

BALANÇO ENERGÉTICO DA PRODUÇÃO DE ETANOL E AÇÚCAR NO PIAUÍ A PARTIR DA CANA DE AÇÚCAR

LILIAN DE CASTRO MORAES PINTO^{1*}, MARIA DO SOCORRO LIRA MONTEIRO²

¹ Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Piauí

² Docente do Departamento de Economia e do Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Piauí

*Autora para correspondência: lilian.moraes@gmail.com

Recebido em 21 de março de 2017. Aceito em 20 de dezembro de 2018. Publicado em 31 de julho de 2019.

RESUMO - Avaliou-se energeticamente a produção de etanol e de açúcar originados da cana de açúcar no Piauí. Para tanto, realizou-se pesquisa de campo em usina com destilaria, e com a colheita executada manualmente, de janeiro a dezembro de 2015. Analisou-se o consumo energético referente às fases agrícola, industrial e de distribuição. Verificou-se que o custo energético total da produção agrícola correspondeu a 9.707,54 MJ/ha.ano, sendo que a aplicação de fertilizantes foi a mais onerosa, com 30% do total. Na etapa industrial, o consumo energético foi de 2.131,07 MJ/ha.ano e a energia investida na construção da Usina representou 16% do total. Já na fase de distribuição, o dispêndio energético foi de 1.607,70 MJ/ha.ano. Ressalta-se que o custo energético total foi de 13.446,31 MJ/ha.ano e que a energia fornecida pelo etanol produzido totalizou 138.398,26 MJ, resultando em um balanço energético de 10,3:1 no Piauí em 2015.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência energética. Sustentabilidade ambiental. Energia renovável. ACV. NEB.

ENERGY BALANCE OF ETHANOL AND SUGAR PRODUCTION FROM SUGARCANE IN PIAUÍ

ABSTRACT - This study analyzed the energetic consumption of ethanol and sugar production in Piauí, using sugarcane as raw material. The field research was carried out in a distillery plant, where the harvest was manual, from January to December 2015. The energy consumption related to the agricultural, industrial and distribution phases was assessed. Thus, it was verified that the total energy cost of agricultural production corresponded to 9,707.54 MJ/ha.year, with fertilizer application being the most onerous, with 30% of the total. In the industrial stage, energy consumption was 2,131.07 MJ/ha.year and the energy invested in the construction of the distillery plant represented 16% of the total. In the distribution phase, the energy expenditure was 1,607.70 MJ/ha.year. In addition, the total energy cost was 13,446.31 MJ/ha.year and the energy supplied by the ethanol produced totaled 138,398.26 MJ, resulting in an energy balance of 10.3:1 in Piauí in 2015.

KEYWORDS: Energy evaluation. Environmental sustainability. Renewable energy. LCA. NEB.

BALANCE ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE ETANOL Y AZÚCAR EN PIAUÍ A PARTIR DE LA CAÑA DE AZÚCAR

RESUMEN - Este estudio analizó el consumo energético de la producción de etanol y azúcar derivados de la caña de azúcar en Piauí. Para ello, se realizó una investigación de campo que se llevó a cabo en un molino con una destilería, donde la cosecha fue manual, de enero a diciembre de 2015. Se evaluó el consumo de energía relacionado con las fases agrícola, industrial y de distribución. Así, se verificó que el costo energético total de la producción agrícola fue de 9.707,54 MJ/ha.año, siendo la aplicación de fertilizantes la más costosa, con el 30% del total. En la etapa industrial, el consumo de energía fue de 2.131,07 MJ/ha.año y la energía invertida en la construcción de la Planta representó el 16% del total. En la fase de distribución, el gasto energético fue de 1.607,70 MJ/ha.año. Además, el costo total de energía fue de 13.446,31 MJ/ha.año y la energía suministrada por el etanol producido totalizó 138.398,26 MJ, lo que resultó un balance energético de 10.3:1 en Piauí el 2015.

PALABRAS CLAVE: Eficiência energética. Sostenibilidad ambiental. Energía renovable. ACV. NEB.

INTRODUÇÃO

Os combustíveis derivados do petróleo foram introduzidos para substituir o carvão como fonte de energia, uma vez que a queima desse mineral libera partículas poluentes no ar que representam um sério problema para a saúde da população mundial (Bartra et al. 2007). No entanto, a queima dos combustíveis fósseis aumentou a concentração de Dióxido de Carbono (CO₂) na atmosfera, o qual, juntamente com outros Gases de Efeito Estufa (GEE), tem contribuído para o efeito estufa, que retém uma parcela do calor emitido pelo sol na atmosfera terrestre, mantendo o planeta aquecido. Todavia, de acordo com Szulejko et al. (2017), quando esse fenômeno se intensifica pode gerar uma série de consequências e a mais grave delas é o aumento da temperatura global.

