



UFAL

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA BIOMASSA**



CECA

Roney Calheiros de Novais

**PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTOS AMBIENTAIS DE SEUS RESÍDUOS NA
INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA DE ALAGOAS**

Maceió – AL

Maio de 2018

Roney Calheiros de Novais

**PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTOS AMBIENTAIS DE SEUS RESÍDUOS NA
INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA DE ALAGOAS**

Orientador: Prof. Dr. João Nunes de Vasconcelos

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Energia da Biomassa, do Centro de Ciências Agrárias (CECA) da Universidade Federal de Alagoas – UFAL, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Energia da Biomassa.

Maceió - AL
2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Agrárias
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

N935p Novais, Roney Calheiros de
 Produção de etanol e impactos ambientais de seus resíduos na
 indústria sucroenergética de Alagoas / Roney Calheiros de Novais –
 2018.
 109 f.; il.

Dissertação (Mestrado em Energia da Biomassa) - Universidade
Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2018.
Orientação: Prof. Dr. João Nunes Vasconcelos

Inclui bibliografia

1. Energia renovável 2. Cana-de-açúcar 3. Destilária I. Título

CDU 633.61

Dedico este trabalho a Deus, por ter me concebido a vida; a minha querida mãe, em memória, exemplo de vida, pelo amor, incentivo e apoio incondicional; a minha amada esposa Sônia Venir e filhas que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

TERMO DE APROVAÇÃO

RONEY CALHEIROS DE NOVAIS

PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTOS AMBIENTAIS DE SEUS RESÍDUOS NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA DE ALAGOAS.

Esta dissertação foi submetida a julgamento como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre Profissional em Energia da Biomassa, outorgado pela Universidade Federal de Alagoas.

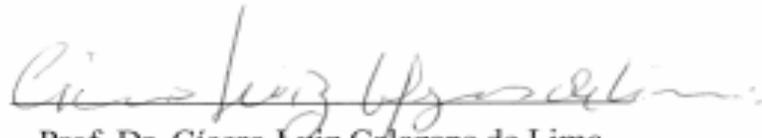
A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

Aprovado em 01/06/2018



Prof. Dr. João Nunes de Vasconcelos

Orientador (UFAL)



Prof. Dr. Cícero Luiz Calazans de Lima

Membro Interno (CECA/UFAL)



Prof^ª. Dr^ª. Rosa Cavalcante Lira

Membro Interno (CECA/UFAL)



Prof. Dr. Ivomberg Dourado Magalhães

Membro Externo (CONTECC)

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela determinação, confiança e perseverança para vencer os obstáculos da vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Nunes de Vasconcelos, pela orientação, confiança, amizade e paciência no decorrer dessa jornada.

Aos meus queridos amigos Eliel, Wagner, Alberto, Luís Carlos e Bruno pela convivência, amizade e lealdade.

À Universidade Federal de Alagoas (UFAL), por meio do Centro de Ciências Agrárias, por me oportunizar um aperfeiçoamento gratuito e de excelência.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Energia da Biomassa, do Centro de Ciências Agrárias (CECA), pelos ensinamentos.

Ao corpo técnico do Programa de Pós-Graduação pelas informações repassadas durante o curso.

Aos funcionários da secretaria de Pós-Graduação, Marcos e Gustavo.

Aos colegas de disciplinas do Mestrado.

Às destilarias anexas e à autônoma, que gentilmente forneceram as informações solicitadas.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

*“A mente que se abre a uma nova ideia, jamais voltará ao seu tamanho original”
Albert Einstein*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1. Cana-de-açúcar	12
2.2. Importância Sócio-Econômica da Cana-de-Açúcar no Brasil	13
2.3. Impactos Ambientais do Setor Alcooleiro	14
2.4 Proálcool	16
2.5. Principais Resíduos Obtidos na Produção de Etanol.....	18
2.5.1. Água.....	18
3.5.2. Vinhaça	19
Adaptado por Peres (1999).	22
2.5.4. Cinzas das Caldeiras	22
2.5.5. CO ₂	23
2.6 Etanol.....	25
2.7 Processo de Fabricação de Açúcar e de Etanol.....	26
2.8 Descrição das Etapas dos Processos de Fabricação de Açúcar e Etanol	28
2.9. Reações químicas no processo de fabricação de etanol.....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 Cana-de-açúcar processada	38
4.2. Produção de diversos produtos da cana-de-açúcar	40
4.3 Produção e destino de derivados da cana-de-açúcar	43
4.4. Resultados dos cálculos para os principais resíduos	49
4.5. Eficiências e rendimentos da cana-de-açúcar.....	52
4.5 Moagem de cana-de-açúcar x petróleo equivalente e CO ₂ liberado na combustão veicular	54
5. CONCLUSÃO.....	56
ANEXOS.....	70
APÊNDICES.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de fabricação de açúcar e etanol	27
Figura1. Etapas do processo de fabricação de etanol	27
Figura 3. Média do bagaço (X), vinhaça (Y) e do CO ₂ liberado na fermentação etanólica (Z), das usinas A, B, C e destilaria D durante as três safras avaliadas (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015).....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Usinas de cana-de-açúcar produzindo em Alagoas no início dos anos 2000 e na safra 2016	15
Tabela 2. Mostra a evolução da produção de etanol no Brasil e nos EUA, entre 1997 e 2022.....	16
Tabela 3. Usos da água (valores médios) em usinas com destilaria anexa.....	19
Tabela 4. Resultado da análise para os 3 tipos de vinhaça em destilarias de Alagoas. .	20
Tabela 5. Valor fertilizante da vinhaça - m ³ /há.....	21
Tabela 6. Composição média do bagaço de cana (PERES, 1999).....	22
Tabela 7. Propriedades do etanol e da gasolina (Heywood, 1988).....	25
Tabela 8. Cana-de-açúcar processada de três usinas no estado de Alagoas (A, B e C) e da destilaria autônoma D) durante três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015).....	26
Tabela 9. Produção de diversos produtos da cana-de-açúcar de três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D) no estado de Alagoas durante três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015).....	38
Tabela 10. Produção Brasileira de Etanol.....	41
Tabela 11. Produção e destino de derivados da cana-de-açúcar de três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D), no estado de Alagoas, durante três safras (2016/2017, 206/2015 e 2014/2015)	44
Tabela 12. Resultados dos cálculos para os principais resíduos (bagaço, vinhaça e CO ₂ liberado na fermentação) da cana-de-açúcar produzidas por três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D) no estado de Alagoas durante três safras (2016/2017, 206/2015 e 2014/2015), para o estado de Alagoas e Brasil.	50
Tabela 13. Eficiências e Rendimentos da cana-de-açúcar três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D), no estado de Alagoas, durante três safras (2016/2017, 206/2015 e 2014/2015).	53
Tabela 14. Moagem de cana-de-açúcar x petróleo equivalente.....	54
Tabela 15. CO ₂ liberado na combustão veicular (t).....	55

PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTOS AMBIENTAIS DE SEUS RESÍDUOS NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA DE ALAGOAS

Resumo

Apesar de toda tradição da agroindústria sucroenergética, é notória a preocupação da população e principalmente do meio científico relacionado aos impactos ambientais negativos que seus processos industriais produzem no meio ambiente. Com isto, objetivou-se avaliar a produção de etanol, açúcar e outros derivados da cana-de-açúcar de quatro unidades industriais de Alagoas, durante três safras e pontuar os possíveis impactos ambientais provocados pelo processo de industrialização. Foi feito um levantamento com um questionário em três destilarias anexas e em uma destilaria autônoma, localizadas no estado de Alagoas. As quatro destilarias conduziram a fermentação em batelada alimentada (processo descontínuo alimentado) e possuem dorna pulmão. Duas possuem dornas abertas e duas fermentadores fechados, para recuperação do etanol arrastado pelos gases desprendidos durante a fermentação etanólica. O questionário foi preenchido com dados operacionais de cada destilaria. Foi avaliada a matéria prima por meio das variáveis cana - de - açúcar moída para açúcar, cana moída para álcool, % cana moída crua, moagem horária, tipo de mosto (caldo / misto / melaço), ART do mosto. Foi quantificada a produção, resíduos, eficiências e rendimentos das usinas. As destilarias avaliadas neste trabalho utilizam seus resíduos dentro de uma amplitude aceitável do ponto de vista ambiental, buscando sempre melhores tecnologias com intuito de minimizar os impactos ambientais. O procedimento operacional industrial adotado pelas quatro unidades é, salvo pequenas variações, padrão para todo o estado de Alagoas.

Palavras-chave: Energia renovável; Cana-de-açúcar; Destilaria; Resíduos.

PRODUÇÃO DE ETANOL E IMPACTOS AMBIENTAIS DE SEUS RESÍDUOS NA INDÚSTRIA SUCROENERGÉTICA DE ALAGOAS

Summary

Despite all the tradition of the sugarcane agro-industry, the concern of the population and especially of the scientific environment related to the negative environmental impacts that its industrial processes produce in the environment is notorious. The objective of this study was to evaluate the production of ethanol, sugar and other sugarcane by-products from four industrial units of Alagoas during three harvests and to assess the possible environmental impacts caused by the industrialization process. A survey was carried out with a questionnaire in three attached distilleries and an autonomous distillery, located in the state of Alagoas. The four distilleries led the batch fermentation fed (discontinuous fed process) and they have a dorna lung. Two of them have opened dornas and two closed fermenters, for the recovery of the ethanol dragged by the gases released during the ethanolic fermentation. The questionnaire was filled with operational data from each distillery. The raw material was evaluated by means of the variables sugarcane ground for sugar, cane ground for alcohol, ground cane, hourly grinding, type of must (broth / mixed / molasses), wort ART. Production, residues, efficiencies and yields of the mills were quantified. The distilleries evaluated in this work use their residues within an acceptable range from the environmental point of view, always seeking better technologies in order to minimize environmental impacts. The industrial operating procedure adopted by the four units is, except for small variations, standard for the entire state of Alagoas..

Keywords: Renewable energy; Sugar cane; Distillery; Residues.

1. INTRODUÇÃO

Devido à elevada capacidade de produção de biomassa, a cana-de-açúcar é considerada uma das principais alternativas para diversificar a produção de energia, reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) para a atmosfera. O interesse em produzir cana-de-açúcar no mundo tem aumentado as pesquisas, que visam melhor compreender a influência do ambiente sobre seu crescimento e desenvolvimento (SILVA, 2015).

A agroindústria da cana-de-açúcar, apesar de toda tradição e da importância na economia nacional, tem sido alvo de inquietações e julgamentos críticos relacionados aos impactos ambientais negativos que seus processos industriais produzem no meio ambiente (SILVA, 2010; REBELATO et al. 2013). O processamento industrial da cana-de-açúcar apresenta uma cadeia produtiva em que várias de suas etapas, se não gerenciadas adequadamente, podem provocar impactos ambientais indesejados, principalmente associados ao solo e à água (ANA, 2009).

Atualmente o Brasil é líder absoluto na produção de etanol obtido a partir da cana-de-açúcar. Embora a indústria alcooleira possua produtividade elevada, ela utiliza a água de forma intensiva como insumo produtivo, e gera grande quantidade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, advindos do setor de produção. Entre estes resíduos estão o bagaço da cana-de-açúcar, proveniente da moagem da cana para extração do caldo, com teor de umidade em torno de 50%, rico em polissacarídeos (açúcares complexos), como a celulose e a hemicelulose, além da lignina, mais conhecida por biomassa lignocelulósica (SILVA, 2006). Esses três materiais juntos compõem mais de 75% da biomassa vegetal e conferem resistência mecânica à planta. O restante da biomassa é composta por substâncias como proteínas, óleos vegetais e minerais; a vinhaça, resíduo da destilação do mosto fermentado para obtenção de etanol, apresenta altas Demandas Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Química de Oxigênio (DQO).

A busca por objetivos produtivos alinhados às questões ambientais está, no entanto, ligada à necessidade do desenvolvimento de indicadores de desempenho ambiental que possam não somente apontar os impactos ambientais atuais das operações industriais, mas que também possam indicar a evolução da atuação ambiental da empresa a partir de intervenções com vistas à melhoria deste desempenho (ROHRICH & CUNHA, 2004).

Neste contexto, apesar da literatura especializada apresentar um grande número de trabalhos sobre os resíduos poluentes da indústria sucroenergética e de seus impactos ambientais (REBELATO et al., 2013; SOUZA et al., 2013; REBELATO et al., 2016), observa-se que os trabalhos voltados para a relação entre produção de etanol e seus impactos ambientais na indústria alcooleira no Nordeste, especificamente para o estado de Alagoas, são escassos. Com isso, objetivou-se com este estudo avaliar a produção de etanol e os resíduos na indústria sucroenergética de Alagoas e seus possíveis impactos ambientais provocados, avaliando toda cadeia produtiva.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cana-de-açúcar

A cana-de-açúcar, originada do Sudoeste asiático, atualmente é cultivada em várias regiões tropicais e subtropicais do mundo e na maioria dessas regiões essa cultura tem limitações hídricas que reduzem sua produtividade agrícola. Na Austrália, cerca de 60% da cana produzida requer algum tipo de irrigação, 40% dos cultivos da África do Sul são feitos com irrigação e em alguns países, como a Suazilândia e o Sudão, a cana não consegue crescer sem irrigação (INMAN-BAMBER e SMITH, 2005).

A cana-de-açúcar é uma planta de metabolismo fotossintético C4, com elevada taxa fotossintética, sendo uma das culturas mais eficientes na conversão de energia radiante em energia química (TEW e COBILL, 2008). Como produtos derivados dessa matéria-prima podem ser citados: açúcar, etanol, eletricidade, melaço, aguardente, bagaço, levedura, torta de filtro, vinhaça, gás carbônico, ácido cítrico, lisina, briquetes, aglomerados MDF e outros (BNDES/CGEE, 2008).

Os maiores produtores de cana-de-açúcar são Brasil, Índia e China, com 658,8, 341,2 e 126,1 milhões de toneladas (t) produzidos em 2013, respectivamente. Para 2017, de acordo com a CONAB (2017), a produção brasileira de cana-de-açúcar foi de 651,8 milhões de toneladas. Nesta mesma safra, o cultivo da cana-de-açúcar no Brasil foi de 8,9 milhões de hectares (ha), distribuídos entre as regiões Sudeste (62,2 %), Centro Oeste (19,9 %), Nordeste (10,4 %), Sul (7%) e Norte (0,6 %). No Nordeste brasileiro, o estado de Alagoas foi o maior produtor, com aproximadamente 22,5 milhões de t em aproximadamente 417 mil ha cultivados, que representa 42% do total desta região e 3% da produção nacional (CONAB, 2015; SILVA, 2014; CONAB, 2017).

O crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar são dependentes da interação de vários fatores meteorológicos, que incluem principalmente a disponibilidade hídrica, radiação solar, temperatura e umidade do ar. Em relação à disponibilidade hídrica (por se tratar de uma cultura de ciclo longo), em regiões cujas precipitações se concentram em determinado período com distribuição irregular, o seu cultivo requer a adoção de irrigação para suplementar a água proveniente das chuvas (INMAN-BAMBER, 2005). Em termos quantitativos, a demanda hídrica da cana-de-açúcar é variável com a região e a variedade, sendo relatados valores de 1.710 mm nas

condições do submédio do Vale do São Francisco (SILVA et al., 2012); entre 1.400 e 1.500 mm em Sindh no Paquistão (QURESHI e MADRAMOOTOO, 2002); e entre 1.448 e 1.584 mm na região dos Tabuleiros Costeiros de Alagoas (ALMEIDA et al., 2008).

O principal fator limitante da produtividade agrônômica da cana-de-açúcar na zona canavieira alagoana e nordestina é a precipitação pluvial, não pelo total pluviométrico anual, mas por conta da irregularidade ou má distribuição das chuvas. Nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas, Teodoro et al. (2009) estimaram uma deficiência hídrica na ordem de 869 mm em um cultivo de cana-de-açúcar (cana-planta de 14 meses). Isso justifica a necessidade do uso da irrigação como prática agrícola imprescindível para a elevação da produtividade agroindustrial da cultura da cana-de-açúcar.

2.2. Importância Sócio-Econômica da Cana-de-Açúcar no Brasil

O cultivo da cana-de-açúcar é antigo e, de acordo com o Instituto do Açúcar e do Alcool - IAA (1972), tem quase 500 anos de história no Brasil. Neste período, Portugal aproveitou esse gigantesco território e transformou-o em uma colônia agroindustrial do açúcar. A cana-de-açúcar desempenha grande importância para o Brasil, que é o maior produtor mundial dessa matéria-prima, e dos produtos açúcar, etanol e eletricidade. O país é também o maior exportador de açúcar do mundo (BARBOSA, 2014). A CONAB (2017) divulgou que, na safra 2016/ 2017, a produção foi de 38,7 milhões de toneladas de açúcar, representando um acréscimo de 14,5% em relação à safra 2015/2016 e um acréscimo de 9% em relação à safra 2014/2015. Na mesma publicação, a produção de etanol na safra 2016/2017 foi de 27,2 bilhões de litros, representando um decréscimo de 10% em relação a safra 2015/2016 e de 4,2% em relação a safra 2014/2015.

O setor canavieiro brasileiro, baseado na biomassa da cana-de-açúcar, tem papel fundamental para o país (CARVALHO, 2003; BNDES/CGEE, 2008; EPE/MME, 2012; CONAB, 2017). Desde 1975, houve a expansão de áreas cultivadas com cana-de-açúcar e aumento de produção de etanol, crescendo principalmente no estado de São Paulo, mais precisamente nos municípios de Ribeirão Preto e Piracicaba que estiveram em forte expansão até 1987 (KOHLHEPP, 2010). O Brasil possui vantagens naturais para o seu cultivo, tais como grande disponibilidade de terra arável e condições

edafoclimáticas propícias. Conforme Conab (2017), na safra 2017/2018 o país deverá apresentar os seguintes indicadores: cultivo de 8,83 milhões de hectares; moagem de 600 milhões de toneladas de cana; rendimento médio de 73,6 toneladas de cana por hectare (TCH); produção de 26,5 bilhões de litros de etanol e 38,8 milhões de toneladas de açúcar. Pode-se fazer uma comparação do conteúdo energético de uma tonelada de cana-de-açúcar, 1.718.000 kcal, com o potencial energético de um barril de petróleo, que é de 1.386.000 kcal, ou seja, uma tonelada de cana equivale energeticamente a 1,24 barril de petróleo bruto (DEDINI, 2005). Atualmente, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis, devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade.

2.3. Impactos Ambientais do Setor Alcooleiro

A cultura da cana, assim como toda atividade agrícola, gera sempre algum impacto no meio ambiente, na medida em que emprega recursos naturais como água e solo e faz uso de insumos e defensivos químicos, como fertilizantes e pesticidas (RODRIGUES, 2010).

O setor alcooleiro em Alagoas é atualmente composto por 21 usinas (Tabela 1), das quais 16 possuem destilarias anexas, uma é destilaria autônoma e quatro produzem apenas açúcar (ÚNICA 2016). Na safra 2016/2017, apenas 17 destas unidades estiveram em operação. Os resíduos sólidos e líquidos gerados pela indústria alcooleira são proporcionais à quantidade de cana-de-açúcar moída pelas usinas. Tais resíduos podem resultar em vários problemas socioambientais, quando não dada a destinação correta para os mesmos, provocando significativos impactos ambientais. É bem verdade que estes resíduos não só podem resultar em sérios impactos ambientais, porém, quando utilizados adequadamente, podem ser revertidos em benefícios para as próprias empresas, fato também confirmado por Macedo et al. (2004) ao relatar que “o etanol e o bagaço, produtos energéticos da cana-de-açúcar, têm contribuído largamente para a redução das emissões de GEE no Brasil, por serem substitutos de combustíveis fósseis, respectivamente gasolina e óleo combustível”.

Tabela 1. Usinas de cana-de-açúcar produzindo em Alagoas no início dos anos 2000 e na safra 2016.

Usinas	Localização	Safra 2000/2001	Safra 2016/2017
Cachoeira	Ipioca	Ativa	Ativa
Caeté	São Miguel dos Campos	Ativa	Ativa
Camaragibe	Matriz de Camaragibe	Ativa	Ativa
Capricho	Cajueiro	Ativa	Desativada
Coruripe	Coruripe	Ativa	Ativa
Leão	Rio Largo	Ativa	Ativa
João de Deus	Capela	Ativa	Desativada
Marituba	Igreja Nova	Ativa	Ativa
Porto Rico	Campos Alegre	Ativa	Ativa
Roçadinho	São Miguel dos Campos	Ativa	Desativada
Santa Clotilde	Rio Largo	Ativa	Ativa
Santa Maria	Porto Calvo	Ativa	Desativada
Santo Antônio	São Luiz do Quitunde	Ativa	Ativa
Seresta	Teotônio Vilela	Ativa	Ativa
Serra Grande	São José da Laje	Ativa	Ativa
Sinimbu	Jequiá da Praia	Ativa	Desativada
Sumaúma	Marechal Deodoro	Ativa	Ativa
Triunfo	Boca da Mata	Ativa	Desativada
Guaxuma	Coruripe	Ativa	Desativada
Pindorama	Coruripe	Ativa	Ativa
Taquara	Colônia de Leopoldina	Ativa	Ativa
Uruba	Atalaia	Ativa	Ativa
Paisa (Penedo)	Penedo	Ativa	Ativa
Total	23 Usinas		

Fonte: Elaboração a Partir dos dados do SINDAÇÚCAR, 2016.

Obs.: As unidades em destaque (em situação duvidosa) irão moer em outras unidades cooperadas, ou seja, estão produzindo cana-de-açúcar, mas não estão moendo em suas próprias moendas.

Quando utilizado como combustível, o etanol traz consigo uma diversidade de vantagens para o meio ambiente. Entre as suas mais relevantes qualidades, está o fato de ser combustível não só limpo como também renovável e autossustentável (CONAB, 2017). Domingues et al. (2016) revelam que, de acordo com dados publicados pela Agência Internacional de Energia - IEA, “a utilização de etanol produzido através da cana-de-açúcar reduz, em média, 89% a emissão de GEE, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (NO₂), se comparado com a gasolina”. Os autores reportam ainda, que o etanol de outras fontes também colabora no sentido de reduzir tal problemática, todavia, em menor escala, “sendo 46% a redução do etanol produzido por beterraba e 31% no etanol de grãos”.

Em todo o ciclo do combustível, desde a sua produção até o uso como combustível automotor (automóveis, aviões agrícolas, motocicletas), o etanol, em comparação com a gasolina, lança uma quantidade menor de CO₂, cerca de 90% menos

na atmosfera, pelo fato de ser obtido de fonte renovável (SZWARC, 2008). Quanto ao processo fotossintético, as plantas realizam o processo de absorção do gás carbônico da atmosfera, contribuindo, assim, para minimizar o efeito estufa, no sentido que o gás é absorvido pela própria planta. No caso dos combustíveis fósseis, o CO₂, extraído de poços do subsolo (petróleo), é lançado na atmosfera, assim como o resultante da queima dos derivados do processamento do petróleo, aumentando assim o teor de CO₂, gerando uma preocupação com o meio ambiente, haja vista que o petróleo não é uma fonte renovável (DOMINGUES et al., 2016).

Os combustíveis fósseis são os maiores responsáveis pela emissão de poluentes, a exemplo dos óxidos nitrosos (NO e N₂O), que formam o ozônio (O₃) e monóxido de carbono (CO). O ozônio formado pelos óxidos contribui para o surgimento de uma diversidade de problemas à saúde do planeta. A título de conhecimento, cita-se como exemplo de tais problemas de saúde, a irritabilidade nos olhos, desconfortos respiratórios, bem como envelhecimento precoce. Já o CO reduz a oxigenação no sangue, o que pode acarretar vertigens, como também tonturas. É oportuno pontuar que o etanol também lança as substâncias supracitadas, porém em menores quantidades (SILVA, 2007).

Visando a contenção da emissão dos agentes poluentes até aqui mencionados, bem como mitigar os impactos gerados pelas indústrias do setor sucroenergético, diversas Leis Federais e medidas socioambientais foram criadas. De acordo com Almeida Filho (2008), os equipamentos empregados para a limpeza de gases se enquadram em cinco categorias principais: câmaras gravitacionais, ciclones, lavadores, filtros e precipitadores eletrostáticos, divididas de acordo com a eficiência na coleta de particulados e no modo de funcionamento.

2.4 Proálcool

Em 1975 foi criado o Programa Nacional do Álcool - Proálcool, um programa de substituição em larga escala dos derivados de petróleo. Esse programa visava evitar o aumento da dependência externa de divisas quando dos choques de preço de petróleo. De 1975 a 2000, foram produzidos cerca de 5,6 milhões de veículos a álcool hidratado. Paralelamente, era adicionado á gasolina de 22 a 25% de etanol anidro, para uma frota superior a 10 milhões de veículos a gasolina, evitando, assim, nesse período, emissões de gás carbônico da ordem de 110 milhões de toneladas de carbono (contido no CO₂), a

importação de aproximadamente 550 milhões de barris de petróleo e, ainda, proporcionando uma economia de divisas da ordem de 11,5 bilhões de dólares (CORTEZ, 2018).

