação do fluxograma do processo produtivo do etanol e da simulação dos dados e obtenção dos resultados do estudo foi utilizado o *software GaBi Education®* (Engenharia do Ciclo de Vida, do alemão *Ganzheitliche Bilanzierung*).

A base de dados GaBi para o ciclo de vida é reconhecida pela sua qualidade e pelo volume de informação que contém. O sistema é utilizado por companhias, associações industriais, instituições governamentais, pesquisadores e consultores.

O *software* GaBi foi desenvolvido pela empresa alemã PE International AG/Thinkstep, a qual tem atuação internacional na área de consultoria em projetos de inventário e avaliação do ciclo de vida.

O GaBi proporcionou a obtenção de informações relevantes e o fluxograma do processo produtivo (Anexo B), que sintetizou os balanços (mássico e energético) do formulário de Inventário de Ciclo de Vida, dando um entendimento integral do processo e os desenhos dos fluxogramas com as simulações da substituição de 50% e 100% do diesel consumido pelo biogás gerado do resíduo torta de filtro (Anexo C e D respectivamente).

2.2 PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL E A COGERAÇÃO NA USINOVA

Todo processo produtivo da Usina Nova Gália Ltda. – USINOVA – (Figura 7) é contínuo, conforme descrito abaixo e exposto no fluxograma do processo (Anexo B).

Atualmente a empresa produz álcool hidratado, álcool anidro e energia para consumo próprio e “vende” 12 MWh, mas em breve, com a terceira turbina entrando em operação, a empresa pretende disponibilizar à concessionária de energia de 20 a 30 MWh.

A Usina foi instalada em 2005 e desde a primeira safra, em 2006, vem sendo crescente a produtividade, chegando a 92 tcana/ha em 2015. Em 2016, devido à falta de chuva, houve uma redução para 65 tcana/ha, porém a empresa estima que encerrará 2017 cumprindo a meta de 100 tcana/ha.

Para o alcance da meta, a empresa investiu em variedades de plantio de tubetes e plantas; no solo; em tecnologias no uso da agricultura de precisão (foto imagem de satélite) e compra de mudas sadias.

No geral, a empresa produz 60% da cana que necessita. Os outros 40% são comprados como estratégia para minimizar e dividir os riscos do negócio com outros produtores devido às variações do mercado, além das dificuldades de produção, logística e custos agrícolas em geral, visto que em torno de 60% a 70% dos custos estão no campo. A cana comprada vem de produtores que se encontram a um raio de 20 Km de distância da Usina.



Figura 7. Vista aérea da usina Nova Gália LTDA.
Fonte: USINOVA (2014).

2.2.1 RECEPÇÃO, MOAGEM DA CANA E TRATAMENTO DO CALDO

Ao chegar à Usina, os caminhões (Figura 8) se dirigem à balança para a pesagem da quantidade de cana (Figura 9). Em média são 100 caminhões por dia com 80 toneladas em média de cana-de-açúcar em cada, chegando a se obter de 7800 a 8000 toneladas de cana/dia.

Caso o veículo seja selecionado para amostragem (processo via informática) o mesmo é conduzido à sonda de amostragem para coletar amostras de cana e analisar dados como: impureza mineral, porcentagem de brocas, teores de açúcares entre outros.



Figura 8. Transporte da cana.



Figura 9. Pesagem da cana.

Em seguida, cada caminhão descarrega a cana nas mesas alimentadoras (Figura 10), a qual é limpa para retirar a terra, as impurezas e a poeira provenientes da lavoura (Figura 11) e em seguida a cana é fragmentada em pedaços pelos picadores (Figura 12) e os fragmentos são triturados no desfibrador (Figura 13) sem que haja a perda de caldo. Posteriormente a cana desfibrada (em torno de 90%) é enviada para as moendas para extração do caldo em uma operação contínua em vários ternos de moenda (Figura 14).

O caldo resultante da moagem (caldo misto) é aquecido em trocadores de calor (Regeneradores de Calor) para acelerar as reações químicas; facilitar as reações do caldo; promover a coagulação das proteínas; diminuir a densidade e viscosidade; provocar a floculação e eliminar e impedir o desenvolvimento de bactérias.

Após o aquecimento, o caldo vai para o balão de *flash*, que tem a função de liberar todas as partículas em suspensão das bolhas de ar que ali estão agregadas e que comprometeriam a decantação e clarificação, se não fossem retiradas. O flasheamento consiste na expansão brusca do caldo de sua pressão na tubulação para a pressão atmosférica. Esta ebulição explosiva e violenta elimina o ar e os gases dissolvidos contidos no caldo, inclusive aquele adsorvido na superfície das partículas de bagacilho.

Depois de passar pelo balão de *flash* o caldo passa pelos decantadores que separam as impurezas do caldo. Da decantação sai o lodo decantado para os filtros rotativos (filtração), os quais produzem o coproduto torta de filtro e o caldo filtrado. Em seguida, o caldo passa pela etapa de Pré-evaporação para elevar o Brix¹¹. O caldo já clarificado e o mosto¹² (vindo do caldo pré-evaporado) passam pela etapa de resfriamento para seguir para a fermentação produzindo o vinho levedurado. Por fim, o já vinho é enviado para a área de produção de álcool (Figura 15) ou açúcar (em breve) em proporções definidas de acordo com as tendências do mercado. O final do processo de moagem também resulta no bagaço da cana quase seco (Figura 16), o qual é enviado através de esteiras (Figuras 17 e 18) às caldeiras (Figura 19) onde é queimado para produzir o vapor utilizado para o acionamento de máquinas pesadas.

¹¹ Medida aproximada de teor de sólidos totais (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

¹² Líquido açucarado que pode ser fermentado.



Figura 10. Mesas alimentadoras.



Figura 11. Limpeza da cana.



Figura 12. Fragmentação da cana.



Figura 13. Desfibrador.



Figura 14. Ternos de moenda.



Figura 15. Produção de álcool.



Figura 16. Bagaço da cana quase seco.



Figura 17. Esteira de transporte do bagaço.



Figura 18. Transporte do bagaço à caldeira.



Figura 19. Caldeira.

2.2.2 BAGAÇO

Segundo os técnicos da Usinova e conforme já visto na literatura, na produção de etanol, 30% em média da cana é bagaço. O bagaço entra nas caldeiras a vapor e gera em média 130 toneladas de vapor/hora. O excedente de bagaço é armazenado e vendido (Figuras 20 e 21). Atualmente, a tonelada do bagaço é vendida a R\$35,00, mas chegou a ser vendida a R\$85,00 em 2015.



Figura 20. Bagaço da cana-de-açúcar.



Figura 21. Armazenamento do bagaço.

2.2.3 GERAÇÃO DO VAPOR

Para produzir 1 kg de vapor são necessários 2,5 kg de bagaço. A geração de vapor é o processo pelo qual a água é transformada em vapor de alta pressão e alta temperatura objetivando o acionamento de turbinas para gerar energia para o funcionamento das máquinas pesadas. Essas máquinas, através de um sistema de redução, acionam os ternos de moenda, os quais esmagam a cana para separar o caldo. O vapor também é utilizado para acionar os geradores de energia, cujos produzem energia elétrica suficiente para atender todo o parque in-

dustrial, desde iluminação até motores elétricos de alta potência. A maior parte da água utilizada no processo de geração de vapor é proveniente do caldo da cana o que contribui para a preservação do meio ambiente.

Para manter o sistema de geração de vapor eficiente com água de qualidade sem danificar as caldeiras, é utilizado um desaerador na água para desmineralizá-la antes de jogá-la nas caldeiras.

A água original utilizada no processo produtivo da Usinova é captada do córrego Sucuri e é reutilizada em diversas partes do processo.

2.2.4 PRODUÇÃO DO ÁLCOOL

Fermentação

É na fermentação que ocorre a transformação do açúcar em álcool. Este processo dura de 8,5 h a 9h e ocorre nas dornas com a ação de organismos vivos denominados leveduras, os quais, através de reações, transformam os açúcares em álcool.

O resultado desta transformação é o vinho fermentado onde estão contidas as leveduras, o álcool e outros resíduos. Após a fermentação, a levedura é separada do vinho através do processo de centrifugação para ser reutilizada. O fermento ou levedura, com uma concentração de aproximadamente 60%, é enviado às cubas de tratamento (dornas) onde recebe nutrientes para se fortalecer e ser novamente utilizado na fermentação (Figura 22).



Figura 22. Cubas de tratamento de fermento.

Destilação

O vinho com pequena quantidade de levedura vai para as colunas de destilação (Figura 23), que através de aquecimento e evaporação, separam o álcool (Figura 24). Em seguida, o álcool é concentrado e purificado atingindo os padrões normativos do mercado e conforme a demanda e tendências do mercado, a quantidade é dividida entre álcool hidratado (teor alcóolico mínimo de 92,6°GL¹³) e álcool anidro (teor alcóolico atingindo até 99,7°GL).

Além da produção de etanol, outros derivados também são produzidos na usina, tais como: bagaço hidrolisado, vinhaça concentrada, melação, óleo fúsel¹⁴, cinzas, torta de filtro, flegmaça e levedura.

A vinhaça, como já vista, é um subproduto resultante da destilação do vinho e é um importante fertilizante, devido ser rica em água, matéria orgânica, nitrogênio, potássio e fósforo, e é utilizada na lavoura como adubo da cana.

A vinhaça é pressurizada (Figura 25) direta das duas piscinas de armazenamento (Figura 26), as quais estão distantes uma da outra 4,5 Km. A distância entre as piscinas de armazenamento é estratégica para se ter uma maior cobertura na fertirrigação e diminuir os custos com tubulação. As mesmas contêm somente a vinhaça com água. Na saída das piscinas há um equipamento que mede o volume e o teor de potássio.

Com a aplicação da vinhaça ao solo, através da fertirrigação (Figura 27), aumenta-se a quantidade média de produção da cana em até 10t/ha. As amostras são feitas a cada dois anos.



Figura 23. Colunas de destilação.



Figura 24. Aquecimento para separação do álcool.

¹³ °Gay Lussac (°GL= %V): quantidade em mililitros de álcool absoluto contida em 100 mililitros de mistura hidro alcoólica (VILELA, 2013).

¹⁴ Mistura de álcoois superiores obtidos em várias etapas do processo de destilação do álcool.



Figura 25. Pressurização da vinhaça.



Figura 26. Piscina de armazenamento da vinhaça.



Figura 27. Fertirrigação do solo.

Torta de filtro

O coproduto torta de filtro é gerado, como já descrito, na etapa de filtração do lodo decantado e 30 toneladas de torta de filtro *in natura* supre o enriquecimento do solo, o qual precisa de 5 a 10 t/ha. A área total de cana plantada é de 20.000 alqueires, equivalente a 96.800 ha (1 alqueire GO = 4,84 ha).

A partir da safra de 2017, a empresa fará o enriquecimento da torta de filtro (Figura 28) com fósforo.

Devido ao grande volume de torta de filtro, o enriquecimento com fósforo facilitará a recuperação do solo. Logo, a torta de filtro tem como destino, atualmente, as áreas de plantação onde os índices de fósforo estão baixos.



Figura 28. Torta de filtro.

Cinzas e Flegmaça

A cinza vem do bagaço queimado nas caldeiras. Na produção de etanol, 7% a 10% da cana viram cinzas, as quais servem para a decantação e depois é utilizada no solo por ser rica em potássio e tem como destino final as áreas de pastagem onde os índices de potássio estão baixos.

