

# ENERGY RETURN ON INVESTMENT (EROI) APLICADO AO FLUXO DE PRODUÇÃO DO ETANOL DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA UMA USINA AUTÔNOMA<sup>1</sup>

Julio Cesar Marques; Sérgio Ricardo Lourenço

## RESUMO

Nos últimos anos, a intensificação da utilização por fontes renováveis de energia se apresenta em destaque em todas as agendas de países desenvolvidos e em desenvolvimento, o principal motivo desta busca por fontes renováveis se caracteriza na busca por uma redução da dependência de combustíveis fósseis. Os fatores que influenciam por uma intensificação no uso de fontes renováveis se apresentam basicamente em função da redução da emissão de gases de efeito estufa, motivos geopolíticos e segurança energética. Países membros da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) apresentam um crescimento significativo na utilização de biocombustíveis em substituição aos combustíveis derivados do petróleo, predominantemente no Estados Unidos da América (EUA) e na União Europeia (UE). No momento o Brasil busca a adesão a OCDE, entretanto deve ser destacado que foi o pioneiro no desenvolvimento de um setor nacional de biocombustíveis economicamente competitivo, baseado principalmente na cana-de-açúcar. O etanol de cana está se tornando cada vez mais importante para a matriz energética mundial. Isso se deve ao seu caráter renovável e ao seu uso em larga escala no setor de transportes, competindo diretamente com combustíveis fósseis, principalmente gasolina e diesel. Os principais problemas competitivos entre os biocombustíveis e os correspondentes combustíveis fósseis são: custos de produção; logística de distribuição e eficiência no uso final, desta forma o problema a ser tratado neste artigo é o de determinar o EROI – Energy Return on Investment no fluxo de produção de etanol de cana-de-açúcar de primeira geração, com base na relação entre a matéria-prima desta fonte de energia e na medição do consumo energético no fluxo de energia, em termos de entrada e saída de energia de cada limite de controle. Análise realizada neste artigo para a obtenção do EROI no fluxo de produção do etanol apresenta resultados satisfatórios, demonstrando que o valor do EROI se encontra entre 6,11 a 4,77.

---

<sup>1</sup> Artigo originalmente publicado em MR Estudos v. 1, n. 2, 11/11/2020. DOI 10.29327/216332.1.2.3

## INTRODUÇÃO

O etanol brasileiro, feito de cana-de-açúcar, tem sido apontado como o substituto mais eficiente da gasolina disponível comercialmente, entretanto como acontece com qualquer outro produto bioenergético, a produção do etanol requer insumos de combustíveis fósseis, desta forma, os supostos benefícios da segurança energética e da mitigação de carbono dependem do quanto esses insumos são capazes de gerar um rendimento substancial.

O fluxo de produção do etanol de cana-de-açúcar se caracteriza por possuir quatro etapas para estudos energéticos, denominados: etapa cana-de-açúcar; etapa agrícola; etapa industrial e etapa de distribuição.