De acordo com Vasconcelos (2015), o Proálcool é um dos mais importantes programas de combustíveis líquidos de biomassa do mundo, sendo superado somente pelos EUA, a partir de 2005 (Tabela 2).

Tabela 2. Mostra a evolução da produção de etanol no Brasil e nos EUA, entre 1997 e 2022.

Ano	Brasil (bilhões de litros)	EUA (bilhões de litros)
1997	15,45	5,89
1998	14,12	6,45
1999	12,98	6,61
2000	10,61	6,47
2001	11,50	6,96
2002	12,62	8,43
2003	14,73	10,90
2004	15,10	13,38
2005	16,00	16,14
2006	15,90	18,40
2007	18,00	20,80
2008	26,12	29,9
2009	28,19	40,1
2010	30,14	49,3
2022 (*)	115,45	136,3

Fonte: MAPA (2007); adaptado de Vasconcelos (2015); Renewable Fuel Association (2011) e AUTOR (2018).

(*) Estimativa

O programa “Proálcool” foi dividido em cinco fases. A primeira foi o incentivo à produção de cana-de-açúcar, reforçando a criação de destilarias e a produção de automóveis movidos 100% a etanol hidratado. Nessa fase, a produção de etanol evoluiu de 600 milhões de litros na safra 1975/76 – para 3,4 bilhões de litros na safra 1979/80. A segunda foi denominada fase de afirmação do programa. Na tentativa de amenizar a crise na oferta de combustíveis, o Brasil criou órgãos para a administração do Proálcool, pesquisa e desenvolvimento de mais alternativas ao petróleo. A terceira fase do Proálcool durou de 1986 a 1995, sendo chamada de fase de estagnação. Neste período, ocorreu a queda do preço do barril de petróleo de US\$ 40 para US\$ 10, colocando em dúvidas a política energética brasileira. Nesta fase ocorreu redução dos investimentos para a produção de combustíveis alternativos e a demanda, cada vez mais crescente, de automóveis movidos a etanol não foi suprida. Entre as consequências do cenário, a

redução da produção de automóveis com motores a etanol foi inevitável (CORTEZ, 2018).

A quarta fase do programa, também conhecida como Fase de Redefinição do Proálcool, ocorreu entre 1995 e 2000. Nesta fase, a produção de cana-de-açúcar estava majoritariamente voltada para a transformação em etanol. A exportação do açúcar ficou na marca de 10 milhões de toneladas, quando não passava de 1 milhão de toneladas no início da década de 90. As montadoras, neste período, reduziram a oferta de carros movidos a álcool a 1% da produção total. Como medida de evitar um colapso no mercado, em maio de 1998, o governo federal edita a Medida Provisória nº 1.662, que eleva a adição de álcool à gasolina de 22% para 24% (PAUL et al., 2012).

A quinta fase do programa Proálcool é a fase atual. Esta fase teve início em 2000. Nesta fase a iniciativa privada também passa a enxergar na energia alternativa como uma fonte certa de lucro, diferente das fases iniciais do programa. Se antes os países produtores regulavam a oferta, as pesquisas demonstram agora que é preciso antecipar uma crise de oferta pelo esgotamento das reservas de petróleo (PAUL et al., 2012; CORTEZ, 2018).

2.5. Principais Resíduos Obtidos na Produção de Etanol

2.5.1. Água

O rendimento de uma destilaria depende de uma série de fatores, tais como: qualidade de cana, eficiência de lavagem da cana, preparo da cana para moagem, assepsia da moenda, condução do processo fermentativo e do cuidadoso tratamento de caldo.

Na indústria sucroenergética, a lavagem da cana-de-açúcar é uma das etapas do processo que mais demanda água. A água entra nas usinas com a cana (cerca de 70% do peso dos colmos) e com a captação para usos na indústria (CAMPOS et al., 2014). A água captada é usada em várias fases do processo de fabricação de açúcar e etanol, com níveis diferentes de utilização; uma parcela é devolvida para os cursos de água após os tratamentos necessários, e outra parte é destinada, juntamente com a vinhaça, à fertirrigação. A diferença entre a água captada e a água lançada, é a água consumida internamente (processos).

A usina utiliza uma grande quantidade de água nos processos, principalmente para resfriamento de equipamentos e sistemas (média aproximada de 21m³/tc), como mostra a Tabela 3.

Tabela 3. Usos da água (valores médios) em usinas com destilaria anexa.

Setor	Processo	Uso médio (m ³ /t de cana)	Distribuição (%)
Alimentação	Lavagem de Cana	5,33	25,4
Extração (moendas)	Embebição	0,25	1,2
	Resfriamento de Mancais	0,15	0,7
Tratamento de Caldo	Preparo de Leite de Cal	0,01	0,1
	Resfriamento na Sulfitação ¹	0,05	0,2
	Embebição dos Filtros	0,04	0,2
	Condensadores dos Filtros	0,30	1,4
Concentração de Caldo	Condensadores/Multijatos/Evaporação ¹	2,00	9,5
	Condensadores/Multijatos/Cozedores ¹	4,00	19,0
	Diluição de Méis	0,03	0,1
	Resfriamento Cristalizadores ¹	0,05	0,2
	Lavagem de Açúcar ¹	0,01	0,0
Geração de Energia	Produção de Vapor	0,50	2,4
	Resfriamento Turbogeneradores	0,20	1,0
Fermentação	Resfriamento do Caldo ²	1,00	4,8
	Resfriamento de Dornas ²	3,00	14,3
Destilação	Resfriamento Condensadores ²	4,00	19,0
Outros	Limpeza de pisos e equipamentos	0,05	0,2
	Uso potável	0,03	0,1
TOTAL		21,00	100,0

Fonte: Neto (2005).

¹ Somente na produção de açúcar; ² Somente na produção de etanol.

3.5.2. Vinhaça

De acordo com Silva et al. (2014) o vinhoto resultante do processo de produção do etanol é um resíduo com potencial de contaminação ambiental, pois cada litro de etanol produzido gera dez ou mais litros de vinhoto, obtendo em sua composição, quantidades significativas de elementos químicos essenciais às plantas (0,46 kg m⁻³ de N, 0,24 kg m⁻³ de P₂ O₅, 3,06 de K₂ O, 2,67 kg m⁻³ de SO₄ e 1,18 kg m⁻³ de CaO) e elevado teor de matéria orgânica (0,53 kg m⁻³) (GLÓRIA e ORLANDO FILHO, 1984).

A vinhaça procedente de melaço, em linhas gerais, apresenta maior riqueza em nutrientes que os demais tipos, enquanto o material procedente de mosto misto é mais rico que o de mosto de caldo, como mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Resultado da análise para os 3 tipos de vinhaça em destilarias de Alagoas.

Parâmetro	Vinhaça de mosto de melaço	Vinhaça de mosto misto	Vinhaça de mosto de caldo
DBO (mg/L de O ₂) (1)	25.000	19.800	6.000 – 16.500
DQO ((mg/L de O ₂) (2)	65.000	45.000	15.000 – 33.000
C	13,20	10,08	9,40
CaO (kg/m ³)	1,13	0,77	0,74
MgO (kg/m ³)	0,56	0,60	0,69
K ₂ O (kg/m ³)	5,33	3,93	2,45
N (kg/m ³)	0,44	0,43	0,42
P ₂ O ₅ (kg/m ³)	0,14	0,21	0,23
SO ₄ (kg/m ³)	2,01	3,25	2,57
Mn (ppm)	1,66	3,36	3,21
Cu (ppm)	0,37	1,66	1,66
Zn (ppm)	0,89	1,79	1,44
Fe (ppm)	35,29	46,14	47,01
pH (ppm)	3,95	3,86	3,70

Fonte: Adaptado de Vasconcelos (1983).

(1) DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio; (2) DQO: Demanda Química de Oxigênio; Carbono (C); Óxido de cálcio (CaO); Óxido de Magnésio; (MgO); Óxido de Potássio (K₂O); Nitrogênio (N); Óxido de fósforo (P₂O₅); Sulfato de magnésio (MgSO₄); Manganês (Mn); Cobre (Cu); Zinco (Zn); Ferro (Fe); Potencial Heterogêneo (pH).

A produção de vinhaça varia em função dos diferentes processos empregados na fabricação do etanol; de maneira geral de 10 a 18 litros de vinhaça são obtidos por 1 litro de etanol produzido e sua composição varia de acordo com a matéria prima e equipamentos utilizados no processo de obtenção do etanol (WADT, 2008). A vinhaça pode ser utilizada na fertirrigação, ou seja, o fertilizante adicionado na água de irrigação, fornecendo nutrientes ao solo, elevando a acidez, evitando erosões, pois aumenta a taxa de infiltração, elevando a capacidade do solo de absorver água e formar agregados (PAULINO et al., 2011). Seu valor como fertilizante é mostrado na Tabela 5.

Para Giachini e Ferraz (2009) o uso de vinhaça em áreas agrícola, especialmente em lavoura de cana, traz benefícios indiscutíveis tanto do ponto de vista agrônômico quanto do econômico e social. Benefícios como aumento no perfilhamento e produção de colmos, foram verificados por Wang et al. (2006) e Oliveira et al. (2009) quando aplicaram vinhaça via fertirrigação na cana-de-açúcar.

No entanto Silva et al. (2007) alertam que, quando aplicada em altas doses, pode acarretar efeitos indesejáveis como o comprometimento da qualidade da cana para produção de açúcar, salinização do solo e poluição do lençol freático. Silva et al. (2006) verificaram efeito da vinhaça sobre as raízes da cana-de-açúcar (base seca), fato este atribuído às melhores condições químicas do solo, pela aplicação deste subproduto.

Tabela 5. Valor fertilizante da vinhaça (150 m³) aplicados em 1 ha.

Nutrientes		Equivalente	
		Fertilizante	US\$/ha
Potássio (K ₂ O)	412,61	690 Kg KCl	180
Nitrogênio (N)	61	135 Kg Uréia	36
Cálcio (CaO)	152	---	--
Enxofre (SO ₄)	240	600 Kg gesso	1,6

Fonte: Adaptado e atualizado de Korndörfer e Anderson (1997).

A partir da preocupação causada com os efeitos tóxicos da vinhaça, algumas tecnologias surgiram com o objetivo de reutilizar ou tratar a vinhaça para a redução de sua toxicidade (MANE et al., 2006 e MOHANA et al., 2009). A vinhaça pode ser tratada tanto por processos físico-químicos como biológicos, que podem reduzir a toxicidade pela degradação de componentes orgânicos; os primeiros, normalmente envolvem reagentes para oxidar compostos orgânicos, enquanto os tratamentos biológicos são classificados como técnicas aeróbias ou anaeróbias (BOTELHO et al., 2012). Geralmente os processos físico-químicos são muito caros, necessitando de grandes volumes de água e grande quantidade de energia (CAMPOS et al., 2014).

2.5.3. Bagaço

O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo da cana após a moagem. O bagaço de cana é, sem dúvida, o resíduo agroindustrial obtido em maior quantidade no Brasil. De acordo com ÚNICA (2012), uma tonelada de cana produz em média 280-300 kg de bagaço. Observando-se os dados da safra 2016/2017 (Apêndice VI), verifica-se que foram produzidos de 182,5 a 195,5 milhões de toneladas desse material, correspondendo a cerca de 28 a 30% do total da cana moída no Brasil.

O bagaço da cana de açúcar é atualmente considerado o terceiro produto, para a geração da bioeletricidade. Além de atender às necessidades de energia das usinas para a produção de açúcar e etanol durante a safra, o bagaço tem permitido a geração de excedentes de energia elétrica, que é fornecida para o sistema elétrico brasileiro, o que é um aspecto positivo e significativo diante da situação de escassez de energia pela qual passa o país. O excedente de bagaço não é utilizado como combustível nas caldeiras ou não comercializado. É armazenado no pátio da indústria e guardado para a safra seguinte, com o objetivo de proporcionar energia necessária para o início das atividades

industriais. O material (bagaço) deve ser amontoado e protegido com plástico, de modo a diminuir a área de exposição às chuvas (CASTRO e JORDANI, 2011).

Na entrada da câmara de combustão das caldeiras, o bagaço recebe correntes de ar através do sistema de ventilação, desencadeando a queima em suspensão. Cirino et al. (2004) afirmam que quando ocorre a queima do bagaço, aumenta a emissão de alguns gases, sendo eles o monóxido de carbono, dióxido de carbono e o nitrogênio, além do material particulado, sendo este o principal agente poluidor, de modo que sua taxa de emissão chega a girar em torno de 3.000 a 6.000 mg/Nm³.

A Tabela 6 mostra a composição média característica do bagaço de cana, em que a fibra é a matéria seca e insolúvel em água, contida na cana de açúcar e o Brix mede os sólidos solúveis em água.

Tabela 6. Composição média do bagaço de cana - de - açúcar.

Composição química média do bagaço	
Carbono	39,7 – 49%
Oxigênio	40 – 46%
Hidrogênio	5,5 – 7,4%
Nitrogênio e cinzas	0 – 0,3%
Propriedades físico-químicas	
Umidade	50%
Fibra	46%
Brix	2%
Impurezas minerais	2%
Composição média da fibra do bagaço	
Celulose	26,6 – 54,3%
Hemicelulose	14,3 – 24,4%
Lignina	22,7 – 29,7%

Adaptado por Peres (1999).

2.5.4. Cinzas das Caldeiras

A queima do bagaço da cana-de-açúcar nas caldeiras é outra importante fonte de poluição. Feitosa et al. (2009) ratificam que a cinza oriunda da queima do bagaço nas caldeiras, é disposta em áreas de aterro ou aplicada no solo, gerando em média 2,06 kg/tonelada de cana. A fuligem é proveniente do sistema de lavagem na chaminé e, direcionada para lagoas de decantação, com produção média de 11,76 kg/tonelada de cana. Também são produzidas as cinzas geradas na caldeira e as cinzas volantes. As cinzas volantes podem ser definidas como as partículas finas que se levantam junto com os gases gerados pela combustão, são capturadas nas chaminés, geralmente por filtros hidrostáticos, antes que sejam liberadas para o ambiente (BASU et al., 2009).

Os resíduos de cinzas gerados a partir da queima do bagaço utilizado como combustível, para produção de vapor nas caldeiras, é estimado em 6 kg cinza/250 kg de bagaço de cana que alimenta a caldeira e o percentual de uso do bagaço em 95% (FIESP, 2001). Parte dessas cinzas pode ser lançada para a atmosfera se as caldeiras não forem dotadas de lavadores de gases e cinzas.

A composição das cinzas pode variar de acordo com o material utilizado e com os parâmetros do processo de incineração, como a temperatura, o tempo de incineração e a porcentagem de umidade do material incinerado, configurando-se assim como um material de composição e morfologia heterogêneas (SOUZA et al., 2007).

O efeito benéfico das cinzas como fertilizante de base e, principalmente, de cobertura, é resultado da sua composição química e da sua solubilização lenta dos macro e micronutrientes, podendo ser grosseiramente comparados ao NPK de relação (1:3:7) mais Ca, Mg e micronutrientes (NOLASCO et al., 1999).

Pode-se resumir então que a cinza de caldeira constitui um resíduo da agroindústria sucroalcooleira produzido em quantidades consideráveis e que é bastante rico em nutrientes e sílica e não contém quantidades consideráveis de metais pesados. O destino da cinza de caldeira tem sido o solo, muitas vezes utilizado como simples material de descarte (FREITAS, 2005) ou na construção civil, devido sua propriedade pozolânica (DAFICO et al., 2003). A propriedade fundamental de um material pozolânico é a capacidade de se combinar com a cal livre do cimento (hidróxido de cálcio).

A composição química da cinza de caldeira gerada pela queima de bagaço de cana-de-açúcar foi avaliada por Brunelli e Pisani Junior (2006), que observaram valores de 0,3% de nitrogênio, 4,9% de carbono orgânico, 0,1% de fósforo, 0,64% de potássio, 0,2% de cálcio, 0,1% de magnésio e 0,01% de enxofre.

2.5.5. CO₂

Durante o procedimento de produção do etanol, o CO₂ é liberado na fermentação do açúcar em etanol, sendo lançado na atmosfera, porém não afeta a camada de ozônio e, por isso, não é perigoso para a atmosfera quanto a gasolina. A cana-de-açúcar, por meio da fotossíntese absorve, no seu crescimento, quantidade equivalente de CO₂, que é gerado nas etapas de produção, transporte e consumo de etanol (MACHADO e SILVA, 2010).

No Brasil, a produção de etanol, que se aproxima de 30 bilhões de litros por ano, lança cerca de 24 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera no mesmo período. A contribuição do etanol brasileiro, comparada com a emissão global de mais de 30 bilhões de toneladas de GEE, parece insignificante, representando apenas 0,1%. Porém, o propósito imediato de evitar essa emissão pode implicar em políticas inovadoras para minimizar os efeitos sobre as mudanças climáticas e uma nova fonte de promoção ao uso do etanol da cana-de-açúcar como insumo energético (UNDP, 2011). Ressalte-se que este CO₂ é somente o oriundo da fermentação etanólica. Some-se a este valor o despreendido quando da queima do álcool etílico nos veículos automotores. Porém, é conveniente lembrar que, durante o crescimento vegetativo da cana-de-açúcar, há absorção de quantidade equivalente de CO₂. Logo, o balanço líquido do CO₂ da produção e utilização do etanol pode ser considerado nulo (JORNAL DA CANA, 2008).

Nas destilarias para a produção do etanol, o mesmo é obtido por meio do processo da fermentação do mosto, que é uma suspensão de substrato açucarado proveniente da cana. O processo de fermentação do mosto é realizado nas denominadas dornas de fermentação, que podem atingir capacidade de centenas de milhares de litros. Algumas empresas utilizam dornas abertas, mas na maioria delas as dornas são fechadas. As dornas abertas são responsáveis pela perda de etanol de 1 a 2% pelo arraste do CO₂ liberado na atmosfera. Por outro lado, as dornas fechadas são dotadas de um sistema coletor de CO₂, que encaminha o gás carbônico e o etanol para uma torre de recuperação. Nos dias atuais, entretanto, existe a possibilidade de captura do CO₂ gerado no processo de fermentação do mosto por meio da implantação de equipamentos específicos de modo que o CO₂, que antes era perdido para a atmosfera, agora possa ser comercializado pela usina alcooleira. Uma usina alcooleira de médio porte, por exemplo, pode recuperar e comercializar cerca de três mil kg/h de CO₂ (JORNAL DA CANA, 2008).

O gás carbônico capturado nas dornas de fermentação pode ser utilizado em inúmeras aplicações industriais, tais como: no estado gasoso, para carbonatação de cervejas, refrigerantes ou água; no estado líquido, para o enchimento de cilindros (extintores de incêndios); no estado sólido, para produção de pellets de gelo seco ou como congelantes para alimentos; na produção de fertilizante, entre outras (Xu, et al., 2010). Os gases de combustão provenientes de usinas de energia não são uma boa fonte

de CO₂, pois, neste caso, há muitas impurezas e muito baixo volume de CO₂ junto ao gás de combustão.

2.6 Etanol

O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar, tem se mostrado como alternativa aos combustíveis fósseis na matriz energética, principalmente do setor automobilístico, pois se destaca por produzir uma energia mais limpa, contribuindo para que o país possa se adequar aos novos padrões de emissões CO₂ (VIEIRA, 2008).

O etanol produzido a partir da cana-de-açúcar surgiu, no Brasil, basicamente por duas razões: a necessidade de amenizar as sucessivas crises do setor açucareiro e a tentativa de reduzir a dependência do petróleo importado. Nesse sentido, no início do século XX, ocorreram as primeiras ações de introdução do etanol na matriz energética brasileira. Em 1925, surgiu a primeira experiência brasileira com etanol combustível. Em 1933, o governo de Getúlio Vargas criou o Instituto do Açúcar e do Alcool – IAA e, pela Lei nº 737, tornou obrigatória a mistura de etanol na gasolina. Na tabela 7 são apresentadas algumas propriedades do etanol e da gasolina.

Tabela 7. Propriedades do etanol e da gasolina (Heywood, 1988).

Combustível	Fórmula (fase)	Peso Molecular	Densidade (kg/m ³)	Calor de Vaporização (kJ/kg)
Etanol	C ₂ H ₆ O (líquido)	46,07	0,78	840
Gasolina	C _n H _{1,87n} (líquido)	~110	0,72 - 0,78	350

O etanol, ao ser misturado com a gasolina (anidro), ou utilizado de forma autônoma como combustível nos veículos Flex (hidratado), proporcionou redução na emissão de 300 milhões de toneladas de CO₂ na atmosfera na última década (ÚNICA, 2015). Em 2016, foi misturado a uma taxa de 26% de etanol na gasolina.

Estudos realizados por Macedo (2007) revelaram que a substituição da gasolina pelo etanol e a utilização do bagaço da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica, contribuíram de forma significativa, para redução dos níveis de CO₂ na atmosfera. Por existir em suas composições longas cadeias de hidrocarbonetos, a gasolina e o diesel lançam na atmosfera outros compostos. Como exemplos, o benzeno (C₆H₆), que é altamente cancerígeno, além do dióxido de enxofre (SO₂), responsável pelas chuvas ácidas, como também pelo desencadeamento de diversas doenças pulmonares. O diesel

é o combustível com o segundo maior nível de hidrocarbonetos, ficando atrás somente da gasolina.

Outra diferença é o elevado teor de oxigênio do etanol (35% em massa), o que implica inicialmente em um poder calorífico na ordem de 65% dos derivados de petróleo e na possibilidade de apresentar uma combustão mais limpa nos motores. Outra característica importante do etanol, associada a uma cadeia molecular curta, é sua considerável volatilidade e elevada resistência à autoinflamação. Tais aspectos o tornam adequado a motores de ignição por centelha (motores Otto). Importante ressaltar que enquanto o etanol, como substância pura, apresenta uma temperatura de destilação constante de 78 °C à pressão atmosférica, a gasolina, que é uma mistura de mais de 500 hidrocarbonetos tipicamente com cadeias de 5 a 12 carbonos, sofre destilação, normalmente entre 30 e 220 °C, e essa característica é usada como parâmetro de projeto de motores Otto (NIGRO e SZWARC, 2009). A produção de etanol anidro e hidratado no Brasil começou a apresentar crescimento a partir da safra 2001/2002, com um total de 11,467 bilhões de litros e após oscilação, chegou a 30,493 bilhões de litros na safra 2015/2016 (ANP, 2010), como mostra a Tabela 8.

Tabela 8. Produção Brasileira de Etanol

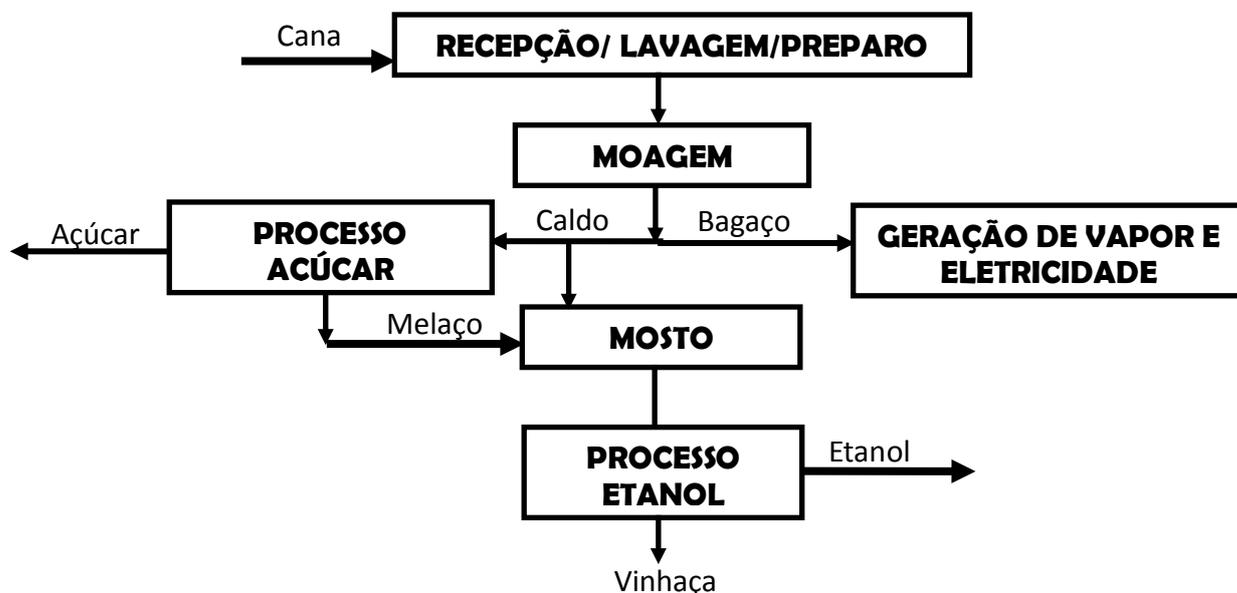
Ano-Safra	Etanol Hidratado (Bilhões de litros)	Etanol Anidro (Bilhões de litros)	Total (Bilhões de litros)	Varição % litros
2001/2002	4,988.	6,479	11,467.	9,04
2002/2003	5,476	7,009	12,485	8,87
2003/2004	5,872	8,768	14,640	17,26
2004/2005	7,035	8,172	15,207	3,88
2005/2006	8,145	7,663	15,808	3,95
2006/2007	9,861	8,078	17,939	13,48
2007/2008	13,981	8,465	22,059	25,12
2008/2009	18,051	9,630	27,681	23,32
2009/2010	18,801	6,938	25,739	-7,02
2010/2011	19,577	8,027	27,604	7,25
2011/2012	14,113	8,624	22,737	-17,63
2012/2013	13,778	9,695	23,473	3,24
2013/2014	16,187	11,826	28,013	19,34
2014/2015	17,183	11,733	28,916	3,23
2015/2016	19,275	11,218	30,493	5,45
2016/2017	16,748	10,991	27,739	-9,03

Fonte: DCAA/SPA/E/MAPE, 2018.