A flegmaça é uma água residual que serve para hidratação e é oriunda do álcool e não possui potássio (Figura 29).



Figura 29. Flegmaça.

2.2.5 PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A capacidade atual de geração de energia da Usina é de 30 MWh com disponibilidade de 12 MWh à Celg Distribuição S.A. (Figura 30). Em breve, o potencial de geração da usina será de 47 MWh e a empresa pretende disponibilizar ao sistema Celg de 20 a 30 MWh.

Através da queima do bagaço da cana, realizada nas caldeiras, é possível que seja gerado calor. O calor transformará, nas caldeiras, a água em vapor. Parte do vapor é enviada aos

turbos geradores encarregados de produzir energia elétrica que será utilizada em todo o parque industrial, podendo seu excedente ser comercializado. O bagaço excedente é comercializado para outras indústrias que o utilizam em várias atividades.

O consumo de vapor da Usina é de 110 t/h e as duas caldeiras que alimentam a indústria tem capacidade de 130 t/h a uma temperatura de alimentação de vapor vivo a 105°C (caldeira 1) e 150 t/h a uma temperatura de alimentação de vapor vivo a 450°C (caldeira 2). Para produzir 1 litro de etanol é necessário 1,5 kg de vapor.



Figura 30. Produção de energia.

Para uma moagem média de 200 a 250 tcana/h são consumidos internamente 1.064.800 kWh de energia e na fertirrigação 935.200 kWh.

2.2.6 LABORATÓRIO DE ANÁLISES

Todas as etapas do processo são monitoradas através de análises laboratoriais de modo a assegurar a qualidade final dos produtos. A Usina possui uma sala de acompanhamento e monitoramento das caldeiras.

Os profissionais envolvidos passam por treinamentos específicos de capacitação para conduzir o processo de forma segura e responsável, garantindo a qualidade final de cada etapa que envolve a fabricação de álcool e em breve do açúcar.

2.3 O ICV DA USINOVA E O SOFTWARE GABI

A compilação do Inventário do Ciclo de Vida do etanol da cana-de-açúcar da Usinova, construído no decorrer dos meses da pesquisa, através das visitas, entrevistas e pesquisas, encontra-se no Anexo A.

Na etapa agrícola, além dos dados coletados na própria usina, foram considerados os insumos do Quadro 5, já mostrado, adaptando-se os valores para a unidade funcional (UF) trabalhada de 1000 kg de cana-de-açúcar. Além disso, outros dados relevantes para as etapas do processo do etanol, presentes no Quadro 6, também foram inseridos no ICV da Usinova por serem padrões em usinas sucroenergéticas.

Todos os dados do ICV foram inseridos no *software Ganzheitliche Bilanzierung* (GaBi) para a montagem do fluxograma do processo produtivo do etanol e para o cálculo dos balanços de massa e energia.

Os dados do ICV com (*) correspondem aos dados criados no GaBi por não possuírem um fluxo correspondente na base de dados do *software*. Já os dados do ICV com (**) foram utilizados das referências bibliográficas, sendo transformados para a UF definida no espoco.

Segundo a PE International (2015), o *software GaBi Education* - versão gratuita para pesquisa e aprendizagem de estudantes e professores - é um produto de desempenho de sustentabilidade que combina modelagem e relatórios; conteúdo de dados; experiência em consultoria para ajudar a economizar recursos, melhorar a marca das empresas e reduzir riscos e é ferramenta padrão de diagnóstico para praticantes de ACV que impulsiona o desempenho de sustentabilidade do produto durante o projeto e planejamento em todos os ramos e permite aos usuários avaliar os potenciais encargos ambientais de um produto ou serviço em sua produção, utilização e eliminação (fim de vida). Além disso, o *software* também suporta: cálculo da pegada de carbono; projetos de Engenharia do Ciclo de Vida (análise técnica, econômica e ecológica); estudos de Custeio do Ciclo de Vida; estudos de Ciclo de Vida no Ambiente de Trabalho; análise de fluxo de massa e energia; projeto para aplicações em ambientes; contabilidade dos gases de efeito estufa; estudos de *benchmarking* e suporte do sistema de gestão ambiental.

O banco de dados GaBi é a maior coleção de dados consistentes de inventário de ciclo de vida, com mais de 4.500 perfis prontos para uso e que representam a maioria dos segmentos das indústrias (PE INTERNATIONAL, 2015).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados mais relevantes dos balanços de massa e energia, gerados com os dados do Inventário do Ciclo de Vida, no *software* GaBi, mostram no Quadro 7 as etapas do processo produtivo do etanol onde se concentra o balanço de massa em kg, e no Quadro 8 as etapas do processo produtivo do etanol onde se concentra o balanço de energia em MJ.

Os principais resultados dos balanços de massa e energia simulados no GaBi com a substituição de 50% do diesel (utilizado na etapa agrícola e no transporte da cana) pela energia do biogás gerada da torta de filtro encontram-se, respectivamente, no Quadro 9 e no Quadro 10.

Já a simulação com os principais resultados dos balanços de massa e energia com a substituição de 100% do diesel (utilizado na etapa agrícola e no transporte da cana) pela energia do biogás gerada da torta de filtro encontram-se, respectivamente, no Quadro 11 e no Quadro 12.

O Anexo E mostra parte da plataforma do GaBi que gerou os quadros de 7 a 12.

Quadro 7: Balanço de massa da produção de etanol para 1000 kg de cana.

Fonte: Adaptado de GaBi (2016).

BALANÇO DE MASSA APENAS COM DIESEL	TOTAL (kg)	Consumo de diesel no processo	Etapa agrícola (plantio e colheita)	Fermentação	Filtração	Limpeza, Preparo e Moagem	Processo de vapor do bagaço da cana
FLUXOS TOTAIS DE MASSA	27.413,98	636,28	0,42	320,00	55,00	315,00	26.087,28
1. RECURSOS	13.969,18	318,13	2,20	250,00	55,00	315,00	13.028,85
1.1. Recursos energéticos não renováveis	2,64	1,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77
• Petróleo bruto (recurso)	2,16	1,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43
1.2. Recursos materiais	13.966,55	316,27	2,20	250,00	55,00	315,00	13.028,08
1.2.1. Recursos materiais não renováveis	5,34	0,11	0,33	0,00	0,00	0,00	4,90
1.2.2. Recursos materiais renováveis	13.959,26	316,16	0,00	250,00	55,00	315,00	13.023,11
• Água	13.466,25	315,54	0,00	250,00	55,00	315,00	12.530,71
• Ar	439,89	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	439,52
• Dióxido de carbono	52,92	0,25	0,00	0,00	0,00	0,00	52,67
2. EMISSÕES PARA O AR	12.567,28	236,52	0,45	70,00	0,00	0,00	12.261,21
2.1. Emissões inorgânicas para o ar	12.127,47	236,35	0,00	70,00	0,00	0,00	11.821,13
• Dióxido de carbono	72,49	0,54	0,00	70,00	0,00	0,00	1,95
• Água (evapotranspiração)	11.938,11	234,30	0,00	0,00	0,00	0,00	11.703,81
• Vapor d'água	60,83	1,49	0,00	0,00	0,00	0,00	59,34
2.2. Outras emissões para o ar	439,72	0,17	0,45	0,00	0,00	0,00	440,01
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	869,84	80,94	1,33	0,00	0,00	0,00	790,23
4. EMISSÕES P/ A ÁGUA DO MAR	4,23	0,60	0,00	0,00	0,00	0,00	3,63

Quadro 8: Balanço de energia da produção de etanol para 1000 kg de cana.

Fonte: Adaptado de GaBi (2016).

BALANÇO DE ENERGIA APENAS COM DIESEL	TOTAL (MJ)	Consumo de diesel no processo	Processo de vapor do bagaço da cana
FLUXOS TOTAIS DE ENERGIA	589,53	83,24	506,29
1. RECURSOS	536,78	81,84	454,94
1.1. Recursos energéticos	536,67	81,83	454,84
1.1.1 Recursos energéticos não renováveis	108,72	78,96	29,76
• Petróleo bruto (recurso)	89,68	73,46	16,22
• Gás natural (recurso)	16,31	5,37	10,94
1.1.2. Recursos de energia renovável	427,95	2,87	425,08
2. EMISSÕES PARA O AR	23,95	1,30	22,65
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	28,73	0,10	28,63

Quadro 9: Balanço de massa da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 50% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.

Fonte: Adaptado de GaBi (2016).

BALANÇO DE MASSA - 50% DIESEL E 50% BIOGÁS GERADO DO RESÍDUO TORTA DE FILTRO	TOTAL (kg)	Consumo de diesel no processo	Etapa agrícola (plantio e colheita)	Fermentação	Filtração	Limpeza, Preparo e Moagem	Processo de vapor do bagaço da cana	Energia do Biogás
FLUXOS TOTAIS DE MASSA	36.707,38	324,25	3,32	320,00	55,00	315,00	26.087,28	9.609,17
1. RECURSOS	18.619,92	162,12	0,33	250,00	55,00	315,00	13.028,85	4.808,62
1.1. Recursos energéticos não renováveis	2,08	0,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,36
• Petróleo bruto (recurso)	1,46	0,89	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,15
1.2. Recursos materiais	18.617,84	161,17	0,33	250,00	55,00	315,00	13.028,08	4.808,26
1.2.1. Recursos materiais não renováveis	8,76	0,06	0,33	0,00	0,00	0,00	4,90	3,47
1.2.2. Recursos materiais renováveis	18.608,97	161,11	0,00	250,00	55,00	315,00	13.023,11	4.804,75
• Água	17.955,53	160,80	0,00	250,00	55,00	315,00	12.530,71	4.644,03
• Ar	577,23	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	439,52	137,52
• Dióxido de carbono	76,01	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	52,67	23,21
2. EMISSÕES PARA O AR	15.486,86	120,53	2,32	70,00	0,00	0,00	12.261,21	3.037,43
2.1. Emissões inorgânicas para o ar	14.980,77	120,44	1,87	70,00	0,00	0,00	11.821,13	2.971,07
• Dióxido de carbono	73,23	0,28	0,00	70,00	0,00	0,00	1,95	1,00
• Água (evapotranspiração)	14.739,60	119,40	0,00	0,00	0,00	0,00	11.703,81	2.916,39
• Vapor d'água	90,25	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00	59,34	30,15
2.2. Outras emissões para o ar	505,97	0,09	0,45	0,00	0,00	0,00	440,01	66,32
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	2.587,87	41,25	1,33	0,00	0,00	0,00	790,23	1.757,72
4. EMISSÕES P/ A ÁGUA DO MAR	5,82	0,30	0,00	0,00	0,00	0,00	3,63	1,89

Quadro 10: Balanço de energia da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 50% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.

Fonte: Adaptado de GaBi (2016).

BALANÇO DE ENERGIA - 50% DIESEL E 50% BIOGÁS GERADO DO RESÍDUO TORTA DE FILTRO	TOTAL (MJ)	Consumo de diesel no processo	Processo de vapor do bagaço da cana	Energia do Biogás
FLUXOS TOTAIS DE ENERGIA	886,87	42,42	506,29	338,16
1. RECURSOS	735,53	41,70	454,94	238,89
1.1. Recursos energéticos	735,08	41,70	454,84	238,54
1.1.1. Recursos energéticos não renováveis	84,27	40,24	29,76	14,27
• Petróleo bruto (recurso)	59,85	37,43	16,22	6,19
• Gás natural (recurso)	19,90	2,74	10,94	6,22
1.1.2. Recursos de energia renovável	650,81	1,46	425,08	224,27
2. EMISSÕES PARA O AR	64,57	0,66	22,65	41,26
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	86,69	0,05	28,63	58,02

Quadro 11: Balanço de massa da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 100% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana.