A procura por fontes alternativas de energia, em especial de combustíveis para transporte, que é uma das atividades que mais consome combustíveis fósseis, evidenciou um grupo de líquidos derivados de matéria vegetal, conhecidos como biocombustíveis (Clancy 2008). Desde 1975 o Brasil utiliza o etanol, que é de origem vegetal, como combustível ou sob a forma de uma mistura contendo de 22% a 25% de álcool na gasolina, colocando o país em uma posição favorável internacionalmente, em termos de emissão de CO₂. Assim, o país consagrou-se como o líder mundial no setor de agroenergia, responsável por cerca de 30% da energia ofertada em 2011 (Brasil 2011).

Além do etanol, a cana de açúcar serve como matéria-prima para a produção de açúcar. Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), enquanto na safra 2005/2006 a produção de açúcar foi de 26,42 milhões de toneladas, na safra 2013/2014 foi de 37,87 milhões. Da mesma maneira, a produção de etanol na safra 2005/2006 foi de 16,99 bilhões de litros, ao passo que na safra 2013/2014, cresceu para 27,95 bilhões, expressando um aumento progressivo em ambas produções no Brasil (CONAB 2014). Inclusive, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) estima para a safra de 2019 uma produção de 47,34 milhões de toneladas de açúcar, e de 58,8 bilhões de litros de etanol (Brasil 2017).

Contudo, para que a produção de etanol seja sustentável ao longo dos anos, é necessário que a quantidade de energia fóssil inserida no processo de produção seja inferior à energia fornecida pelo produto. Estudos energéticos permitem estimar a energia diretamente consumida e/ou indiretamente utilizada em um processo produtivo, possibilitando determinar a dependência ou não de fontes de energia não renováveis, que podem configurar-se em fatores limitantes no processo de produção agrícola (Salla e Cabello 2010).

Uma maneira de determinar os impactos ambientais de um sistema produtivo, entre eles o consumo de energia não-renovável, é através de uma Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). No Brasil, a ACV é balizada por normas da série ABNT ISO 14.000. Os princípios gerais, as etapas de definição de objetivos e escopo e a análise do inventário são abordados na NBR ISO 14.040 (ABNT 2014a) e a avaliação de impactos ambientais aliada com a interpretação do ciclo de vida são determinadas pela NBR ISO 14.044 (ABNT 2014b). Trata-se de um método que avalia quantitativamente os impactos ambientais de bens e processos do “berço ao túmulo”, ou seja, ao longo de toda a cadeia de valor (produção e processamento da matéria-prima mais as fases de uso e descarte) (Hellweg e Canals 2014).

Nesse sentido, este trabalho objetivou analisar a energia fóssil consumida durante o processo de produção e de processamento industrial da cana de açúcar no Piauí, e na distribuição do etanol e açúcar produzidos, bem como da energia obtida na forma de etanol, contabilizando os custos energéticos de todas as etapas, a fim de determinar o balanço energético da produção.

MATERIAL E MÉTODOS

A produção de açúcar e de álcool considerada originou-se em usina sucroalcooleira no Estado do Piauí, implantada em 1979, e que possuía uma área total de 16.000 ha no período analisado, englobando territórios piauiense (Teresina, União e José de Freitas) e maranhense (Caxias e Timon), com 12.000 ha de área plantada. A coleta de dados foi referente à safra de 2015 e envolveu pesquisa direta, cuja seleção dos entrevistados ocorreu mediante amostragem não probabilística intencional, e leitura de documentos oficiais da Usina. Esta pesquisa foi aprovada junto ao Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Federal do Piauí, por meio do número 52728115.2.0000.5214.

A análise energética baseou-se na Avaliação do Ciclo de Vida do etanol e do açúcar, em conformidade com as normas ISO 14040 (ABNT 2014a) e ISO 14044 (ABNT 2014b). Descreveu-se separadamente os sistemas de produção de açúcar e de álcool, sucedido da identificação das entradas de energia nos dois processos para quantificar o consumo energético de cada atividade: cultivo da matéria-prima, processamento na usina e distribuição.