2.7 Processo de Fabricação de Açúcar e de Etanol

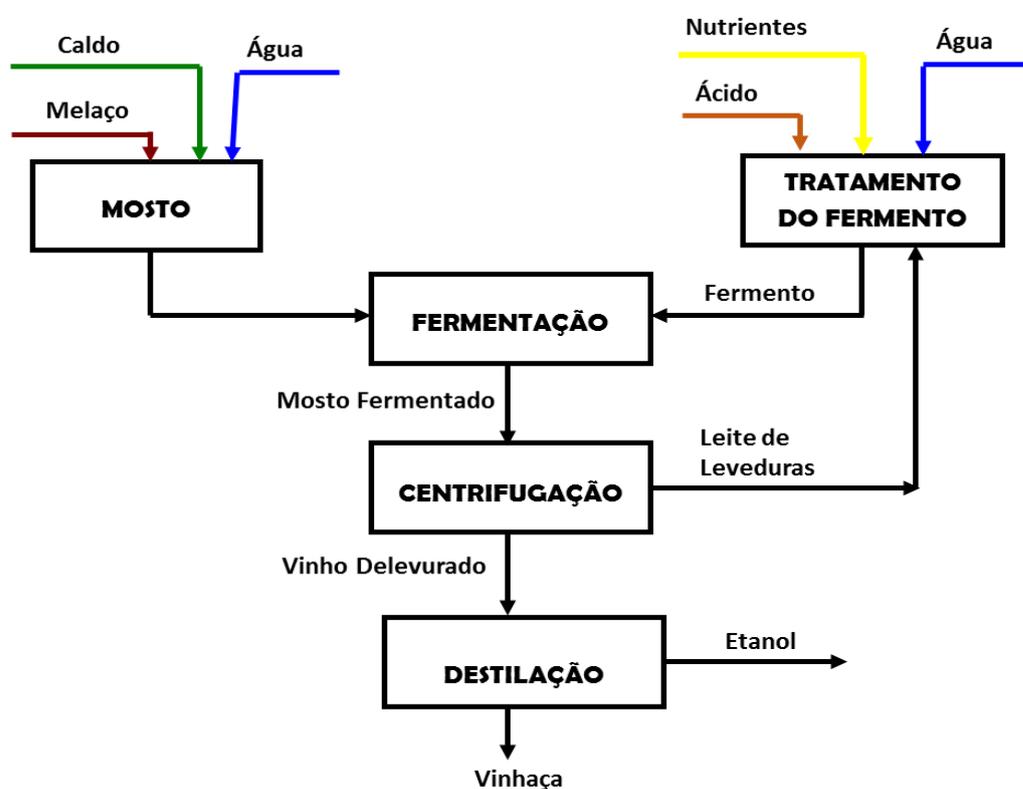
A título de ilustração, foram descritas de forma resumida nesta seção do trabalho, a moagem de cana para açúcar e para etanol (Figuras 1) e as etapas do processo de fabricação de etanol (Figura 2).

Figura 1. Processo de fabricação de açúcar e etanol



Fonte: Autor (2018)

Figura 2. Etapas do processo de fabricação do etanol



Fonte: Autor (2018)

2.8 Descrição das Etapas dos Processos de Fabricação de Açúcar e Etanol

Cirino et al. (2004) descrevem de maneira resumida a produção industrial de açúcar e etanol. De acordo com os referidos autores, o processo de industrialização tem início com o recebimento da cana-de-açúcar (Figura 1). Chegando à usina, a cana é pesada, operação industrial importante e tem por objetivos o controle da produtividade agrícola, do rendimento e dos valores a serem pagos aos fornecedores de cana-de-açúcar, se for o caso. Para esta etapa é utilizada uma balança, do tipo rodoviário, com sistema automático de controle de pesagem. Esta balança, além da pesagem da matéria-prima, é também utilizada no controle da expedição de produtos industrializados (açúcar e etanol), no controle da saída de resíduos e recebimento de insumos utilizados no processo.

Uma vez pesada, a cana é descarregada diretamente na mesa alimentadora, através de um guincho tombador de cana, projetado para operar rápida e eficientemente com veículos de dimensões e capacidades variadas. A maioria das usinas processadoras de cana-de-açúcar no Brasil, não utiliza mais barracão para estocar a matéria-prima, sendo utilizado o sistema bate-volta, onde a cana fica estocada nas próprias carretas, em um pequeno espaço de tempo, numa área definida para este fim, para evitar a decomposição bacteriológica (CIRINO et al., 2004). Após o descarrego, a cana é lavada para que sejam retiradas as impurezas; essa água não é descartada, passa por um sistema de decantação e correção de pH e retorna ao sistema de lavagem da cana. Na sequência, a cana é cortada em pedaços menores, por meio de facas oscilantes, também chamadas de navalhas e, logo após, sofre ruptura por impactos consecutivos de um equipamento chamado desfibrador, que contém um jogo de martelos e uma placa desfibradora, que tem por objetivo romper as células (córtex) da cana que contém o caldo, sem entretanto extrai-lo.

Na operação da extração do caldo, existem dois tipos de equipamentos utilizados nas indústrias sucroenergéticas do Brasil: Moendas e Difusor, sendo a moenda o mais utilizado. O caldo extraído é conduzido à peneira rotativa para retirada das impurezas mais grosseiras, onde o caldo é dividido para fabricação de álcool etílico e para fabricação de açúcar. O bagaço que sobra do processo de extração é enviado, via esteira, às caldeiras, para geração de vapor. O vapor é enviado às turbinas, que acionam as moendas e bombas e aos turbo-geradores para geração de energia elétrica. O caldo de

cana após ter passado por peneiras rotativas contém, ainda, impurezas menores, que podem ser solúveis, coloidais ou insolúveis. É praticamente impossível a clarificação do caldo por simples decantação. Por isso, é necessário que o caldo passe por um processo químico, que favorecerá a coagulação, floculação e a precipitação destas impurezas, que são eliminadas por sedimentação. É necessário ainda fazer a correção do pH com adição de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 - leite de cal) ao caldo, para evitar inversão e decomposição da sacarose. O processo de tratamento do caldo consiste das seguintes etapas: fosfatação, caleagem, sulfitação, aquecimento, decantação e filtração do lodo.

A seguir este caldo é submetido a um processo de concentração através da eliminação da água. A concentração do caldo é realizada em duas etapas. A primeira em evaporadores de múltiplos efeitos aquecidos a vapor, produzindo xarope. Após deixar os evaporadores, o xarope é enviado a mais uma etapa de concentração, onde ocorrerá a formação dos cristais de açúcar, em função da precipitação da sacarose dissolvida na água. Esta etapa é dividida entre o cozimento e a cristalização por resfriamento, na qual se obtém uma mistura de cristais envolvidos em mel (solução açucarada) conhecida por massa cozida. Após o resfriamento da massa cozida esta é centrifugada para a separação dos açúcares e do mel (CIRINO et al., 2004).

A fermentação etanólica é a operação mais complexa e importante da fabricação do etanol, por utilizar organismos vivos e concentrar grande parte da eficiência da produção. Para que haja fermentação, é necessário que o meio seja preparado adequadamente para receber os microrganismos responsáveis pelo desdobramento dos açúcares em etanol e gás carbônico. Portanto, deve-se ter um mosto ideal, ou seja, uma mistura aquosa que contém açúcares, que serão transformados em etanol. A preparação do mosto é realizada num tanque com agitador, chamado diluidor, numa proporção predeterminada, usando como componentes: mel e água (mosto de melaço); mel e caldo (mosto misto); mel, caldo e água (mosto misto) e somente caldo (mosto de caldo).

A fermentação etanólica é uma reação bioquímica exoergônica, que transforma as moléculas de sacarose, por hidrólise, em glicose e frutose que, em seguida, são convertidas em etanol e gás carbônico, liberando energia térmica. O agente da fermentação é um microrganismo vivo, conhecido popularmente como fermento e tecnicamente como *Sacharomices cerevisiae*, que foi biologicamente desenvolvido e adaptado para a indústria alcooleira (CIRINO et al., 2004). A fermentação pode ser conduzida de diferentes maneiras. O reator biológico pode ser operado de forma descontínua, semicontínua, descontínua alimentada (ou batelada alimentada) ou

contínua; todas estas maneiras podem trabalhar com ou sem recirculação do fermento (SCHIMDELL e FACCIOTTI, 2001).

Para a produção industrial do etanol, os processos fermentativos são classificados em processos batelada ou contínuo, sendo que a denominação batelada na prática industrial da produção de etanol se refere à batelada alimentada. A nível industrial, os biorreatores, também denominados de dornas, que são reatores de aço carbono, normalmente fechadas e mantidas a uma temperatura entre 33 e 35 °C até o final do processo, quando a concentração do etanol se situa entre 7 e 12 °GL.

De acordo com Santos (2006), na fermentação etanólica ocorre a transformação dos açúcares em etanol e dióxido de carbono. A fermentação se processa porque as leveduras necessitam de energia para sobreviver, através de dois fenômenos: a respiração, que necessita do oxigênio do ar ou a fermentação, que ocorre na ausência de oxigênio do ar (fermentação anaeróbia). Assim, a levedura necessita transformar muito açúcar em etanol, para assegurar suas necessidades energéticas. A fermentação dos mostos realiza-se em três fases distintas: pré-fermentação, fermentação principal e pós-fermentação. A pré-fermentação se inicia quando o fermento (leveduras) é adicionado ao mosto e ocorre com pouca formação de espuma. Inicia-se a fermentação principal ou tumultuosa, reconhecida pela elevação rápida da temperatura, queda da densidade do mosto por causa do desaparecimento dos açúcares e da formação equivalente do etanol. A acidez eleva-se, abaixando o pH. Essa fase termina quando desaparece a espuma. A pós-fermentação é caracterizada pela diminuição lenta e gradativa da temperatura do mosto, diminuição do desprendimento de gás carbônico e não se formam mais espumas.

A separação das leveduras do vinho (mosto fermentado) é feita por meio das separadoras centrífugas contínuas, pela diferença de densidade. O vinho de leveduras (sem as leveduras), é enviado para dorna volante e o creme ou leite de leveduras (suspensão concentrada de leveduras), para os pré - fermentadores que, após tratamento adequado (adição de água e correção do pH com ácido sulfúrico), retorna para um novo ciclo fermentativo.

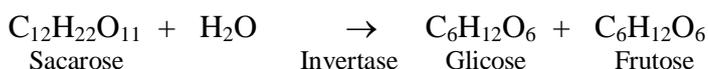
De acordo com RIBEIRO et al. (1999), o vinho de leveduras segue da dorna volante para a destilação. Neste processo, o líquido é colocado em colunas de destilação, denominadas colunas A e B, nas quais ele é aquecido até a evaporação, onde ocorre, respectivamente, a destilação e a retificação, com produção do etanol hidratado, com teor de etanol variando de 92,5 a 93,8 ° INPM (p/p), estipulado pela ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). Na destilação é obtido o resíduo

principal do processo produtivo de etanol, a vinhaça. Para se obter etanol anidro ou desidratado, com teor de etanol variando de 99,3 a 99,8 ° INPM, é necessário introduzir no processo de destilação, um artifício que propicie a retirada da água da mistura, de modo a alterar a sua composição. Para isso, atualmente adiciona-se o ciclohexano ao etanol hidratado, formando uma mistura azeotrópica etanol-água-ciclohexano que, ao evaporar-se, permite a obtenção do etanol anidro. Isso ocorre na Coluna C, denominada coluna de desidratação.

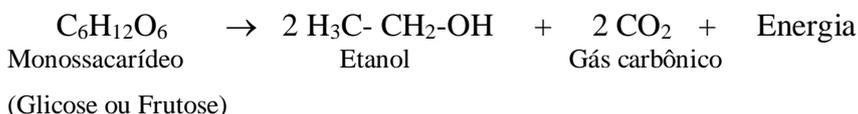
2.9. Reações químicas no processo de fabricação de etanol

De acordo com Peruzzo e Canto (2002), as reações presentes no processo são a hidrólise da sacarose e a fermentação etanólica que podem ser equacionadas, respectivamente, da seguinte forma:

1ª Etapa - Hidrólise da sacarose



2ª Etapa - Fermentação etanólica

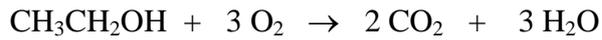


(Glicose ou Frutose)

A partir das reações químicas das etapas 1ª e 2ª (hidrólise e fermentação), pode-se estimar a quantidade de dióxido de carbono liberado na produção de etanol, por meio de cálculo estequiométrico. Na reação química da 1ª etapa, têm-se 342 g de sacarose reagindo com 18 g de água, resultando em 180 g de glicose e 180 g de frutose (monossacarídeos). Na reação química da 2ª etapa, novamente pelo cálculo estequiométrico, 180 g do monossacarídeo resultam em 92 g de etanol e 88 g de dióxido de carbono. As leveduras se encarregam de executar a transformação de açúcar em etanol.

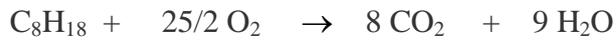
Na combustão, conforme evidenciam as reações dadas a seguir, a gasolina libera quantidades de CO₂ significativamente maiores que o etanol. Lembrando que o etanol é um combustível renovável e a gasolina, fóssil (WADT, 2008):

- Combustão do etanol:



Etanol

- Combustão da gasolina:



Gasolina

Observa-se que cada molécula de etanol libera duas moléculas de gás carbônico, enquanto uma “molécula” de gasolina libera oito moléculas de gás carbônico (CONAB, 2017).

O principal argumento de que o etanol é mais vantajoso do que a gasolina vem da biologia. Sabe-se que a cana-de-açúcar é um vegetal e este passa pelo processo da fotossíntese. No processo fotossintético, os vegetais absorvem gás carbônico para a produção de glicose. Portanto, todo o gás carbônico liberado na combustão do etanol é reabsorvido pela cana-de-açúcar durante a fotossíntese, sendo esta uma das principais diferenças em relação à gasolina. Com ela, apenas retira-se o petróleo, faz-se uma destilação fracionada e adiciona-se etanol anidro (atualmente 27%). Todo o gás carbônico liberado por ela fica na atmosfera, exceto o resultante da queima do etanol anidro.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para a avaliação dos impactos ambientais gerados pela produção de etanol no Estado de Alagoas, foram coletadas informações de 4 destilarias, nas safras 2014/15, 2015/16 e 2016/17, sendo 3 anexas (destilarias que estão acopladas a uma usina para produção de açúcar) e 1 autônoma (unidade industrial que só produz etanol), esta última só forneceu dados para duas safras (2014/15, 2015/16), haja vista que não moeu cana-de-açúcar na safra 2016/17.

O levantamento foi feito por meio de questionário distribuído nas referidas unidades industriais e de consultas informais aos responsáveis pelas respostas do questionário, além de outras questões de caráter geral. A partir deste item, serão denominadas de usinas/destilarias A, B, C e D. Os dados fornecidos são apresentados nos anexos A, B, C e D.

Ressalte-se que as unidades industriais amostradas conduziram a fermentação etanólica em batelada alimentada (processo descontínuo alimentado). As unidades B e C operam com dornas fechadas e recuperação do etanol arrastado pelos gases produzidos durante a fermentação, por meio de lavagem dos mesmos com água em coluna específica.

A avaliação das informações foi feita quantificando-se os diversos derivados, oriundos da produção de etanol, assim como a destinação dos mesmos. As principais variáveis avaliadas foram: água (de lavagem de cana-de-açúcar, de preparação de mosto, de limpeza de equipamentos e piso); bagaço de cana-de-açúcar; gás carbônico liberado durante o processo fermentativo; gás carbônico liberado durante a queima do etanol em veículos automotores; vinhaça produzida no processo de destilação para a produção de etanol; cinzas resultantes da queima do bagaço nas caldeiras; produção de óleo fúsel etc.

Outro fator avaliado foi o tipo de mosto utilizado na fermentação etanólica, haja vista que sua composição influencia diretamente a composição da vinhaça, que será aplicada (juntamente com outros resíduos líquidos), nos canaviais, na operação denominada de fertirrigação (fertilização mais irrigação). Os mostos utilizados nas destilarias anexas normalmente são mistos (caldo mais melaço ou caldo mais melaço e água, dependendo das proporções caldo : melaço). Nas destilarias autônomas, o mosto utilizado é o de caldo.

No questionário, foram solicitadas informações como moagem de cana, produção de açúcar, produção de etanol hidratado, produção de etanol anidro, de torta filtro rotativo, óleo de fúsel, kg de açúcar por tonelada de cana, kg de melaço por tonelada de cana e litros de etanol por tonelada de cana, consumo de ácido sulfúrico e de ciclohexano; água utilizada na lavagem da cana e na lavagem dos gases liberados durante a fermentação, entre outras, para que se possa ter uma visão global de uma unidade sucroalcooleira.

Foram calculados os principais resíduos da cana (bagaço, vinhaça e CO₂ liberado na fermentação do mosto) para cada safra. Para estes cálculos foi considerada a quantidade de bagaço (média estimada para Alagoas) presente em uma tonelada de cana e a quantidade de vinhaça (média estimada para Alagoas), obtida para cada litro de etanol produzido, em todas as unidades produtivas. Também foi calculada a produção destes resíduos para o estado de Alagoas e, em seguida, para o Brasil (Apêndices I a VI, para as quatro unidades industriais, Alagoas e Brasil, respectivamente).

Exemplo dos cálculos é mostrado a seguir. Para o cálculo e/ou estimativa das quantidades de derivados e resíduos gerados na indústria sucroenergética, com foco principal na produção de etanol, foram utilizadas as considerações mostradas a seguir:

➔ Resíduos produzidos em todas as unidades produtivas

a) Bagaço

1 ton. Cana - XXX kg bagaço

*XXXXXX ton cana - **x = XXXXX ton bagaço**

* (∑ Cana para açúcar + Cana para Etanol)

b) Vinhaça

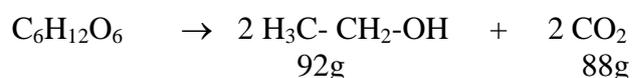
1 L etanol - XXX L vinhaça

*XXXXXXXX m³ - **x = XXXXX m³ vinhaça**

* (∑ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Conforme dados do Anexo V e sabendo-se a densidade do etanol anidro ($d = 789 \text{ kg/m}^3$), tem-se:

- Etanol Anidro:

$$\begin{array}{rcl} 0,092 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 789 \text{ kg/m}^3 \times \text{XXXX m}^3 & - & \mathbf{x = \text{XXXXXX ton CO}_2} \quad (\text{I}) \end{array}$$

Conforme dados do Anexo V e sabendo-se que a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m^3 , tem-se:

- Etanol Hidratado:

$$\begin{array}{rcl} 0,092 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 811 \text{ kg/m}^3 \times \text{XXXXX m}^3 & - & \mathbf{x = \text{XXXXX ton CO}_2} \quad (\text{II}) \end{array}$$

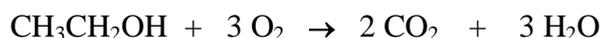
Total de CO_2 liberado na fermentação: (Etanol anidro + etanol hidratado):

$$(\text{I}) + (\text{II}) = \mathbf{\text{XXXXXX ton CO}_2}$$

➔ Quantidade de CO_2 liberado na combustão interna dos automóveis no estado de Alagoas.

1. Devido ao etanol

De acordo com a reação:



Conforme dados do Anexo VII, verificando o consumo total de etanol hidratado e sabendo-se que sua densidade é 811 kg/m^3 , tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 811 \text{ kg/m}^3 \times \text{XXXXX m}^3 \text{ (Anexo VII)} & - & \mathbf{x = \text{XXXXXX ton CO}_2} \quad (\text{III}) \end{array}$$

Conforme dados dos Anexos H e I, somando-se o consumo total das gasolinas Aditivada e Comum e sabendo-se que são adicionados XX% de etanol anidro, tem-se:

$$\begin{array}{l} \text{XXXXXXXX m}^3 \text{ (Anexo VIII)} + \text{XXXXX m}^3 \text{ (Anexo IX)} = \mathbf{\text{XXXXXX m}^3} \\ \text{XX\% de álcool anidro equivalem a} = \mathbf{\text{XXXXXX m}^3} \end{array}$$

Sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m^3 , então:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 789 \text{ kg/m}^3 \times \text{XXXX m}^3 & - & \mathbf{x = \text{XXXXXX ton CO}_2} \quad (\text{IV}) \end{array}$$

Total de CO_2 liberado na combustão (etanol):

$$(III) \text{ (etanol hidratado)} + (IV) \text{ (etanol anidro)} = \mathbf{XXXXXXX} \text{ ton de CO}_2$$

2. Devido à gasolina

Conforme dados dos Anexos H e I, verificando-se o consumo total de gasolina (densidade = 740 kg.m^{-3}) e que o etanol anidro adicionado à gasolina é XX%, tem-se:

Consumo de Gasolina Total – Quantidade de Álcool Anidro (XX%)

$$(XXXX \text{ m}^3) - (XXXXXX \text{ m}^3) = \mathbf{XXXXXX} \text{ m}^3 \text{ gasolina}$$

Pela reação:



Tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 0,114 \text{ kg de gasolina} & - & 0,352 \text{ kg de CO}_2 \\ 740 \times XXXXX \text{ m}^3 & - & x = \mathbf{XXXXXXX} \text{ ton CO}_2. \end{array}$$

Com base nestas informações, observa-se que, para suprir a quantidade de gasolina, serão necessários produzir cerca de 30% a mais de etanol, isto é:

$$\mathbf{XXXX} \text{ (consumo anual de gasolina)} \times 1,3 \quad (V)$$

Neste caso, transformando-se a produção de etanol anidro utilizada na mistura com a gasolina, em etanol hidratado, através de suas respectivas densidades, 789 kg/m^3 e 811 kg/m^3 , tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 789 \text{ kg/m}^3 & - & XXXX \text{ m}^3 \text{ etanol anidro} \\ 811 \text{ kg/m}^3 & - & \mathbf{x = XXXX} \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado} \quad (VI) \end{array}$$

Fazendo-se agora a diferença entre o (VI) acima calculado, pela quantidade de etanol anidro utilizado na mistura com a gasolina, obtém-se a quantidade de etanol hidratado correspondente:

$$(VI) - XXXX \text{ m}^3 \text{ etanol anidro} = \mathbf{XXXX} \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado} \quad (VII)$$

Então a quantidade necessária de etanol hidratado será:

$$(V) - (VII) = \mathbf{XXXX} \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado} \quad (VIII)$$

Como 1 barril de petróleo produz cerca de 30,21 L gasolina, tem-se:

30,21 L gasolina	-	1 barril de petróleo
(VIII)	-	x = XXXX barris

Então:

1,24 barril	-	1 ton de cana
XXXX barris	-	x = XXXX ton de Cana

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Usinas A, B e C possuem destilarias anexas, enquanto a destilaria D é autônoma (só produz etanol). Logo, nas destilarias autônomas, toda a moagem de cana-de-açúcar é direcionada para a produção de etanol. Por outro lado, nas usinas com destilaria anexa, a cana-de-açúcar moída e distribuída para a produção de açúcar e de etanol. Nas destilarias anexas, a produção de etanol ocorre utilizando-se melaço e caldo (mosto misto). O melaço é proveniente da fabricação de açúcar, resíduo obtido de aproximadamente 30 litros ou 40 kg por tonelada de cana processada (Vasconcelos, 1985). A cana moída para açúcar nas três usinas com destilarias anexas foi maior que para etanol, pelo fato de trabalharem com mosto misto, utilizando-se melaço e caldo para a produção de etanol. A crise que se abateu sobre a agroindústria da cana-de-açúcar vitimou a destilaria autônoma D, que não moeu cana na safra 2016/17.