Fonte: Adaptado de GaBi (2016).

BALANÇO DE MASSA - 100% BIOGÁS GERADO DO RESÍDUO TORTA DE FILTRO	TOTAL (kg)	Consumo de diesel no processo	Etapa agrícola (plantio e colheita)	Fermentação	Filtração	Limpeza, Preparo e Moagem	Processo de vapor do bagaço da cana	Energia do Biogás
FLUXOS TOTAIS DE MASSA	46.008,26	12,22	0,42	320,00	55,00	315,00	26.087,28	19.218,33
1. RECURSOS	23.274,41	6,11	2,20	250,00	55,00	315,00	13.028,85	9.617,25
1.2. Recursos energéticos não renováveis	1,53	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,77	0,72
• Petróleo bruto (recurso)	0,75	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,43	0,29
1.2. Recursos materiais	23.272,88	6,08	2,20	250,00	55,00	315,00	13.028,08	9.616,53
1.2.1. Recursos materiais não renováveis	12,18	0,00	0,33	0,00	0,00	0,00	4,90	6,95
1.2.2. Recursos materiais renováveis	23.258,69	6,07	0,00	250,00	55,00	315,00	13.023,11	9.609,51
• Água	22.444,82	6,06	0,00	250,00	55,00	315,00	12.530,71	9.288,05
• Ar	714,57	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	439,52	275,03
• Dióxido de carbono	99,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	52,67	46,42
2. EMISSÕES PARA O AR	18.410,17	4,54	0,45	70,00	0,00	0,00	12.261,21	6.074,87
2.1. Emissões inorgânicas para o ar	17.837,80	4,54	0,00	70,00	0,00	0,00	11.821,13	5.942,14
• Dióxido de carbono	73,96	0,01	0,00	70,00	0,00	0,00	1,95	2,01
• Água (evapotranspiração)	17.541,09	4,50	0,00	0,00	0,00	0,00	11.703,81	5.832,78
• Vapor d'água	119,67	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	59,34	60,30
2.2. Outras emissões para o ar	572,21	0,00	0,45	0,00	0,00	0,00	440,01	132,65
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	4.305,90	1,56	1,33	0,00	0,00	0,00	790,23	3.515,45
4. EMISSÕES P/ A ÁGUA DO MAR	7,41	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	3,63	3,77

Quadro 12: Balanço de energia da produção de etanol para 1000 kg de cana com o biogás gerado da torta de filtro substituindo 100% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana. Fonte: Adaptado de GaBi (2016).

BALANÇO DE ENERGIA - 100% BIOGÁS GERADO DO RESÍDUO TORTA DE FILTRO	TOTAL (MJ)	Consumo de diesel no processo	Processo de vapor do bagaço da cana	Energia do Biogás
FLUXOS TOTAIS DE ENERGIA	1184,21	1,60	506,29	676,32
1. RECURSOS	934,28	1,57	454,94	477,77
1.1. Recursos energéticos	933,49	1,57	454,84	477,08
1.1.1. Recursos energéticos não renováveis	59,82	1,52	29,76	28,54
• Petróleo bruto (recurso)	30,02	1,41	16,22	12,39
• Gás natural (recurso)	23,49	0,10	10,94	12,44
1.1.2. Recursos de energia renovável	873,67	0,06	425,08	448,54
2. EMISSÕES PARA O AR	105,19	0,02	22,65	82,52
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	144,66	0,00	28,63	116,03

O Quadro 13 e o Quadro 14 exibem, respectivamente, os valores percentuais da relação do balanço de massa e energia com 50% de biogás, gerado do resíduo torta de filtro, substituindo 50% do diesel *versus* balanços de massa e energia apenas com diesel.

Quadro 13: Relação dos balanços de massa com 50% do biogás gerado da torta de filtro.

RELAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS DE MASSA - 50% de biogás	TOTAL (%)	Consumo de diesel no processo	Etapa agrícola (plantio e colheita)	Fermentação	Filtração	Limpeza, Preparo e Moagem	Processo de vapor do bagaço da cana
FLUXOS TOTAIS DE MASSA	34%	-49%	695%	0%	0%	0%	0%
1. RECURSOS	33%	-49%	-85%	0%	0%	0%	0%
1.1. Recursos energéticos não renováveis	-21%	-49%	-	-	-	-	0%
• Petróleo bruto (recurso)	-33%	-49%	-	-	-	-	0%
1.2. Recursos materiais	33%	-49%	-85%	0%	0%	0%	0%
1.2.1. Recursos materiais não renováveis	64%	-49%	0%	-	-	-	0%
1.2.2. Recursos materiais renováveis	33%	-49%	-	0%	0%	0%	0%
• Água	33%	-49%	-	0%	0%	0%	0%
• Ar	31%	-49%	-	-	-	-	0%
• Dióxido de carbono	44%	-49%	-	-	-	-	0%
2. EMISSÕES PARA O AR	23%	-49%	413%	0%	-	-	0%
2.1. Emissões inorgânicas para o ar	24%	-49%	-	0%	-	-	0%
• Dióxido de carbono	1%	-49%	-	0%	-	-	0%
• Água (evapotranspiração)	23%	-49%	-	-	-	-	0%
• Vapor d'água	48%	-49%	-	-	-	-	0%
2.2. Outras emissões para o ar	15%	-49%	0%	-	-	-	0%
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	198%	-49%	0%	-	-	-	0%
4. EMISSÕES P/ A ÁGUA DO MAR	38%	-49%	-	-	-	-	0%

Quadro 14: Relação dos balanços de energia com 50% do biogás gerado da torta de filtro.

RELAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS DE ENERGIA - 50% de biogás	TOTAL (%)	Consumo de diesel no processo	Processo de vapor do bagaço da cana
FLUXOS TOTAIS DE ENERGIA	50%	-49%	0%
1. RECURSOS	37%	-49%	0%
1.1. Recursos energéticos	37%	-49%	0%
1.1.1 Recursos energéticos não renováveis	-22%	-49%	0%
• Petróleo bruto (recurso)	-33%	-49%	0%
• Gás natural (recurso)	22%	-49%	0%
1.1.2. Recursos de energia renovável	52%	-49%	0%
2. EMISSÕES PARA O AR	170%	-49%	0%
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	202%	-49%	0%

Já o Quadro 15 e o Quadro 16 mostram, respectivamente, os valores percentuais da relação do balanço de massa e energia com 100% de biogás, gerado do resíduo torta de filtro, substituindo o diesel *versus* s balanços de massa e energia apenas com diesel.

Quadro 15: Relação dos balanços de massa com 100% do biogás gerado da torta de filtro.

RELAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS DE MASSA - 100% de biogás	TOTAL (%)	Consumo de diesel no processo	Etapa agrícola (plantio e colheita)	Fermentação	Filtração	Limpeza, Preparo e Moagem	Processo de vapor do bagaço da cana
FLUXOS TOTAIS DE MASSA	68%	-98%	1%	0%	0%	0%	0%
1. RECURSOS	67%	-98%	0%	0%	0%	0%	0%
1.1. Recursos energéticos não renováveis	-42%	-98%	-	-	-	-	0%
• Petróleo bruto (recurso)	-65%	-98%	-	-	-	-	0%
1.2. Recursos materiais	67%	-98%	0%	0%	0%	0%	0%
1.2.1. Recursos materiais não renováveis	128%	-98%	-1%	-	-	-	0%
1.2.2. Recursos materiais renováveis	67%	-98%	-	0%	0%	0%	0%
• Água	67%	-98%	-	0%	0%	0%	0%
• Ar	62%	-98%	-	-	-	-	0%
• Dióxido de carbono	87%	-98%	-	-	-	-	0%
2. EMISSÕES PARA O AR	46%	-98%	-1%	0%	-	-	0%
2.1. Emissões inorgânicas para o ar	47%	-98%	-	0%	-	-	0%
• Dióxido de carbono	2%	-98%	-	0%	-	-	0%
• Água (evapotranspiração)	47%	-98%	-	-	-	-	0%
• Vapor d'água	97%	-98%	-	-	-	-	0%
2.2. Outras emissões para o ar	30%	-98%	-1%	-	-	-	0%
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	395%	-98%	0%	-	-	-	0%
4. EMISSÕES P/ A ÁGUA DO MAR	75%	-98%	-	-	-	-	0%

Quadro 16: Relação dos balanços de energia com 100% do biogás gerado da torta de filtro.

RELAÇÃO ENTRE OS BALANÇOS DE ENERGIA - 100% de biogás	TOTAL (%)	Consumo de diesel no processo	Processo de vapor do bagaço da cana
FLUXOS TOTAIS DE ENERGIA	101%	-98%	0%
1. RECURSOS	74%	-98%	0%
1.1. Recursos energéticos	74%	-98%	0%
1.1.1 . Recursos energéticos não renováveis	-45%	-98%	0%
• Petróleo bruto (recurso)	-67%	-98%	0%
• Gás natural (recurso)	44%	-98%	0%
1.1.2. Recursos de energia renovável	104%	-98%	0%
2. EMISSÕES PARA O AR	339%	-98%	0%
3. EMISSÕES PARA ÁGUA DOCE	404%	-98%	0%

Analisando a simulação do Quadro 13, observa-se que ao substituir 50% do diesel utilizado na etapa agrícola e no transporte da cana (quantidade correspondente a 49% do consumo total de diesel no processo de produção do etanol) pela energia do biogás gerada do resíduo torta de filtro, resultou no aumento de 34% dos “fluxos totais de massa” e no aumento de 44% em massa de dióxido de carbono dos “recursos materiais renováveis”, ocasionando a diminuição de 21% de massa dos “recursos energéticos não renováveis” e 33% a menos de consumo de “petróleo bruto” em massa. No item “emissões inorgânicas para o ar” houve uma variação muito pequena na massa de dióxido de carbono (1%), porém um aumento de 48% de massa de vapor d'água.

Já no Quadro 14, observa-se que no balanço energético, o uso da torta de filtro para gerar energia do biogás no processo produtivo do etanol, substituindo 50% do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana à usina, resultou: no aumento de 50% na eficiência do “total dos fluxos de energia”; redução de 22% dos “recursos energéticos não renováveis”; redução de 33% no consumo de energia do petróleo bruto e aumento significativo de 52% dos “recursos de energia renovável”.

Na estimativa para substituição integral do diesel na etapa agrícola e no transporte da cana, o qual totaliza 98% do consumo de diesel em todo processo produtivo, pela energia do biogás gerada do resíduo torta de filtro, a simulação no GaBi mostrou que os resultados da relação dos balanços de massa e energia, respectivamente presentes no Quadro 15 e no Quadro 16, são proporcionais, ou seja, dobrando-se a quantidade da energia do biogás, dobram-se os percentuais em todos os itens calculados nas colunas Total (kg) e Total (MJ) em relação aos resultados do Quadro 13 e Quadro 14.

É importante observar a relação dos recursos energéticos renováveis e não-renováveis em cada uma das situações:

Situação 1: para 100% de consumo de diesel, onde os recursos energéticos totalizam 536,67 MJ por tonelada de cana, tem-se que 79,74% dos recursos energéticos são renováveis (427,95 MJ) e 20,26% são recursos energéticos não-renováveis (108,72 MJ).

