

AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DA INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO CONJUNTA DE BIOETANOL 1G/2G DE CANA-DE-AÇÚCAR COM UMA USINA DE BIODIESEL DE ÓLEO DE PALMA PARA O CASO BRASILEIRO

Eric A. Ocampo Batlle, ericocampo1989@gmail.com^{1,2}

Jose Escobar Palácio, joescobar@gmail.com^{1,2}

Electo Silva Lora, silva.electo52@gmail.com^{1,2}

¹Universidade Federal de Itajubá, Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG,

²Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída - NEST, Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG.

Resumo: O uso da biomassa está se tornando uma alternativa cada vez mais atraente, para dar uma solução parcial à falta de energia, com uma abordagem ecofriendly, tendo como referente sólido a planta de cana-de-açúcar; que recebem o novo e valioso conceito das biorefinarias, estas podem ser resumidas, como instalações de produção que atingem o rendimento global mais elevado das matérias-primas, com o menor impacto ambiental, com entrada mínima de energia e dando o valor máximo da saída de energia. Por outro lado, tem-se apontado o elevado consumo de diesel nas etapas agrícolas e de transporte da cana, o que compromete o perfil ambiental que este possui. A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) e a palmeira-de-dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) estão entre as culturas de maior produtividade, 6 a 7,5 mil litros de etanol/há.ano e 4 a 6 toneladas de óleo/há.ano, respectivamente. A produção integrada de biocombustíveis derivados dessas culturas é uma alternativa atraente para melhorar o ciclo de vida, através da redução no consumo de combustíveis fósseis, e os indicadores de desempenho energético (baseados nas leis termodinâmicas). Neste contexto, o presente trabalho apresenta um estudo de três diferentes configurações de biorefinaria. Cada estudo de caso foi baseado na produção conjunta de uma usina de açúcar e álcool com uma usina de biodiesel de óleo de palma. O cenário I considero os seguintes produtos: etanol 1G, açúcar, biodiesel, glicerina e eletricidade. O cenário II mantém os produtos, mas este considera a incorporação de uma planta anexa de etanol lignocelulósico (2ª geração) tendo como matéria prima o bagaço da cana processada.

Palavras-chave: Energia, Biomassa, cana-de-açúcar, dendê, cogeração, biorrefinaria.

1. INTRODUÇÃO

Hoje em dia, a procura por fontes alternativas de energia para atender a crescente demandas de energia global está aumentando continuamente, à medida que os níveis de população e prosperidade aumentam em tudo o mundo.

Embora os combustíveis fósseis pareçam ser fonte de energia suficientes para pouco mais de meio século, devido à descoberta e exploração de novas reservas de petróleo e gás, eles acabarão por se esgotar (Vlysidis et al. 2011).

Além disso, o uso extensivo de petróleo, carvão e gás natural causou uma série de questões ambientais, sendo o aquecimento global o mais crucial (Cherubini 2010). Portanto, além de encontrar formas de atender à crescente demanda energética, também precisamos diminuir o impacto ambiental associado ao uso intensivo deste tipo de energia (Não renovável). Recurso renováveis como o sol, o vento, a água e a biomassa podem substituir parcialmente o consumo de combustíveis fósseis ao mesmo tempo em que se reduzem os impactos ambientais (Ho et al. 2014).

Questões semelhantes existem no setor de transporte, onde o mercado é regido por derivados do petróleo, como a gasolina, querosene e diesel (Vlysidis et al. 2011). No 2016 o setor de transporte consumiu entorno de 26% (3,3 mil Mtep) da energia primaria do mundo e prevê-se um aumento médio de 1,4% (U.S. Energy Information Administration 2016). No Brasil, o cenário não é diferente, já que o setor de transporte consumiu mais do 28% (84 Milhões de toneladas equivalentes de petróleo) do consumo final total de energia em 2016 (Coelho et al. 2016). O uso de biocombustíveis para transporte é alvo no Brasil (Kami Delivand & Gnansounou 2013).