4.1 Cana-de-açúcar processada

Na tabela 9, estão representados os valores de produção de cana-de-açúcar das três usinas com destilarias anexas (A, B e C) e da destilaria autônoma (D) durante três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015). Para a safra de 2016/2017 a usina C moeu para produção de açúcar 1.514.066,423 toneladas. Este valor é superior em 44% e 48% em relação às usinas A e B, respectivamente.

Tabela 9. Cana-de-açúcar processada de três usinas no estado de Alagoas (A, B e C) e da destilaria autônoma D) durante três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015).

Cana-de-açúcar						
Safra 2016/2017						
Usina/Destilaria	CMA	CMAL	MH	CC	TP	ARTM
	-----ton-----			%	%	
A	657.587,48	13.494,27	261,64	22,8	Caldo/mel	14,29
B	720.564,55	4.171,66	261,51	-	Caldo/mel	16,91
C	1.514.066,42	138.808,92	496,98	61,61	Caldo/mel	14,54
D (Não moeu)	-	-	-	-	-	-
Safra 2015/2016						
A	628.391,66	9.220,416	269,21	26,17	Caldo/mel	15,01
B	955.624,58	54.898,98	292,30	-	Caldo/mel	18,32
C	1.661.510,52	230.315,02	143,31	78,38	Caldo/mel	14,85
D	0	200.171,50	143,31	-	CALDO	14,85
Safra 2014/2015						
A	976.309,59	81.133,32	281,70	23,84	Caldo/mel	14,91
B	1.275.808,17	172,534	323,40	-	Caldo/mel	18,13
C	2.031.785,68	49.662,00	466,65	70,77	Caldo/mel	15,05
D	0	290.655,10	156,91	-	CALDO	14,64

CMA- Cana Moída para açúcar; CMAL- Cana moída para álcool; MH- Moagem horária; CC- Cana crua; TP- Tipo de mosto; ARTM- Açúcar total recuperado do mosto.

Na safra 2015/2016 a usina C moeu para a produção de açúcar 1.661.510,520 toneladas de cana. Este valor é superior em 38% e 58% em relação às usinas A e B, respectivamente. Na safra 2014/2015 novamente a usina C obteve destaque para esta variável (2.031.785,68 t), sendo este valor superior em 48% e 63% em relação às usinas A e B, respectivamente. De acordo Lima (2001) uma tonelada de cana-de-açúcar moída produz em média 850 litros de caldo, onde 78 a 86% é água, 10 a 20% é sacarose e o restante de outros compostos. A alta produção de sacarose comprova a aptidão desta cultura para produção de açúcar e etanol pois, enquanto as plantas em geral convertem menos de 1% da luz solar em energia química, a cana-de-açúcar é capaz de converter cerca de 2% da radiação incidente em açúcares, dos quais dois terços estão na forma de lignina e de celulose.

A quantidade de cana-de-açúcar moída destinada para produção de etanol foi menor em relação à produção de açúcar em todas as usinas com destilarias anexas e safras avaliadas. A usina C obteve a maior produção (230.315,020 t) de cana-de-açúcar para produção de etanol na safra 2015/2016. Em média, na usina C foram destinadas para produção de etanol 139.595,313 t cana-de-açúcar nas três safras avaliadas (2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017), enquanto as usinas A e B moeram em média 34.616,020 e 19.747,720 t de cana para produção de etanol, respectivamente.

A destilaria D moeu 290.655,100 e 200.171,500 t de cana-de-açúcar para produção de etanol nas safras 2014/2015 e 2015/2016, respectivamente. A referida destilaria não moeu na safra 2016/2017. A produção de cana-de-açúcar na safra 2015/2016 no Brasil foi 5% maior em relação a safra 2014/2015 e 2,2% maior em relação a safra 2016/2017, gerando 33,84 milhões de toneladas de açúcar, 18,57 bilhões de litros de etanol hidratado e 11,66 bilhões de litros de anidro, que é destinado à mistura com gasolina. Nesta mesma safra, o Estado de Alagoas produziu 16,382 milhões de toneladas de cana, 1,2 milhão de toneladas de açúcar, 163 milhões de litros de etanol hidratado e 215 milhões de litros de etanol anidro (MAPA, 2016). Porém a CONAB (2017) afirma que na safra 2014/2015, no Brasil, 46,9% da cana foi destinada para a produção de açúcar e 53,1%, para a produção de etanol.

Valores semelhantes foram verificados para as usinas A e B na moagem horária de cana nas duas primeiras safras analisadas (2016/2017: 261,64 e 261,51 t/h; 2015/2016: 269,21 e 292,30 t/h) para a produção de açúcar e etanol. A usina C, na safra 2016/2017, moeu 496,98 t/h, alcançando uma diferença de 53% das demais usinas

anexas avaliadas nesta pesquisa. A destilaria D moeu em média 150,11 t/h nas safras 2014/2015 e 2015/2016.

A usina A, nas três safras, utilizou em média 24,3% de cana crua, enquanto a usina C utilizou em média 44,12%. A usina B e a destilaria D não utilizaram cana crua em nenhuma safra avaliada neste trabalho. Arévalo (1998) ratifica como vantagens da colheita da cana crua: maior flexibilidade da colheita; aumento das atividades microbianas e de minhocas; melhoria da estrutura do solo; menor custo dos tratamentos culturais; proteção do solo contra erosão e radiação. A moagem de cana-de-açúcar crua (sem a tradicional queimada antes do corte), para a fabricação de açúcar e de etanol, é uma tendência crescente e irreversível, haja vista que há legislação específica proibindo, de forma programada, a moagem de cana-de-açúcar queimada.

A três destilarias anexas utilizaram o mesmo tipo de mosto (caldo mais mel). A destilaria D utilizou apenas mosto de caldo. O açúcar total recuperado do mosto (ARTM) foi, para a usina A, 14,7% (média das três safras), para a B, 17,8% (média das três safras), para a C 14,8% (média das três safras) e para a destilaria D, 14,7% (média das duas safras).

4.2. Produção de diversos produtos da cana-de-açúcar

A produção do açúcar Very High Polarization (VHP) é o tipo mais exportado pelo Brasil. No seu branqueamento não há a utilização de anidrido sulfuroso. Para este açúcar especial, a usina C obteve destaque, alcançando em média nas três safras 1.825.848 sacos (Tabela 10). O açúcar VHP tem entre 99,1 e 99,69% de polarização e cor. Quanto mais baixo esse índice, mais claro ou mais branco é o açúcar (FILHO e PICCIRILLI, 2012). Para a produção de açúcar cristal as usinas A e a B produziram 117.358 sacos e 2.603 sacos na safra 2016/2017. Não produziram mais este açúcar nas demais safras (2015/2016 e 2014/2015). A usina C foi quem mais produziu açúcar cristal nas três safras avaliadas, com produção média de 1.345.208 sacos.

A produção de etanol hidratado na usina C obteve maior destaque, com média de 18.250 m³ nas três safras (2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017), seguida pela destilaria D, com média nas duas safras (2014/2015 e 2015/2016) de 17.686 m³ e Usina B (16.356 m³). A Usina A obteve a menor média, 5.087 m³ de álcool hidratado, nas três safras (2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017). De acordo com a CONAB (2015), a capacidade nominal diária do estado de Alagoas para a produção de etanol hidratado é de 3.344.000

L/dia. Para a Produção de etanol anidro, a usina C apresentou maiores valores para as safras 2016/2017 e 2014/2015 (média de 26.437 m³). Na safra 2016/2017 a usina B produziu 3.270 m³ a mais que a usina A, porém na safra 2014/2015 a Usina A chegou a produzir 6.328 m³ a mais que a usina B. O total de etanol produzido (hidratado mais anidro) foi quantificado por meio de medidores de vazão ou tanques calibrados e são enviados para armazenagem em tanques de grande volume, situados em parques de tanques, onde aguardam sua comercialização e posterior remoção por caminhões (COPERSUCAR, 1989).

Tabela 10. Produção de diversos produtos da cana-de-açúcar de três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D) no estado de Alagoas durante três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015).

PRODUÇÃO	Usina/Destilaria			
	A	B	C	D
Safra 2016/2017				
Produção de açúcar VHP (sacos)	1.087.419	1.414.959	1.624.428	Não moeu
Produção de açúcar cristal (sacos)	117.358	2.603	1.409.050	
Produção de etanol hidratado (m ³)	4,397	18,854	11,744	
Produção de etanol anidro (m ³)	10,208	13,478	28,846	
Produção média diária de açúcar (kg)	9,127	10,739	11,000	
Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	33	70	120	
Produção média diária de etanol anidro (m ³)	77	130	280	
Destino do etanol de 2 ^a	Redestilar	-	Redestilar	
Açúcares redutores no vinho	0,701	0,453	0,42	
Teor alcoólico do vinho (GL)	6,2	7,48	8,39	
Safra 2015/2016				
Produção de açúcar VHP (sacos)	967.005	1.610.163	1.443.965	
Produção de açúcar cristal (sacos)	-	-	1.220.261	
Produção de etanol hidratado (m ³)	2,055	17,527	31,825	13.666
Produção de etanol anidro (m ³)	9,485	4,821	19,837	-
Produção média diária de açúcar (kg)	6,762	9,148	22,000	-
Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	14,37	99,59	120	130,2
Produção média diária de etanol anidro (m ³)	66,33	130	280	-
Destino do etanol de 2 ^a	Redestilar	-	Redestilar	-
Açúcares redutores no vinho	0,562	0,49	0,49	-
Teor alcoólico do vinho (GL)	6,57	7,97	7,50	5,94
Safra 2014/2015				
Produção de açúcar VHP (sacos)	1.708.322	2.211.259	2.409.152	
Produção de açúcar cristal (sacos)	-	-	1.406.313	
Produção de etanol hidratado (m ³)	8,809	29,654	11,179	21.705
Produção de etanol anidro (m ³)	14,155	7,826	30,625	-
Produção média diária de açúcar (kg)	8,584	9,656	11,000	-
Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	44,27	129,5	120	147,7
Produção média diária de etanol anidro (m ³)	71,13	130	280	-
Destino do etanol de 2 ^a	Redestilar	-	Redestilar	-
Açúcares redutores no vinho	0,602	0,48	0,49	-
Teor alcoólico do vinho (GL)	6,89	8,9	7,21	6,28

O etanol hidratado é mais conhecido como o etanol comum vendido nos postos de combustíveis, enquanto o etanol anidro é aquele misturado à gasolina. A principal

diferença entre os dois diz respeito à quantidade de água presente em cada um deles. O etanol hidratado é um combustível que possui em sua composição entre 95,1% e 96% de etanol e o restante de água, enquanto o etanol anidro possui pelo menos 99,6% de graduação alcoólica. Dessa forma, o etanol anidro é praticamente etanol puro. O etanol anidro é misturado à gasolina para baratear o combustível, aumentar sua octanagem e reduzir a emissão de poluentes, o que se tornou uma preocupação mundial nos últimos anos, minimizando o efeito estufa (CHIEPPE JÚNIOR, 2012). A Lei N°8.723, de 1993, estipulou a mistura de etanol anidro com gasolina. Em poucos anos, novos decretos alteraram a porcentagem da mistura. Desde 16 de março de 2015, o percentual obrigatório de etanol anidro combustível na gasolina comum é de 27%.

O estado de Alagoas apresentou uma produção relevante no ano 2009, com valor de 790,9 milhões de litros. Entretanto, nas safras 2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017, (Anexo V), essa produção caiu para 555 milhões de litros, 378 milhões de litros e 383 milhões de litros, respectivamente.

Pelos dados apresentados nos anexos V a IX, constata-se que o estado de Alagoas produz mais etanol anidro que etanol hidratado e consome menos da metade de sua produção total.

A produção média diária de açúcar, não importando o tipo, VHP ou cristal, ou a soma dos dois, em cada unidade é muito semelhante nas três safras analisadas. Para a usina A, a média foi de 8.158 sacos de 50 kg. Na usina B foi de 9.848 sacos e, na Usina C, média de 22.000 sacos, sendo a maior produtora. Obedecendo à mesma tendência da produção diária de açúcar, a produção média diária de etanol hidratado e a produção média diária de etanol anidro, a destilaria C apresentou melhor desempenho, chegando a 120 e 280 m³ de etanol hidratado e etanol anidro, respectivamente, em relação às demais destilarias anexas (A e B). A destilaria D apresentou média diária de 139 m³ de etanol hidratado nas duas safras avaliadas.

A destilaria anexa à usina A apresentou maior quantidade de açúcares redutores no vinho (média de 0,62 %), quando comparado com as demais destilarias anexas (B, média de 0,47 % e C, média de 0,45 %), nas três safras avaliadas para a produção de açúcar e etanol. Para Santos et al. (2017), açúcares redutores são carboidratos que possuem grupo carbonílico livre, capaz de se oxidar na presença de agentes oxidantes em solução alcalina. Os autores ainda afirmam que a glicose e frutose são os principais açúcares redutores utilizados na fermentação. Della-Bianca et al. (2013) ratificam que esses carboidratos são dois dos principais monossacarídeos presentes em processos

fermentativos, dentre os quais se destacam a produção de vinho, cachaça e etanol combustível.

Para o teor de etanol do vinho, pela equação de Gay Lussac (°GL), a destilaria C apresentou maior teor (8,39 °GL) em relação à destilaria B (7,5 °GL) e destilaria A (6,2 °GL) na safra 2016/2017. Na safra 2015/2016 a destilaria B apresentou maior teor (7,97 °GL) que a destilaria C (7,50 °GL) e maior que a destilaria A (6,57 °GL). Na safra 2014/2015, a destilaria B apresentou teor de 8,9 °GL. A destilaria C obteve 7,21 °GL e a destilaria A 6,89 °GL. A destilaria D apresentou média de 6,11 °GL de teor de etanol no vinho nas duas safras avaliadas (2014/2015 e 2015/2016).

A produção de etanol é feita exclusivamente por via fermentativa no Brasil. Conforme Nogueira e Garcia (2013), a vinhaça, vinhoto ou restilo, é o líquido derivado da destilação do vinho, que é resultante da fermentação do caldo da cana de açúcar ou melação. O volume varia basicamente entre 10 a 15 litros/litro de etanol, dependendo do teor de etanol do vinho e o vapor direto.

4.3 Produção e destino de derivados da cana-de-açúcar

Como um dos principais resíduos da cana-de-açúcar, o melação foi produzido em maior quantidade pela usina A, com 72,31 kg por tonelada de cana processada. As usinas B e C praticamente não obtiveram diferenças significativas, 62,36 e 61,65 kg/ton, respectivamente, para a safra 2016/2017 (Tabela 11). Resultado semelhante foi verificado na safra 2014/2015, obedecendo à mesma tendência, com a usina A (60,36 kg/ton) se destacando, com o resultado mais elevado, seguida de perto pela usina B (54,89 kg/ton) e usina C (53,57 kg/ton). A destilaria D não produziu esta variável para nenhuma safra avaliada neste estudo, porque não produz açúcar. Para Castro (2013), o melação é o principal subproduto da indústria do açúcar, sendo produzido na proporção de 40 a 60 kg/ton de cana processada, justificando os resultados encontrados nas usinas avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 11. Produção e destino de derivados da cana-de-açúcar de três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D), no estado de Alagoas, durante três safras (2016/2017, 206/2015 e 2014/2015).

RESÍDUOS	Usina/Destilaria			
	A	B	C	D
	Safr 2016/2017			
Melaço por tonelada de cana (kg)	72,31	62,36	61,65	Não moeu
Destino do melaço	Venda/álcool	Venda/álcool	Venda/álcool	
Bagaço por tonelada de cana (kg)	315	327	301	
Destino do bagaço	Caldeiras	Caldeiras	Caldeiras	
Umidade do bagaço	50,25	49,22	49,09	
Pol do bagaço	2,68	3,30	2,08	
ART do bagaço	-	3,47	-	
Torta por tonelada de cana (kg)	33,71	32	38	
Destino da torta	Campo	Campo	Campo	
Pol da torta	3,35	2,69	1,62	
Vinhaça por litro de etanol (L)	14	14	13	
Destino da vinhaça	Irrigação	Irrigação	Irrigação	
Teor alcoólico da vinhaça (GL)	-	0,03	0,01	
Temperatura da vinhaça (°C)	-	100	60	
Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	5,74	5	2	
Destino da água de lavagem de cana	Irrigação	Irrigação	Irrigação	
Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	-	5,49	-	
Safr 2015/2016				
Melaço por tonelada de cana (kg)	62,65	53,37	60,99	N/produz
Destino do melaço	Venda/álcool	Venda/álcool	Venda/álcool	N/produz
Bagaço por tonelada de cana (kg)	310	320,48	308,91	308
Destino do bagaço	Caldeiras	Caldeiras	Caldeiras	Caldeiras
Umidade do bagaço	51,47	49,92	50,55	51,60
Pol do bagaço	2,64	2,26	2,02	2,46
ART do bagaço	-	2,37	-	-
Torta por tonelada de cana (Kg)	30,45	31,24	38,17	N/produz
Destino da torta	Campo	Campo	Campo	N/produz
Pol da torta	3,12	2,92	2,74	N/produz
Vinhaça por litro de etanol (L)	14	14,00	13	14
Destino da vinhaça	Irrigação	Irrigação	Irrigação	Irrigação
Teor alcoólico da vinhaça (GL)	-	0,0329	0,0380	0,006
Temperatura da vinhaça (°C)	-	100	60	-
Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	5,58	5,00	2,00	-
Destino da água de lavagem de cana	Irrigação	Irrigação	Irrigação	Tratamento
Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	-	0,50	-	-
Safr 2014/2015				
Melaço por tonelada de cana (kg)	60,36	54,89	53,57	N/produz
Destino do melaço	Venda/álcool	Venda/álcool	Venda/álcool	N/produz
Bagaço por tonelada de cana (kg)	314,6	314	303	308
Destino do bagaço	Caldeiras	Caldeiras	Caldeiras	Caldeira
Umidade do bagaço	49,84	50,08	50,13	49,81
Pol do bagaço	2,81	2,11	1,95	2,24
ART do bagaço	-	2,22	4,52	-
Torta por tonelada de cana (kg)	29,91	28,3	45,54	N/produz
Destino da torta	Campo	Campo	Campo	N/produz
Pol da torta	3,68	2,69	2,33	N/produz
Vinhaça por litro de etanol (L)	14	14	13	14
Destino da vinhaça	Irrigação	Irrigação	Irrigação	Irrigação
Teor alcoólico da vinhaça (GL)	-	0,02	0,02	-
Temperatura da vinhaça (°C)	-	100	60	-
Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	5,32	5	2	-
Destino da água de lavagem de cana	Irrigação	Irrigação	Irrigação	Tratamento
Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	-	7,04	-	-

Em todas as destilarias anexas avaliadas, o destino do melaço foi a própria destilaria, com o objetivo de fabricação de etanol. Isto é justificado, de acordo com Ribeiro et al. (1999), devido ao elevado teor de açúcares totais e demais componentes, deixando claro a vantagem das unidades mistas com a possibilidade de aproveitamento do melaço residual que, após passar por processo de reidratação, é destinado à fabricação de álcool etílico. Esse uso adiciona valor a este subproduto, que é normalmente destinado à alimentação animal, cujo preço de comércio representa apenas uma fração do preço do produto principal, o açúcar.

O bagaço da cana-de-açúcar é outro importante derivado. Para esta variável, na safra 2016/2017, a usina B produziu 327 kg/ton de cana processada, enquanto a usina A produziu 315 kg/ton. A usina C produziu 301 kg/ton e a destilaria D não moeu nesta safra. Na safra 2014/2015, as usinas A e B produziram praticamente a mesma quantidade de bagaço de cana (314,6 e 314 kg/ ton de cana, respectivamente), seguidas pela usina C, com 303 kg/ton de cana e a Destilaria D, com 308 kg/ton de cana. Estes resultados são superiores aos encontrados por Cortez e Magalhães (1992), que afirmam que, para 1 tonelada de cana moída, produz-se aproximadamente 250 kg de bagaço. Porém, de acordo com a CONAB (2011), a produção do bagaço depende do tipo de cana-de-açúcar utilizada, das condições climáticas, do solo etc, sendo que as variedades comumente utilizadas no Brasil produzem entre 270 e 290 kg por tonelada de cana processada.

Ressalte-se que estas quantidades de bagaço são obtidas após o processo de extração (em moendas ou difusores), onde ocorre adição de água ao material triturado (operação denominada embebição). Todas as usinas avaliadas destinaram o bagaço da cana-de-açúcar para as caldeiras, com o objetivo de gerar vapor. Cortez e Magalhães (1992), estudando os principais derivados da agroindústria canavieira e sua valorização, concluíram que a energia embutida no bagaço, é maior do que a contida no etanol produzido, pois 250 kg de bagaço podem gerar, quando convertido em energia calórica, 560.000 kcal. A queima do bagaço em caldeiras fornece um rendimento térmico em torno de 85%. Porém, com esta queima, são produzidos alguns poluentes como cinzas, fuligens, monóxido e dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Um ponto positivo na utilização desta técnica, é que grande parte das usinas tornam-se autossuficientes energeticamente e em alguns casos há ainda a possibilidade de venda do excedente, processo denominado de cogeração (PIACENTE, 2005).

As usinas A, B e C, nas três safras avaliadas (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015) e destilaria D, nas duas safras (2015/2016 e 2014/2015) conseguiram manter a umidade do bagaço variando de 49 a 51%. Estes resultados corroboram com Santos et al. (2011) que encontrarem 50% com o bagaço recém-moído. Os referidos autores ainda explicam que a estocagem do bagaço nos pátios das usinas é um dos fatores que contribuem para a ineficiência de sua exploração. Hugot (1977) afirma que sua simples deposição ao ar livre, favorece a fermentação natural, apodrecimento e diminuição de seu rendimento energético. O poder calorífico do bagaço torna-se maior à medida que o teor de umidade se reduz, principalmente devido à menor necessidade de calor para vaporizar a água (PAYNE, 1989). Almeida (2004) afirma que a disposição física das pilhas é difícil devida a seus volumes. Em grande parte das usinas brasileiras, um trator espalha o bagaço no alto da pilha, que pode chegar a ter cerca de 300 m de extensão, 100 m de largura e 40 m de altura.

Pol do Bagaço nada mais é que o teor de sacarose, aferido por polarímetro ou sacarímetro. Nesta variável, a usina B obteve maior valor (3,30 %), seguido da usina A (2,68 %) e a usina C obteve a melhor performance (2,08 %) para a safra 2016/2017. Nas duas últimas safras avaliadas (2014/2015 e 2015/2016) a destilaria A obteve a pior performance, com valor médio de 2,72 %. A destilaria D obteve o segundo pior resultado (média de 2,35 %) para o teor de sacarose. A usina B obteve o segundo melhor resultado médio de 2,18 % e o melhor resultado foi o da usina C (média de 1,98 %). Estes valores corroboram os encontrados por Borges e Lopes (2009), indicando que, quando a umidade do bagaço se encontra com 49 e 50 %, a pol do bagaço geralmente varia de 2 a 3 %, respectivamente. Hugot (1969) afirma que para cada ponto de pol que se baixa no bagaço no processo de extração de caldo, obtém-se um rendimento em torno de três quilos de açúcar.

Para os açúcares redutores totais (ART) do bagaço, a única usina que quantificou esta variável para as safras 2016/2017, 2015/2016, 2014/2015 foi a B (média de 2,69 %). A usina C, na safra 2014/2015, determinou o ART do bagaço, encontrando o valor (4,52 %). Os valores da usina B estão dentro dos estipulados por Rabelo (2007), avaliando o desempenho do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino para a hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar, encontrando valores entre 3,5 e 4,2 %.

A usina C obteve uma maior quantidade de torta de filtro, 38 kg por tonelada de cana processada, enquanto as usinas A e B produziram 34 e 32 kg/ton, respectivamente,

na safra 2016/2017. Para a safra 2015/2016, as usinas A, B e C produziram 30,5; 31,3 e 38,5 kg/ton de cana, respectivamente. Na safra 2014/2015 a usina C ampliou ainda mais esta variável, produzindo 45,5 kg/ton de cana, enquanto as usinas A e B diminuíram suas produções de torta de filtro para 30 e 28,3 kg/ton de cana processada, respectivamente. Porém estes valores estão dentro da amplitude estipulada por Ribeiro (1999), onde citam que para cada tonelada de cana processada produz-se de 20 a 45 kg de torta. Para Alvarenga e Queiroz (2008) torta de filtro é o resíduo da filtração mecânica durante a fabricação do açúcar e do etanol, originada da mistura do lodo de decantação e do bagacilho, este proveniente da peneiração do bagaço e a mistura de ambos enviada ao filtro contínuo rotativo à vácuo, onde se obtém o resíduo denominado torta de filtro. A destilaria D não produz torta de filtro pelo fato de ser uma unidade autônoma. Estudo sobre a composição química da torta de filtro rotativo produzida no estado de Alagoas, foi realizado por Vasconcelos (1983).