Situação 2: para 50% de consumo de diesel (etapa agrícola + transporte da cana-de-açúcar) e 50% da energia do biogás gerada do resíduo torta de filtro, onde os recursos energéticos totalizam 735,53 MJ por tonelada de cana, tem-se 88,54% de recursos energéticos renováveis (650,81 MJ) e 11,46% de recursos energéticos não-renováveis (84,27 MJ).

Situação 3: para substituição de 100% de consumo de diesel na etapa agrícola e no transporte da cana-de-açúcar por 100% da energia do biogás gerada do resíduo torta de filtro, tem-se um total de 933,49 MJ de recursos energéticos por tonelada de cana, sendo 93,59% de recursos energéticos renováveis (873,67 MJ) e 6,41% de recursos energéticos não-renováveis (59,82 MJ).

Apesar do reaproveitamento da água no processo produtivo do etanol, também é importante analisar seu consumo, pois segundo Koehler (2008), o uso da água é um indicador ambiental essencial para todas as atividades do ciclo de vida do produto.

Analisando-se os quadros do balanço de massa, observa-se que a etapa que mais consome água é a do processo de produção de vapor com uso do bagaço da cana (cogeração) com 12.530,71 kg/tc, representando 93% do total no Quadro 7. Quando da inserção de 50% da energia do biogás, representa 70% (dados do Quadro 9) e com a substituição total do diesel, representa 56% (dados do Quadro 11). Em Vilela (2013), os resultados apontaram que as etapas de fermentação e cogeração são as que mais consomem água, 36,15 % e 38,75 %, respectivamente, mostrando que em ambos os estudos o maior consumo de água está no processo de cogeração de energia através da geração de vapor do bagaço da cana.

Em relação ao consumo de energia, a etapa do processo de vapor do bagaço da cana (cogeração) é a que mais demanda energia (506,29 MJ/tc), representando 86% no cenário atual (apenas com diesel). Quando se substitui 50% do diesel, este valor representa 57% do total e de 47% quando se substitui 100% do diesel pelo biogás gerado da torta de filtro. A mesma etapa foi encontrada nos resultados de Vilela (2013), cujos maiores consumos de energia estão na etapa de cogeração (25,50%) e fabricação de açúcar (24,59%), sendo que no caso da USINOVA não há ainda dados para produção de açúcar.

Avaliando a situação atual, correspondente aos dados do Quadro 8 (apenas o uso do diesel) encontra-se um valor para o balanço energético de 4,94 (razão entre a quantidade do

item “recursos energéticos” gerados *versus* “recursos energéticos não renováveis” investidos: 536,67 MJ/ 108,72 MJ), ou seja, para cada unidade de energia fóssil investida, produzem-se quase 5 vezes mais de energia, comprovando-se a autossuficiência do processo.

Para a substituição de 50% do diesel pelo biogás gerado da torta de filtro na etapa agrícola e no transporte da cana à usina, o valor do balanço energético é 8,72 (735 MJ/ 84,27 MJ) e com a substituição integral do diesel pelo biogás gerado da torta de filtro tem-se um balanço energético de 15,60 (933,49 MJ/ 59,82 MJ), sendo então mais eficiente o processo quando se aproveita a torta de filtro para gerar a energia do biogás.

A usina sucroenergética estudada por Anater *et al.* (2016) apresentou o valor de 6,2 para o balanço energético calculado.

Turdera (2013) avaliou o balanço energético de algumas usinas sucroenergéticas do sul de Mato Grosso do Sul e obteve o valor de 6,8. Já Oliveira *et al.* (2005) fizeram um estudo e encontraram uma média das usinas sucroenergéticas do Brasil com um valor de 3,7 para o balanço energético.

Macedo *et al.* (2004) encontraram um valor médio de 8,3 para usinas sucroenergéticas do Brasil. Em outro estudo, Macedo *et al.* (2008) avaliaram uma usina sucroenergética localizada no Estado de São Paulo e o resultado para o balanço energético foi um valor de 9,3.

Observando-se os resultados dos autores citados acima, nota-se que o valor do balanço energético calculado para a usina estudada está entre os valores encontrados nas referências, com exceção do que ocorre quando se substitui totalmente o diesel pelo biogás gerado da torta de filtro, o qual foi bem mais positivo.

O valor de 4,94 para o balanço energético calculado na situação atual da USINOVA está abaixo dos valores encontrados pelos autores acima, com exceção de Oliveira *et al.* (2005). Porém, ao substituir o diesel parcialmente ou integralmente pelo biogás gerado da torta de filtro na etapa agrícola e no transporte da cana, tem-se balanços energéticos (8,72 e 15,60) superiores a maioria dos estudos comparados acima, comprovando-se a viabilidade, em termos energéticos, da estimativa de geração do biogás do resíduo torta de filtro.

CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apesar da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) ou mesmo da análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV) serem ferramentas eficazes para avaliar os processos; seus fluxos e os impactos ambientais dos produtos e serviços, o Brasil ainda é carente de trabalhos que abordem o ICV ou a ACV. Entretanto, o tema vem se expandindo devido às crescentes pesquisas em instituições de ensino superior e em firmas voltadas ao agronegócio.

Entre as principais dificuldades e motivos que enfraquecem o uso destas ferramentas estão: a abordagem metodológica; a qualidade e disponibilidade de dados, os quais influenciam significativamente os resultados; a grande quantidade de dados detalhados necessários para o ICV, cuja em muita das vezes desencoraja o uso desta ferramenta; além de dificuldades para a realização de pesquisas em virtude do tempo necessário para coletar os dados e da falta de recursos financeiros para execução de projetos, assim como a necessidade de uma abordagem multidisciplinar.

Outra limitação da ACV, de modo especial para a produção de biocombustíveis, está relacionada com a competição entre o uso da terra para a produção de biomassa e o uso da terra para produção de alimentos.

Os resultados do ICV na Usinova Ltda. mostraram que as etapas da produção de etanol que se concentram o balanço de massa são: consumo de diesel no processo; etapa agrícola (plantio e colheita); fermentação; filtração; limpeza, preparo, moagem e o processo de vapor do bagaço da cana.

Já o balanço de energia concentra-se nas etapas “consumo de diesel no processo” e no “processo de vapor do bagaço da cana”.

Com a estimativa do uso da energia do biogás gerada do resíduo torta de filtro no processo de produção do etanol da cana-de-açúcar, a pesquisa mostrou que é possível substituir total ou parcialmente o diesel consumido na etapa agrícola e no transporte da cana à usina e assim reduzir os recursos energéticos não renováveis; o petróleo bruto e os recursos totais da etapa agrícola (para 50% de diesel e 50% de biogás) e aumentar os recursos energéticos e materiais renováveis. Logo, práticas sustentáveis, como a própria implementação do uso do biogás em processos, aliada às ferramentas eficazes de gestão, são pontos essenciais para assegurar o fornecimento de energia renovável pela usina de maneira ecologicamente correta e viável.

A principal dificuldade percebida na pesquisa para o uso da metodologia do ICV ou da ACV, de um modo geral, é devido ao fato do foco ser nos aspectos ambientais dos produtos, não os associando ao desenvolvimento econômico, social e outras características relevantes para a tomada de decisão. Por isso, a ACV e principalmente só a análise do ICV não substituem o processo de tomada de decisão, mas devem complementá-lo.

Visto que o uso generalizado da abordagem metodológica sugerida por normas e autores requerem mais consenso e que ainda há a necessidade no desenvolvimento e aprimoramento de uma base de dados nacional do Inventário do Ciclo de Vida, recomenda-se para estudos futuros: uma ACV completa na Usinova Ltda.; um aprofundamento dos fluxos energéticos de entrada e saída do processo de produção do etanol para aumentar a base de dados nacionais e um comparativo entre o rendimento energético e mássico do bagaço da cana e/ou da vinhaça com a torta de filtro.

Os resultados do ICV da Usinova Ltda. mostraram que além de viável a substituição parcial ou integral do diesel consumido na usina (na etapa agrícola + transporte da cana à usina) pelo biogás gerado da torta de filtro, há uma estimativa de diminuição de no mínimo 22% dos recursos energéticos não renováveis, passando de 108,72 MJ para 84,27 MJ por tonelada de cana e um aumento de no mínimo 52% dos recursos energéticos renováveis, passando de 427,95 MJ para 650,81 MJ por tonelada de cana, aproveitando-se melhor os coprodutos.

Os resultados relativos à pesquisa serão apresentados à empresa, a qual tem interesse em otimizar seus processos, reutilizar os resíduos que apresentam alto potencial de geração de energia do biogás como combustível alternativo e de adotar medidas para mitigar as emissões de gases do efeito estufa.

Conclui-se que o processo de produção do etanol da cana-de-açúcar torna-se mais eficiente e com balanço energético positivo quando se aproveita a torta de filtro para gerar a energia do biogás e que em relação ao estudo do ICV e da ACV é necessário ainda percorrer caminhos que os tornem gerenciáveis, simples, práticos e viáveis economicamente, sem menosprezar a confiabilidade da metodologia e que tanto as instituições públicas quanto a iniciativa privada podem se beneficiar do ICV ao incorporar o conceito ambiental em seus processos de tomada de decisão.

REFERÊNCIAS

ABILOGÁS - Associação Brasileira do Biogás e do Biometano. Biometano como estratégia para redução dos gases causadores do efeito estufa. Encontro ANP com o mercado sobre a qualidade de produtos. Rio de Janeiro, 2017.

ABILOGÁS - Associação Brasileira do Biogás e do Biometano. Biogás e biometano. Abiogás, 2015. Disponível em: < <https://www.abiogas.org.br/biogas-e-biometano> >. Acesso em: 30 jul. 2017.

ABNT NBR ISO 14040: 2009 Versão Corrigida: 2014. Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. 2ª ed. 2009a.

ABNT NBR ISO 14044:2009 Versão Corrigida: 2014. Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. 1ª ed. 2009b.

ABRAMOVAY, R. Biocombustíveis, *A energia da controvérsia*. São Paulo: Senac, 2009.

AL-AMIN, A. Q.; SIWAR, C.; JAAFAR, A. H. (2009). Energy use and environment impact of new alternative fuel mix in electricity generation in Malaysia. *The Open Renewable Energy Journal* 2, p. 25–32.

ANATER, M. J. N.; NASCIMENTO, J. R.; TURDERA, M. V.; SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D. Balanço energético e emissões de gases de efeito estufa do processo de produção de etanol: *um estudo de caso*. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer. Goiânia, v.13 n.24, p. 1634, 2016.

ANDRADE, J. M.; DINIZ, K. M. (2007). Impactos ambientais da agroindústria da cana-de-açúcar: Subsídios para a gestão. Especialização em Gerenciamento Ambiental (Monografia). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo.

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Biometano. ANP, 2017. Disponível em: < <http://www.anp.gov.br/WWWANP/biocombustiveis/biometano> >. Acesso em: 30 jul. 2017.

BERTONCINI, E. I. (2008). Geração de resíduos da indústria da cana-de-açúcar. *Workshop: Aspectos ambientais da cadeia do etanol de cana-de-açúcar* (p. 18). Piracicaba: Programa de Pesquisa em Políticas Públicas (PPPP).