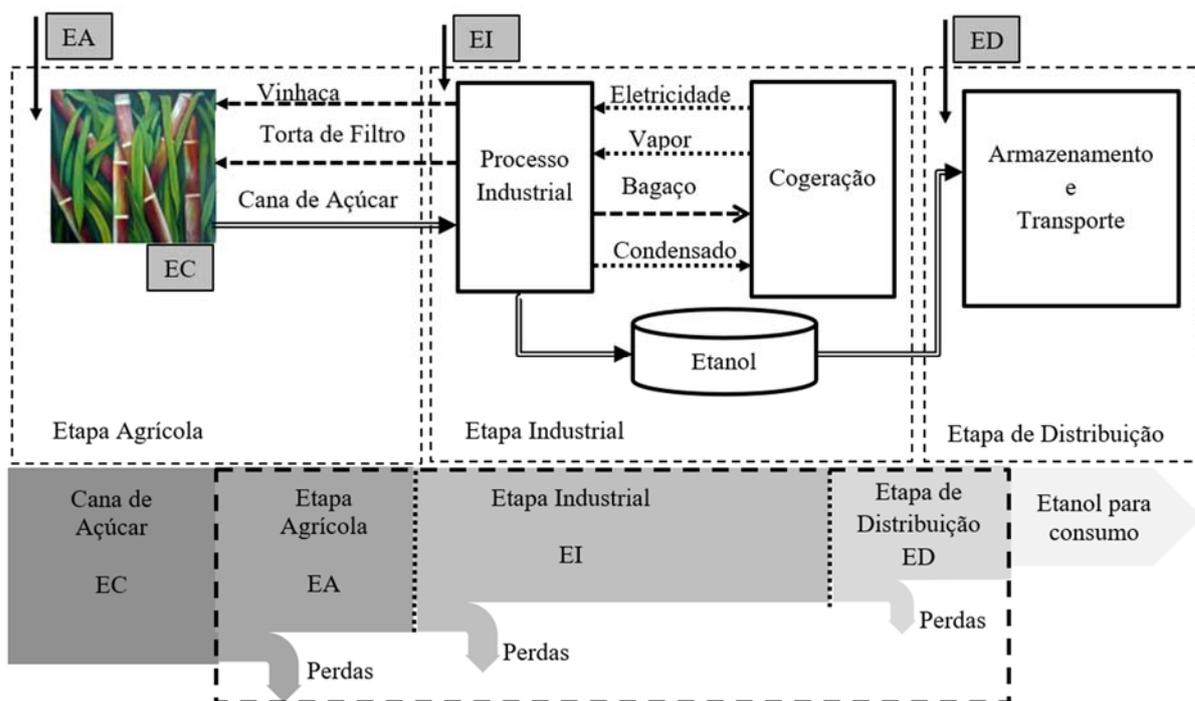
A etapa cana-de-açúcar (EC) refere-se à energia disponível na própria cana de açúcar, a etapa agrícola (EA) trata do consumo energético que ocorre nesta etapa que envolve as fases de preparo do solo e trato culturais, colheita e transporte até a usina, estas atividades são caracterizadas por alto consumo de combustíveis fósseis que implica em alto consumo de energia, dentre as atividades de maior consumo de energia deve ser destacado a atividade de colheita mecanizada. A etapa industrial (EI) retrata o consumo energético durante a fase de produção do etanol na usina sucroalcooleira ou também chamada de indústria, que compreende desde a atividade de recebimento e preparo da cana até a obtenção do etanol. Nesta etapa se destaca o processo de moagem, que gera como resíduo o bagaço de cana, resíduo utilizado no processo de cogeração de energia nas usinas produtoras de etanol, processo este responsável por gerar energia elétrica e térmica para o processo produtivo, disponibilizando o excedente de energia elétrica para ser comercializado, junto as distribuidoras. E por fim a etapa de distribuição (ED), diz respeito ao consumo energético para distribuição do etanol, ou seja, o transporte e armazenamento do etanol da usina produtora até os pontos de consumo, porém, deve ser ressaltado que no Brasil esta atividade ocorre basicamente por meio de modais rodoviários.

O detalhamento do fluxo de produção do etanol está associado ao tipo de planta que irá processar a cana-de-açúcar, existem três principais tipos de plantas produtoras de açúcar e etanol a partir da cana de açúcar no Brasil: usinas produtoras de açúcar, destilarias autônomas para produção de apenas etanol e usinas integradas para a produção conjunta de açúcar e etanol, na Figura 1 observa-se o fluxo de produção do etanol de primeira geração em uma usina autônoma de forma simplificada para o problema a ser tratado neste artigo, incluindo os limites de cada etapa para o estudo energético.

## JUSTIFICATIVA

A justificativa deste artigo é baseada no consumo de energia para a produção de etanol, relacionando a energia disponível na cana de açúcar e no consumo de energia necessário para a produção de etanol. Conforme descrito por Bermann (2009) com a atual diversidade de cultivares de cana utilizado para produção de etanol em vários países produtores, é necessário medir comparativamente as características do processo de produção de cada uma dessas matérias-primas. Um dos parâmetros que podem ser analisados é a relação entre a quantidade de energia fóssil gasta em toda a cadeia produtiva do etanol e a quantidade de energia renovável obtida, um estudo energético difere-se da análise econômica, pois permite a determinação da energia consumida, direta ou indiretamente, utilizada em um processo de produção, possibilitando determinar se depende ou não de fontes de energia não renováveis que podem constituir em fatores limitantes no processo de produção (SALLA et al., 2009).