Nesta investigação aplicou-se a média padrão de Macedo et al. (2008) para o manejo da cultura da cana de açúcar, de um ciclo de plantio de seis anos, com uma reforma, quatro culturas e cinco cortes. Assim, foram calculados os aspectos referentes ao cultivo da cana de açúcar considerando os dados relativos à implantação da lavoura, por ser uma atividade única para os cinco anos subsequentes de produção, rateados em partes iguais para os seis anos de cultivo. Desse modo, cada ciclo produtivo incorporou um quinto do dispêndio energético correspondente à fase de instalação da lavoura; e mensurou-se o gasto energético com a colheita e manutenção das soqueiras levando em conta a produção de 2015.

Foi feita análise de estatística descritiva sobre os dados coletados, e os cálculos foram realizados através do *software* Microsoft Excel.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O cultivo da cana de açúcar, o processamento na usina e a distribuição dos produtos exigiram energia proveniente de fontes fósseis de carbono. A quantidade de energia fóssil empregada na produção de etanol e de açúcar foi calculada com base nas informações coletadas na Usina, como mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo da safra 2015 na Usina Piauiense

Item	Produção	Percentual
Área colhida (ha)	12.000,00	
Cana total (t)	967.427,41	100,0%
Rendimento médio (Mg/ha)	80,60	
Cana para etanol (t)	152.282,14	15,7%
Etanol total (m ³)	32.679,50	
Cana para açúcar (t)	815.145,27	84,3%
Açúcar (kg)	66.914.600,00	

Fonte: COMVAP (2016).

Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: fase agrícola

O dispêndio energético do processo operacional de cultivo da cana de açúcar relacionado à utilização de maquinário agrícola se baseou em Macedo et al. (2004), que realizaram um levantamento de dados numa usina

onde a colheita ocorria de forma mecanizada, ou seja, diferente do que aconteceu na Usina Piauiense, onde a colheita ocorreu 100% de forma manual. Porém, apesar dessa distinção, reconheceu-se que isso não prejudicou a consistência científica da pesquisa.

Utilizou-se o fator energético de 8,52 MJ/kg determinado por Alves, Boddey e Urquiaga (2009) para a energia empregada na fabricação e manutenção das máquinas, como tratores e implementos agrícolas que operam na produção da cana de açúcar. Além disso, o custo energético da aplicação de calcário, fósforo (P), potássio (K) e nitrogênio (N) para a safra de 2015 foi calculado fundamentando-se no mesmo estudo, que estimou que a cada novo plantio são adicionadas 2t de calcário/ha, com um custo energético de 1,31 MJ/kg, e que a aplicação recomendada era de 16 kg/ha.ano de pentóxido de fósforo (P_2O_5) e 83 kg/ha.ano de óxido de potássio (K_2O), compostos que apresentam os valores de 3,19 e 5,89 MJ/kg como fatores energéticos, respectivamente. Quanto ao uso de fertilizantes nitrogenados, considerou-se a aplicação usual de 20 quilos no plantio e 80 a 100 quilos nas socas, resultando numa média ponderada anual ao redor de 57 quilos de N por hectare, e o fator energético de 54 MJ/kg.

Adicionalmente, calculou-se o consumo energético do uso de herbicidas e inseticidas. Para tanto, baseou-se no trabalho de Alves, Boddey e Urquiaga (2009), que definiram um dispêndio energético de 452 MJ por kg de ingrediente ativo de herbicida, e na obra de Pimentel (1980), que estipulou um custo energético dos inseticidas utilizados na fase agrícola de produção de cana de açúcar de 363,83 MJ/kg. Levou-se em consideração a estimativa do BNDES (2008) de aplicação de 2,20 kg de herbicida e 0,12 kg de inseticidas por hectare.

Para precisar o dispêndio de energia resultante da queima de óleo diesel, primeiramente, calculou-se o poder calorífico do combustível segundo BEN (2015), que foi de 35,52MJ/L. Reafirma-se a utilização de Alves, Boddey e Urquiaga (2009) para o cálculo do consumo de energia, na forma de óleo diesel combustível, em operações agrícolas para renovação e manutenção do canavial. Em média, as máquinas consumiram 22,3 litros de óleo diesel por hectare, com consumo de 790,80 MJ/ha de energia. Em função da produtividade agrícola da Usina estudada em 2015 ter sido de 80,60 megagramas (Mg) de cana por hectare cultivado, foi possível determinar o consumo energético decorrente da queima de óleo diesel para o transporte da cana na safra do referido ano. Considerou-se que o MAPA (Brasil 2013) estimou que a distância média percorrida pela cana do ponto de corte até a Usina no Piauí seria de aproximadamente 17 km, e que segundo COMVAP (2015), o trajeto geralmente era realizado em caminhões com capacidade média de 28 toneladas de cana, com rendimentos médios de 1,6 km/litro de óleo diesel carregado e 3 km/litro quando vazio. Outrossim, ressalta-se o consumo de diesel no transporte de insumos para a usina e lavoura, que foi de 206 MJ/ha.ano, visto que Boddey et al. (2008) calcularam que o combustível necessário para transportar anualmente tais produtos era 5,8 L/ha.