BNDES, B. N.; CGEE, C. D., (2008). Bioetanol de cana-de-açúcar: *energia para o desenvolvimento*. Rio de Janeiro: BNDES.

BRAUNBECK, O. A.; NETO, E. A. (2010). Logística de transporte de matéria-prima e resíduos da cana-de-açúcar. In L. A. (coordenador), Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade (p. 487-504). São Paulo: Blucher.

BRONDANI, M. (2014). Avaliação do ciclo de vida (ACV) da produção de bioetanol hidratado em pequena escala: abrangência agrícola e industrial. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos. Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, 130 p.

- CALDEIRA-PIRES, A.; VILELA, F. S.; LUZ, S. M.; PALMA-ROJAS, S.; RODRIGUES, T. O.; SILVÉRIO, V. C.; ALVES, A. M. Sustainability of the biorefinery industry for fuel production. *Energies*, v. 6, p. 329-350, 2013.
- CAPAZ, R. S. (2009). Estudo do desempenho energético da produção de biocombustíveis: Aspectos Metodológicos e Estudos de Caso. 2009. 121 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) - Universidade Federal de Itajubá. Itajubá.2009.
- CHERUBINI, F.; ULGIATI, S. Crop residues as raw materials for biorefinery systems - A *LCA case study*. *Appl Energy*, v.53, p.434-447, 2009.
- CHOHFI, F. M. (2004). Balanço e análise de emissão e sequestro de CO₂ na geração de eletricidade excedente no setor sucro-alcooleiro. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Energia. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá. 2004.
- CLAUDINO, E.S.; TALAMINI, E. Análise do ciclo de vida (ACV) aplicada ao agronegócio – *Uma revisão de literatura*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 17, p. 77-85, 2013.
- COELHO, W. L. V.; DA SILVA, F. S.; DALLACORT, R.; CARNEIRO, P. A. V. Análise do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do setor sucroenergético no estado de Mato Grosso em diferentes cenários produtivos. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 5, n. 2, 2016.
- COELHO, S. T.; LORA, B. A.; GUARDABASSI, P. M. (2010). Aspectos ambientais da cadeia do etanol de cana-de-açúcar no estado de São Paulo. In L. A. CORTEZ, *Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade*, p. 241-253. São Paulo: Blucher.
- CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira v.4 - safra 2017/18 - n.1 - primeiro levantamento | abril 2017. Observatório agrícola. Monitoramento agrícola – Cana-de-açúcar. Brasília, p. 1-57, abril 2017.
- CORTEZ, L. A.; LORA, E. E; GÓMEZ, E. O. (2008). *Biomassa para energia*. Unicamp: Editora Unicamp.
- EBA - European Biogas Association. *Biomethane in transport*, 2016.
- EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional – 2017 (ano base 2016)*. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: < https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2017_Web.pdf >. Acesso em: 24 jul. 2017.
- ELBEHRI, A.; SEGERSTEDT, A.; LIU, P. *Biofuels and the sustainability challenge: A global assessment of sustainability issues, trends and policies for biofuels and related feedstocks*. FAO: Rome, Italy, 2013, p. 15.
- FILHO, L. G.; MACEDO, I. C. (2010). Contribuição do etanol para a mudança do clima. In U. –U. *Cana-de-açúcar, Etanol e Bioeletricidade A cana-de-açúcar no futuro da matriz energética* (p. 77-96). São Paulo: Luc Projetos de Comunicação.
- FNQ. Fundação Nacional da Qualidade (2008). *A transformação do setor sucroalcooleiro em sucroenergético*. Disponível em: < <http://www.fnq.org.br/informe-se/artigos-e-entrevistas/cases-de-sucesso/a-transformacao-do-setor-sucroalcooleiro-em-sucroenergetico> >. Acesso em: 21 jan. 2017.
- FRANCHETTI, M., 2013. Economic and environmental analysis of four different configurations of anaerobic digestion for food waste to energy conversion using LCA for: *a food service provider case study*. *J. Environ. Manag.* v. 123, p. 42-48.

- FACHVERBAND BIOGAS E.V. Biogas can do it: *facts, arguments and potentials*. 2011.
- GABI - Ganzheitlichen Bilanzierung 2016. Software desenvolvido por PE International AG. Atualizado em 2016. Disponível em: < <http://www.gabi-software.com/brazil/index/> >. Acesso em: agosto 2017.
- GARCIA, J. C. C.; SPERLING, E. V. Greenhouse gas emissions in the life cycle of ethanol: *Estimation in agriculture and industrialization stages in Minas Gerais, Brazil*. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.15, p.217-222, 2010.
- GIL M.; MOYA A.; DOMÍNGUES E. (2013) Life cycle assessment of the cogeneration processes in the Cuban sugar industry. *J Clean Prod* v. 41, p. 222–231.
- GOLDEMBERG, J.; COELHO, S. T.; GUARDABASSI, P. (2008). The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy* v. 36 , p. 2086– 2097.
- GOLDEMBERG, J. *et al.* (2007). Ethanol for a Sustainable Energy Future. *Science* v. 315, p.808 - 810.
- GRAEL, P. F. F.; BEZERRA, B. S. Sistema de produto para a avaliação de ciclo de vida para construção de rodovias. 6th International Workshop Advances in Cleaner Production - “Ten years working together for a sustainable future”. São Paulo, 2017.
- GRISOLI, R. P. S. (2011). Comparação das emissões de gases de efeito estufa no ciclo do etanol de cana-de-açúcar no Brasil e os critérios da Diretiva Européia para energias renováveis. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Energia). 110 f. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2011.
- GUERRA, J.P.M.; COLETA JR, J. R.; ARRUDA, L.C.M; SILVA, G.A.; KULAY, L. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. Springer, São Paulo, v. 19, p. 814-825, 2014.
- HAADEL, A.V. Aproveitamento dos subprodutos de destilarias de álcool para proteger o meio ambiente e aumentar a rentabilidade. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, p. 1-7, 2000.
- HOLM-NIELSEN, J.B.; AL SEADI, T.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. 2009. The futures of anaerobic digestion and biogas utilization. *Bioresour. Technol.* v. 100, p. 5478 - 5484.
- HUTTUNEN, S.; MANNINEN, K.; LESKINEN, P. Combining biogas LCA reviews with stakeholder interviews to analyse life cycle impacts at a practical level. *Journal of Cleaner Production*, Helsinki, v. 80, p. 5-16, 2014.
- IBICT – Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. *Manual do sistema ILCD - Sistema internacional de referência de dados do ciclo de vida de produtos e processos: Guia geral para avaliação do ciclo de vida – Orientações detalhadas*. Tradução de Luiz Marcos Vasconcelos. Brasília: Ibict, 2014. 317 p.
- ILCD - International Reference Life Cycle Data System. *ILCD Handbook: General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*. União Europeia: Joint Research Centre (2010).
- JANKE, L.; LEITE, A. F.; NIKOLAUSZ, M.; SCHMIDT, T.; LIEBETRAU, J.; NELLES, M.; STINNER, W. Biogas production from sugarcane waste: *assessment on kinetic challenges for process designing*. *International Journal of Molecular Sciences Int. J. Mol. Sci.* v. 16, p. 20685-20703, 2015.
- JAVALAGI, C.M.; PATIL, H. R.; BHUSHI, U. M. Statistical modeling of steam generation for cogeneration in Indian sugar industry: *a case study*. *Cogeneration & Distributed Generation Journal* 25(1), p. 18–34, 2010.

- JÚNIOR, A. V.; DEMAJOROVIC, J. Modelos e ferramentas de gestão ambiental: *desafios e perspectivas para as organizações*. 3ª ed. São Paulo: Senac São Paulo. 2010. ISBN: 9788539602957.
- KOEHLER, A. (2008). Water use in LCA: *managing the planet's freshwater resources*. International Journal Life Cycle Assessment 13, pp. 451–455.
- KOGA, P. S. L. (2013). Avaliação técnica, socioeconômica e ambiental para a sustentabilidade de sistemas de produção de cana-de-açúcar na região oeste de São Paulo. 91 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2013.
- KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. Estudos Avançados, v. 24, p. 68, 2010.
- LEAL, M. R. (2010). Evolução Tecnológica do processamento da cana-de-açúcar para etanol e energia elétrica. In C. L. Cortez, Bioetanol de cana-de-açúcar: *P & D para produtividade e sustentabilidade*, p. 561-575. São Paulo: Blucher.
- LEITE, A. F.; JANKE, L.; HARMS, H.; ZANG, J. W.; FONSECA-ZANG, W.A.; STINNER, W.; NIKOLAUSZ, M. Assessment of the variations in characteristics and methane potential of major waste products from the brazilian bioethanol industry along an operating season. Energy&fuels. Special Issue: 2nd International Scientific Conference Biogas Sciece, 2015.
- LEITE, R. C. C.; LEAL, M. R. L. V. O Biocombustível no Brasil. CEBRAP, 2007.
- MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E.; SILVA, J. E. (2008). Greenhouse 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, v. 32, p. 582 – 595.
- MACEDO, I. C.; LEAL, M. R.; SILVA, J. E. (2004). Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente - Governo do Estado de São Paulo.
- MALÇA, J.; FREIRE, F. (2006). Renewability and life-cycle energy efficiency of bioethanol and bio-ethyl tertiary butyl ether (bioETBE): *Assessing the implications of allocation*. Energy, v. 31, Issue 15, p. 3362–3380.
- MANOCHIO, C. (2014). Produção de bioetanol de cana-de-açúcar, milho e beterraba: uma comparação dos indicadores tecnológicos, ambientais e econômicos. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, 2014.
- MARVUGLIA, A.; BENETTO, E.; REGE, S.; JURY, C. Modelling approaches for consequential life-cycle assessment (C-LCA) of bioenergy: *Critical review and proposed framework for biogas production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Luxemburgo, v. 25, p. 768-781, 2013.
- MEDEIROS, M. A.; VENDEMIATTI, J. A.; SOBRINHO, G. D.; ALBUQUERQUE, A. F. (2006). Disciplina ST 405 – Química sanitária e laboratório de saneamento. *Apostila de laboratório*. Limeira: Unicamp.
- MENDONÇA, R. M. L. (2007). Avaliação do Ciclo de Vida do carbono na queima de biodiesel à base de óleo de soja. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília. Brasília, 2007.
- MENTEN, F.; CHÈSE, B.; PATOUILLARD, L.; BOUVART, F. A review of LCA greenhouse gas emissions results for advanced biofuels: *The use of meta-regression analysis*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Paris, v. 26, p. 108-134, 2013.