**Figura 1: Fluxo de produção do etanol de cana-de-açúcar**



Com a busca por um maior rendimento agrícola o uso de insumos industriais, como combustíveis fósseis e equipamentos agrícolas e industriais, torna-se mais intensa a demanda por recursos energéticos, a análise do fluxo de energia permite a determinação do consumo de energia relacionado à quantidade de insumos utilizados e à eficiência energética no processo de produção. O uso desse tipo de análise na agricultura e na indústria permite a determinação

de “Gargalos Energéticos”; portanto, a análise dos fluxos de energia permite o uso de uma decisão de gestão baseada na economia de recursos energéticos, que pode ser refletida em melhores resultados econômicos e ambientais (ANDREA et al., 2014).

Ramirez Triana (2011) descreve uma comparação da análise energética do fluxo de produção de etanol, realizada por 4 grupos de pesquisadores: Boddey et al., (2008), Macedo; Seabra; Silva, (2008), Oliveira; Vaughan; Rykiel, (2005) e Pimentel; Patzek. (2007); em função da energia disponível no etanol de cana e do consumo de energia no processo de produção dessa energia e, assim, apresentam o balanço energético do etanol. No entanto, alguns desses valores não mostram o consumo de energia para todas as etapas envolvidas no processo, ou seja, não incluem o ciclo de vida do combustível entre a produção da matéria-prima e a disponibilidade do produto ao consumidor final (Well-To-Tank). Por outro lado, vale ressaltar que os estudos apresentados não relacionam a quantidade de energia necessária, disponível na matéria-prima da fonte de energia a ser processada, para obter uma unidade de energia da fonte final de energia, neste caso o etanol. Assim, este artigo se justifica por apresentar o EROI do fluxo de produção de etanol em função da energia contida em uma certa quantidade de massa de cana-de-açúcar disponível para processamento e no consumo de energia necessário para realizar esse processamento, desde a etapa agrícola até a etapa de distribuição do etanol para consumo, obtendo assim o EROI (CAPELLÁN-PÉREZ; DE CASTRO; MIGUEL GONZÁLEZ, 2019).

## **METODOLOGIA**

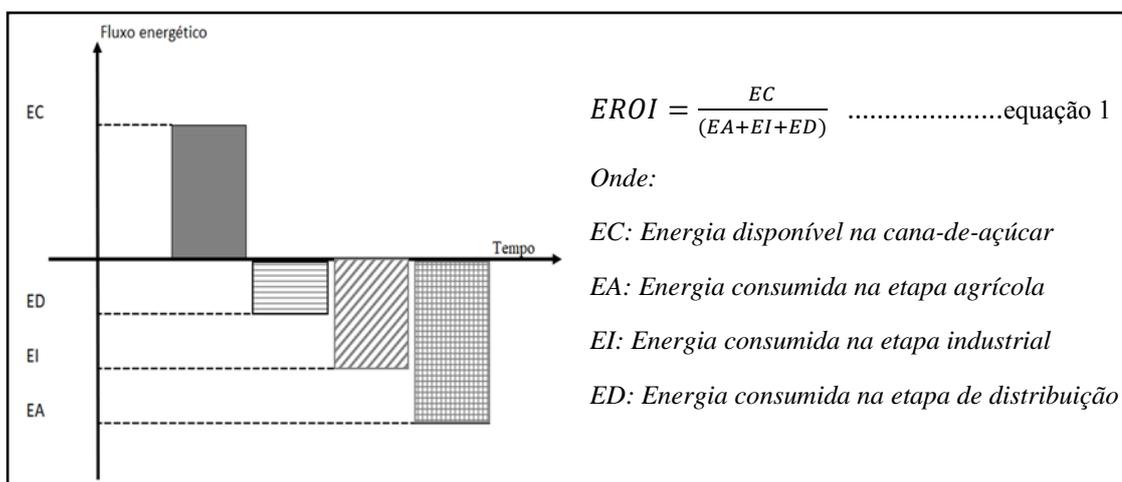
Para o setor sucroalcooleiro, segundo Cortez (2010), o uso da biomassa como energia precisa considerar o balanço energético da cadeia produtiva para sua produção e subsequente transformação. A análise energética da biomassa por meio da energia primária contida na cana-de-açúcar pode ser uma alternativa interessante ao uso de bagaço, palha ou sacarose de forma independente, estes tipos de estudos são recomendados com o objetivo de desenvolver ou atualizar técnicas que permitam o uso mais eficiente da energia primária da cana-de-açúcar.