Note-se que o bioetanol e biodiesel são os biocombustíveis líquidos mais importantes empregados no sector de transporte no mundo (Ho et al. 2014), naturalmente existem diversos trabalhos publicados nos quais são avaliados diferentes tipos de biomassa para a obtenção destes (Bergmann et al. 2013)(Ho et al. 2014)(Manochio et al. 2017). Mas tem-se demonstrado por meio de diferentes pesquisas (Yanez Angarita et al. 2009) (Seabra et al. 2011) que as biomassas mais aptas para a produção de etanol e biodiesel são a cana-de-açúcar e a palma africana (dendezeiro), já que estas culturas possuem altos rendimentos de biocombustíveis, 7,6 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de etanol (Leal et al. 2013) e 5 t ha⁻¹ ano⁻¹ de óleo (Bergmann et al. 2013). Além de isso estas culturas possuem grande disponibilidade de resíduos de biomassa, as quais podem ser utilizadas para fins energéticos.

Nesse contexto destacam-se as propostas de modelos de produção integrada também chamados de Biorrefinaria, que têm sido apontados como uma alternativa para melhorar a interação na produção de bioenergia, químicos e alimentos do processamento sustentável de biomassa (Fatih Demirbas 2009)(Ghatak 2011).

Segundo (Queiroz et al. 2012) a integração da cultura de cana e palma poderia melhorar o desempenho energético do sistema de produção do biodiesel. Em função dos fatos (Souza et al. 2012) realizou uma pesquisa onde comparava um sistema tradicional de produção de etanol de cana com um sistema de produção conjunta, no qual o etanol e o biodiesel são produzidos na mesma biorrefinaria, mas apenas o etanol é negociado. Obtendo como resultado um balanço energético da produção conjunta 1,7 maior que a convencional. Além de liberar 23% menos emissões de GEE que o sistema convencional.

Neste contexto, o presente trabalho procura avaliar termodinamicamente a integração energética do processo de produção conjunta de etanol e biodiesel, por meio de três diferentes configurações de biorrefinaria.

2. OS ESTUDOS DE CASOS

Os estudos de caso propostos tiveram a finalidade principal de associar os processos industriais da cana com o de palma analisado desta forma, as possibilidades de diferentes configurações de um sistema constituído por: i. usina de açúcar e álcool, ii. planta de extração e refinação de óleo de palma, iii. usina de biodiesel, iv. planta de cogeração e v. planta de processamento de etanol ou metanol (2^a geração).

Foram consideradas as limitações, os potenciais e a viabilidade de uma verdadeira integração de processos visando solucionar os três desafios que o ser humano enfrenta: a segurança alimentar e energética, além da proteção do meio ambiente.

Adicionalmente, as seguintes premissas foram consideradas:

- Analisar a instalação da capacidade de moagem de cana-de-açúcar, aproveitando a economia de escala e as tendências futuras da agroindústria.
- O processo de co-geração foi projetado com turbinas a vapor de condensação-extração (CEST), com parâmetros de vapor de 8 MPa e 520 ° C (setor sucroalcooleiro) e 4 MPa e 400 ° C (setor sucroalcooleiro).
- Toda a quantidade de bagaço da moagem de cana será consumida.
- As exigências elétricas térmicas das instalações devem ser atendidas
- Comparar, do ponto de vista termodinâmico, as vantagens obtidas com a introdução da biorrefinaria, quando comparada com o caso base.

2.1. Caso de Estudo I

Este estudo de caso (Fig. 1) foi projetado para se tornar uma referência para o outro, encontra-se composto por uma usina de açúcar e álcool, uma planta de extração de óleo, uma planta de biodiesel de palma e um sistema de cogeração, este último usa como combustível (através de duas caldeiras de portes diferentes) os resíduos de biomassa gerados pela cultura da cana e palma, para assim suprir de energia térmica (vapor) e elétrica as plantas consideradas neste caso.

Desta forma, este primeiro estudo de caso foi caracterizado por:

1. Uma capacidade de moagem de cana de 1700 t de cana / hora.
2. Uma capacidade de processamento de cachos de fruta fresca de palma de 100 t CFF/hora.
3. Uma capacidade da unidade produtora de biodiesel de 19 t BD/hora.
4. A planta de biodiesel encontra-se perto da planta de extração e refinação.