- NEVES, M. F.; TROMBIN, V. G.; CONSOLI, M. (2010). O mapa sucroenergético do Brasil. In U. –U. Cana-de-açúcar, *Etanol e bioeletricidade : a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética*, p. 14-43. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação.
- NUMATA JÚNIOR, F.; UGAYA, C.M.L. How to take dynamic data in Life Cycle Inventory from brazilian sugarcane ethanol. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. Paraná, v. 5, 2016.
- NUNES, P. B. (2010). Caracterização logística do sistema agroindustrial da cana-de-açúcar no centro-sul do Brasil. Graduação em Ciências Econômicas (monografia). Piracicaba: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade São Paulo, 2010.
- NYKO, D.; GARCIA, J.L.F.; MILANEZ, A.Y.; DUNHAM, F. B. A corrida tecnológica pelos biocombustíveis de segunda geração: *uma perspectiva comparada*. BNDES Setorial, Brasil, n. 32, p.5-48, set. 2010.
- OLIVEIRA, E. C. (2010). Balanço energético na produção de álcool da cana-de-açúcar: Comparativo com a produção norte americana de etanol por meio da utilização de milho. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Física Com Ênfase em Física Ambiental, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul. Dourados, 2010.
- OLIVEIRA, M. E. D. D.; VAUGHAN, B. E.; JR., E. R. Ethanol as Fuel: *Energy, Carbon Dioxide Balances, and Ecological Footprint*. *BioScience* , v. 55, p. 593-602, jul. 2005.
- OMETTO, A. R.; HAUSCHILD, M. Z.; ROMA, W. N. L. (2008). Lifecycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Brazil. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, v. 14, p. 236-247.
- PAIVA, R.P.O.; MORABITO, R. Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool. *Gestão da produção*. São Carlos, v. 14, n. 1, p. 25-41, 2007.
- PE INTERNATIONAL. Tutorial GaBi. 2015.
- PELLEGRINI, L. F. (2009). Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicada à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.
- PIERAGOSTINI, C.; MUSSATI, M. C.; AGUIRRE, P. On process optimization considering LCA methodology. *Journal of Environmental Management*, v. 96, p. 43-54, 2012.
- QUEIROZ, G. C.; GARCIA, E. E. C. Reciclagem de sacolas plásticas de polietileno em termos de inventário de ciclo de vida. *Revista Polimeros*, v.20, p.401-406, 2010.
- RAMALHO, J. F.; AMARAL-SOBRINHO, N. M. (2001). Metais pesados em solos cultivados com cana-de-açúcar pelo uso de resíduos agroindustriais. *Revista Floresta e Ambiente*, p. 229-264.
- RENÓ, M.L.G.; OLMO, O.A.D.; PALACIO, J.C.E.; LORA, E.E.S; VENTURINI, O.J. Sugarcane biorefineries: *Case studies applied to the Brazilian sugar–alcohol Industry*. *Energy Conversion and Management*. Itajubá, v. 86, p. 981-991, 2014.
- RENÓ, M.L.G.; LORA, E.E.S; PALACIO, J.C.E.; VENTURINI, O.J; BUCHGEISTER, J.; ALMAZAN, O. A LCA (life cycle assessment) of the methanol production from sugarcane bagasse. *Energy*. Itajubá, v. 36, p. 3716-3726, 2011.
- RODRÍGUEZ, M. F. (2010). Uso de Água na Produção de Etanol de Cana-de-açúcar. Dissertação de Mestrado em Planejamento de Sistemas Energético. Campinas: Unicamp, 2010.

ROJAS, S. P. (2012). Contribuição do Enfoque de Ciclo de Vida da Ecologia Industrial na Economia do Meio Ambiente. Tese de Doutorado (Economia). Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

ROY, P.; NEI, D.; ORIKASA, T.; XU, Q.; OKADAME, H.; NAKAMURA, N.; SHIINA, T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, v.90, p.1-10, 2009.

RUVIARO, C. F.; GIANEZINI, M.; BRANDÃO F. S.; WINCK, C. A.; DEWES, H. Life cycle assessment in Brazilian agriculture facing worldwide trends. *Journal of Cleaner Production*, v.28, p.9-24, 2012.

SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*. Revista Science Direct – Elsevier, v.33, p.1101 - 1107, 2009.

SAMPAIO, C. M. S. (2013). Avaliação do setor sucroalcooleiro brasileiro quanto ao atendimento a requisitos de sustentabilidade da produção de etanol combustível. Tese de Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. Rio de Janeiro, RJ, 221 p, 2013.

SANTOS, F. A.; QUEIRÓZ, J. D.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARÃES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. *Química Nova*, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SCA – Sociedade Corretora de Álcool Ltda. Etanol do Brasil. 2017. Unidades Produtoras. Disponível em: < <http://www.scalcool.com.br/unidades-produtoras/> >. Acesso em: 22 jan. 2017.

SCA – Sociedade Corretora de Álcool Ltda. Etanol do Brasil. 2014. Disponível em: < <http://www.scalcool.com.br/noticias/goias-e-o-segundo-maior-produtor-de-cana-de-acucar-do-pais/> >. Acesso em: 25 jul. 2017.

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C.; CHUM, H. L.; FARONI, C. E; SARTO, C. A. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: *GHG emissions and energy use*. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, v.5, p.519-532, 2011.

SETTEN, A. D. (2010). Infraestrutura logística de exportação de etanol e açúcar no centro-sul do país. Escola de Economia de São Paulo – EESP (dissertação de Mestrado). São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2010.

SILVA, F.; ARDUIN, R.; SOUZA, C.; VINHAL, L.; TEIXEIRA, C.; OLIVEIRA, L. Aspectos metodológicos para a realização de estudos de avaliação de ciclo de vida (ACV) para produtos de construção. XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído – ENTAC. Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção. São Paulo, 2016.

SOARES, L.H.B.; ALVES, B J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Mitigação das emissões de gases de efeito estufa pelo uso de etanol de cana-de-açúcar produzido no Brasil. Circular Técnica 27. Rio de Janeiro: Embrapa, 2009.

SPERLING, F., 2012. The angry countryside and the installation of biogas plants as a contested issue in a German region. In: Welz, Sperling, Blum (Eds.), *Negotiating Environmental Conflicts: Local communities, global policies*. Institut für Kulturanthropologie und Europäische Ethnologie. Goethe University. *Kulturanthropologie Notizen* 81.

TCU - Tribunal de Contas da União. Relatório de levantamento. Avaliação da regulação e das políticas públicas voltadas para o mercado interno de etanol, à vista do risco de desabastecimento e da instabilidade de preços. Riscos de insuficiência da expansão da oferta, dos novos

investimentos, e dos mecanismos de monitoramento do setor e de indução de correções do mercado. Determinações. Arquivamento. Relator Ministro Raimundo Carreiro. – Brasília: TCU, 2012. 58 p. – (Processo: 027.708/2011-0 Mercado interno de etanol e sua regulação).

TENÓRIO, J.A.S.; SANTOS, L.J.C. Avaliação do ciclo de vida e custeio do ciclo de vida de evaporadores para usinas de açúcar. Universidade de São Paulo, São Paulo, v. 63, n. 1, p. 179-184, 2010.

TURDERA, E. M. V. Energy balance, forecasting of bioelectricity generation and greenhouse gas emission balance in the ethanol production at sugarcane mills in the state of Mato Grosso do Sul. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 19, p. 582- 488, 2013.

USINOVA (2014). Usina Nova Gália Ltda. Disponível em < <http://novagalialia.webnode.com/galeria-de-fotos/#foto-aerea2-julho-14-jpg> >. Acesso em: 08 jul. 2017.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. (2017). Moagem prevista para a região Centro-Sul na safra 2017/2018 é de 585 milhões de toneladas. Disponível em < <http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=80> >. Acesso em: 25 de jul. 2017.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. (2016a). Cana amplia sua participação e se mantém como 1ª fonte de energia renovável no Brasil. Disponível em < <http://www.unica.com.br/imprensa/20030441920330985536/cana-amplia-sua-participacao-e-se-mantem-como-1-por-centoC2-por-centoAA-fonte-de-energia-renovavel-no-brasil> >. Acesso em: 21 jan. 2017.

_____. (2016b). Mapa da produção. Disponível em < <http://www.unica.com.br/mapa-da-producao/> >. Acesso em: 22 jan. 2017

UNICA. (2009). Novos termos e expressões marcam a comunicação do setor, agora sucroenergético. Disponível em < <http://www.unica.com.br/noticia/2401714692039673243/novos-terminos-e-expressoes-marcam-acomunicacao-do-setor-por-cento2C-agora-sucroenergetico/> >. Acesso em: 21 jan. 2017.

VILELA, F. S. V. (2013). Avaliação do ciclo de vida da produção industrial de etanol e açúcar. Estudo de Caso: Usina Jalles Machado S/A. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas. Publicação ENM.DM-184A/2013, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107 p, 2013.

ZAPPAROLI, I. D.; SILVA; S. S. Desenho da metodologia da avaliação do ciclo de vida (ACV) do etanol combustível pelo método CML 2000 com SimaPRO. 3nd International Workshop Advances in Cleaner Production - “Cleaner production initiatives and challenges for a sustainable world”. São Paulo, 2011.

APÊNDICE – QUESTIONÁRIO DA ENTREVISTA

1) Quais as entradas e seus quantitativos do processo? (energia, matéria-prima, etc.)

- a) Elétrica;
- b) Diesel;
- c) Gás;
- d) Água;
- e) Ar (oxigênio), calculada a partir da
 - a. queima do bagaço $C + O_2 \rightarrow CO_2$ e da
 - b. fermentação alcoólica $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2 C_2H_5OH + 2 CO_2$
 - c. diesel $4 C_{12}H_{23} + 71 O_2 \rightarrow 48 CO_2 + 46 H_2O$
- f) Cana-de-açúcar;
- g) Insumos diversos (óleo lubrificante, produtos químicos, etc.);
- h) Antissépticos:
 - a. Acido sulfúrico;
 - b. Penicilina;
 - c. Pentaclorofenol;
- i) Mão de obra especializada;
- j) Maquinaria;
- k) Peças de reposição;
- l) Utilização de solo;

2) Quais as saídas e seus quantitativos do processo?

- a) Etanol;
 - a. Etanol hidratado
 - b. Etanol anidro
 - c. Álcool retificado
- b) Açúcar;
- c) Energia elétrica;
- d) Bagaço;
- e) Fermento;
- f) Óleo fúsel;
- g) Melaço;

- h) Vinhaça;
- i) Flegma e Flegmaça;
- j) Gases de exaustão;
- k) Calor residual (na vinhaça, nos gases, vapor de baixa pressão);
- l) Torta de filtro;
- m) Cinzas da caldeira;
- n) Dióxido de carbono CO₂;
- o) Outros gases de combustão;
- p) Outras descargas ambientais: efluentes líquidos, ar e solo;
- q) Resíduos sólidos:
 - a. Lixo comum;

3) Identifique os (as):

- a) Recursos abióticos e bióticos;
- b) Quantidades água, ar, vapor;
- c) Emissões de CO₂ e outros;
- d) Resíduos para aterro;
- e) Balanços: ganhos e perdas de massa e energia;

4) Qual (is)?:

- a) Os componentes perigosos;
- b) Custos associado às perdas;
- c) Índice de rejeição dos produtos;

5) Existe uma unidade de reciclagem para os produtos rejeitados?

6) A usina comercializa créditos de carbono?