No entanto, como descrito por Seabra et al. (2011), o Brasil não possui um banco de dados para análise energética, que pode ser utilizado em todo o país e/ou regionalmente para o setor sucroenergético, existem apenas estudos específicos envolvendo algumas plantas produtoras, que prevalecem até os dias atuais. Leal; Walter; Seabra (2013) descreve que, para a indústria da cana-de-açúcar, alguns especialistas da indústria passaram a considerar a cana-de-açúcar como matéria-prima energética, e não como alimento, de modo que outras

características relacionadas ao conteúdo total de energia primária se tornaram importantes parâmetros de qualidade. A determinação do EROI ocorre por meio da razão entre a energia disponível na cana-de-açúcar e pela soma da energia consumida nas etapas agrícola, industrial e de distribuição, conforme observa-se na Figura 2 (FENG et al., 2018).

As fronteiras físicas do sistema referem-se às etapas do ciclo de vida do produto, com seus processos característicos, que serão consideradas no estudo, nesta pesquisa o que está considerado refere-se as fronteiras físicas “Well-To-Tank” que abrange o ciclo de vida do combustível entre a produção da matéria-prima e a disponibilização do produto final para o consumidor.

**Figura 2: Esquema cartesiano para o EROI**

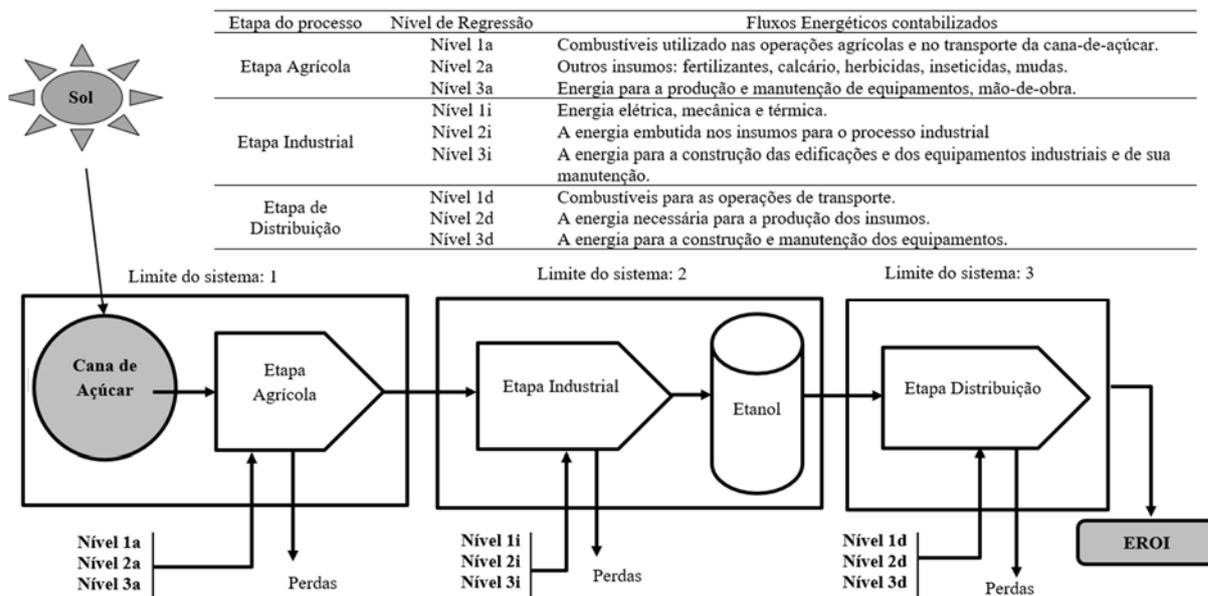


Fonte: Murphy et al., (2011)

Os níveis de regressão da análise energética referem-se à extensão dos fluxos energéticos contabilizados dentro das fronteiras físicas do sistema e são caracterizados conforme descrito na Figura 3.