Com relação ao consumo de energia nos trabalhos manuais no cultivo da cana de açúcar, utilizou-se como dados básicos para o cálculo a energia consumida pelo trabalho rural (kcal/dia de trabalho) de 14.975 kcal/dia, obtida por Giampietro e Pimentel (1990) e a estimativa de Pimentel e Patzek (2007) de que em todo o processo agrícola da produção da cana são empregues 128 horas-homem por hectare em um ano. A energia consumida pela aplicação das sementes foi calculada segundo a metodologia proposta por Pimentel e Patzek (2007), que outorgam 2,0% de todas as entradas agrícolas como a energia consumida na aplicação das sementes.

Para a realização da irrigação, a Usina contou com motores elétricos e pivôs centrais, cujas bombas e deslocamento obtiveram energia proveniente da queima do bagaço. Portanto, a irrigação não foi contabilizada como atividade consumidora de energia.

Sendo assim, inferiu-se que o total de energia fóssil incorporada na fase agrícola do sistema produtivo de açúcar e de etanol em 2015 no Piauí foi 9.707,54 MJ/ha.ano. Ressalta-se que tal montante abrangeu a totalidade de energia consumida pela mão de obra humana e pela queima de óleo diesel, resultante do transporte de insumos destinados à lavoura e à usina. Ao mesmo tempo, identificou-se que os elementos de maior consumo energético foram a utilização de compostos nitrogenados na fertilização, o transporte da cana da lavoura até a usina e o uso de maquinário agrícola.

Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: fase industrial

O processamento do etanol e do açúcar na usina utiliza grande quantidade de energia. Nesse sentido, destaca-se que a Usina Piauiense fez uso da queima do bagaço da cana para gerar vapor, que alimentou caldeiras de alta pressão, abastecendo a usina de energia gerando, inclusive, um excedente que pôde ser exportado para a rede da Eletrobrás. Deste modo, não foi necessário o uso de energia fóssil para alimentar o processamento industrial. Apesar disso, existiu um custo energético fundamental, o da edificação da usina, associado ao material usado nas construções e nos equipamentos.

Dessa maneira, aplicou-se a metodologia de cálculo do uso de energia fóssil incorporada na edificação de Pimentel e Patzek (2007), considerando a energia em cimento igual a 6,61 MJ/kg, a energia em aço igual a 30 MJ/kg e a energia em aço inoxidável igual a 71,7 MJ/kg. Além disso, o cálculo do gasto energético do aço investido na usina supõe que um terço da massa total do aço encontra-se disposta como equipamentos e que o restante conforma-se na sua estrutura. Segundo Boddey et al. (2008), a construção de uma usina tem 50 anos de vida útil, e para tanto faz-se necessária uma massa total de 1.600 toneladas de cimento.

Conforme a metodologia descrita por Alves, Boddey e Urquiaga (2009), considerou-se 225,3 MJ/ha.ano de energia para a retificação de etanol hidratado e uma energia consumida proveniente dos insumos da usina de 487,6 MJ/ha.ano.

Logo, a etapa industrial da produção de açúcar e etanol pela Usina estudada em 2015 teve um custo energético de 2.131,07 MJ/ha.ano. Assim, o impacto do uso de fontes renováveis no montante final de energia necessária para processar um hectare de cana de açúcar foi alto e os processos industriais da Usina analisada configuraram-se em alternativa vantajosa para o meio ambiente, por requisitar menor entrada de energia fóssil, não-renovável.

Energia fóssil empregada na produção de etanol e açúcar: distribuição

Em 2015 a Usina abasteceu Teresina, Fortaleza/CE, São Luís/MA e Guamaré/RN com etanol, e essa distribuição teve consumo energético, pois fez uso de caminhões-tanque com capacidade de 3.000, 5.000 e 15.000 L, cujo rendimento médio de combustível é 2,5 km/L, que realizaram um trajeto usina-posto de abastecimento com distância média de 360 km, no percurso ida e volta. Da mesma maneira, toda a produção de açúcar do Piauí foi direcionada para os estados do Piauí, do Maranhão e do Ceará. O transporte do açúcar foi realizado por caminhões com capacidade para 30 toneladas e rendimento de 3,5 km/L, em um percurso médio de 360km de ida e volta (COMVAP 2016). Sendo assim, o montante de energia consumida na etapa de distribuição de açúcar e etanol foi de 1.607,70 MJ/ha.ano.