7) A usina produz, consome e vende o excedente de toda a energia gerada? Quantos MWh por ano)

ANEXO A – INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA DA USINOVA

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Etapa Agrícola (plântio e colheita) com energia do Processo de vapor de biomassa (sólida) 90%(bagaço da cana)	Energia da cogeração do bagaço	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	4,50	kWh	Cana-de-açúcar	BR: sugar cane, at farm [plant production]	1000,00	kg
	Antibióticos (penicilina, etc)	Fertilizer	0,00	kg				
	Ácido sulfúrico	Sulfuric acid, dimethyl ester	0,45	kg				
	Dióxido de Cloro (ClO ₂)	RER: chlorine dioxide, at plant	0,04	kg				
	Nitrogênio**	Nitrogen [Inorganic emissions to fresh water]	1,33	kg				
	Fosfato**	Phosphate (P ₂ O ₅) [Non renewable resources]	0,33	kg				
	Óxido de Potássio**	Potassium [Non renewable elements]	1,87	kg				
	Calcário**	Limestone [Minerals]	53,33	kg				
	Sementes**	CH: maize seed organic, at farm	21,60	kg				
	Diesel	Diesel [Refinery products]	0,96	lt				

CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UM
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Caminhão de transporte da cana com BR: Diesel mix at refinery ts	Diesel	Diesel [Refinery products]	0,96	lt	Cana-de-açúcar	BR: sugar cane, at farm	1,00	t/h
	Cana-de-açúcar	BR: sugar cane, at farm	1,00	t/h				
Limpeza, Preparo e Moagem com energia do Processo de vapor de biomassa (solid) 90%(bagaço da cana)	Cana-de-açúcar	BR: sugar cane, at farm	1,00	t/h	Bagaço	Bagasse (51.5% H2O content)	0,27	t/h
	Diesel	Diesel [Refinery products]	0,00	lt	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,10	t/h
	Energia da cogeração do bagaço	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	16,00	kWh				
	Água de embebição (AE)	water	0,32	t/h				
Armazenamento do Bagaço	Bagaço	BR: bagasse, from sugarcane, at sugar refinery	0,09	t/h	Bagaço	BR: bagasse, from sugarcane, at sugar refinery	0,09	t/h

CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UM
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Caixa de Caldo Misto	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,10	t/h	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h
	Energia**	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	3,69	MJ	Vapor**	Steam (Mp)	2,55	kg
	Vapor**	Steam (Mp)	2,55	kg				
	Caldo Filtrado (CF)	Sugar cane (TH; 74.5% H2O content)	0,22	t/h				
Regenerador de Calor 1	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h
	Vinhaça	BR: vinasse, from sugarcane molasses, at sugar refinery [others]	1,11	t/h	Vinhaça	BR: vinasse, from sugarcane molasses, at sugar refinery [others]	1,11	t/h
Regenerador de Calor 2	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h
	Caldo pré-evaporado (CPE)*		0,73	t/h	Caldo pré-evaporado (CPE)*		0,73	t/h

CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UM
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Aquecedor	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h
	Vapor Vegetal (V1)	Steam (lp)	0,09	t/h	Vapor Vegetal Condensado (CDV1)/Steam (vhp)		0,09	t/h
Balão de Flash	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,32	t/h	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,30	t/h
					Vapor de Flash (VF)	Steam (vlp)	0,03	t/h
Decantação	Caldo misto (CM)	Sugar cane (74.5% H2O content)	1,30	t/h	Caldo Clarificado (CC)*		1,10	t/h
					Lodo (L)	Waste water (sludge for agricultural use as fertilizer)	0,20	t/h
Filtração	Lodo (L)	Waste water (sludge for agricultural use as fertilizer)	0,20	t/h	Caldo Filtrado (CF)	Sugar cane (TH; 74.5% H2O content)	0,22	t/h
	Água de embebição (AE)	water	0,06	t/h	Torta de Filtro (T)	CH: silage maize IP, at farm**	0,04	t/h

CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Pré- evaporação	Caldo Clarificado (CC)*		1,10	t/h	Caldo Pré- evaporado (CPE)*		0,73	t/h
	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,41	t/h	Vapor Vegetal (V1)	Steam (lp)	0,37	t/h
					Vapor de Escape Condensado (CDVE)	Steam (vhp)	0,41	t/h
Resfriamento	Mosto (M)*		0,73	t/h	Água	water	2,73	t/h
	Água	water	2,73	t/h	Mosto (M)*		0,73	t/h
Fermentação	Mosto (M)*		0,73	t/h	Vinho Levedurado (VL)*		1,28	t/h
	Fermento Tratado (FT)	Yeast	0,50	t/h	CO ₂	Carbon dioxide [Inorganic emissions to air]	0,07	t/h
	Leite de Levedura (LL)	CH: yeast paste, from whey, at fermentation	0,25	t/h				
	Energia**	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]**	2,97	MJ				
	Água Tratada (AT)	water	0,25	t/h				

CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Centrífuga de Vinho	Vinho Levedurado (VL)*		1,28	t/h	Leite de Levedura (LL)	CH: yeast paste, from whey, at fermentation	0,25	t/h
					Vinho Turbinado (VT)/Vinho*		1,03	t/h
Destilação	Vinho Turbinado (VT)/Vinho*		1,03	t/h	Vinhaça	BR: vinasse, from sugarcane, at fermentation	1,11	t/h
	Vapor Vegetal (V1)	Steam (lp)	0,28	t/h	Álcool Hidratado	BR: ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant	92,71	l/h
Armazenamento da Vinhaça (Piscina)	Vinhaça	BR: vinasse, from sugarcane, at fermentation	0,56	t/h	Vinhaça	CH: vinasse, at regional storehouse	0,56	t/h
	Energia**	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	351,00	MJ				
Fertirrigação	Vinhaça	BR: vinasse, from sugarcane, at fermentation	0,56	t/h	Vinhaça	BR: vinasse, from sugarcane, at fermentation	0,56	t/h
	Energia da cogeração do bagaço	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	4,50	kWh				

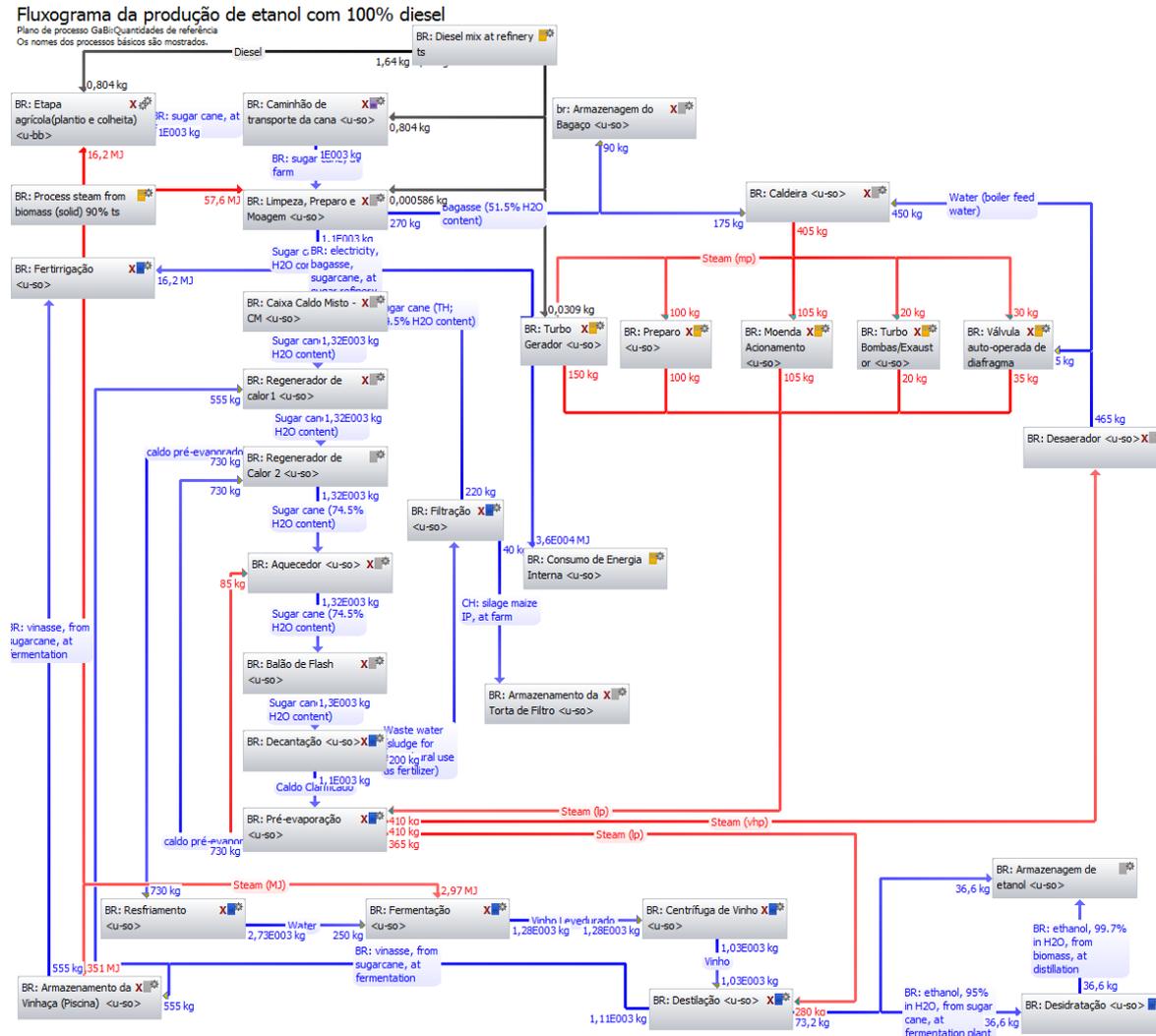
CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Caldeira	Bagaço	Bagasse (51.5% H2O content) [Biomass fuels]	0,18	t/h	Descarga de Caldeira (DC)	GLO: discharge, produced water, onshore [Appropriation]	0,04	t/h
	Água de Caldeira (AC)	Water (boiler feed water) [Operating materials]	0,45	t/h	Vapor Direto (VD)	Steam(mp)	0,41	t/h
					Cinzas	Boiler Ash	5,00	kg
Turbo Gerador	Vapor Direto (VD)	Steam(mp)	0,15	t/h	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,15	t/h
	Diesel	Diesel [Refinery products]	0,00	lt	Energia da cogeração do bagaço	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	50,00	kWh
Preparo	Vapor Direto (VD)	Steam(mp)	0,10	t/h	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,10	t/h
Moenda Acionamento	Vapor Direto (VD)	Steam(mp)	0,11	t/h	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,11	t/h
Turbo Bombas/Exaustor	Vapor Direto (VD)	Steam(mp)	0,02	t/h	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,02	t/h

CONTINUA//

ETAPAS DO PROCESSO	ENTRADAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN	SAÍDAS	FLUXOS CORRESPONDENTES NO GaBi	UF	UN
Dados considerados para unidade funcional (UF) de 1000 kg de cana-de-açúcar.					* Fluxo criado por não haver correspondente na base de dados GaBi ** Dados da literatura			
Válvula Auto-operada de diafragma	Vapor Direto (VD)	Steam(mp)	0,03	t/h	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,03	t/h
	Água p/dessueraquecedor (ADS)	water	0,01	t/h				
Desaerador	Vapor de Escape (VE)	Steam (lp)	0,00	t/h	Água de Caldeira (AC)	Water (boiler feed water)	0,46	t/h
	Vapor de Esc. Cond. (CDVE)	Steam (vhp)	0,41	t/h				
	Make-up (MU)*		0,06	t/h				
Consumo de Energia Interna	Energia da cogeração do bagaço	BR: electricity, bagasse, sugarcane, at sugar refinery [cogeneration]	26,62	kWh				
Armazenagem do etanol	Etanol hidratado	BR: ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant	36,60	kg	Etanol hidratado	BR: ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant	36,60	kg
	Etanol anidro	BR: ethanol, 99.7% in H2O, from biomass, at distillation	36,60	kg	Etanol anidro	BR: ethanol, 99.7% in H2O, from biomass, at distillation	36,60	kg
Desidratação	Etanol hidratado	BR: ethanol, 95% in H2O, from sugar cane, at fermentation plant	36,60	kg	Etanol anidro	BR: ethanol, 99.7% in H2O, from biomass, at distillation	36,60	kg