A contabilização energética do fluxo de produção do etanol foi realizada seguindo os seguintes passos: a) levantamento e validação dos dados de produtividade dos canaviais; b) mensurar a energia disponível na cana de açúcar em função da produtividade; c) mensurar o consumo energético do processo por nível de regressão; e d) mensurar o EROI do fluxo de produção do etanol.

**Figura 3: Contabilização energético do fluxo de produção do etanol**



Fonte: Capaz (2009) e Macedo et al. (2004)

## Resultados e discussão

A amostra avaliada compreende a produção de cana-de-açúcar para o período de 2007/2008 a 2017/2018, a validação dos dados, ocorreu por meio de outliers para uma amostra avaliada com 66 pontos que apresenta uma média da amostra calculada de 78,74 tc/ha, com um valor de limite superior de 120,94 tc/ha e um valor de 36,43 tc/ha para o limite inferior. Apenas um valor se apresenta fora dos limites superior e inferior, este valor é de 131,02 tc/ha, referente ao 1º corte da safra de 2016/2017, a nova média da amostra calculada para o período em análise excluindo este ponto é de 77,94 tc/ha, o que representa uma redução de 1,06% ou 0,8 tc/ha, em relação a média calculada considerando os 66 pontos analisados o que não apresenta variação significativa, o que torna a mostra de dados válida.

Para o período em análise a cana-de-açúcar apresenta uma produtividade média máxima de 89,74 tc/ha e uma produtividade média mínima de 70,03 tc/ha. A quantidade de energia primária contida na cana-de-açúcar, se apresenta em um intervalo de 8368,85 MJ/tc e 6598,56 M/tc, em relação a energia contida nos componentes da cana-de-açúcar, estes também se apresentam em intervalos, para a sacarose o intervalo está entre 2827,32 MJ/tc e 2229,24 MJ/tc, para as fibras o intervalo está entre 2714,22 M/tc e 2140,07 MJ/tc e por fim para palha este intervalo está entre 2827,30 MJ/tc e 2229,30 MJ/tc.

O consumo energético na etapa agrícola é de 266,92 MJ/tc a 219,30 MJ/tc, para este consumo energético o nível 1a se apresenta com o maior consumo de energia, este valor

corresponde a 46,17% do total de energia consumida, o consumo de energia no nível 2a corresponde a 42,87% e o nível 3a que corresponde a 10,95% do total de energia consumida.

Na etapa industrial os valores de energia atendem a demanda operacional da usina, neste estudo os valores adotados como dados operacionais para uma usina autônoma expressam uma capacidade de processamento de 2.000.000 tc/ano; capacidade de moagem de 500 tc/h e 4000 h/ano de operação por safra o que representa a produção de 80,4 l/tc equivalente a 1885,15 MJ/tc de etanol anidro, ou a obtenção de 85,47 l/tc equivalente a 1927,38 MJ/tc de etanol hidratado. O consumo energético total na etapa industrial é de 1139,00 MJ/tc e 1070,01 MJ/tc, para etanol anidro e etanol hidratado respectivamente. Entretanto se considerar apenas o consumo de energia fóssil este consumo energético total na etapa industrial é de 26,69 MJ/tc e 26,02 MJ/tc, para o etanol hidratado e etanol anidro respectivamente, neste caso considera-se que a usina autônoma é autossuficiente em geração de energia.