5. Uma planta de cogeração que opera com bagaço de cana-de-açúcar (caldeira I), casca e fibra de palma (Caldeira II), fornece vapor e eletricidade à usina de açúcar e álcool, planta de extração e refinação de óleo de palma, e planta de biodiesel de palma

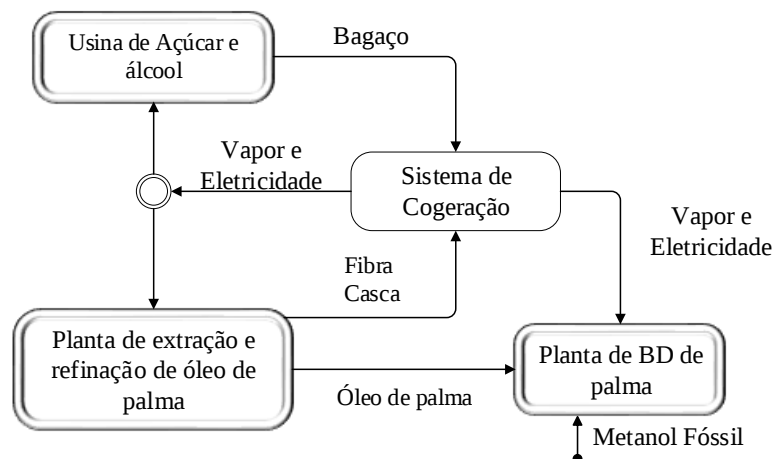


Figura 1: Estudo de caso I.

Além das características mencionadas, a seguir estão listados alguns parâmetros que foram adotados neste estudo de caso. Eles foram baseados em instalações reais e referências bibliográficas. Na Tabela 1 estão listados os principais deles.

Tabela 1: Principais parâmetros para o estudo de caso I (SCHEGLIÁIEV 1978; Camargo & Ushima 1990; Arrieta et al. 2007; BNDES e CGEE 2008; CGEE 2009; Stichnothe & Schuchardt 2011; Lai et al. 2012; Nasution et al. 2014; O'Hara & Mundree 2016; DEDINI 2017).

Sistema de moagem da cana-de-açúcar	
Capacidade de moagem (t cana/h)	2,000
% de bagaço na cana-de-açúcar (base úmida)	27
Umidade do bagaço (%)	50
PCI do bagaço (kJ/kg)	7,524
Sistema de Extração e refinação de óleo de palma	
Capacidade de processamento dos CFF (t CFF/h)	100
% de fibra nos CFF (base úmida)	14
Umidade da fibra (%)	10
% de casca nos CFF (base úmida)	7
Umidade de casca (%)	50
% de cachos vazios nos CFF (base úmida)	22
Umidade de cachos vazios (%)	40
PCI da fibra (kJ/kg)	19,201
PCI da casca (kJ/kg)	21,445
PCI dos cachos vazios (kJ/kg)	8,165
Planta de Cogeração	
Pressão da caldeira de cogeração I (MPa)	8.5
Temperatura na saída da caldeira de cogeração I (°C)	520
Pressão da caldeira de cogeração II (MPa)	4
Temperatura na saída da caldeira de cogeração II (°C)	400
Eficiência isentrópica das bombas (%)	85
Eficiência da Caldeira de cogeração I (% PCI)	85
Eficiência da Caldeira de cogeração II (% PCI)	80
Eficiência dos Geradores elétricos (%)	92
Eficiência isentrópica da turbina a vapor - Cogeração I (%)	88
Eficiência isentrópica da turbina a vapor - Cogeração II (%)	80
Usina de açúcar e álcool	
Consumo específico de vapor (kg/t cana)	442
Consumo de eletricidade (kWh/t cana)	34
<i>Demanda elétrica do Processo</i>	<i>18</i>

<i>Demanda elétrica para acionamento do sistema de extração</i>	16
Rendimento do Etanol (l/t cana)	46
Rendimento do Açúcar (kg/t cana)	59
Planta de Extração e refinação de óleo de palma	
Consumo específico de vapor (kg/t CFF)	500
Consumo de eletricidade (kWh/t CFF)	19
Rendimento do CPO (kg/t CFF)	200
Rendimento do PKO (kg/t CFF)	17
Rendimento do PKC (kg/t CFF)	35
Rendimento do POME (kg/t CFF)	320
Planta de Biodiesel de palma	
Capacidade de produção de BD (t BD/h)	19.4
Consumo específico de vapor (kg/t CPO)	564
Consumo de eletricidade (kWh/t CPO)	22
Rendimento de biodiesel (kg/t CPO)	970
Rendimento de glicerina (kg/t CPO)	113.6

O balanço de massa e energia das plantas também foi simulado usando o software Gate Cycle TM. Neste caso, a capacidade instalada elétrica é de 143.4 MW. O esquema de fluxos de massa e energia da configuração da biorrefinaria utilizada no estudo de caso I é mostrado na figura 2.