Esta investigação detectou a quantidade total de energia fóssil envolvida no sistema produtivo, como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2. Consumo de energia fóssil pela Usina Piauiense em 2015

ITEM	Entradas		Energia	
	Quantidade Básica	Unidade Básica	Fator Energético MJ/Unid. Bas.	MJ/ha.ano
Máquinas	136,6	kg	8,52	1.163,83
Óleo diesel	22,26	L	35,52	790,80
Calcário	333,00	kg	1,31	436,20
Fósforo	16,00	kg	3,19	51,04
Potássio	83,00	kg	5,89	488,87
Nitrogênio	57,00	kg	54,00	3.078,00

Herbicidas	2,20	kg	451,66	994,40
Inseticidas	0,12	kg	363,83	43,66
Sementes ¹	2000	kg	-	190,34
Transporte de insumos	5,80	L	35,52	206,00
Transporte da cana	35,50	L	35,52	1.260,90
Cimento na construção	8,32	kg	6,61	54,99
Aço leve (estrutural)	20,30	kg	30,00	609,00
Aço leve em equipamento	18,20	kg	30,00	546,00
Aço inoxidável	2,90	kg	71,70	208,18
Retificação até 99.5% ²	-	-	-	225,30
Reagentes químicos usados na usina ²	-	-	-	487,60
Mão-de-obra	128,00	h	7,84	1.003,50
Distribuição álcool	26,14	L	35,52	928,60
Distribuição açúcar	19,11	L	35,52	679,10
Total				13.446,31

Notas: ¹ Estimado como correspondente a 2,0% de todas as entradas agrícolas.

² Alves, Boddey e Urquiaga (2009).

A Tabela 2 resume os processos responsáveis pelo consumo de energia do cultivo da cana de açúcar na safra de 2015, cujo montante distinguiu-se no custo energético das etapas produtivas de açúcar e de etanol, como exposto na Tabela 3.

Tabela 3. Consumo energético das etapas produtivas de açúcar e de etanol em 2015 na Usina Piauiense

Etapa	Entrada de energia (MJ/ha.ano)	Proporção
Fase agrícola	9.707,54	72,2%
Fase industrial	2.131,07	15,8%
Distribuição	1.607,70	12,0%
Total	13.446,31	100,0%

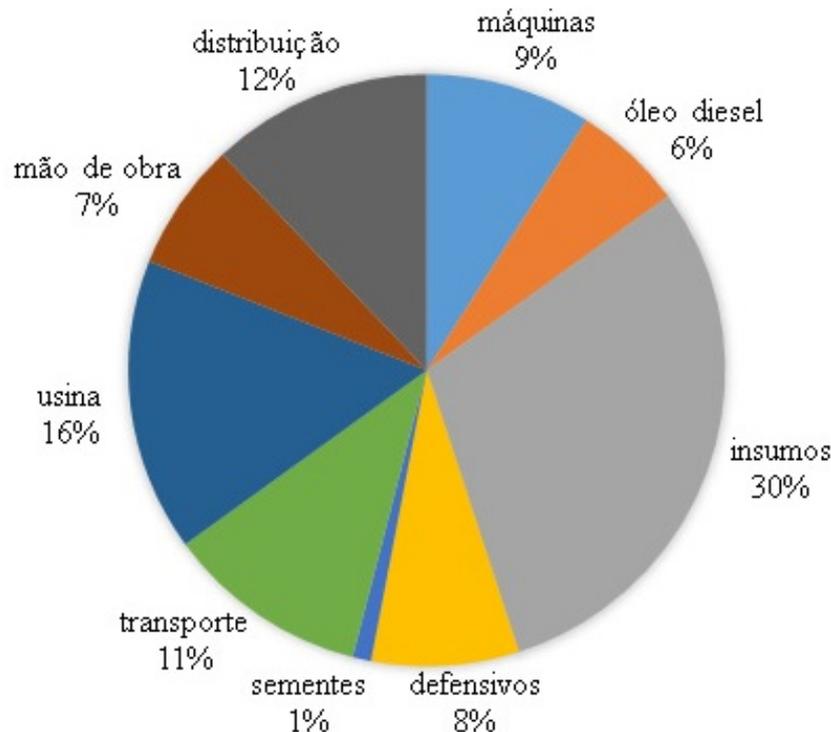
Por meio da Tabela 3, observou-se a predominância do gasto de energia fóssil nas atividades executadas durante a fase agrícola. Todavia, reconheceu-se que esse montante foi superestimado, em virtude da Usina ter utilizado fertirrigação com vinhaça diluída em água de lavagem da cana e aplicação de torta de filtro, cuja riqueza organo-mineral é elevada, e por isso substituiu parcial ou totalmente a adubação química, tornando menor a necessidade do aporte de N, P e K.