O consumo energético para etapa de distribuição é de 24,44 MJ/tc para o etanol anidro e de 31,86 MJ/tc para o etanol hidratado, esta diferença é facilmente justificada devido ao etanol anidro ser entregue diretamente nas distribuidoras para ser adicionado a gasolina, enquanto o etanol hidratado é entregue nas distribuidoras para posterior distribuição nos pontos de consumo.

Os resultados encontrados para o consumo energético do fluxo de produção do etanol de cana-de-açúcar se apresentam entre 1368,79 MJ/tc e 1321,21 MJ/tc para o etanol hidratado, para o etanol anidro este consumo de energia se apresenta entre 1430,39 MJ/tc e 1382,81 MJ/tc.

Os valores obtidos para o EROI para a produção do etanol hidratado, estão entre 6,11 a 4,99, para o etanol anidro os valores estão entre 5,85 a 4,77. Nas Figuras 4 e 5 observa-se o consumo energético para o etanol anidro e etanol hidratado.

**Figura 4: Consumo energético no fluxo de produção do etanol anidro**

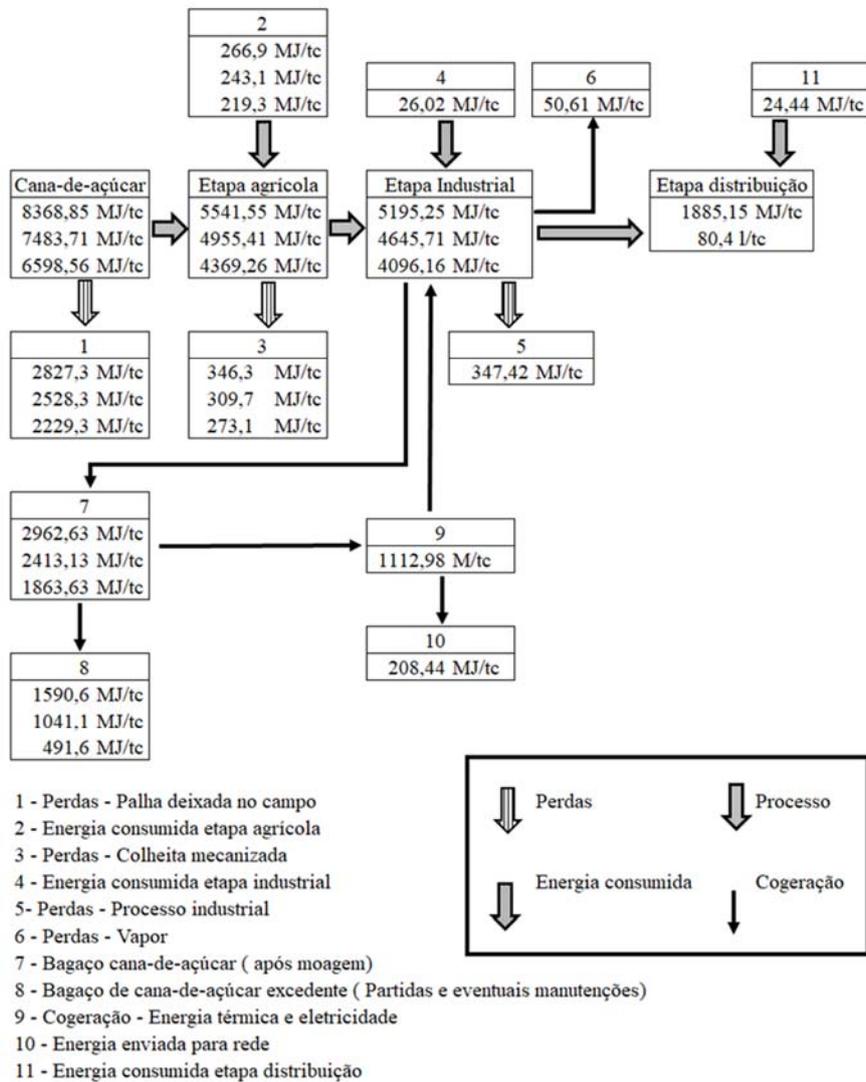
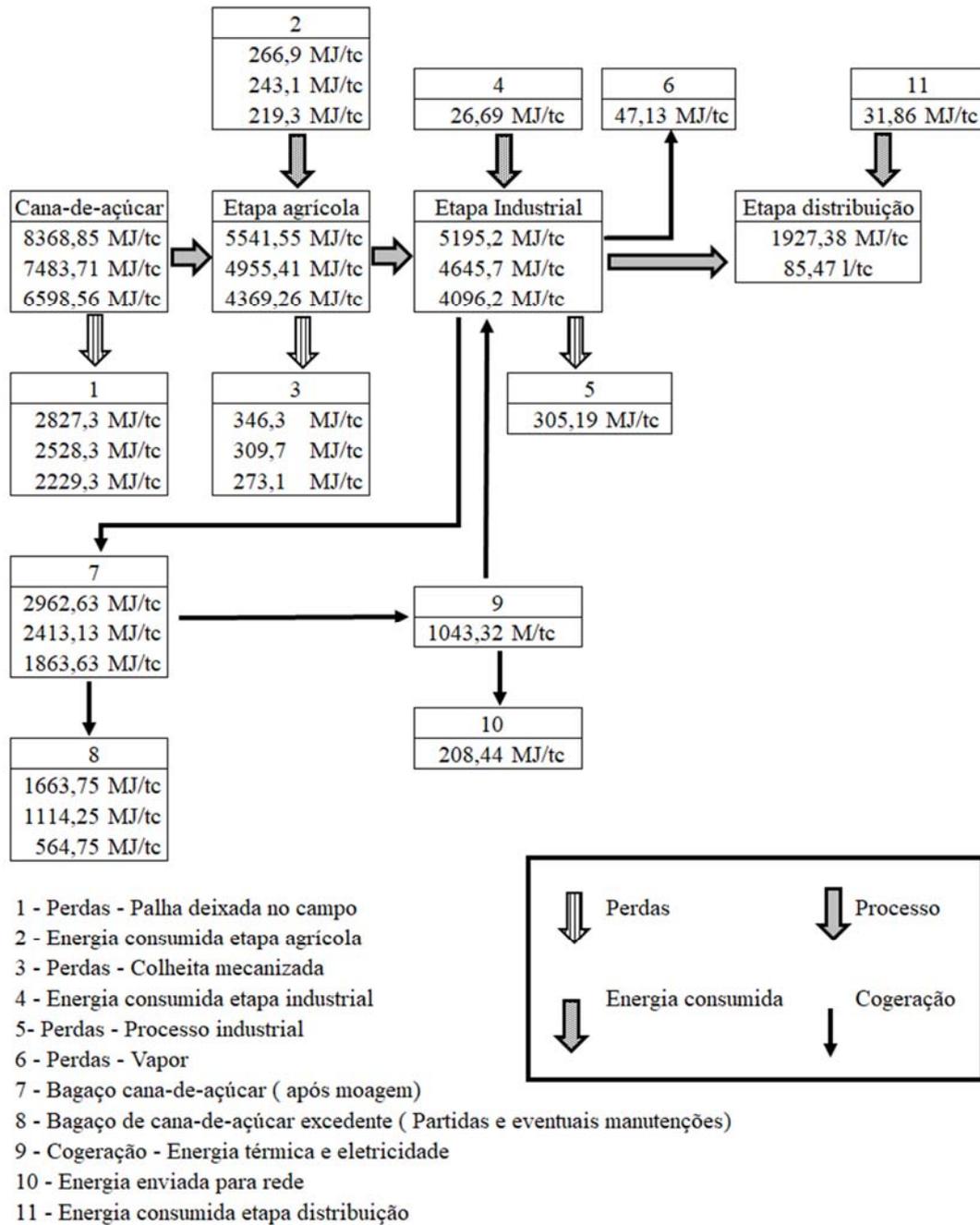


Figura 5: Consumo energético no fluxo de produção do etanol hidratado



**Conclusão**

O cálculo para o EROI do etanol apresenta valores satisfatórios, entre 6,11 a 4,77, isto significa que para cada unidade de energia utilizada para o processamento do etanol são disponibilizadas entre 6,11 a 4,77 unidades de energia para uso final. Desta forma o etanol de cana-de-açúcar se caracteriza por possuir um modelo de produção energeticamente viável e como uma fonte renovável de energia.