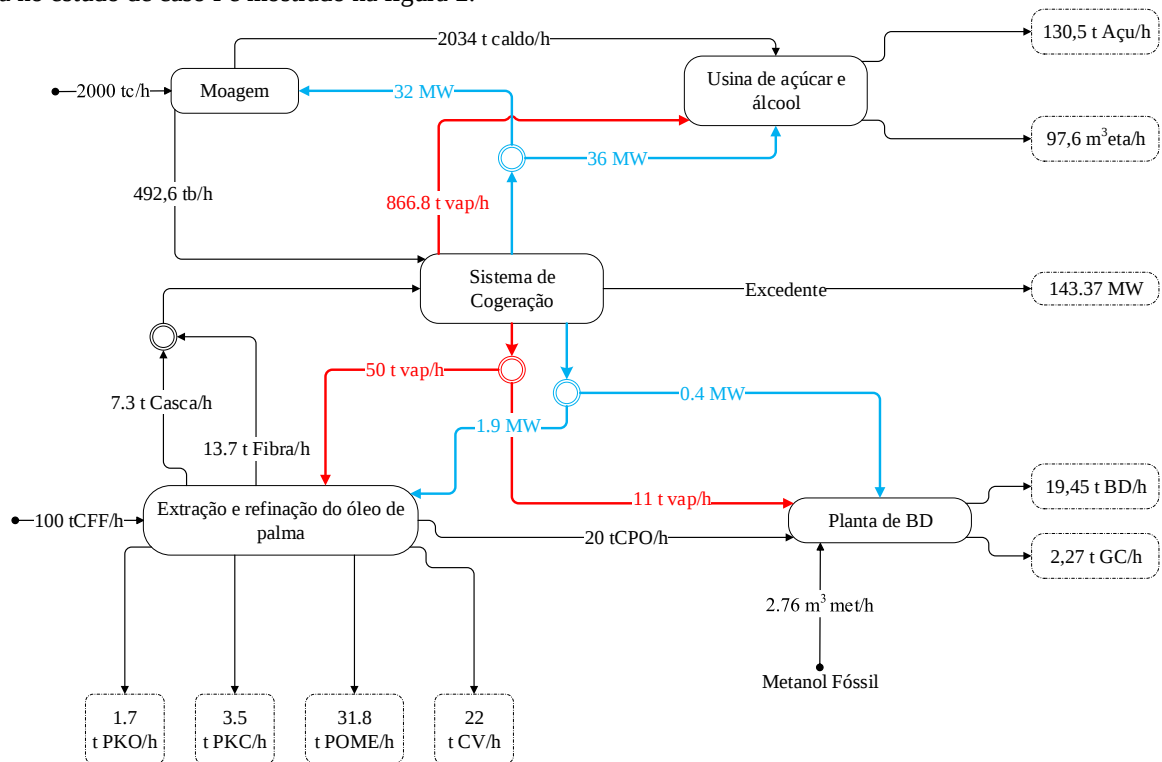


Figura 2: Balanço de massa e energia do caso I.

2.2. Caso de estudo II

O segundo estudo de caso (fig.3) integrou uma usina de açúcar e álcool, uma usina de cogeração, uma planta de extração e refinação de óleo de palma, uma planta de biodiesel de palma e uma usina de etanol lignocelulósico. A diferença no estudo de caso II é que uma parte da produção de bagaço gerada na usina de açúcar e álcool é destinada a usina de etanol lignocelulósico. A Tabela resume os principais parâmetros deste estudo de caso, retirados das referências listadas no topo da tabela 2.

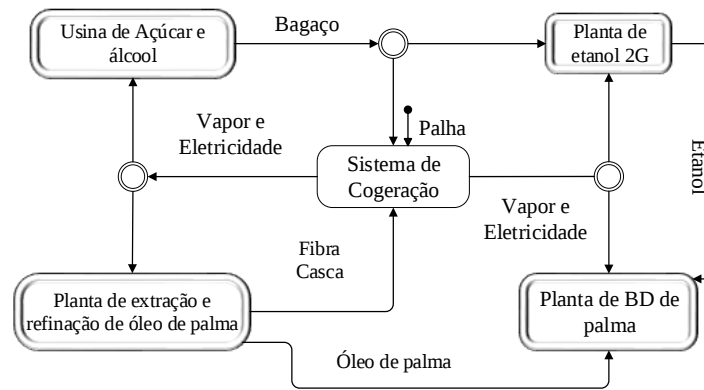


Figura 3: Estudo de caso II.