O destino da torta produzida a partir da cana processada, para as usinas A, B e C, foi ao campo, aplicada como adubo. De acordo com Marques (2009), esse resíduo é rico em minerais (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) e matéria orgânica, principalmente proteínas e lipídeos, podendo ser utilizado para alimentação animal ou ainda como adubo. Para Rossetto (2005), as propriedades fertilizantes da torta de filtro são conhecidas desde a década de 1950, entretanto, seu uso com esse objetivo começou na década de 1970.

Para a pol da torta, a usina A obteve maiores valores nas três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015, respectivamente 3,35, 3,12 e 3,68 %, o que indica que houve uma pior performance do sistema de filtração da mistura lodo e bagacilho. A usina B obteve média de 2,77 % para as três safras e a usina C obteve média de 2,56 % para as três safras citadas nesta pesquisa. Os valores encontrados nesta pesquisa para o pol da torta são superiores aos desejados para esta variável, que são abaixo de 1,0%, de acordo com Payne (1989). Ainda segundo Payne (1989), os valores de pol da torta de filtro estão diretamente relacionados com a velocidade de operação das máquinas, pois velocidade superior a 10 rotações por hora (rph) ocasiona perdas. O ideal é operar com rotação baixa, para uma melhor eficiência do filtro, porém as usinas do nordeste operam em sua maioria com o sistema de filtração subdimensionado.

Para a produção da vinhaça, as usinas A, B e C geraram quantidades similares nas três safras estudadas 14, 14 e 13 litros de vinhaça por litro de álcool etílico, respectivamente. A destilaria D produziu 14 litros de vinhaça por litro de etanol nas

safras 2014/2015 e 2015/2016. A vinhaça é um resíduo de processo de destilação do etanol. Para cada litro de etanol produzido, são gerados de 10 a 14 litros de vinhaça, o que ratifica os resultados aferidos nas usinas estudadas (CHRISTOFOLETTI et al., 2013 e VITOR, 2014).

Toda vinhaça gerada nas destilarias avaliadas é destinada para as lavouras, na forma de irrigação (fertirrigação). Em 2014, foram gerados no Brasil cerca de 280 bilhões de litros de vinhaça e 97% desse volume foram usados na própria lavoura. Silva et al. (2014) relatam que quando a vinhaça é aplicada no solo, o mesmo é alterado, gerando modificações em parte de suas propriedades químicas, uma vez que altera o pH e os teores de potássio trocáveis. Para Silva et al. (2007) estas alterações no solo favorecem o aumento da disponibilidade de alguns elementos para as plantas. É uma importante alternativa econômica, já que as indústrias sucroenergéticas gastam menos com adubos (SILVA et al., 2015). Entretanto, esse subproduto pode contaminar corpos d'água (PREVITALI, 2011) e, quando em excesso, causa diversos tipos de impactos ambientais (CHRISTOFOLETTI et al., 2013). Por outro lado, para Laime et al. (2011) o seu descarte no solo é a alternativa menos poluente.

A usina A não aferiu o teor de etanol da vinhaça em nenhuma safra avaliada, enquanto a usina B apresentou 0,03 °GL e 0,02 °GL de teor de etanol, nas safras 2016/2017 e 2014/2015, respectivamente. A usina C mediu 0,01 °GL e 0,02 °GL para as mesmas safras. Os resultados desta pesquisa estão dentro do aceitável e, de acordo com a ÚNICA (2003), esta certifica que a graduação alcoólica da vinhaça não pode ser superior a 0,03 °GL.

A temperatura da vinhaça variou para duas destilarias. A destilaria B (100 °C) e a C (60 °C) para as safras 2016/2017 e 2014/2015. Essa variação se deve ao fato de que na Usina B a amostra foi coletada antes do trocador de calor K, que resfria a vinhaça e na usina C, a amostra foi coletada após o trocador de calor k. Para Rossetto (1987), a temperatura ideal da vinhaça que sai dos aparelhos de destilação é de 85 a 90 °C. Porém a ÚNICA (2016) reporta que a diminuição da temperatura da vinhaça para abaixo de 60°C, ideal 45°C, permite o uso de materiais com menor custo como tanques e tubulações de fibra e o uso de geomembranas sintéticas de impermeabilização, que não toleram a elevada temperatura da vinhaça que sai da destilaria (cerca de 100°C caso não haja reaproveitamento regenerativo do seu calor).

A lavagem da cana de açúcar é a etapa de maior demanda de água em todo o processo. A usina A foi a que mais utilizou água para esta etapa, 5,74 e 5,32 m³/ton de

cana, para as safras 2016/2017 e 2014/2015, respectivamente. As usinas B e C utilizaram a mesma quantidade de água, 5 e 2 m³/ton de cana para as duas safras avaliadas. Braile et al. (1993) confirmam que a taxa de aplicação de água para lavagem de cana pode variar de 2 m³/ton de cana a 7 m³/ton de cana, correspondendo em aproximadamente 25% do volume total de água utilizado no processo. Portanto, a operação de reciclagem da água de lavagem de cana tem sido amplamente empregada, visando à redução no consumo e, principalmente, visando à questão dos impactos ambientais com a diminuição deste recurso.

Todas as usinas avaliadas utilizam a água de lavagem de cana em circuito fechado, porém, ao fazerem o descarte, destinam a água de lavagem para irrigação. O lodo da lavagem de cana tem contribuído para que retornem ao campo, auxiliando a lavoura quando incorporados ao solo (LIMA, 2001).

As cinzas são oriundas da queima do bagaço nas caldeiras. Para esta variável, apenas a usina B apresentou resultados, em média de 4,34 kg/ton de cana para as três safras estudadas. De acordo com Malavolta (2001), uma tonelada de cana pode gerar 16,5 kg de cinzas. As cinzas de caldeira de bagaço de cana-de-açúcar, por apresentarem quantidades consideráveis de nutrientes de plantas, podem ser aproveitadas em solos de baixa fertilidade natural, melhorando as suas características físico-químicas (FEITOSA et al., 2009).

4.4. Resultados dos cálculos para os principais resíduos

Os principais resíduos da cana-de-açúcar (bagaço, vinhaça e CO₂ liberado na fermentação do mosto) foram calculados para cada usina avaliada nesta pesquisa, para o estado de Alagoas e o Brasil durante as três safras estudadas (Tabela 12). Para o bagaço de cana, vinhaça e CO₂ liberado na fermentação do mosto, no estado de Alagoas representam, em média 3,14%, 1,7%, 0,5% respectivamente, da produção do país. Alagoas produz ainda 1,8% e 0,9% de etanol anidro e hidratado respectivamente, do país.

Encontra-se, no Apêndice 7, um memorial de cálculo da quantidade de CO₂ liberado na combustão interna dos automóveis no estado de Alagoas, devido ao etanol e devido à gasolina.

A usina C produziu em média 571.740,1 ton de bagaço de cana nas três safras avaliadas nesta pesquisa. Este valor é 40% maior que o resultado encontrado pela usina

B, 57% maior que o da A e 89% maior que o destilaria D, com a média das duas safras que foi realizada a moagem (Figura 3X). Este derivado da cana-de-açúcar é armazenado e utilizado nas referidas usinas e destilaria autônoma para fins energéticos, e o excedente comercializado. Lunas (2014) ratifica a importância do bagaço da cana-de-açúcar, entre os produtos e conjuntos gerados pela cana, provendo a possibilidade ao setor de duas alternativas: processamento adicional ou decisão de venda.

Tabela 12. Resultados dos cálculos para os principais resíduos (bagaço, vinhaça e CO₂ liberado na fermentação) da cana-de-açúcar produzidas por três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D) no estado de Alagoas durante três safras (2016/2017, 206/2015 e 2014/2015), para o estado de Alagoas e Brasil.

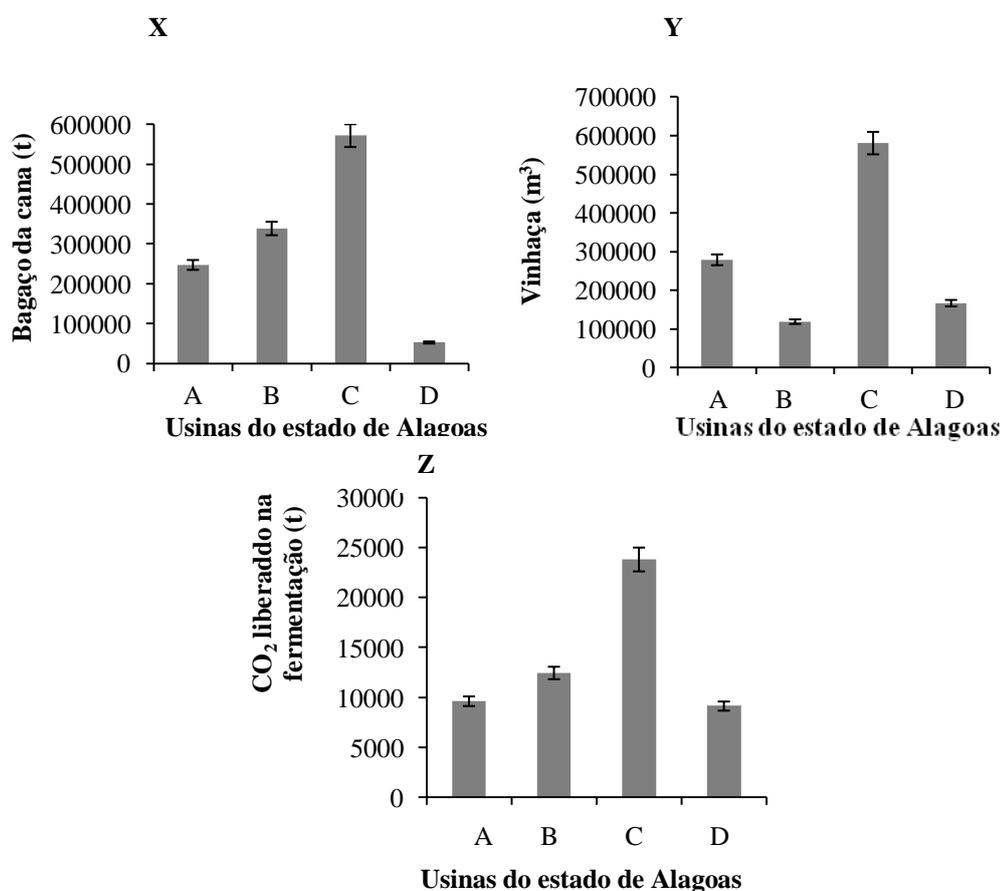
Resíduos (Total)	Usinas					
	2016/2017					
	A	B	C	D	ALAGOAS	BRASIL
Bagaço (t)	211.390,8	237.083	498.639,4	-	4.969.610	182.515.480
Vinhaça (m ³)	204.470	215.090	527.682,1	-	4.979.000	327.048.000
CO ₂ etanol anidro (t)	7.703,9	10.172	21.770	-	208.296	8.746.168
CO ₂ etanol hidrat. (t)	3.410,9	1.462,6	9.111	-	83.004,1	12.151.953,5
*CO ₂ total (t)	11.114,8	11.634,6	30.881	-	291.300	20.898.121,5
	2015/2016					
Bagaço (t)	197.659,8	323.852,6	584.403,8	61.652,8	5.078.420	186.710.720
Vinhaça (m ³)	161.560	312.882,5	671.612,3	191.333	4.914.000	362.784.000
CO ₂ etanol anidro (t)	7.158,6	3.638,4	14.971,2	-	162.260	8.800.506
CO ₂ etanol hidrat. (t)	1.594,1	13.597	24.688	10.601	126.445	14.407.027,1
*CO ₂ total (t)	8.752,7	17.235,3	39.659,2	10.601	288.705	23.207.533,1
	2014/2015					
Bagaço (t)	332.671,5	455.242,9	632.177,3	89.521,8	7.165.650	177.499.560
Vinhaça (m ³)	321.496	524.738,2	543.472,5	303.870	7.215.000	341.760.000
CO ₂ etanol anidro (t)	10.682,7	5.906,9	23.113,3	-	278.482,7	9.115.968,8
CO ₂ etanol hidrat. (t)	6.833,5	23.004,1	8.672,5	16.837	144.287,5	12.722.897,5
*CO ₂ total (t)	17.516,2	28.911	31.785,8	16.837	422.770,2	21.838.833,3

*CO₂ liberado na fermentação em toneladas de CO₂.

Tendências semelhantes ocorreram para a produção da vinhaça, obtendo-se destaque para a usina C, por ser a maior produtora de etanol (média das três safras estudadas, de 580.922,3 m³). A usina B e a destilaria D (média das duas safras) e usina A produziram valores inferiores, na ordem de 61%, 72% e 80%, respectivamente (Figura 3Y). Foi aferido o CO₂ liberado no processo de fermentação do mosto. Neste processo, o gás carbônico (CO₂) é um importante subproduto do processo. Para esta variável, a usina C apresentou melhor desempenho em face de sua maior produção (média das três safras de 34.108,7 t). A destilaria B produziu apenas 19.260,3 t, seguida pelas D (13.719 t), com média das duas safras que ocorreu a moagem e A, com 12.461,2

t (Figura 3Z). De acordo com o Grupo Exal (2008), diariamente as destilarias lançam uma grande quantidade de dióxido de carbono para a atmosfera. No entanto, isso faz com que seja desperdiçada uma possibilidade de faturamento. Alexandre (2011), estudando a recuperação de CO₂ produzido nas dornas de fermentação, afirma que, apesar de todo aproveitamento das unidades produtivas em relação a subprodutos, ainda há o CO₂ produzido no processo fermentativo, e este é uma fonte geradora de investimento que tem se mostrado vantajosa. Pois, além de sua comercialização como produto, pode ser negociado como créditos de carbono no mercado, já que o beneficiamento do CO₂ auxilia em uma ação sustentável, evitando que estes sejam lançados na atmosfera.

Figura 3. Média do bagaço (X), vinhaça (Y) e do CO₂ liberado na fermentação etanólica (Z), das usinas A, B, C e destilaria D durante as três safras avaliadas (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015).



4.5. Eficiências e rendimentos da cana-de-açúcar

No que se refere a eficiências e rendimentos, as unidades industriais apresentaram resultados satisfatórios (acima de 80%) para as três safras (2016/2017, 2015/2016 e 2014/2015), com exceção da A para a variável eficiência geral de moagem, que alcançou 70 e 69 % nas safras 2014/2015 e 2015/2016, respectivamente (Tabela 13). A destilaria D obteve média de eficiência geral de moagem, eficiência de fermentação e eficiência de destilação de 70, 81 e 99 %, respectivamente, nas duas safras estudadas. Alguns problemas no processo podem diminuir a qualidade do açúcar e a eficiência do processo, como por exemplo, a grande quantidade de sujidades na cana e limpeza na esteira da recepção ineficiente, falta de assepsia durante o processo, alto teor de dextrana no açúcar, alto teor de cinzas no açúcar, não uniformidade no tamanho dos cristais de açúcar, grande quantidade de “pó de açúcar”, e o alto teor de sacarose sendo enviada à destilaria (ÚNICA, 2016).

Para a produção de açúcar por tonelada de cana, a usina C mostrou-se mais eficiente (média de 94,84 kg/ton de cana) que as demais estudadas nesta pesquisa, nas três safras (2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017). A usina B produziu em média 89,75 kg/ton de cana e a usina A, média de 86,33 kg/ton de cana. Porém, para Pinto (2009), uma usina de açúcar relativamente eficiente pode produzir 100 kg de açúcar a partir de cada tonelada de cana processada.

A quantidade de etanol por tonelada de cana processada é um parâmetro importante na análise de eficiência de uma destilaria. Neste sentido, a destilaria com melhor desempenho nas três safras avaliadas foi a C, com média de 89,9 L/ton de cana, seguida pela B (média de 82,7 L/ton de cana) e pela A (média de 74,7 L/ton de cana). A destilaria D obteve o pior valor médio, para a quantidade de etanol por tonelada de cana processada (70,5 L/ton de cana). Pinto (2009) indica que 80 litros de etanol por tonelada de cana processada é um valor satisfatório. Para Cortez e Magalhães (1992) uma usina que gera aproximadamente 70 L/ton de cana está com bom índice de aproveitamento desta matéria prima.

As usinas B e C foram as únicas que aferiram o consumo total de água por tonelada de cana processada nas três safras. Em ambas o consumo foi 20 m³/ton de cana. O uso médio de água de uma usina com destilaria anexa, com mix de produção de 50% de cana para açúcar e 50% para a produção de etanol resulta praticamente no valor de 22 m³/ton cana (ELIA NETO, 2005). A importância de analisar esta variável é

justificada, pois o consumo pelas usinas é de aproximadamente 880 milhões de m³, embora a maioria tenha circuitos de água fechados. No país funcionam atualmente 347 usinas, o que torna o Brasil o segundo maior produtor de etanol do mundo, de acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (Conab) e do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa). E com a iminente diminuição do recurso água, é necessário tecnologias e políticas cada vez mais eficientes que visam à redução dos impactos ambientais para o setor canavieiro.

Tabela 13. Eficiências e rendimentos da cana-de-açúcar de três usinas (A, B e C) e uma destilaria autônoma (D), no estado de Alagoas, durante três safras (2016/2017, 2016/2015 e 2014/2015).

EFICIÊNCIAS/ RENDIMENTOS	Usina/Destilaria			
	A	B	C	D
----- Safra 2016/2017 -----				
Eficiência geral de moagem (%)	79,33	87,48	86,61	-
Eficiência de fermentação (%)	85,70	93,8	89,89	-
Eficiência de Destilação (%)	99,0	99,50	89,44	-
Kg de açúcar por tonelada de cana	93,91	98,37	100,17	-
Kg de mel por tonelada de cana	72,31	62,36	61,65	-
Litros de etanol por tonelada de cana	78,01	90,89	91,68	-
Consumo total de água (ton/cana)	-	1,8	1,2	-
CONSUMO DE INSUMOS				
Consumo de Ácido Sulfúrico (g/m ³ de Álcool)	4,165	9,95	4,6	-
Consumo Médio de Ciclohexano (gm ³ de Álcool)	0,43	6,13	2,59	-
----- Safra 2015/2016 -----				
Eficiência geral de moagem (%)	69,01	81,84	82,25	68,69
Eficiência de fermentação (%)	87,96	89,60	89,82	80,60
Eficiência de destilação (%)	99,0	99,50	89,38	99,25
Kg de açúcar por tonelada de cana	77,34	84,25	80,18	N/produz
Kg de mel por tonelada de cana	62,65	53,37	60,99	N/produz
Litros de etanol por tonelada de cana	71,33	79,67	83,06	70,45
Consumo total de água (ton/cana)	-	1,8	1,2	-
CONSUMO DE INSUMOS				
Consumo de ácido sulfúrico (g/m ³ de etanol)	4,2	10,5	4,4	-
Consumo médio de ciclohexano (g/m ³ de etanol)	0,57	3,8	1,2	-
----- Safra 2014/2015 -----				
Eficiência geral de moagem (%)	78,57	81,48	80,45	70,31
Eficiência de fermentação (%)	-	83,43	96,45	80,58
Eficiência de destilação (%)	99	99,5	95,97	99,27
Kg de açúcar por tonelada de cana	87,74	86,65	94,38	N/produz
Kg de mel por tonelada de cana	60,36	54,89	53,51	N/produz
Litros de etanol por tonelada de cana	74,70	77,54	94,96	70,61
Consumo total de água (ton/cana)	-	1,8	1,2	-
CONSUMO DE INSUMOS				
Consumo de ácido sulfúrico (g/m ³ de etanol)	3,3	9,98	4,78	-
Consumo médio de ciclohexano (g/m ³ de etanol)	0,49	5,92	2,89	-

Para o consumo de insumos como, por exemplo, ácido sulfúrico e Ciclohexano, a usina B se mostrou menos eficiente, pois consumiu aproximadamente 50% a mais que as demais usinas anexas nas três safras. O ácido sulfúrico é tido como um indicador da

economia de uma destilaria, já que é um dos produtos químicos mais utilizados e caros pela indústria. De acordo com Souza e Mutton (2004), o tratamento ácido é prática comum para o controle da infecção contida no fermento. Observa-se redução de 44,3% da contaminação microbiana em função do tempo e do vigor desse tratamento.

4.5 Moagem de cana-de-açúcar x petróleo equivalente e CO₂ liberado na combustão veicular

A tabela 14 mostra valores da moagem de cana-de-açúcar versus a produção de petróleo equivalente para as três safras avaliadas na pesquisa (2014/2015, 2015/2016 e 2016/2017). Nesta tabela é possível observar que o estado de Alagoas moeu mais ou menos 3% (média nas três safras) de toda cana moída no País. A região norte/nordeste moeu aproximadamente 7,5 % (média nas três safras), e a região centro/sul representando praticamente 90% do total moído no Brasil. Valores semelhantes foram verificados para a variável petróleo equivalente, nas três safras avaliadas nesta pesquisa.

Tabela 14. Moagem de cana-de-açúcar x petróleo equivalente, calculados para o estado de alagoas e regiões do Brasil para as três safras avaliadas na pesquisa.

Moagem de cana-de-açúcar x petróleo equivalente			
Safra 2014/2015			
Estados	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	*Petróleo equivalente na safra (mil barris)	*Petróleo equivalente dia (6 meses safra) (mil barris)
Alagoas	23.115	28.663	159
Região Norte-Nordeste	60.782	75.370	419
Região Centro-Sul	573.145	710.700	3.948
Brasil	633.927	786.070	4.367
Safra 2015/2016			
Alagoas	16.382	20.314	113
Região Norte-Nordeste	49.115	60.903	338
Região Centro-Sul	617.709	765.959	4.255
Brasil	666.824	826.862	4.593
Safra 2016/2017			
Alagoas	16.031	19.878	89
Região Norte-Nordeste	44.704	55.433	308
Região Centro-Sul	607.137	752.850	4.183
Brasil	651.841	808.283	4.491

De acordo com os valores da tabela 15 é possível verificar que o CO₂ liberado na combustão veicular devido ao etanol hidratado é muito inferior (62.48 t) ao % etanol anidro na gasolina (289.800 t) e principalmente a gasolina (1.248.733 t) em média dos 4 anos avaliados (2013 a 2016), estes valores justificam a importância da utilização do etanol no Brasil e no mundo. Estes valores são ratificados pela IEA (Agência

Internacional de Energia) que afirmam que a utilização de etanol produzido através da cana-de-açúcar reduz, em média 89%, a emissão de gases responsáveis pelo efeito estufa, como dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (NO₂), se comparado com a gasolina. Por outro lado, há a questão da necessidade de grandes áreas para plantação vegetal. Sem dúvidas que o principal benefício do etanol é ser uma alternativa limpa e renovável, se comparada com a gasolina, que é derivada do petróleo, um recurso mineral finito que libera gás carbônico e contribui com a poluição. Diminuir os impactos ambientais é um dos desafios de produtores e pesquisadores, contando com novas tecnologias e pesquisas para ampliar o uso de combustíveis sustentáveis. Uma importante saída é o investimento em cultivares cada vez mais produtivas, ou seja, aumentar a produção sem aumentar a área de plantio. Muito importante também é as usinas sempre procurar reaproveitar ao máximo seus resíduos de forma racional. Outra importante medida seria a reutilização da água e depois o tratamento antes de ser feito o seu descarte no processo de lavagem da cana.

Tabela 15. CO₂ liberado na combustão veicular (t), Devido ao etanol hidratado, ao % etanol anidro na gasolina e a gasolina.

CO₂ liberado na combustão veicular (t)	
Ano 2013	
Devido ao etanol hidratado	54.251
Devido ao % etanol anidro na gasolina	266.895
Devido à gasolina	1.212.075
Ano 2014	
Devido ao etanol hidratado	55.322
Devido ao % etanol anidro na gasolina	291.622
Devido à gasolina	1.324.371
Ano 2015	
Devido ao etanol hidratado	91.080
Devido ao % etanol anidro na gasolina	301.001
Devido a gasolina	1.231.954
Ano 2016	
Devido ao etanol hidratado	49.278
Devido ao % etanol anidro na gasolina	299.683
Devido à gasolina	1.226.534

Um ponto importante na cadeia produtiva do etanol é a utilização de levedura seca, que é obtida da secagem de uma parte do leite de levedura, retirada do processo de fermentação. A levedura seca é produzida na proporção de 2,5 quilos para 100 litros de álcool etílico produzido e possui em sua composição 35% de proteína bruta e alto teor

de vitaminas, especialmente as do complexo B, comercializada para compor ração animal e, em casos especiais, para consumo humano (BONASSA et al., 2015).