Mesmo assim, o valor de 13.446,31 MJ/ha.ano foi inferior ao encontrado por Salla e Cabello (2010), de 14.370,90 MJ/ha.ano, que analisaram uma usina típica da região Centro/Sul, na qual a colheita era mecanizada e o bagaço não era usado para abastecer a indústria. Portanto, esse cenário indicou que a atividade da Usina no Piauí, considerando a demanda por energia não-renovável, se assemelhou à da usina da região preponderante do Brasil, que apresenta maior desenvolvimento tecnológico e investimentos, tanto na parte agrícola quanto na industrial.

Consumo de energia não-renovável

A Figura 1 destaca a relevância do consumo de energia das atividades do ciclo de vida do etanol e do açúcar.

Figura 1. Uso de energia fóssil na produção de etanol e açúcar por atividade na Usina Piauiense em 2015.



Percebe-se a predominância da aplicação de fertilizantes como consumidora de 30% da energia total (Figura 1), derivada principalmente da energia investida na produção desses insumos, seguida pela etapa de processamento industrial, com 16%, durante o qual a energia é consumida majoritariamente no processo de produção de materiais de construção.

Comparativamente ao estudo de Salla et al. (2009), que investigaram duas usinas paulistas e obtiveram um consumo total de 14.370,9 MJ/ha.ano na etapa agrícola e 139.532,2 MJ/ha.ano na industrial, o gasto energético da Usina Piauiense durante igual período foi inferior, devido à utilização do bagaço da cana para abastecer a Usina de energia, o que redundou em 2.131,07 MJ/ha.ano.

Adicionalmente, sabendo que o processo produtivo foi responsável pelo consumo de 13.446,31 MJ/ha em 2015 e que cada hectare originou 6.228,00 L de etanol, calculou-se a demanda energética de 2,16 MJ por litro de álcool. O custo energético encontrado nesta dissertação aproximou-se do apresentado por Salla et al. (2009), de 2,0 MJ/L, e por Urquiaga, Alves e Boddey (2005), de 2,7 MJ/L, em relação às operações agrônômicas de produção de cana de açúcar.

Todavia, Salla et al. (2009) calcularam uma demanda de 19,4MJ/L no processamento industrial, resultando em um custo energético total de 21,4MJ/L. A produção no Piauí em 2015 requereu menor quantidade de energia fóssil por ter usado o bagaço da cana para ativar a Usina. Portanto, o investimento de *Megajoules* no sistema produtivo indica que o cultivo e o processamento da cana de açúcar nesta Usina foi potencialmente sustentável.

Rendimento energético líquido

Salienta-se que o rendimento energético líquido, expresso em MJ por hectare num período de um ano, configura-se na diferença entre a energia fornecida e a energia consumida no processo, ou o uso de recursos, o qual permite avaliar a eficiência energética da cultura considerada. Para tanto, calculou-se a quantidade de energia fornecida pelo etanol produzido na Usina analisada em 2015, como exposto na Tabela 4.

Tabela 4. Saída de energia do sistema produtivo da Usina Piauiense em 2015.

Item	Cálculo	Quantidade
a. Densidade do etanol anidro (kg/m ³)		791,00
b. Densidade do etanol hidratado (kg/m ³)		809,00
c. Energia contida no etanol anidro (kcal/kg)		6.750,00
d. Energia contida no etanol hidratado (kcal/kg)		6.300,00
e. Energia contida no etanol anidro (MJ/kg)	$c \div 238,84$	28,26
f. Energia contida no etanol hidratado (MJ/kg)	$d \div 238,84$	26,38
g. Poder calorífico do etanol anidro (MJ/L)	$(e \times a) \div 1000$	22,35
h. Poder calorífico do etanol hidratado (MJ/L)	$(f \times b) \div 1000$	21,34
i. Produção de etanol total (L/ha) ¹		6.228,00
j. Energia fornecida pelo etanol (MJ/ha) ²	$i \times g$	138.398,26

Notas: ¹ Considerou-se a produtividade de 80,6 TC/ha e o rendimento de 77,27 L/TC.