ANEXO B – FLUXOGRAMA DO PROCESSO PRODUTIVO DO ETANOL CRIADO NO SOFTWARE GABI – MASSA E ENERGIA



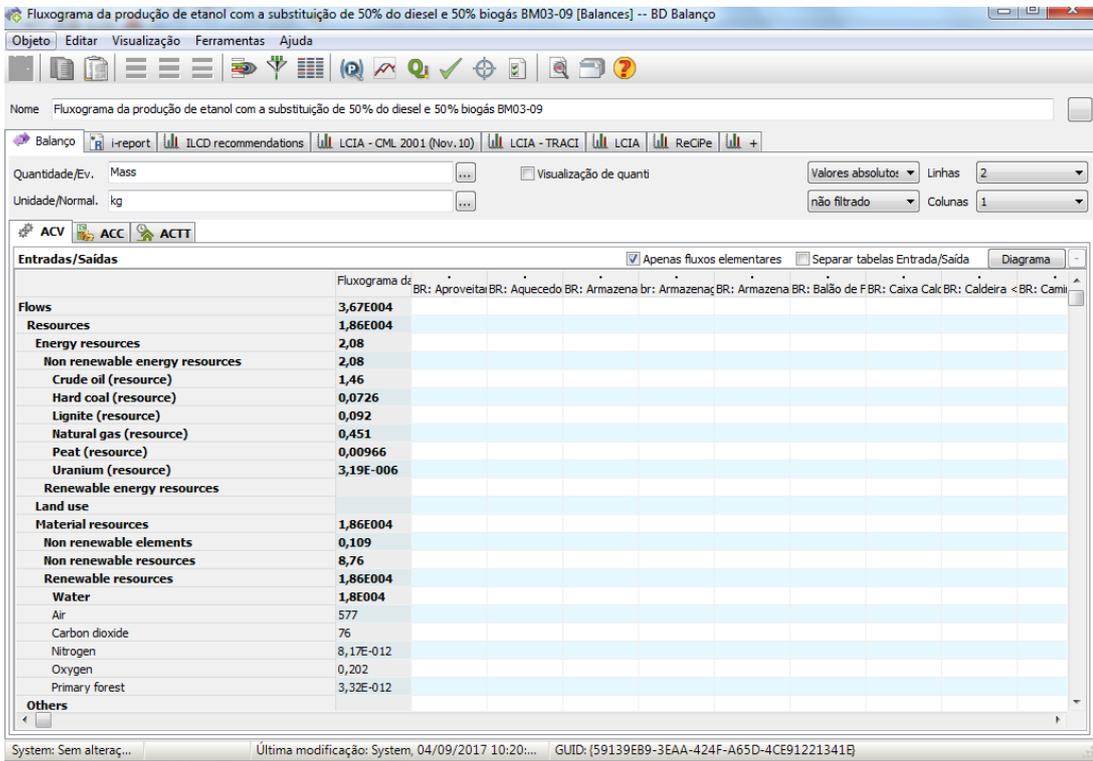
ANEXO E – TELAS DOS BALANÇOS MÁSSICO E ENERGÉTICO DA PLATAFORMA GABI

Entradas/Saídas	Fluxograma de	BR:	Aquecedo BR:	Armazena br:	Armazenaç BR:	Armazena BR:	Armazena BR:	Balão de FBR:	Caixa Calc BR:	Caldeira < BR:	Caminhã
Flows	2,74E004										
Resources	1,4E004										
Energy resources	2,64										
Non renewable energy resources	2,64										
Crude oil (resource)	2,16										
Hard coal (resource)	0,0454										
Lignite (resource)	0,0493										
Natural gas (resource)	0,37										
Peat (resource)	0,00936										
Uranium (resource)	1,94E-006										
Renewable energy resources											
Land use											
Material resources	1,4E004										
Non renewable elements	1,94										
Non renewable resources	5,34										
Renewable resources	1,4E004										
Water	1,35E004										
Air	440										
Carbon dioxide	52,9										
Nitrogen	3,97E-012										
Oxygen	0,202										
Primary forest	1,61E-012										
Others											

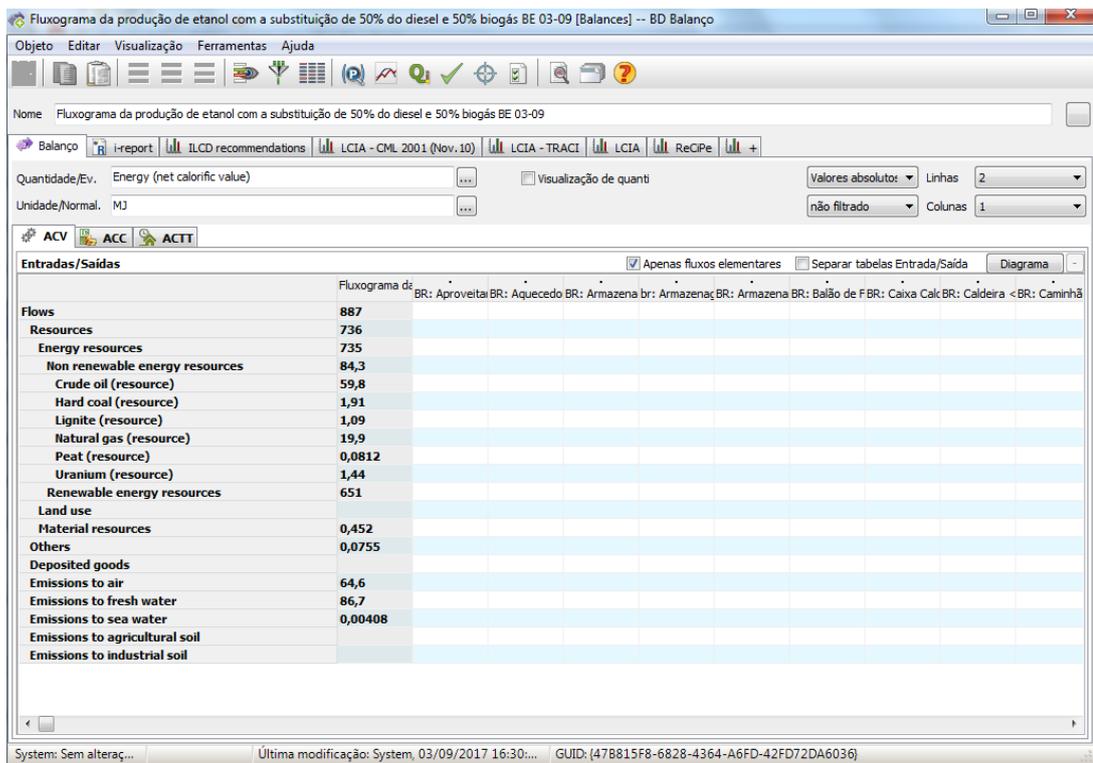
Correspondente a parte do Quadro7.

Entradas/Saídas	Fluxograma de	BR:	Aquecedo BR:	Armazena br:	Armazenaç BR:	Armazena BR:	Armazena BR:	Balão de FBR:	Caixa Calc BR:	Caldeira < BR:	Caminhã
Flows	590										
Resources	537										
Energy resources	537										
Non renewable energy resources	109										
Crude oil (resource)	89,7										
Hard coal (resource)	1,19										
Lignite (resource)	0,586										
Natural gas (resource)	16,3										
Peat (resource)	0,0787										
Uranium (resource)	0,875										
Renewable energy resources	428										
Land use											
Material resources	0,107										
Others	0,0748										
Deposited goods											
Emissions to air	23,9										
Emissions to fresh water	28,7										
Emissions to sea water	0,00571										
Emissions to agricultural soil											
Emissions to industrial soil											

Correspondente a parte do Quadro8.



Correspondente a parte do Quadro 9.



Correspondente a parte do Quadro 10.

Fluxograma da produção de etanol com 100% de biogás BM03-09 [Balances] -- BD Balanço

Objeto Editar Visualização Ferramentas Ajuda

Nome Fluxograma da produção de etanol com 100% de biogás BM03-09

ILCD recommendations LCIA - CML 2001 (Nov.10) LCIA - TRACI LCIA ReCiPe Balanço i-report

Quantidade/Ev. Mass Unidade/Normal. kg

Valores absolutos Linhas 2

não filtrado Colunas 1

ACV ACC ACTT

Entradas/Saídas

Fluxograma de: BR: Aproveita BR: Aquecedo BR: Armazena br: Armazenaç BR: Armazena BR: Balão de FBR: Caixa Calc BR: Caldeira < BR: Cami

Flows	Quantidade
Resources	2,33E004
Energy resources	1,53
Non renewable energy resources	1,53
Crude oil (resource)	0,752
Hard coal (resource)	0,0999
Lignite (resource)	0,135
Natural gas (resource)	0,533
Peat (resource)	0,00996
Uranium (resource)	4,44E-006
Renewable energy resources	
Land use	
Material resources	2,33E004
Non renewable elements	2,02
Non renewable resources	12,2
Renewable resources	2,33E004
Water	2,24E004
Air	715
Carbon dioxide	99,1
Nitrogen	1,24E-011
Oxygen	0,202
Primary forest	5,02E-012
Others	

Guardar alteração do objeto na base de dados.

Correspondente ao Quadro 11.

Fluxograma da produção de etanol com 100% de biogás BE03-09 [Balances] -- BD Balanço

Objeto Editar Visualização Ferramentas Ajuda

Nome Fluxograma da produção de etanol com 100% de biogás BE03-09

Balanço i-report ILCD recommendations LCIA - CML 2001 (Nov.10) LCIA - TRACI LCIA ReCiPe

Quantidade/Ev. Energy (net calorific value) Unidade/Normal. MJ

Valores absolutos Linhas 2

não filtrado Colunas 1

ACV ACC ACTT

Entradas/Saídas

Fluxograma de: BR: Aproveita BR: Aquecedo BR: Armazena br: Armazenaç BR: Armazena BR: Balão de FBR: Caixa Calc BR: Caldeira < BR: Cami

Flows	Quantidade
Resources	934
Energy resources	933
Non renewable energy resources	59,8
Crude oil (resource)	30
Hard coal (resource)	2,63
Lignite (resource)	1,6
Natural gas (resource)	23,5
Peat (resource)	0,0837
Uranium (resource)	2
Renewable energy resources	874
Land use	
Material resources	0,796
Non renewable elements	0,796
Non renewable resources	
Renewable resources	7,38E-011
Others	0,0761
Deposited goods	
Emissions to air	105
Emissions to fresh water	145
Emissions to sea water	0,00245
Emissions to agricultural soil	
Emissions to industrial soil	

System: Sem alteraç... Última modificação: System, 05/09/2017 00:55... GUID: {E772AC26-F018-4011-89AE-96D71493587C}

Correspondente ao Quadro 12.

Resumo do Currículo Lattes

Endereço para acessar <http://lattes.cnpq.br/5369917951385979>

Graduação em Engenharia de Produção pela Universidade do Estado do Pará - UEPA (2004); MBA em Logística Empresarial pela Universidade da Amazônia - UNAMA (2007) e mestre em Tecnologia de Processos Sustentáveis pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – IFG (2017). Pesquisador-Tecnologista em Metrologia e Qualidade na área de Engenharia de Produção, do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO/GO (2010 – atual).