5. CONCLUSÃO

Apesar de inúmeros derivados da cana-de-açúcar produzidos e em grande quantidade, a agroindústria da cana-de-açúcar e, em particular a do etanol, traz inúmeras vantagens do ponto de vista ambiental, por ser atividade cuja matéria-prima é renovável.

As destilarias avaliadas neste trabalho utilizam seus resíduos dentro de uma amplitude aceitável do ponto de vista ambiental, buscando sempre melhores tecnologias com intuito de minimizar os impactos ambientais. O procedimento industrial adotado pelas quatro unidades é, salvo pequenas variações, padrão para todo o estado de Alagoas e, porque não dizer, também do Brasil.

Todo o bagaço é aproveitado como combustível em sistemas de cogeração de energia elétrica. Algumas das unidades avaliadas ainda vende o excedente de energia elétrica.

Parte das águas residuárias são devolvidas para os cursos de água após os tratamentos necessários, e outra parte é destinada, juntamente com a vinhaça à fertirrigação.

As caldeiras são dotadas de lavadores de gases e cinzas e a fuligem resultante é direcionada para lagoas de decantação e, daí, é enviada à fertirrigação.

A vinhaça, produzida em grande quantidade, é aplicada em quase sua totalidade nos canaviais, não gerando problemas ambientais.

O gás carbônico capturado nas dornas de fermentação é lançado na atmosfera, porém não afeta a camada de ozônio, por ser absorvido pela cana-de-açúcar durante o crescimento vegetativo, porém pode ser utilizado em inúmeras aplicações industriais.

O etanol anidro é misturado à gasolina, atualmente na proporção de 27%, como agente oxigenante/antidetonante, diminuindo as emissões de poluentes, quando se compara com a queima da gasolina pura. Nos veículos flex, sucesso absoluto atualmente no Brasil, o etanol hidratado pode ser utilizado, puro ou misturado à gasolina, em quaisquer proporções.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEXANDRE, A. F. F. **Projecto de recuperação CO₂ a partir das unidades de Steam Methane Reforming da refinaria de Sines.** p.112. 2011.

ALMEIDA FILHO, F. **Monitoramento e Controle de Emissão de Material Particulado em uma Fonte Estacionária.** Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química, São Carlos, 2008.

ALMEIDA, A. C. S.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I; BARBOSA, G. V. S.; MOURA-FILHO, G. M; FERREIRA JÚNIOR, R. A. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1441-1448, out. 2008.

ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T. R. **Produção mais limpa e aspectos ambientais na indústria sucroalcooleira.** In: International workshop advances in cleaner production, 2, São Paulo, 2009.

ANA. **Manual de conservação e reuso da água na agroindústria sucroenergética.** Agência Nacional da Águas – FIESP – ÚNICA- CTC – Brasília, 2009.

ANUÁRIO ESTATÍSTICO BRASILEIRO DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2010. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Acesso em: 10 set. 2010.

ARÉVALO, R. A. Plantas daninhas nos resíduos de colheita de cana crua e seu controle. **Stab**, v. 16, n.4,1998. p. 24-5.

BARBOSA, R.; LAPA, N.; LOPES, H.; GÜNTHER, A.; DIAS, D.; MENDES, B. Biomass fly ashes as low-cost chemical agents for Pb removal from synthetic and industrial wastewaters. **Journal of Colloid and Interface Science** 2014, 424, 27.

BASU, M.; PANDE, M.; BHADORIA, P. B. S.; MAHAPATRA, S. C. Potential fly-ash utilization in agriculture: A global review. **Progress in Natural Science** 2009, 19, 1173.

BNDES, CGEE. Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social; Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (Coord.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BONASSA, G. Subprodutos gerados na produção de bioetanol: bagaço, torta de filtro, água de lavagem e palhagem. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 4, p. 144-166, 2015.

BORGES, M. T. M. R.; LOPES, C. H. **Introdução a Tecnologia Agroindustrial**. São Carlos: Eduscar, 2009.

BOTELHO, R. G.; TORNISIELO, V. L.; de OLINDA, R. A.; MARANHO, L. A.; MACHADO-NETO, L. Acute toxicity of sugarcane vinasse to aquatic organisms before and after pH adjustment. **Toxicological and Environmental Chemistry**, v. 94, p. 1-11, 2012.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. (1993). **Manual de Tratamento de Águas Residuárias Industriais**. CETESB São Paulo, SP. Brasil. Estud. av., São Paulo, v. 24, n. 68, 2010.

BRUNELLI, Â. M. M. D. P.; PISANI, R. Proposta de disposição de resíduo gerado a partir da queima do bagaço de cana em caldeiras como fonte de nutriente e corretivo do solo. **Anais**. In Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 30 (pp. 1-8). AIDIS (2006).

CALDAS, C. **Manual de análises selecionadas para indústrias sucroalcooleiras**. Maceió- AL, 2006, 438p.

CAMPOS, C. R.; MESQUITA, V. A.; SILVA, C. F.; SCHWAN, R. F.. Efficiency of physicochemical and biological treatments of vinasse and their influence on indigenous

microbiota for disposal into the environment. **Waste management**, v. 34, n. 11, p. 2036-2046, 2014.

CARVALHO, L. C. C. Cenário sucroalcooleiro: as esperanças do ano novo. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**. Piracicaba, v. 21, n.3, p. 8-9, 2003.

CASTRO, C. V; JORDANI, D. O. **Responsabilidade Socioambiental das Usinas Sucroalcooleiras**. 2011.

CASTRO, H. F. de. **Processos Químicos Industriais II**. Lorena: USP, 2013.

CHIEPPE JÚNIOR, J. B. **Tecnologia e fabricação do álcool**. Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 74 p.: il.

CHRISTOFOLETTI, C. A.; PEDRO-ESCHER, J; CORREIA, J. E.; MARINHO, J. F. U.; FONTANETTI, C. S. Sugarcane vinasse: Environmental implications of its use. **Waste Management**, v. 33, p. 2752- 2761, 2013.

CIRINO, T. M. A. **Planejamento e diretrizes para um sistema de gestão ambiental em uma indústria sucroalcooleira**. <http://74.125>, v. 47, p. 97-114, 2004. Acesso no dia 22.02.2018.

CONAB. (Companhia Nacional de Abastecimento). **A Geração Termoeletrica com a Queima do Bagaço de Cana-de-Açúcar no Brasil - Análise do Desempenho da Safra 2009-2010**. 2011.

CONAB. (Companhia Nacional de Abastecimento). Acompanhamento de safra brasileira: grãos. **Sétimo levantamento**, abril 2017. Brasília: CONAB, 2017. v. 4 - SAFRA 2016/17- N. 7.

CONAB. (Companhia Nacional de Abastecimento). 2016a. **Levantamentos de safra**.

CONAB. (Companhia Nacional de Abastecimento). 2016b. **Levantamentos de safra**.

COPERSUCAR– Cooperativa, de Produtores de Cana. Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo LTDA. **PROALCOOL–Fundamentos e perspectivas. São Paulo, 1989.**

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa (Ed.). **Proálcool 40 anos: Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro.** Editora Blucher, 2018.

CORTEZ, L. & MAGALHÃES, P. Principais subprodutos da agroindústria canavieira e sua valorização. **Revista Brasileira de Energia**, Vol.2, n. 2, 1992.

DAFICO, D. A. **Método de produção de cinza de casca de arroz para utilização em concretos de alto desempenho.** 2003.

DELLA-BIANCA, B. E.; BASSO, T. O.; STAMBUK, B. U.; BASSO, L. C.; GOMBERT, A. K. What do we know about the yeast strains from the Brazilian fuel ethanol industry. **Applied Microbiology and Biotechnology, Berlin**, v. 97, n. 3, p. 979-991, 2013.

DOMINGUES, H. T. M.; XAVIER, P; MIRAPALHETE, T. **Produção de etanol à partir do arroz.** 2016.

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. Caracterização físico-química da vinhaça. **Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, São Paulo, Brasil, 1995.**

EPE – **Empresa de Pesquisa Energética. Análise de conjuntura dos biocombustíveis** - janeiro a dezembro de 2011. Brasília-DF, 2012.

FEITOSA, D. G.; MALTONI, K. L. & SILVA, I. P. F. Avaliação da cinza oriunda da queima do bagaço da cana-de-açúcar na substituição da adubação química convencional para produção de alimentos e preservação do meio ambiente. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 04. n. 02, p. 2412-2415, 2009.

FIESP/CIESP. **Ampliação da Oferta de Energia através da Biomassa.** Relatório, disponível em www.fiesp.org.br. Setembro/2001.

FILHO, G. Z; PICCIRILLI, J. P. **Açúcar e Álcool: Desde a lavoura da cana até o produto acabado.** 1a Ed. Editora Viena, Santa Cruz do Rio Pardo - São Paulo, 2012.

FREITAS, E. de S. **Caracterização da cinza do bagaço da cana-de-açúcar do município de Campos dos Goytacazes gerado a partir da queima de bagaço de cana em caldeiras como fonte de nutriente.** Rio de Janeiro, 2005.

GIACHINI, C. F.; FERRAZ, M. V. Benefícios da utilização de vinhaça em terras de plantio de cana-de-açúcar - revisão de literatura. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, v. 3, p. 1-15, 2009.

GLÓRIA, N.; ORLANDO FILHO, J. Aplicação de vinhaça: Um resumo e discussões sobre o que foi pesquisado. **Revista Álcool Açúcar**, v. 16, p. 32-39, 1984.

GRUPO EXAL. Piracicaba: **Exal Brasil News**. 1. ed., ano 01, ago. 2008. Disponível em: Acesso em 25 Set., 2014.

HEYWOOD, J. B. (1988); **Internal Combustion Engine Fundamentals**; McGraw-Hill Book Co.; New York.

HUGOT, E. Manual da Engenharia Açucareira, Edição Revista e Atualizada, Ed. Mestre **Jou, São Paulo**, V. 2, 1977.

HUGOT, E. Manual da Engenharia Açucareira, **Edição Revista e Atualizada**, Ed. Mestre Jou, São Paulo, V. 1, 1969.

IAA. **BRASIL/AÇÚCAR**. Rio de Janeiro: MIC/IAA, Coleção Canavieira nº 8, 1972. 244 p.

INMAN-BAMBER, N. G.; SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to water deficits. **Field crops research**. v. 92, p. 185-202, 2005.

JORNAL DA CANA. (2008). **Usinas podem ampliar faturamento com venda de CO2.** *Jornal da Cana*, 46.

MORAES JÚNIOR, A. D. S.; RAMOS, F. B. EDUCAÇÃO FINANCEIRA E MERCADO DE CAPITAIS: um estudo sobre a importância da desmistificação do mercado de capitais e educação financeira na sociedade brasileira. **Revista Eletrônica de Debates em Economia**, 1(1), p-112, 2013.

KOHLHEPP, G. Análise da situação da produção de etanol e biodiesel no Brasil. **Estudos avançados**, v. 24, n. 68, p. 223-253, 2010.

LAIME, E. M.; FERNANDES, P. D. O.; SOUZA, D. C. D. Possibilidades tecnológicas para a destinação da vinhaça: uma revisão. **Revista trópica: Ciências Agrárias e Biológicas, Chapadinha**, v. 5, n. 3, p. 16-29, 2011.

LIMA, U. A. Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos. **São Paulo: Edgard Blücher**, v. 3, p. 1-43, 2001.

LUNAS, A. L. **Benefício econômico do bagaço de cana-de-açúcar: um estudo no setor sucroenergético do sudoeste goiano.** 2014.

MACEDO, I. C. Situação atual e perspectivas do etanol. *Estudos Avançados*, **São Paulo**, v. 21, n. 59, p. 157-165. 2007.

MACEDO, I. C.; NOGUEIRA, L. A. H. **Biocombustíveis.** Cadernos NAE - Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. N. 2. Brasília: Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, 2004.

MACHADO, A. G. C.; SILVA, J. C. Estratégia empresarial e práticas ambientais: evidências no setor sucroalcooleiro. **Revista Brasileira de Gestão de Negócios**, v. 12, n. 37, p. 405424, 2010.

MALAVOLTA, E. **Sobre a utilização agrícola do resíduo de cinza de caldeira**, CNA Centro de Energia Nuclear na Agricultura, USP, In: *Parecer para Cargill Citrus Ltda*, 2001.

MANE, J. D.; MODI, S.; NAGAWADE, S.; PHADNIS, S. P.; BHANDARI, V. M. Treatment of spent wash using chemically modified bagasse and colour removal studies. **Bioresource Technology**, v.97, p. 1752–1755, 2006.

MAPA - MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. Relação das unidades produtoras cadastradas no departamento da cana-de-açúcar e agroenergia. Brasília: **MAPA**. 2016.

MARQUES, D. **Conselho de Informações sobre Biotecnologia, Guia da cana-de-açúcar**. 2009.

MOHANA, S.; ACHARYA, B. K.; MADAMWAR, D. Distillery spent wash: Treatment technologies and potential applications. **Journal of Hazardous Materials**. v.163, p.12– 25, 2009.

NIGRO, F.; SZWARC, A. Etanol como combustível veicular: perspectivas tecnológicas e propostas de políticas públicas. **Versão Preliminar, USP**, 2009.

NOLASCO, A. M.; GUERRINI, I. A.; BENEDETTI, V. Uso de resíduos urbanos e industriais como fonte de nutrientes e condicionadores de solos florestais. **Nutrição e fertilização florestal. Piracicaba: IPEF**, p. 385-414, 1999.

OLIVEIRA, E. L.; ANDRADE, L. A. B.; FARIA, M. A.; CUSTÓDIO, T. N. Vinhaça de alambique e nitrogênio na cana-de-açúcar, em ambiente irrigado e não irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 694-699, 2009.

OMENA, S. P.; CALLADO, N. H.; PEDROSA, V. A.; TORQUATO JR, H.; MENEZES, A. C. V.; PIMENTEL, I. M. C.. TRATAMENTO DE ÁGUAS DE LAVAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR, VISANDO A SUA REUTILIZAÇÃO. **Águas Subterrâneas**, n. 1, 2004.

PACHECO, T. F. **Fermentação alcoólica com leveduras de características floculantes em reator tipo torre com escoamento ascendente.** 2011. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.

PAUL, N. M.; FUCK, M. P.; DALCIN, R. B. **Trajetórias Tecnológicas do Etanol: do Proálcool à Alcoolquímica.** 2012.

PAULINO, J.; ZOLIN, C. A.; BERTONHA, A.; FREITAS, P. S. L.; FOLEGATTI, M. V. Estudo exploratório do uso da vinhaça ao longo do tempo. II. Características da cana-de-açúcar. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 24–249, 2011.

PAYNE, J. H. **Operações Unitárias na Produção de Açúcar de Cana. Piracicaba:** Nobel, 1989.

PERES. S., **Gás do bagaço de cana: um combustível substituto do gás natural.** In XV SNPTEE Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Foz do Iguaçu – Paraná 1999.

PERUZZO, T. M.; CANTO, E. L. do. **Química na abordagem do cotidiano.** São Paulo: Moderna, 2002. v. 3 (Orgânica)

PIACENTE, F. J. **Agroindústria Canavieira e o Sistema de Gestão Ambiental: o caso das usinas localizadas nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.** 2005. 175 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual De Campinas Instituto De Economia, Campinas, São Paulo, 2005.

PREVITALI, N. R. Uso de vinhaça para fertirrigação. Trabalho de graduação para obtenção do grau de tecnólogo em biocombustíveis. **Faculdade de Tecnologia de Aracatuba**, 2011.

QURESHI, S. A.; MADRAMOOTOO, C. A.; DODDS, G. T. Evaluation of irrigation Scheme for sugarcane in Sindh, Pakistan, using SWP93. **Agricultural Water Management**, 2002, v.54, p.37–48.

RABELO, S. C. **Avaliação de desempenho do pré-tratamento com peróxido de hidrogênio alcalino para a hidrólise enzimática de bagaço de cana-de-açúcar.** 2007.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Ponderação do impacto ambiental dos resíduos e subprodutos da produção industrial sucroenergética. **Revista Gestão Industrial**, v. 9, n. 2, 2013.

REBELATO, M. G.; MADALENO, L. L.; RODRIGUES, A. M. Análise do desempenho ambiental das usinas sucroenergéticas localizadas na bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 3, 2016.

RENEWABLE FUELS ASSOCIATION. **Building bridges to a more sustainable future.** Washington, DC: RFA, 2011. 38 p. (2011 Ethanol Industry Outlook). Disponível em: . Acesso em: 15 mar. 2011.

RIBEIRO, C; BLUMER, S; HORII, J. Fundamentos de tecnologia sucroalcooleira: tecnologia do açúcar. **Universidade de São Paulo–Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”–Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição**, 1999.

RIBEEIRO, C; BLUME, S. JORGE FUNDAMENTOS DE TECNOLOGIA SUCROALCOOLEIRA (2ª parte) **piracicaba**, 1999.

RODRIGUES, L. D. A cana-de-açúcar como matéria-prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação. **Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Análise Ambiental), Faculdade de Engenharia, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora**, 2010.

ROHRICH, S. S.; CUNHA, J. C. A proposição de uma taxonomia para a análise da gestão ambiental no Brasil. **Revista de Administração Contemporânea (RAC)** , v.8, n.4, p.86-95, 2004.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F. Nutrição e adubação da cana-de-açúcar: indagações e reflexões. **Encarte do Informações Agrônomicas**, n.110, p. 6-11, jun. 2005.

SANTOS, A. M. Estudo da influência da complementação de nutrientes no mosto sobre o processo de fermentação alcoólica em batelada. Engenharia Química - UFAL. Programa: **Projetos de pesquisas - Engenharias II**, 2006.

SANTOS, M. L.; LIMA, O. J.; NASSAR, E. J.; CIUFFI, K. J.; CALEFI, P. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, 34(3), 507-511, 2011.

SANTOS, A. A. Microwell plate-based method for the determination of reducing sugars with the DNS reagent. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, 2017.

SCHMIDELL, W.; FACCIOTTI, M. C. R. Biorreatores e processos fermentativos. **Biocologia industrial**, v. 1, p. 179-192, 2001.

SILVA, V. L. M. M.; GOMES, W. C.; ABREU, C. A. M.; ALSINA, O. L. S.; **Isotermas de equilíbrio para a adsorção de hidrocarbonetos em bagaço de cana-de-açúcar**. In XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Santos – São Paulo, Setembro 2006.

SILVA, M. A. S.; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 1, p. 108-114, 2007.

SILVA, R. O. Cana de mel, sabor de fel – Capitania de Pernambuco: uma intervenção pedagógica com caráter multi e interdisciplinar. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 32, n. 2, p. 90-94, maio 2010.

SILVA, N. F.; LELIS NETO, J. A.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; MIRANDA, J. H.; COELHO, R. D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. **Irriga**, Botucatu Edição especial, p. 340-350, 2012.

SILVA, A. P, M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 1, 2014.

SINDICATO DA INDÚSTRIA DO AÇÚCAR E DO ALCOOL DE ALAGOAS. Disponível em: <http://www.sindacucar-al.com.br/>. Acesso em: 25 de julho de 2016.

SOUZA, M. A. C; MUTTON, M. J. R. Flocculação de leveduras por *Lactobacillus fermentum* em processos industriais de fermentação alcoólica avaliada por técnica fotométrica. **Ciência Agrotec.** v.28, n.4, p.893-898, 2004.

SOUZA, G. N.; FORMAGINI, S.; CUSTÓDIO, F. O.; SILVEIRA, M. M.; Resumos do 49º Congresso Brasileiro do Concreto, São Paulo, Brasil, 2007.

SOUZA NOGUEIRA, M. A. F; DA SILVA G. M. Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 17, n. 17, p. 3275-3283, 2013.

SZWARC, A. **Ethanol and the control of greenhouse gases.** In: BIOFUELS IN BRAZIL: realities and prospects. Brasília, DF: Ministério das Relações Exteriores, 2008. p. 121-135.

TEODORO, I.; SOUZA, J. L.; BARBOSA, G. V. S.; MOURA FILHO, G.; DANTAS NETO, J.; ABREU, M. L. Crescimento e produtividade da cana-de-açúcar em cultivo de sequeiro nos tabuleiros costeiros de Alagoas. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos, Piracicaba**, v.27, p. 46-49, 2009.

TEW, T. L., COBILL, R. M. Genetic improvement of sugarcane (*Saccharum* spp.) as an energy crop. In: VERMERRIS, W. (Ed.). **Genetic Improvement of Bioenergy Crops.** New York, Springer, 2008. p. 249–272.

UNDP - United Nations Development Programme. RCCS - Renewable CO2 Capture and Storage from Sugar Fermentation Industry in **Sao Paulo** State. 2011.

UNICA. União da Indústria de Cana de açúcar. **Conquistas do setor sucroenergético na matriz energética brasileira**. A sustentabilidade no setor sucroenergético brasileiro, 2012.

UNICA. União da Indústria de Cana de açúcar. O Estado da Vinhaça. Site www.unicadata.com.br, acessado em 10 de agosto de 2016.

VASCONCELOS, J. N. de. Estudo sobre a Composição Química da Vinhaça de Diferentes Procedências no Estado de Alagoas. **Saccharum APC**, São Paulo, v. 6, n.29, p. 40-48, 1983.

VASCONCELOS, J. N. de. Estudo sobre a composição química de melaços do Estado de Alagoas. **STAB Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.3, n.5, p.45-51, mai./jun. 1985.

VASCONCELOS, J. N. de. Estudo sobre a composição química de torta de filtro rotativo no Estado de Alagoas. **Saccharum APC**, São Paulo, v. 6, n.27, p. 32-38, jul./ago. 1983.

VASCONCELOS, J. N. de. Ethanol Fermentation. In: Santos, F.; Borém, A.; Caldas, C.. (Org.). **Sugarcane. Agricultural Production, Bioenergy, and Ethanol**. 1ed. New York: Elsevier, 2015, v. 1, p. 311-340.

VIEIRA, M. C. A; LIMA, J. F; BRAGA, N. M. Setor sucroalcooleiro brasileiro: evolução e perspectivas. **Perspectivas do investimento**, v. 2010, p. 207-245, 2007.

VITOR, T. M. S. **Fermentações em mostos com altos teores de açúcar**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

WADT, L. C. **Cultivo de Pleurotus ssp em vinhaça visando a produção de biomassa e exopolissacarídeos**. 2008, Dissertação (Mestrado em Biologia na Agricultura e Ambiente), Universidade de São Paulo). Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba, 2008.

WANG, Y.; Mo, Y.; WANG, W.; LI, Y.; YE, Y. Effect of vinasse irrigation on the activity of three enzymes and agronomic characters at seedling stage of sugarcane. **Sugar Tech**, v.8, p.264-267, 2006.

XU, Y., ISOM, L.; HANNA, M. A. (2010). Adding value to carbon dioxide from ethanol fermentations. **Bioresource Technology**, 101(10), 3311-3319.