Tabela 2: Principais parâmetros para o estudo de caso II (Manochio et al. 2017; Dias et al. 2013; Wiloso et al. 2012).

Planta de Etanol lignocelulósico	
Consumo específico de vapor (kg/l e2G)	19
Consumo específico de vapor a 21 bar (kg/l e2G)	7,65
Consumo específico de vapor a 2,5 (kg/ l e2G)	11,34
Consumo de eletricidade (kWh/t bagaço)	24
Rendimento do etanol 2G (l/t bagaço)	149.31
Rendimento de vinhaça (l/t bagaço)	442.1
Rendimento de Torta de lignina (kg/t bagaço)	110
Planta de Cogeração	
Produção de vapor nas caldeiras (t / h)	1499
Potência Instalada (MW)	291.4
Eletricidade excedente (MW)	217.9
Consumo da mistura de bagaço e palha nas caldeiras (t/h)	524.6
Consumo específico da mistura (t_{mix}/t_{vap})	0.35

Nota-se da tabela que o consumo de eletricidade teve um incremento de 4.27%, visto que há a produção de mais um produto (etanol 2G) pelo sistema, outro parâmetro foi o consumo específico de vapor, que aumentou em 38.22%. A principal consequência deste aumento foi o déficit de bagaço para o sistema de cogeração, ou seja, a produção de vapor pelo mesmo, não foi suficiente para atender a demanda de vapor do sistema proposto. Em termos numéricos, a quantidade de bagaço disponível é de 359.57 t/h, já que são destinados 133 ton de bagaço para a planta de etanol 2G, e a quantidade necessária da planta de cogeração é de 524.57 t/h.

Logo uma alternativa para solucionar este problema é considerar o aproveitamento dos resíduos (palha) da colheita da cana-de-açúcar como biomassa adicional para abastecer a usina de cogeração, deixando o bagaço suficiente para suportar uma produção de etanol de 18.6 m³/h,

Neste caso, a capacidade instalada elétrica é de 217.9 MW. O esquema de fluxos de massa e energia da configuração da biorrefinaria utilizada no estudo de caso II é mostrado na figura 4.