² A produção de etanol anidro correspondeu a cerca de 90% da produção total de etanol, por isso considerou-se o seu poder calorífico para os cálculos.

Conforme a Tabela 4, detectou-se que cada hectare cultivado com cana de açúcar direcionado à produção de etanol, produziu 138.398,26 MJ. Entretanto, como exposto na Tabela 2, cada hectare demandou 13.446,31 MJ, resultando em um rendimento energético líquido de 124.951,95 MJ/ha.ano. Sendo assim, o rendimento energético líquido da produção sucroalcooleira do Piauí foi positivo, pois a energia fornecida pelo sistema foi superior à consumida. Ademais, a atividade prevalecente na Usina no ano analisado foi produção de açúcar, que não gera energia. Mesmo assim, o balanço energético foi favorável. Destaca-se, também, que ocorreu geração de energia via combustão do bagaço de cana, o que redundou na geração de 10.727,644 MW de energia elétrica, em 2015.

Todavia, o rendimento energético líquido da Usina Piauiense foi inferior ao encontrado por Urquiaga, Alves e Boddey (2005), que pesquisaram em São Paulo, onde a produtividade média de cana de açúcar era de 84 Mg/ha e a produção de etanol de cana foi próxima de 86 litros/TC. Utilizando um valor calorífico de etanol de 22,3 MJ/L, o montante foi de 141.120 MJ/ha.ano. Logo, infere-se que o resultado inferior deveu-se tanto a um menor rendimento na produção de cana por hectare, quanto na produção de etanol por tonelada de cana no Piauí, derivado das distintas condições de qualidade de solo e de clima.

Eficiência energética

A eficiência energética do sistema foi definida através da razão entre a quantidade de energia oferecida e a consumida, ou razão saída/entrada. Dessa forma, quanto maior o valor, maior o rendimento em relação à energia investida, ou consumida e, portanto, maior a eficiência do sistema (Macedo et al. 2008). Nessa perspectiva, apresenta-se na Tabela 5 a eficiência energética do etanol de cana de açúcar produzido pela Usina estudada em 2015.

Tabela 5. Eficiência energética do etanol de cana de açúcar da Usina Piauiense em 2015.

Item	Cálculo	Quantidade
a. Demanda de energia do sistema produtivo (MJ/ha.ano)		13.446,31
b. Oferta de energia do sistema produtivo (MJ/ha.ano)		138.398,26
c. Eficiência energética	$b \div a$	10,30

Consoante a Tabela 5, verificou-se que o valor de eficiência energética foi 10,30, o que revelou a viabilidade do sistema como fonte de energia, ficando acima dos valores encontrados por Boddey et al. (2008), de 9,0 e por Urquiaga, Alves e Boddey (2005), de 8,0. Assim, no sistema produtivo de açúcar e de álcool analisado no Piauí, para cada 1,0 MJ de energia fóssil consumida se produziu 10,3 MJ de energia renovável, na forma de etanol da cana. Acrescenta-se que esse valor diferiu do valor internacionalmente reconhecido para o balanço energético (NEB) do etanol, que é de 9, e estava acima dos valores encontrados por Leite e Cortez (2013) para etanol de outras biomassas: o álcool de milho (NEB entre 1,0 e 1,4), e de beterraba (NEB aproximadamente 2).

Sendo assim, mesmo que a energia fóssil tenha sido direcionada majoritariamente para a produção de açúcar, o balanço energético da produção de etanol da cana na Usina do Piauí foi superior ao de outras biomassas. Tal performance se deveu, principalmente, à eficiência na utilização de subprodutos industriais, pois derivado do bagaço ter sido usado para gerar energia, não houve maior demanda por combustíveis fósseis na fase industrial, o que redundou em grande benefício, não apenas para o balanço energético, mas sobretudo para as emissões de GEE associadas à produção de açúcar e etanol.

CONCLUSÃO

Este estudo identificou que a produção de açúcar e de etanol no Piauí apresentou balanço energético positivo, o que é considerado potencialmente sustentável do ponto de vista ambiental. Sendo assim, reconheceu-se que o etanol produzido no Estado pode ser uma alternativa energética favorável, principalmente por utilizar o bagaço da cana para fornecer energia para o processamento industrial. Inclusive, evidencia-se a necessidade de mais pesquisas sobre o uso do bagaço da cana de açúcar na cogeração de energia para validação dos parâmetros utilizados.