ANEXOS

ANEXO A – Dados operacionais da unidade industrial A.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA BIOMASSA



Destilaria		Usina (A)		Safra	
<input type="checkbox"/> Autônoma		Fermentação Batelada <input type="checkbox"/>		Doma Pulmão:	
<input checked="" type="checkbox"/> Anexa		Fermentação Contínua <input type="checkbox"/>		Dorna Fechada:	
				S <input type="checkbox"/> N <input type="checkbox"/>	
				S <input type="checkbox"/> N <input checked="" type="checkbox"/>	
Responsável pelo preenchimento:				Fone:	

DADOS OPERACIONAIS INDUSTRIAIS				
SAFRAS		2014/2015	2015/2016	2016/2017
Nº	ÍTEM	DADOS		
Matéria Prima				
1	Cana moída para açúcar (ton)	976.309,59	628.391,664	657.587,4
2	Cana moída para etanol (ton)	81.133,32	9.220,41	13.494,27
3	% Cana crua	23,84	26,17	22,8
4	Moagem horária (ton)	281,790	269,218	261,648
5	Tipo de mosto (caldo/ misto/ melaço)	Caldo/Mel	Caldo/Mel	Caldo/Mel
6	ART do mosto	14,91	15,01	14,29
Produção				
7	Produção de açúcar VHP (sacos)	1.708.322	967.005	1.087.419
8	Produção de açúcar cristal (sacos)	-	-	117.358
9	Produção de etanol hidratado (m ³)	8.809	2.055	4.397
10	Produção de etanol anidro (m ³)	14.155	9.485	10.208
11	Produção média diária de açúcar	8.584	6.762	9.127
12	Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	44,27	14,37	33
13	Produção média diária de etanol anidro (m ³)	71,13	66,33	77
14	Produção média diária de etanol de 2ª (m ³)	-	-	-
15	Destino do etanol de 2ª	Volante	Volante	Volante
16	Açúcares redutores no vinho	0,602	0,562	0,701
17	Teor alcoólico do vinho (GL)	6,89	6,57	6,2
Resíduos				
18	Melaço por tonelada de cana (kg)	60,36	62,65	72,31
19	Destino do melaço	Venda/ Etanol	Venda/ Etanol	Venda/ Etanol
20	Bagaço por tonelada de cana (kg)	314,6	310	315
21	Destino do bagaço	Geração de Vapor	Geração de Vapor	Geração de Vapor
22	Umidade do bagaço	49,84	51,47	50,25
23	Pol do bagaço	2,81	2,64	2,68
24	ART do bagaço	-	-	-
25	Torta por tonelada de cana (kg)	29,91	30,45	33,71
26	Destino da torta	Campo	Campo	Campo
27	Pol da torta	3,68	3,12	3,35

28	Vinhaça por litro de etanol(L)	14	14	14
29	Destino da vinhaça	Irrigação	Irrigação	Irrigação
30	Teor alcoólico da vinhaça (GL)	-	-	-
31	Temperatura da vinhaça	-	-	-
32	Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	5,32	5,58	5,74
33	Destino da água de lavagem de cana	Irrigação	Irrigação	Irrigação
34	ART na água de lavagem de cana	-	-	-
35	Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	-	-	-
Eficiências/ Rendimentos				
36	Eficiência geral de moagem (%)	78,57	69,01	79,33
37	Eficiência de fermentação (%)	-	87,96	85,70
38	Eficiência de destilação (%)	99	99,0	99,0
39	Kg de açúcar por tonelada de cana	87,74	77,34	93,91
40	Kg de mel por tonelada de cana	60,36	62,65	72,31
41	Litros de etanol por tonelada de Cana	74,70	71,33	78,01
42	Litros de etanol por tonelada de mel	309,09	314,49	321,7
43	Consumo total de água (m ³ /ton cana)	-	-	-
Consumo de Insumos				
44	Consumo de ácido sulfúrico (L/m ³ de etanol)	3.377	4.270	4.165
45	Consumo médio de ciclohexano (L/m ³ de etanol)	0,49	0,57	0,43

ANEXO B - Dados operacionais da unidade industrial B.

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA BIOMASSA	
--	---	---

Destilaria	Usina (B)	Safra	
() Autônoma	Fermentação Batelada (x)	Doma Pulmão:	Dorna Fechada:
(x) Anexa	Fermentação Contínua ()	S (x) N ()	S (x) N ()
Responsável pelo preenchimento:		Fone:	

DADOS OPERACIONAIS INDUSTRIAIS				
SAFRAS		2014/2015	2015/2016	2016/2017
Nº	ÍTEM	DADOS		
Matéria Prima				
1	Cana moída para açúcar (ton)	1.275.808,17	955.624,59	720.564,55
2	Cana moída para etanol (ton)	172.534,00	54.898,98	4.171,67
3	% Cana crua	-	-	-
4	Moagem horária (ton)	323,41	292,31	261,52
5	Tipo de mosto (caldo/ misto/ melaço)	Misto	Misto	Misto
6	ART do mosto	18,13	18,32	16,91
Produção				
7	Produção de açúcar VHP (sacos)	2.211.259	1.610.163	1.414.959
8	Produção de açúcar cristal (sacos)	-	-	2.603
9	Produção de etanol hidratado (m ³)	29.654,40	17.527,62	1.885,40
10	Produção de etanol anidro (m ³)	7.826,90	4.821,13	13.478,17
11	Produção média diária de açúcar	9.656,15	9.148,65	10.739,11
12	Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	129,50	99,59	70,00
13	Produção média diária de etanol anidro (m ³)	130,00	130,00	130,00
14	Produção média diária de etanol de 2ª (m ³)	-	-	-
15	Destino do etanol de 2ª	-	-	-
16	Açúcares redutores no vinho	0,48	0,49	0,45
17	Teor alcoólico do vinho (GL)	8,90	7,97	7,48
Resíduos				
18	Melaço por tonelada de cana (kg)	54,89	53,37	62,36
19	Destino do melaço	Destilaria	Destilaria	Destilaria
20	Bagaço por tonelada de cana (kg)	314,32	320,48	327,13
21	Destino do bagaço	Caldeiras	Caldeiras	Caldeiras
22	Umidade do bagaço	50,08	49,92	49,22
23	Pol do bagaço	2,11	2,26	3,30
24	ART do bagaço	2,22	2,37	3,47
25	Torta por tonelada de cana (kg)	28,32	31,24	31,83
26	Destino da torta	Canavial	Canavial	Canavial
27	Pol da torta	2,69	2,92	2,69
28	Vinhaça por litro de etanol(L)	14,00	14,00	14,00
29	Destino da vinhaça	Fertirrigação	Fertirrigação	Fertirrigação
30	Teor alcoólico da vinhaça (GL)	0,0258	0,0329	0,0326

31	Temperatura da vinhaça	110,00	110,00	110,00
32	Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	5,00	5,00	5,00
33	Destino da água de lavagem de cana	Fertirrigação	Fertirrigação	Fertirrigação
34	ART na água de lavagem de cana	0,50	0,50	0,50
35	Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	7,04	7,99	5,49
Eficiências/ Rendimentos				
36	Eficiência geral de moagem (%)	81,48	81,84	87,48
37	Eficiência de fermentação (%)	83,43	89,60	93,80
38	Eficiência de destilação (%)	99,50	99,50	99,50
39	Kg de açúcar por tonelada de cana	86,65	84,25	98,37
40	Kg de mel por tonelada de cana	54,89	53,37	62,36
41	Litros de etanol por tonelada de Cana	77,54	79,67	90,69
42	Litros de etanol por tonelada de mel	315,51	339,81	331,12
43	Consumo total de água (m ³ /ton cana)	20	20	20
Consumo de Insumos				
44	Consumo de ácido sulfúrico (L/m ³ de etanol)	9.970,63	10.579,30	9.956,54
45	Consumo médio de ciclohexano (L/m ³ de etanol)	592,67	384,59	613,01

ANEXO C - Dados operacionais da unidade industrial C.

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA BIOMASSA	
--	---	---

Destilaria Usina (C)			
() Autônoma	Fermentação Batelada (x)	Doma Pulmão:	Dorna Fechada:
(x) Anexa	Fermentação Contínua ()	S (x) N ()	S (x) N ()
Responsável pelo preenchimento:		Fone:	

DADOS OPERACIONAIS INDUSTRIAIS				
SAFRAS		2014/2015	2015/2016	2016/2017
Nº	ÍTEM	DADOS		
Matéria Prima				
1	Cana moída para açúcar (ton)	2.031.785,68	1.661.510,52	1.514.066,42
2	Cana moída para etanol (ton)	49.662,005	230.315,024	138.808,927
3	% Cana crua	70,77	78,38	61,61
4	Moagem horária (ton)	466,66	496,76	496,98
5	Tipo de mosto (caldo/ misto/ melaço)	Misto	Misto	Misto
6	ART do mosto	15,05	14,26	14,54
Produção				
7	Produção de açúcar VHP (sacos)	2.409.152	1.443.965	1.624.428
8	Produção de açúcar cristal (sacos)	1.406.313	1.220.261	1.409.050
9	Produção de etanol hidratado (m ³)	11.179,644	31.825,080	11.744,894
10	Produção de etanol anidro (m ³)	30.625,929	19.837,402	28.846,033
11	Produção média diária de açúcar	22.000	22.000	22.000
12	Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	120	120	120
13	Produção média diária de etanol anidro (m ³)	280	280	280
14	Produção média diária de etanol de 2ª (m ³)	-	-	-
15	Destino do etanol de 2ª	Redestilar	Redestilar	Redestilar
16	Açúcares redutores no vinho	0,49	0,49	0,42
17	Teor alcoólico do vinho (GL)	7,21	7,50	8,39
Resíduos				
18	Melaço por tonelada de cana (kg)	53,512	60,99	61,65
19	Destino do melaço	Destilaria	Destilaria	Destilaria
20	Bagaço por tonelada de cana (kg)	303,72	308,91	301,68
21	Destino do bagaço	Caldeiras	Caldeiras	Caldeiras
22	Umidade do bagaço	50,13	50,55	49,10
23	Pol do bagaço	1,95	2,02	2,07
24	ART do bagaço	4,52	-	-
25	Torta por tonelada de cana (kg)	45,54	38,17	37,75
26	Destino da torta	Adubação	Adubação	Adubação
27	Pol da torta	2,33	2,74	1,63
28	Vinhaça por litro de etanol(L)	13	13	13
29	Destino da vinhaça	Fertirrigação	Fertirrigação	Fertirrigação
30	Teor alcoólico da vinhaça (GL)	0,0295	0,0380	0,0175

31	Temperatura da vinhaça	60	60	60
32	Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	2.000	2.000	2.000
33	Destino da água de lavagem de cana	Fertirrigação	Fertirrigação	Fertirrigação
34	ART na água de lavagem de cana	-	-	-
35	Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	-	-	-
Eficiências/ Rendimentos				
36	Eficiência geral de moagem (%)	80,45	82,25	86,61
37	Eficiência de fermentação (%)	96,45	89,82	89,89
38	Eficiência de destilação (%)	95,97	89,38	89,44
39	Kg de açúcar por tonelada de cana	94,39	80,18	100,18
40	Kg de mel por tonelada de cana	53,51	60,99	61,65
41	Litros de etanol por tonelada de Cana	94,96	83,06	91,68
42	Litros de etanol por tonelada de mel	330,69	318,20	306,31
43	Consumo total de água (m ³ /ton cana)	20	20	20
Consumo de Insumos				
44	Consumo de ácido sulfúrico (L/m ³ de etanol)	4.780.000	4.430.400	4.677.648
45	Consumo médio de ciclohexano (L/m ³ de etanol)	2.895.00	1.250.050	2.595.336

ANEXO D - Dados operacionais da unidade industrial D.

	UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA DA BIOMASSA	
---	---	---

Destilaria: (D)			
(x) Autônoma	Fermentação Batelada (x)	Doma Pulmão:	Dorna Fechada:
() Anexa	Fermentação Contínua ()	S (x) N ()	S () N (x)
Responsável pelo preenchimento:		Fone:	

SAFRAS		2014/2015	2015/2016	2016/2017
Nº	ÍTEM			
Matéria Prima				Não moeu
1	Cana moída para açúcar (ton)	0	0	
2	Cana moída para etanol (ton)	290.655,100	200.171,500	
3	% Cana crua	0	0	
4	Moagem horária (ton)	156,91	143,31	
5	Tipo de mosto (caldo/ misto/ melaço)	Caldo	Caldo	
6	ART do mosto	146,41	148,56	
Produção				
7	Produção de açúcar VHP (sacos)	0	0	
8	Produção de açúcar cristal (sacos)	0	0	
9	Produção de etanol hidratado (m ³)	21.705,019	13.666,700	
10	Produção de etanol anidro (m ³)	0	0	
11	Produção média diária de açúcar	0	0	
12	Produção média diária de etanol hidratado (m ³)	147,7	130,2	
13	Produção média diária de etanol anidro (m ³)	0	0	
14	Produção média diária de etanol de 2ª (m ³)	-	-	
15	Destino do etanol de 2ª	-	-	
16	Açúcares redutores no vinho	-	-	
17	Teor alcoólico do vinho (GL)	6,28	5,94	
Resíduos				
18	Melaço por tonelada de cana (kg)	N/produz	N/produz	
19	Destino do melaço	N/produz	N/produz	
20	Bagaço por tonelada de cana (kg)	308	308	
21	Destino do bagaço	Caldeiras	Caldeiras	
22	Umidade do bagaço	49,81	51,60	
23	Pol do bagaço	2,24	2,46	
24	ART do bagaço	-	-	
25	Torta por tonelada de cana (kg)	N/produz	N/produz	
26	Destino da torta	N/produz	N/produz	
27	Pol da torta	N/produz	N/produz	
28	Vinhaça por litro de etanol(L)	14	14	
29	Destino da vinhaça	Irrigação	Irrigação	
30	Teor alcoólico da vinhaça (GL)		0,006	

31	Temperatura da vinhaça	-	-	
32	Água de lavagem por tonelada de cana (m ³)	-	-	
33	Destino da água de lavagem de cana	Tratamento	Tratamento	
34	ART na água de lavagem de cana	-	-	
35	Cinzas das caldeiras por tonelada de cana (kg)	-	-	
Eficiências/ Rendimentos				
33	Eficiência geral de moagem (%)	68,69	72,74	
37	Eficiência de fermentação (%)	80,60	74,89	
38	Eficiência de destilação (%)	99,25	99,93	
39	Kg de açúcar por tonelada de cana	N/produz	N/produz	
40	Kg de mel por tonelada de cana	N/produz	N/produz	
41	Litros de etanol por tonelada de Cana	70,45	65,43	
42	Litros de etanol por tonelada de mel	233,45	233,45	
43	Consumo total de água (m ³ /ton cana)	-	-	
Consumo de Insumos				
44	Consumo de ácido sulfúrico (L/m ³ de etanol)	-	-	
45	Consumo médio de ciclohexano (L/m ³ de etanol)	-	-	

ANEXO E - Moagem de Cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol.

Moagem de Cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - Safra 2014/2015.

Estados	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	Açúcar (mil toneladas)	Etanol Anidro (mil m ³)	Etanol Hidratado (mil m ³)	Etanol Total (mil m ³)
Alagoas	23.115	1.883	369	186	555
Região Centro-Sul	573.145	32.011	10.740	15.492	26.232
Região Norte-Nordeste	60.782	3.560	1.339	909	2.249
Brasil	633.927	35.571	12.079	16.401	28.480

Fonte: UNICA, ALCOPAR, BIOSUL, SIAMIG, SINDALCOOL, SIFAEG, SINDAAF, SUDES e MAPA.

Moagem de Cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - Safra 2015/2016.

Estados	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	Açúcar (mil toneladas)	Etanol Anidro (mil m ³)	Etanol Hidratado (mil m ³)	Etanol Total (mil m ³)
Alagoas	16.382	1.228	215	163	378
Região Centro-Sul	617.709	31.221	10.643	17.581	28.225
Região Norte-Nordeste	49.115	2.616	1.017	991	2.008
Brasil	666.824	33.837	11.661	18.572	30.232

Fonte: UNICA, ALCOPAR, BIOSUL, SIAMIG, SINDALCOOL, SIFAEG, SINDAAF, SUDES e MAPA.

Moagem de Cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - Safra 2016/2017.

Estados	Cana-de-açúcar (mil toneladas)	Açúcar (mil toneladas)	Etanol Anidro (mil m ³)	Etanol Hidratado (mil m ³)	Etanol Total (mil m ³)
Alagoas	16.031	1.446	276	107	383
Região Centro-Sul	607.137	35.628	10.655	14.996	25.651
Região Norte-Nordeste	44.704	3.107	934	669	1.603
Brasil	651.841	38.734	11.589	15.665	27.254

Fonte: UNICA, ALCOPAR, BIOSUL, SIAMIG, SINDALCOOL, SIFAEG, SINDAAF, SUDES e MAPA.

ANEXO F - Consumo de combustíveis no estado de Alagoas (L): etanol anidro.

Mês	2013	2014	2015	2016	2017
Janeiro	6.817.400	9.706.227	10.256.375	9.962.745	11.134.125
Fevereiro	5.844.400	8.501.676	7.994.620	9.679.230	9.856.620
Março	6.336.000	8.782.488	9.250.073	10.541.880	10.875.465
Abril	6.544.300	9.298.928	9.909.675	9.799.447	9.968.670
Maio	8.199.000	8.923.051	9.376.017	9.915.213	10.269.855
Junho	7.743.250	8.283.776	9.072.135	9.577.456	9.810.720
Julho	8.201.250	9.079.125	9.272.296	9.944.073	10.103.130
Agosto	8.421.875	9.032.750	8.950.901	10.387.170	9.995.754
Setembro	8.193.500	9.380.390	9.486.315	10.532.970	9.829.755
Outubro	8.861.402	9.838.221	9.811.125	10.291.185	10.110.898
Novembro	8.802.964	8.904.625	9.055.530	10.240.965	9.965.291
Dezembro	9.778.625	10.671.750	10.722.780	11.697.480	11.108.107
Total	93.743.966	110.403.007	113.157.842	122.569.814	123.028.390

Elaborado pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) a partir de dados publicados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGAS).

ANEXO G - Consumo de combustíveis no estado de Alagoas (L): etanol hidratado.

Mês	2013	2014	2015	2016	2017
Janeiro	3.383.000	3.775.000	4.090.500	4.190.000	2.281.000
Fevereiro	3.481.081	3.160.086	4.847.000	2.517.500	2.338.500
Março	3.230.000	2.870.500	4.949.000	2.462.000	2.779.000
Abril	2.957.000	2.785.000	5.235.000	2.293.999	2.354.500
Maio	2.824.500	2.761.000	4.514.500	2.772.500	2.600.000
Junho	2.620.000	2.480.000	4.525.500	2.779.500	2.262.500
Julho	2.625.000	2.449.000	5.246.500	2.220.500	2.027.000
Agosto	2.489.000	2.934.000	4.766.500	2.542.500	2.779.500
Setembro	2.592.000	2.648.500	4.260.500	2.443.000	3.750.795
Outubro	2.769.000	2.766.500	6.238.500	2.566.000	2.856.595
Novembro	2.758.500	3.136.500	4.915.500	2.408.000	4.147.698
Dezembro	3.238.000	3.891.500	5.116.000	2.566.500	4.879.796
Total	34.967.081	35.657.586	58.705.000	31.761.999	35.056.884

Elaborado pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) a partir de dados publicados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGAS).

ANEXO H - Consumo de combustíveis no estado de Alagoas (L): gasolina A (Aditivada).

Mês	2013	2014	2015	2016	2017
Janeiro	27.269.600	29.118.681	30.769.125	26.936.311	30.103.375
Fevereiro	23.377.600	25.505.030	23.983.860	26.169.770	26.649.380
Março	25.344.000	26.347.462	26.371.327	28.502.120	29.404.035
Abril	26.177.200	27.896.785	26.792.825	26.494.802	26.952.330
Maio	24.597.000	26.769.154	25.349.972	26.807.797	27.766.645
Junho	23.229.750	24.851.330	24.528.365	25.894.602	26.525.280
Julho	24.603.750	27.237.375	25.069.541	26.885.827	27.315.870
Agosto	25.265.625	27.098.250	24.200.586	28.083.830	27.025.558
Setembro	24.580.500	28.141.170	25.648.185	28.478.031	26.576.745
Outubro	26.584.207	29.514.664	26.526.375	27.824.315	27.336.872
Novembro	26.408.894	26.713.875	24.483.470	27.688.535	26.943.194
Dezembro	29.335.875	32.015.250	28.991.220	31.626.520	30.033.029
Total	306.774.001	331.209.026	312.714.851	331.392.460	332.632.313

Elaborado pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) a partir de dados publicados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGAS).

ANEXO I - Consumo de combustíveis no estado de Alagoas (L): gasolina C (Comum).

Mês	2013	2014	2015	2016	2017
Janeiro	34.087.000	38.824.908	41.025.500	36.899.056	41.237.500
Fevereiro	29.222.000	34.006.706	31.978.480	35.849.000	36.506.000
Março	31.680.000	35.129.950	35.621.400	39.044.000	40.279.500
Abril	32.721.500	37.195.713	36.702.500	36.294.249	36.921.000
Mai	32.796.000	35.692.205	34.725.989	36.723.010	38.036.500
Junho	30.973.000	33.135.106	33.600.500	35.472.058	36.336.000
Julho	32.805.000	36.316.500	34.341.837	36.829.900	37.419.000
Agosto	33.687.500	36.131.000	33.151.487	38.471.000	37.021.312
Setembro	32.774.000	37.521.560	35.134.500	39.011.001	36.406.500
Outubro	35.445.609	39.352.885	36.337.500	38.115.500	37.447.770
Novembro	35.211.858	35.618.500	33.539.000	37.929.500	36.908.485
Dezembro	39.114.500	42.687.000	39.714.000	43.324.000	41.141.136
Total	400.517.967	441.612.033	425.872.693	453.962.274	455.660.703

Elaborado pela União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA) a partir de dados publicados pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) e pela Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado (ABEGAS).

APÊNDICES

**APÊNDICE A - Memorial de cálculo dos principais resíduos para a unidade A
(AUTOR, 2018)**

Safra 2014/2015

Dados Considerados:

1 ton cana = 314,6 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na usina

a) Bagaço

1 ton. cana - 314,6 kg bagaço

*1.057.442,91 ton cana - **x = 332.671,5 ton bagaço**

*(Σ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

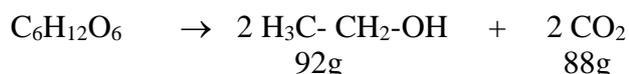
1 L etanol - 14 L vinhaça

*22.964.000 L - **x = 321.496 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x **14.155 m³** - **x = 10.682,7 ton CO₂**

Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **8.809 m³** - **x = 6.833,5 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 10.682,7 + 6.833,5 = 17.516,2 ton CO₂

Safra 2015/2016

Dados Considerados:

1 ton cana = 327,40 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na usina

a) Bagaço

1 ton. cana - 310 kg bagaço

*637.612,1 ton cana - **x = 197.659,8 ton bagaço**

*(Σ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

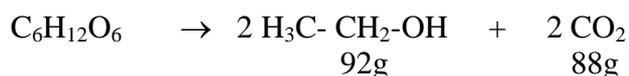
1 L etanol - 14 L vinhaça

***11.540.000 L** - **x = 161.560 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x **9.485,40 m³** - **x = 7.158,6 ton CO₂**

Densidade do etanol hidratado (d = 811 kg/m³) tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **2.055 m³** - **x = 1.594,1 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 7.158,6 + 1.594,1 = 8.752,7 ton CO₂

Safra 2016/2017

Dados Considerados:

1 ton cana = 315 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na usina

a) Bagaço

1 ton. cana - 315 kg bagaço

***671.081,756 ton cana - x = 211.390,8 ton bagaço**

* (∑ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

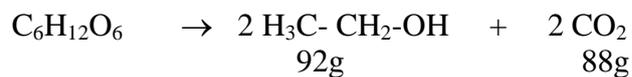
1 L etanol - 14 L vinhaça

***14.605.000 L - x = 204.470 m³ vinhaça**

*(∑ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Densidade do etanol anidro (d = 789 kg/m³) tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x **10.208 m³** - **x = 7.703,9 Ton CO₂**

Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **4.397 m³** - **x = 3.410,9 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 7.703,9 + 3.410,9 = 11.114,8 ton CO₂

**APÊNDICE B - Memorial de cálculo dos principais resíduos para a unidade B
(AUTOR, 2018)**

Safra 2014/2015

Dados Considerados:

1 ton cana = 314,32 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na usina

a) Bagaço

1 ton. cana - 314,32 kg bagaço

***1.448.342,17 ton cana - x = 455.242,9 ton bagaço**

* (Σ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

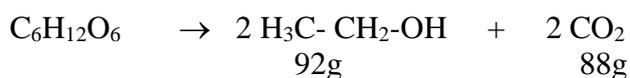
1 L etanol - 14 L vinhaça

***37.481.300 L - x = 524.738,2 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol Hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x 7.826,9 m³ - x = 5.906,9 ton CO₂

Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x 29.654,4 m³ - x = 23.004,1 ton CO₂

Total de CO₂ liberado na fermentação: 5.906,9 + 23.004,1 = 28.911 ton CO₂

Safra 2016/2017

Dados Considerados:

1 ton cana = 327,13 kg de bagaço (média da safra).