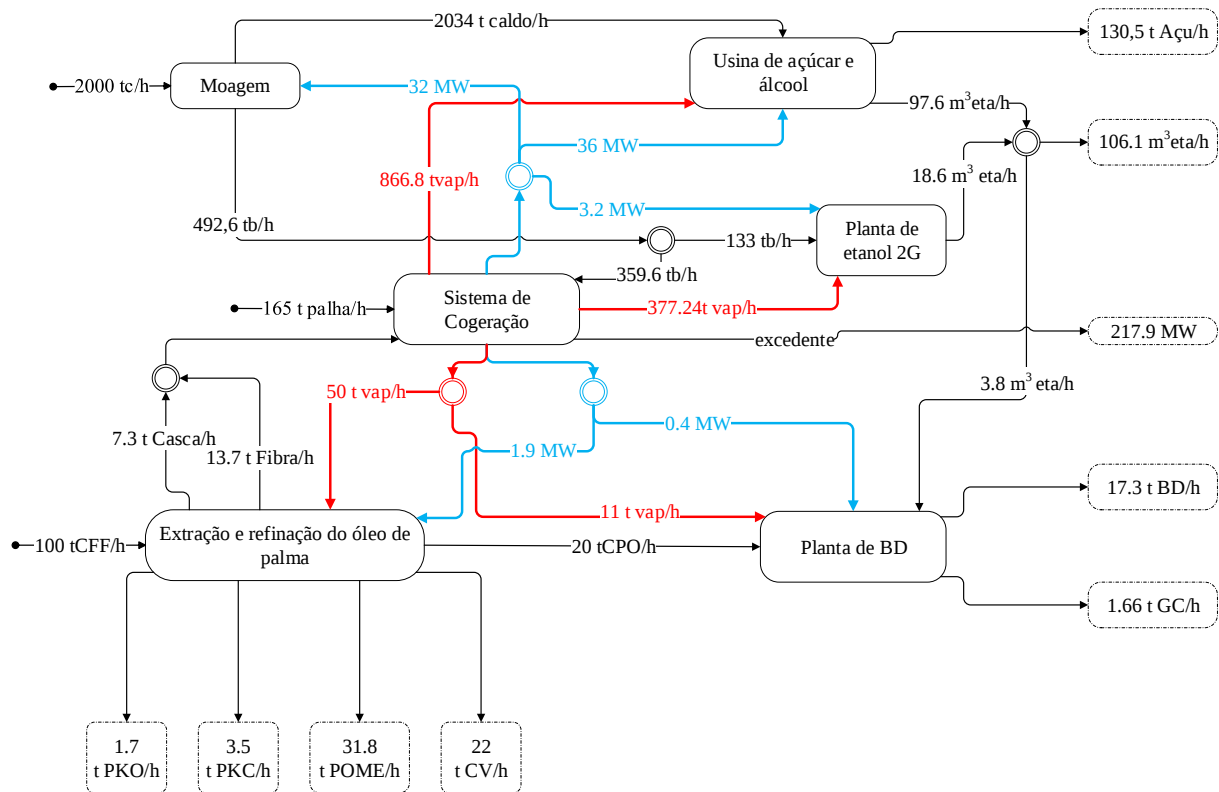


Figura 4: Balanço de massa e energia caso II.

3. AVALIAÇÃO TERMODINÂMICA DOS ESTUDOS DE CASO ANALISADOS

Os estudos de caso foram avaliados termodinamicamente, permitindo o cálculo de seus índices de desempenho baseados na Primeira lei termodinâmica.

A Primeira Lei estabelece que a energia não pode ser destruída. Assim, a energia de entrada em um sistema térmico que opera em estado estacionário estará presente na energia dos produtos, co-produtos e perdas do sistema (conservação de energia). Alguns índices baseados na Primeira Lei da Termodinâmica são apresentados a seguir:

Fator de Utilização de Energia (FUE): Conhecido também como eficiência energética ou eficiência da Primeira Lei, é um indicador baseado no princípio físico da conservação de energia.

$$FUE = \frac{W + Q_{util}}{m_{mix1} * PCI_{mix1} + m_{mix2} * PCI_{mix2}} \quad (1)$$

Onde:

W – Potência elétrica produzida pelo sistema [kW]

Q_{util} – fluxo de calor útil do sistema para processo [kW]

m_{mix1} – fluxo total de combustível proveniente da cultura de cana (bagaço e palha) consumido pelas caldeiras [kg/s]

m_{mix2} – fluxo total de combustível proveniente da cultura de palma (casca e fibra) consumido pelas caldeiras [kg/s]

PCI_{mix1} – Poder Calorífico Inferior da mistura 1 [kJ/kg]

PCI_{mix2} – Poder Calorífico Inferior da mistura 2 [kJ/kg]

O calor útil total do sistema empregado no processo. Esse é composto pelo somatório dos fluxos de entalpia do vapor destinado às plantas (usina de açúcar e álcool e planta de extração de óleo e planta de biodiesel, menos o fluxo de entalpia do condensado de retorno).

Eficiência global da planta (η_{global}): A fim de analisar a função produtividade de obtenção de energia e combustíveis a partir da cana-de-açúcar propõe-se dividir o somatório da energia do etanol, do açúcar, da eletricidade excedente, glicerina e do metanol, pela energia contida na matéria-prima, como mostra a equação a seguir:

$$\eta_{global} = \frac{W_{exced} + \sum(\dot{m}PCI)_{produtos}}{\sum(\dot{m}PCI)_{mp}} \quad (2)$$

Índice de eletricidade excedente (I_{exced}): é a razão do excedente de energia elétrica (W_{exced}) pela quantidade de matéria prima processada (t_{mp}) em toneladas por hora [kWh/ t_{mp}].

$$I_{exced} = \frac{W_{exced}}{t_{mp}} \quad (3)$$

Para determinar os índices supracitados, é essencial obter valores para as variáveis envolvidas. As variáveis para as energias específicas encontram-se sumarizado na tabela 3.

Tabela 3: PCI dos produtos avaliados nos estudos de casos.