AGRADECIMENTOS

As autoras agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Piauí (FAPEPI) pelo apoio financeiro e à Usina estudada e seus funcionários, pelo acolhimento e transparência.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2014a. **NBR ISO 14040** - Gestão ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Princípios e estrutura. Rio de Janeiro.
- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 2014b. **NBR ISO 14.044** – Gestão Ambiental - Avaliação do Ciclo de Vida - Requisitos e Orientações. Rio de Janeiro.

- Alves BJR, Boddey RM e Urquiaga S. 2009. **Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana de açúcar produzido no Brasil**. Circular Técnica, EMBRAPA, Seropédica - RJ, 13 p.
- Bartra J et al. 2007. Air pollution and allergens. **Journal of investigational allergology and clinical immunology**, 17(2): 3-8.
- BEN. 2015. **Balanço Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia, Brasília, 155p.
- BNDES. 2008. **Bioetanol de cana de açúcar** - Energia para o desenvolvimento sustentável. CEPAL, Rio de Janeiro, 1: 72-76.
- Boddey RM et al. 2008. **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems**. Bio-ethanol production in Brazil. In: PIMENTEL, D. (Ed.), New York, USA, Springer, p. 321-356. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8654-0>
- Brasil. MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2011. **Brasil é líder mundial no setor de agroenergia**. Brasília: MAPA. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2011/12/brasil-e-lider-mundial-no-setor-de-agroenergia>>. Acesso em: 10 set. 2015.
- Brasil. MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2013. **Perfil do setor do açúcar e do álcool no Brasil**. Edição para a safra 2011-2012. Brasília, 5: 1-88.
- Brasil. MINISTÉRIO DE AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. 2017. **Projeções do Agronegócio Brasil 2011-2012 a 2021-2022**. Brasília: MAPA. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/assuntos/politica-agricola/todas-publicacoes-de-politica-agricola/projecoes-do-agronegocio/projecoes-do-agronegocio-brasil-2011-2012-a-2021-2022-sintese.pdf/view>>. Acesso em: 12 set. 2015.
- Clancy JS. 2008. Are biofuels pro-poor? Assessing the evidence. **The European journal of development research**, 20(3): 416-431. <https://doi.org/10.1080/09578810802245618>
- COMVAP. 2015. Comparativo de safras: resumo anual. **Relatório**. Teresina.
- COMVAP. 2016. **Relatório acerca da safra 2015**. Teresina.
- CONAB. COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. 2014. Séries históricas de área plantada, produtividade e produção, relativas às safras 2005/06 a 2014/15 de cana-de-açúcar. **Relatório**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&ordem=produto>> (acesso em: 24 fev. 2015).
- Giampietro M e Pimentel D. 1990. Assessment of the energetics of human labor. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 32: 257-272.
- Hellweg S e Canals LM. 2014. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. **Science**, 344(6188): 1109–1113. <https://doi.org/10.1126/science.1248361>
- Leite RC e Cortez LAB. 2013. **O etanol combustível no Brasil**. Disponível em: <https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/etanol3_000g7gq2cz702wx5ok0wtedt3xdrmfk.pdf> (acesso em 26 fev. 2016).
- Macedo IC et al. 2004. **Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil**. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 37 p.

Macedo IC et al. 2008. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, 32(7): 582-595. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2007.12.006>

Pimentel D. 1980. **Handbook of energy utilization in agriculture**. 487 p.

Pimentel D e Patzek T. 2007. Ethanol production: energy and economic issues related to U.S. and Brazilian sugarcane. **Natural Resources Research**, 16(3): 235-242. <https://doi.org/10.1007/s11053-007-9049-2>

Salla DA e Cabello C. 2010. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca, cana-de-açúcar e milho. **Energia na Agricultura**, 25(2): 32-53. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2010v25n2p32-53>

Salla DA et al. 2009. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, 39(8): 2516-2520.

Szulejko JE, Kumar P, Deep A e Kim KH. 2017. Global warming projections to 2100 using simple CO₂ greenhouse gas modeling and comments on CO₂ climate sensitivity factor. **Atmospheric Pollution Research**, 8(1): 136-140. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.08.002>

Urquiaga S, Alves BJR e Boddey RM. 2005. Produção de biocombustíveis: A questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, ano XIV – n. 1.