## Bibliografia

ANDREA, M. C. S. et al. Energy demand in agricultural biomass production in Parana state, Brazil. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, SPEC. ISSUE, p. 43–52, 2014.

BERMANN, C. Crise ambiental e as energias renováveis. **Energia, ambiente e sociedade**, v. 60, n. 3, p. 20-29, 2009. Disponível em:  
<<http://www.iee.usp.br/sites/default/files/biblioteca/producao/2008/Artigos%20de%20Periodicos/bermanncrise.pdf>>.

BODDEY, Robert M. et al. In: Pimentel D. (eds) Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems. Springer, Dordrecht. **Bio-ethanol production in Brazil**, p. 321–356, 2008. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8654-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8654-0_13) .

CAPAZ, Rafael Silva. **Estudo do desempenho energético da produção de biocombustíveis: Aspectos metodológicos e estudo de caso**. 2009. 121 f.. Dissertação (Mestrado – Engenharia da Energia) – Universidade Federal de Itajubá – Programa de Pós Graduação em Energia, Itajubá – MG, 2009.

CAPELLAN-PÉREZ, Iñigo; DE CASTRO, Carlos; MIGUEL GONZALEZ, Luis Javier. Dynamic Energy Return on Energy Investment (EROI) and material requirements in scenarios of global transition to renewable energies. **ENERGY STRATEGY REVIEWS**, v. 26, 100399, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100399> .

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa. **Bioetanol de cana de açúcar - P&D para Produtividade e Sustentabilidade**. Edgard Blücher LTDA, 2010. 954 p. ISBN 978-85-212-0530-2.

FENG, Jingxuan et al. Modeling the point of use EROI and its implications for economic growth in China. **Energy**, v. 144, p. 232–242, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.11.061> .

LAMBERT, Jessica G.; HALL, Charles a. S.; BALOGH, Stephen B. EROI of Global Energy Resources. **SUNY- Environmental Science & Forestry; Next Generation Energy Initiative , Inc.** Uk, October, p. 160, 2013.

LEAL, Manoel Regis L. V.; WALTER, Arnaldo Silva; SEABRA, Joaquim E. A. Sugarcane as an energy source. **Biomass Conversion and Biorefinery**, 2013.

MACEDO, Carvalho et al. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil, 2004. **Secretaria do Meio Ambiente, Governo de São Paulo**. Abril de 2004. 19pp+anexos.

MACEDO, Isaias C.; SEABRA, Joaquim E. A.; SILVA, João E. A. R. Green house gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, v. 32, n. 7, p. 582–595, 2008.

MURPHY, David J. et al. Order from chaos: A preliminary protocol for determining the

EROI of fuels. **Sustainability**, v. 3, n. 10, p. 1888–1907, 2011.

OLIVEIRA, Marcelo.; VAUGHAN, Burton.; RYKIEL, Edward. Ethanol as Fuel : Energy , Carbon Dioxide Balances , and Ecological Footprint. **American Institute of Biological Sciences**, v. 55, n. 7, p. 593–602, 2005.

PIMENTEL, David; PATZEK, Tad. Ethanol production: Energy and economic issues related to U.S. and Brazilian sugarcane. **Natural Resources Research**, v. 16, n. 3, p. 235–242, 2007.

PINA, Eduardo A. et al. Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane – Evaluation of different plant configurations. **Energy**, v. 138, p. 1263–1280, 2017.

RAMÍREZ TRIANA, Carlos Ariel. Energetics of Brazilian ethanol: Comparison between assessment approaches. **Energy Policy**, v. 39, n. 8, p. 4605–4613, 2011.

SALLA, Diones Assis et al. Avaliação energética da produção de etanol utilizando como matéria-prima a cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, Brasil, v. 39, p. 2516–2520, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/cr/v39n8/a307cr1202.pdf>>. Acesso em: 25 ago. 2019.

SEABRA, Joaquim E. A. et al. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. **Biofuels Bioproducts & Biorefining**, V.5, p. 519-532, 2011.