1 L de Etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na usina

a) Bagaço

1 ton. cana - 327,13 kg bagaço

***724.736,22 ton cana - x = 237.083 ton bagaço**

* (∑ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

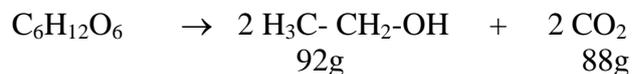
1 L etanol - 14 L vinhaça

***15.363.570 L - x = 215.090 m³ vinhaça**

*(∑ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x 13.478,17 m³ - x = 10.172 ton CO₂

Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x 1.885,40 m³ - x = 1.462,6 ton CO₂

Total de CO₂ liberado na fermentação: 10.172 + 1.462,6 = 11.634,6 ton CO₂

**APÊNDICE C - Memorial de cálculo dos principais resíduos para a unidade C
(AUTOR, 2018)**

Safra 2014/2015

Dados Considerados:

1 ton cana = 303,72 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 13 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na usina

a) Bagaço

1 ton. cana - 303,72 kg bagaço

***2.081.447,69 ton cana - x = 632.177,3 ton bagaço**

* (∑ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

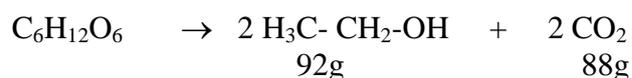
1 L etanol - 13 L vinhaça

***41.805.573 L - x = 543.472,5 m³ vinhaça**

*(∑ Etanol anidro + Etanol Hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x **30.625,93 m³** - **x = 23.113,3 ton CO₂**

Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **11.179,644 m³** - **x = 8.672,5 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 23.113,3 + 8.672,5 = 31.785,8 ton CO₂

**APÊNDICE D - Memorial de cálculo dos principais resíduos para a unidade D
(AUTOR, 2018)**

Safra 2014/2015

Dados Considerados:

1 ton cana = 308 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na destilaria

a) Bagaço

1 ton. cana - 308 kg bagaço

***290.655,100 ton cana** - **x = 89.521,8 ton bagaço**

* (Cana para Etanol)

b) Vinhaça

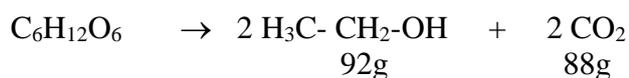
1 L etanol - 14 L vinhaça

***21.705.019 L** - **x = 303.870,3 m³ vinhaça**

*(Etanol Hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **21.705,019 m³** - **x = 16.837,4 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 16.837,4 ton CO₂

Safra 2015/2016

Dados Considerados:

1 ton cana = 308 kg de bagaço (média da safra).

1 L de etanol = 14 L vinhaça (média da safra).

► Resíduos produzidos na destilaria

a) Bagaço

1 ton. Cana - 308 kg bagaço

***200.171,5 ton cana** - **x = 61.652,8 ton bagaço**

* (Cana para Etanol)

b) Vinhaça

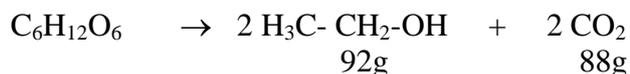
1 L etanol - 14 L vinhaça

***13.666.700 L** - **x = 191.333,8 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Como a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **13.666,7 m³** - **x = 10.601,8 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 10.601,8 ton CO₂

Safra 2015/2016

Dados Considerados:

1 ton cana = 310 kg de bagaço (média estimada em Alagoas).

1 L de etanol = 13 L vinhaça (média estimada em Alagoas).

► Resíduos produzidos em todas as unidades produtivas

a) Bagaço

1 TC - 310kg bagaço
16.382.000 - **x = 5.078.420 ton bagaço**

b) Vinhaça

1 L etanol - 13 L vinhaça
 378.000.000 L - **x = 4.914.000 m³ vinhaça**

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂
 789 x **215.000 m³** - **x = 162.260 ton CO₂**

Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂
 811kg/m³ x **163.000 m³** - **x = 126.445 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 162.260 + 126.445 = 288.705 ton CO₂

Safra 2016/2017

Dados Considerados:

1 ton cana = 310 kg de bagaço (média estimada em Alagoas).

1 L de etanol = 13 L vinhaça (média estimada em Alagoas).

► Resíduos produzidos em todas as unidades produtivas

d) Bagaço

1 TC - 310kg bagaço
16.031.000 - **x = 4.969.610 ton bagaço**

e) Vinhaça

1 L etanol - 13 L vinhaça
 383.000.000 L - **x = 4.979.000 m³ vinhaça**

f) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂
 789 x **276.000 m³** - **x = 208.296 ton CO₂**

Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂
 811kg/m³ x **107.000 m³** - **x = 83.004,1 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 208.296 + 83.004,1 = 291.300 ton CO₂

**APÊNDICE F - Memorial de cálculo dos principais resíduos no Brasil
(AUTOR, 2018)**

Safra 2014/2015

Dados Considerados:

1 ton cana = 280 kg de bagaço (média estimada no Brasil).

1 L de etanol = 12 L vinhaça (média estimada no Brasil).

► Resíduos produzidos em todas as unidades produtivas

a) Bagaço

1 ton. Cana - 280 kg bagaço

***633.927.000 ton cana - x = 177.499.560 ton bagaço**

*(Σ Cana para açúcar + Cana para Etanol)

b) Vinhaça

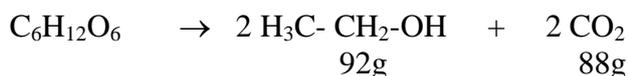
1 L etanol - 12 L vinhaça

***28.480.000 m³ - x = 341.760.000 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x 12.079.000 m³ - x = 9.115.968,8 ton CO₂

Conforme dados do Anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x 16.401.000 m³ - x = 12.722.897,5 ton CO₂

Total de CO₂ liberado na fermentação: 9.115.968,8 + 12.722.897,5 = 21.838.833,3751,6 ton CO₂

Safra 2015/2016

Dados Considerados:

1 ton cana = 280 kg de bagaço (média estimada no Brasil).

1 L de etanol = 12 L vinhaça (média estimada no Brasil).

► Resíduos produzidos em todas as unidades produtivas

a) Bagaço

1 ton. Cana - 280 kg bagaço

***666.814.000 ton cana - x = 186.710.720 ton bagaço**

* (Σ Cana para açúcar + Cana para Etanol)

b) Vinhaça

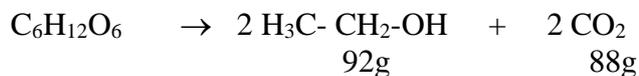
1 L etanol - 12 L vinhaça

***30.232.000 m³ - x = 362.784.000 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol Hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x **11.661.000 m³** - **x = 8.800.506 ton CO₂**

Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **18.572.000 m³** - **x = 14.407.027,1 ton CO₂**

Total de CO₂ liberado na fermentação: 8.800.506 + 14.407.027,1 = 23.207.533,1 ton CO₂

Safra 2016/2017

Dados Considerados:

1 ton cana = 280 kg de bagaço (média estimada no Brasil).

1 L de etanol = 12 L vinhaça (média estimada no Brasil).

► Resíduos produzidos em todas as unidades produtivas

a) Bagaço

1 ton. Cana - 280 kg bagaço

***651.841.000 ton cana - x = 182.515.480 ton bagaço**

*(Σ Cana para açúcar + Cana para etanol)

b) Vinhaça

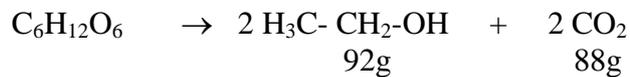
1 L etanol - 12 L vinhaça

***27.254.000 m³ - x = 327.048.000 m³ vinhaça**

*(Σ Etanol anidro + Etanol Hidratado)

c) CO₂ produzido na fermentação etanólica

De acordo com a reação:



Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, tem-se:

- Etanol anidro:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

789 x **11.589.000 m³** - **x = 8.746.168 ton CO₂**

Conforme dados do anexo A e sabendo-se que a densidade do etanol hidratado é 811 kg/m³, tem-se:

- Etanol hidratado:

0,092 kg de etanol - 0,088 kg de CO₂

811kg/m³ x **15.665.000 m³** - **x = 12.151.953,5 ton CO₂**

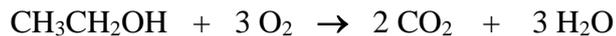
Total de CO₂ liberado na fermentação: 8.746.168 + 12.151.953,5 = 20.898.121,5 ton CO₂

APÊNDICE G - Memorial de cálculo da quantidade de CO₂ liberado na combustão interna dos automóveis no estado de Alagoas (AUTOR, 2018):

Ano de 2013

1. Devido ao etanol

De acordo com a reação:



Conforme dados do Anexo G, verificando-se o consumo total de etanol hidratado e sabendo-se que sua densidade é 811 kg/m³, tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 811 \times 34.967,081 \text{ m}^3 \text{ (Anexo G)} & - & \mathbf{x = 54.250,7 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Conforme dados dos Anexos H e I, somando-se o consumo total das gasolinas Aditivada e Comum e sabendo-se que são adicionados 25% de etanol anidro, tem-se:

$$\begin{array}{l} 306.774,001 \text{ m}^3 \text{ (Anexo H) + } 400.517,967 \text{ m}^3 \text{ (Anexo I)} = \mathbf{707.292 \text{ m}^3} \\ 25\% \text{ de álcool anidro equivale a } = \mathbf{176.823 \text{ m}^3} \end{array}$$

Sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, então:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 789 \times \mathbf{176.823 \text{ m}^3} & - & \mathbf{x} \\ & & \mathbf{x = 266.895,1 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Total de CO₂ liberado na combustão (etanol):

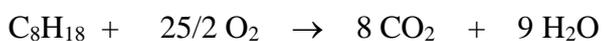
$$54.250,7 \text{ (etanol hidratado)} + 266.895,1 \text{ (etanol anidro)} = \mathbf{321.145,8 \text{ ton de CO}_2}$$

2. Devido à Gasolina

Conforme dados dos Anexos H e I, verificando-se o consumo total de gasolina (densidade = 740 kg.m⁻³) e que o etanol anidro adicionado à gasolina é 25%, tem-se:

$$\begin{array}{l} \text{Consumo de Gasolina Total – Quantidade de Álcool Anidro (25\%)} \\ (\mathbf{707.292 \text{ m}^3}) \quad - \quad (\mathbf{176.823 \text{ m}^3}) \quad = \quad \mathbf{530.469 \text{ m}^3 \text{ gasolina sem}} \end{array}$$

etanol



Gasolina

$$\begin{array}{rcl} 0,114 \text{ kg de gasolina} & - & 0,352 \text{ kg de CO}_2 \\ 740 \times \mathbf{530.469 \text{ m}^3} & - & \mathbf{x = 1.212.075,1 \text{ ton CO}_2.} \end{array}$$

Considerando a produção de cana-de-açúcar da safra de 2013/2014, que foi de 20,671 milhões de toneladas, tem-se que, em equivalente energético, esta safra correspondeu a 25,632 milhões de barris de Petróleo por ano ou 70,2 mil barris/dia, que equivale a 2.120.742 L de gasolina/dia, isso se fosse utilizado 100% da safra de cana para etanol.

Com base nas informações e cálculos supracitados observa-se que, para suprir a quantidade de gasolina (**530.469 m³**), serão necessários:

$$530.469 \times 1,3 = 689.609,7 \text{ m}^3 \text{ de etanol hidratado.}$$

Neste caso, transformando-se os **176.823 m³** de etanol anidro utilizado na mistura com a gasolina em hidratado, tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 789\text{kg/m}^3 & - & \mathbf{176.823 \text{ m}^3 \text{ etanol anidro}} \\ 811\text{kg/m}^3 & - & \mathbf{x = 181.753,4 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}} \end{array}$$

$$181.753,4 - 176.823 = \mathbf{4.930,4 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}}$$

Então, a quantidade necessária de etanol hidratado será:

$$689.609,7 - 4.930,4 = \mathbf{684.679,3 \text{ m}^3}$$

Como 1 barril de petróleo produz cerca de 30,21 L gasolina, temos:

$$\begin{array}{rcl} 30,21 \text{ L gasolina} & - & 1 \text{ barril de petróleo} \\ 684.679.300 \text{ L} & - & \mathbf{x} \\ & & \mathbf{x = 22.663.995,4 \text{ barris}} \end{array}$$

Então:

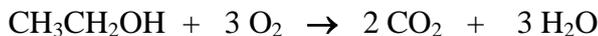
$$\begin{array}{rcl} 1,24 \text{ barris} & - & 1 \text{ ton de Cana} \\ 22.663.995,4 \text{ barris} & - & \mathbf{x} \\ & & \mathbf{x = 18.277.415,6 \text{ ton de Cana}} \end{array}$$

Para suprir totalmente o consumo de gasolina no Estado de Alagoas seriam necessários moer a mais 18.277.415,6 ton de cana, o que representa 88,42% da moagem efetivamente realizada, que foi de 20.671.000 ton de cana, ou necessitaria comprar em outros estados o valor correspondente a 684.679,3 m³ de etanol.

Ano de 2014

1. Devido ao etanol

De acordo com a reação:



Conforme dados do Anexo G, verificando-se o consumo total de etanol hidratado ($d = 811 \text{ kg/m}^3$), tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 811 \times 35.657,586 \text{ m}^3 \text{ (Anexo G)} & - & \mathbf{x = 55.322 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Conforme dados dos Anexos H e I, somando-se o consumo total das gasolinas Aditivada e Comum e sabendo-se que são adicionados 25% de etanol anidro a esta gasolina, tem-se:

$$331.209,026 \text{ m}^3 \text{ (Anexo H)} + 441.612,033 \text{ m}^3 \text{ (Anexo I)} = \mathbf{772.821 \text{ m}^3}$$

$$25\% \text{ de álcool anidro equivale a } = \mathbf{193.205,3 \text{ m}^3}$$

Sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m^3 , então:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 789 \times \mathbf{193.205,3 \text{ m}^3} & - & \mathbf{x = 291.622,4 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

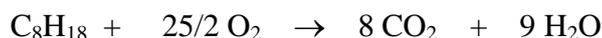
Total de CO_2 liberado na combustão (etanol):

$$55.322 \text{ (etanol hidratado)} + 291.622,4 \text{ (etanol anidro)} = \mathbf{346.944,4 \text{ ton de CO}_2}$$

2. Devido à Gasolina

Conforme dados dos Anexos H e I, verificando-se o consumo total de gasolina (densidade = 740 kg.m^{-3}) e que o etanol anidro adicionado à gasolina é 25%, tem-se:

$$\begin{array}{rcl} \text{Consumo de Gasolina Total} - \text{Quantidade de Álcool Anidro (25\%)} & & \\ (772.821 \text{ m}^3) & - & (193.205,3 \text{ m}^3) = \mathbf{579.615,7 \text{ m}^3 \text{ gasolina sem}} \\ \text{etanol} & & \end{array}$$



Gasolina

$$\begin{array}{rcl} 0,114 \text{ kg de gasolina} & - & 0,352 \text{ kg de CO}_2 \\ 740 \times \mathbf{579.615,7 \text{ m}^3} & - & \mathbf{x = 1.324.371 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Considerando-se que a produção de cana-de-açúcar da safra de 2014/2015 foi de 23,115 milhões de toneladas, tem-se, em equivalente energético, 28,663 milhões de barris de petróleo por ano ou 78,53 mil barris/dia, que equivale a 2.372.391,3 L de gasolina/dia, isso se fosse utilizado 100% da safra de cana para etanol.

Com base nas informações e cálculos supracitadas observa-se que, para suprir a quantidade de gasolina (**579.615,7 m³**), serão necessários:

$$579.615,7 \times 1,3 = 753.500,4 \text{ m}^3.$$

Neste caso, transformando-se os **193.205,3 m³** de etanol anidro utilizado na mistura com a gasolina em hidratado, tem-se:

$$\begin{array}{r} 789\text{kg/m}^3 \text{ - } 193.205,3 \text{ m}^3 \text{ etanol anidro} \\ 811\text{kg/m}^3 \text{ - } \quad \quad \quad \times \\ \mathbf{x = 198.592,5 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}} \end{array}$$

$$198.592,5 - 193.205,3 = \mathbf{5.387,2 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}}$$

Então a quantidade necessária de etanol hidratado será:

$$753.500,4 - 5.387,2 = \mathbf{748.113,2 \text{ m}^3}$$

Como 1 barril de petróleo produz cerca de 30,21 L gasolina, tem-se:

$$\begin{array}{r} 30,21 \text{ L gasolina - 1 barril de petróleo} \\ \mathbf{748.113.200 \text{ L}} \text{ - } \quad \quad \quad \times \\ \mathbf{x = 24.763.760,3 \text{ barris}} \end{array}$$

Então:

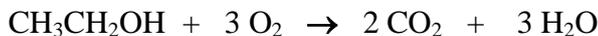
$$\begin{array}{r} 1,24 \text{ barril} \quad \quad \quad \text{-} \quad \quad 1 \text{ ton de Cana} \\ \mathbf{24.763.760,3 \text{ barris}} \text{ -} \quad \quad \quad \times \\ \mathbf{x = 19.970.774,5 \text{ ton de cana}} \end{array}$$

Para suprir totalmente o consumo de gasolina no Estado de Alagoas, seriam necessários moer a mais 19.970.774,5 ton de cana, o que representa 86,40% da moagem efetiva da safra, que foi de 23.115.000 ton de cana, ou necessitaria comprar em outros estados o valor correspondente a **748.113,20 m³** de etanol.

Ano de 2015

1. Devido ao etanol

De acordo com a reação:



Conforme dados do Anexo G, verificando-se o consumo total de etanol hidratado (densidade = 811 kg/m³), tem-se:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 811 \times 58.705,000 \text{ m}^3 \text{ (Anexo G)} & - & \mathbf{x = 91.079,5 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Conforme dados dos Anexos H e I, somando-se o consumo total das gasolinas aditivada e comum e sabendo-se que são adicionados 27% de etanol anidro a estas gasolinas, tem-se:

$$312.714,851 \text{ m}^3 \text{ (Anexo H)} + 425.872,693 \text{ m}^3 \text{ (Anexo I)} = \mathbf{738.587,5 \text{ m}^3}$$

$$27\% \text{ de álcool anidro equivale a } = \mathbf{199.418,6 \text{ m}^3}$$

Sabendo-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, então:

$$\begin{array}{rcl} 0,046 \text{ kg de etanol} & - & 0,088 \text{ kg de CO}_2 \\ 789 \times \mathbf{199.418,6 \text{ m}^3} & - & \mathbf{x = 301.000,7 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Total de CO₂ liberado na combustão (etanol):

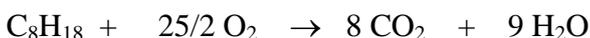
$$91.079,5 \text{ (etanol hidratado)} + 301.000,7 \text{ (etanol anidro)} = \mathbf{392.080,2 \text{ ton de CO}_2}$$

2. Devido à Gasolina

3. Conforme dados dos Anexos H e I, verificando-se o consumo total de gasolina (densidade = 740 kg.m⁻³) e que o etanol anidro adicionado à gasolina é 27%, tem-se:

Consumo de Gasolina Total – Quantidade de Álcool Anidro (27%)

$$\mathbf{(738.587,5 \text{ m}^3)} \quad - \quad \mathbf{(199.418,6 \text{ m}^3)} \quad = \mathbf{539.169 \text{ m}^3 \text{ gasolina s/ etanol}}$$



Gasolina

$$\begin{array}{rcl} 0,114 \text{ kg de gasolina} & - & 0,352 \text{ kg de CO}_2 \\ 740 \times \mathbf{539.169 \text{ m}^3} & - & \mathbf{x = 1.231.953,9 \text{ ton CO}_2} \end{array}$$

Considerando-se que a produção de cana-de-açúcar da safra de 2015/2016 foi de 16,382 milhões de toneladas, tem-se, em equivalente energético, 20,314 milhões de barris de petróleo por ano ou 55,65 mil barris/dia, que equivale a 1.681.186,5 L de gasolina/dia, isso se fosse utilizado 100% da safra de cana para etanol.

Com base nas informações e cálculos supracitados observa-se que, para suprir a quantidade de gasolina (**539.169 m³**), seria necessário:

$$539.169 \times 1,3 = \mathbf{700.919,7 \text{ m}^3} \text{ de etanol.}$$

Neste caso, transformando-se os **199.418,6m³** de etanol anidro utilizado na mistura com a gasolina em hidratado, tem-se:

$$\begin{array}{l} 789\text{kg/m}^3 - 199.418,6 \text{ m}^3 \text{ etanol anidro} \\ 811\text{kg/m}^3 - \mathbf{x = 204.979,1 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}} \end{array}$$

$$204.979,1 - \mathbf{199.418,6 = 5.560,5 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}}$$

Então a quantidade necessária de etanol hidratado seria:

$$700.919,7 - \mathbf{5.560,5 = 695.359,2 \text{ m}^3}$$

Como 1 barril de petróleo produz cerca de 30,21 L gasolina, tem-se:

$$\begin{array}{l} 30,21 \text{ L gasolina} - 1 \text{ barril de petróleo} \\ \mathbf{695.359,2 \text{ L}} - \mathbf{x = 23.017.517,4 \text{ barris}} \end{array}$$

Então:

$$\begin{array}{l} 1,24 \text{ barril} - 1 \text{ ton de Cana} \\ 23.017.517,4 \text{ barris} - \mathbf{x = 18.562.514 \text{ ton de cana}} \end{array}$$

Para suprir totalmente o consumo de gasolina no Estado de Alagoas seria necessário moer a mais 18.562.514 ton de cana, o que representa 113,31% da moagem efetiva da safra, que foi de 16.382.000 ton de cana, ou necessitaria comprar em outros estados o valor correspondente a **695.359,2 m³** de etanol.

Ano de 2016

1. Devido ao etanol

De acordo com a reação:



Conforme dados do Anexo G, verificando-se o consumo total de etanol hidratado (densidade = 811 kg/m³), tem-se:

0,046 kg de etanol	-	0,088 kg de CO ₂
811 x 31.761,999 m³ (Anexo G)	-	x = 49.278 ton CO₂

Conforme dados dos Anexos H e I, somando-se o consumo total das gasolinas aditivada e comum e sabendo-se que são adicionados 27% de etanol anidro a estas gasolinas, tem-se:

$$331.392,460 \text{ m}^3 \text{ (Anexo H)} + 453.962,274 \text{ m}^3 \text{ (Anexo I)} = \mathbf{735.354,7 \text{ m}^3}$$

$$27\% \text{ de álcool anidro equivale a } = \mathbf{198.545,8 \text{ m}^3}$$

Sabe-se que a densidade do etanol anidro é 789 kg/m³, então:

0,046 kg de etanol	-	0,088 kg de CO ₂
789 x 198.545,8 m³	-	x = 299.683,3 ton CO₂

Total de CO₂ liberado na combustão (etanol):

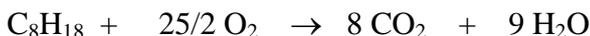
$$49.278 \text{ (etanol hidratado)} + 299.683,3 \text{ (etanol anidro)} = \mathbf{348.961,3 \text{ ton de CO}_2}$$

2. Devido à Gasolina

Conforme dados dos Anexos H e I, verificando-se o consumo total de gasolina (densidade = 740 kg.m⁻³) e sabendo-se que são adicionados 27% de etanol anidro a esta gasolina, tem-se:

Consumo de Gasolina Total – Quantidade de etanol anidro (27%)

$$\mathbf{(735.354,7 \text{ m}^3)} \quad - \quad \mathbf{(198.545,8 \text{ m}^3)} \quad = \quad \mathbf{536.808,9 \text{ m}^3 \text{ gasolina sem etanol}}$$



Gasolina

0,114 kg de gasolina	-	0,352 kg de CO ₂
740 x 536.808,9 m³	-	x = 1.226.534,2 ton CO₂.

Considerando-se que a produção de cana-de-açúcar da safra de 2016/2017 foi de 16,031 milhões de toneladas, tem-se, em equivalente energético, 19,878 milhões de barris de petróleo por ano ou 54,46 mil barris/dia, que equivale a 1.645.236,6 L de gasolina/dia, isso se fosse utilizado 100% da safra de cana para etanol.

Com base nas informações e cálculos supracitados observa-se que para, suprir a quantidade de gasolina (**536.808,9 m³**), seria necessário:

$$536.808,9 \times 1,3 = 697.851,6 \text{ m}^3.$$

Neste caso, transformando-se os **198.545,8 m³** de etanol anidro utilizado na mistura com a gasolina em hidratado, tem-se:

$$\begin{array}{l} 789\text{kg/m}^3 - 198.545,8 \text{ m}^3 \text{ etanol anidro} \\ 811\text{kg/m}^3 - \mathbf{x = 204.082 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}} \end{array}$$

$$204.082 - \mathbf{198.545,8 = 5.536,2 \text{ m}^3 \text{ etanol hidratado}}$$

Então a quantidade necessária de etanol hidratado seria:

$$697.851,6 - 5.536,2 = \mathbf{692.315,4 \text{ m}^3}$$

Como 1 barril de petróleo produz cerca de 30,21 L gasolina, tem-se:

$$\begin{array}{l} 30,21 \text{ L gasolina} - 1 \text{ barril de petróleo} \\ \mathbf{692.315,4 \text{ L}} - \quad \quad \quad \mathbf{x} \quad \quad \quad \mathbf{x = 22.916.763 \text{ barris}} \end{array}$$

Então:

$$\begin{array}{l} 1,24 \text{ barril} - 1 \text{ ton de Cana} \\ 22.916.763 \text{ barris} - \quad \quad \quad \mathbf{x = 18.481.260,5 \text{ ton de cana}} \end{array}$$

Para suprir totalmente o consumo de gasolina no Estado de Alagoas seria necessário moer a mais 18.481.260,5 ton de cana, o que representa 115,28% da moagem efetiva da safra, que foi de 16.031.000 ton de cana, ou necessitaria comprar em outros estados o valor correspondente a **692.315,4 m³** de etanol.