Produto	Valor	Referência
Etanol	28,23 MJ/kg	(Goldemberg et al. 2008)
Açúcar	16,73 MJ/kg	(Renó et al. 2014)
Bagaço (50%)	7,65 MJ/kg	(Modesto et al. 2016)
Palha (15%)	12,90 MJ/kg	(Walter & Ensinas 2010)
Caldo	2,51 MJ/kg	(Renó et al. 2014)
Fibra (40%)	19,2 MJ/kg	(Lai et al. 2012; Husain et al. 2002)
Casca (10%)	21,4 MJ/kg	(Lai et al. 2012; Husain et al. 2002)
Glicerina	18 MJ/kg	(BRAR, SATINDER KAUR; SARMA, SAURABH JYOTI ; PAKSHIRAJAN 2016)
Biodiesel	39,9 MJ/kg	(Queiroz et al. 2012)

Com essas variáveis, os índices que indicam o desempenho de cada processo foram calculados e os resultados são resumidos na figura.

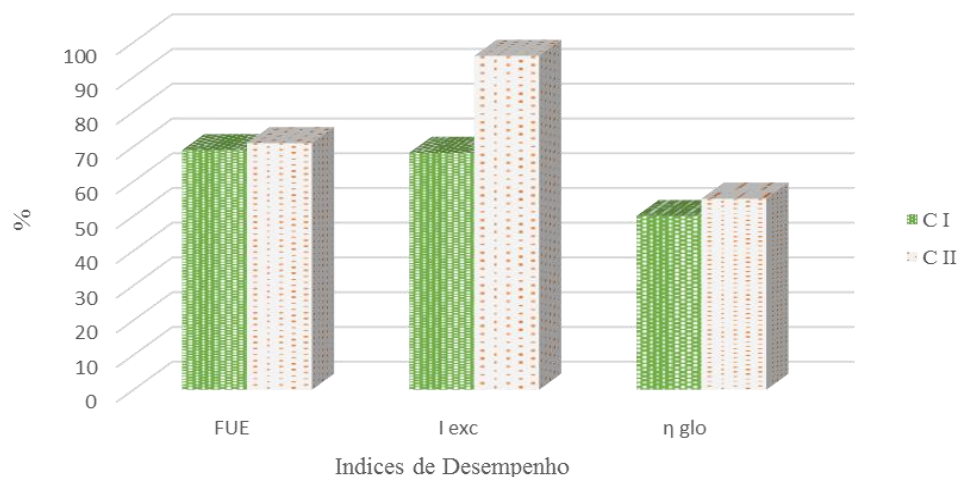


Figura 5: Índices termodinâmicos dos estudos de caso.

A Figura 5 mostra que o caso II supera em todos os índices de desempenho termodinâmico ao caso I, no entanto, a produção de eletricidade excedente foi 27,89% maior no estudo de caso II comparado ao estudo de caso I, principalmente devido ao uso do resíduo da cana-de-açúcar (palha). O estudo de caso II obteve uma utilização energética da matéria prima 1,8% maior que o estudo de caso I.

4. CONCLUSÕES

Um fator essencial no desenvolvimento de biorrefinarias é o crescimento da demanda por energia, combustíveis e produtos químicos. Seguindo essa ideia, o presente trabalho teve como objetivo analisar a possibilidade de diversificar

os produtos da indústria sucroalcooleira, além de integrar a indústria de palma no conceito de biorrefinaria. Isto encorajaria reduções na dependência de combustíveis fósseis (consequentemente diminuindo as emissões de CO₂) e revitalizaria as áreas rurais.

A partir dos resultados das avaliações realizadas sobre energia em os estudos de caso, é evidente que o conceito proposto de biorrefinaria, no contexto de uma economia agroindustrial, requer a inclusão da palha da cana-de-açúcar como suplemento, proporcionando um melhor equilíbrio nas matérias-primas.

A opção estudada no contexto das biorrefinarias apresenta um balanço positivo, o que permite oferecer açúcar, etanol (1G e 2G), biodiesel, glicerina, eletricidade e uma gama atrativa de co-produtos, cuja seleção sempre dependerá das condições dos mercados nacional e internacional.

Vale ressaltar que a análise energética demonstrou que o uso de energia é incrementado devido à complementação e diversificação de produções dentro das biorrefinarias.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Fundação de Amparo e Pesquisa do estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de aperfeiçoamento de pessoal de nível superior – CAPES.

6. REFERÊNCIAS

- Arrieta, F.R.P. et al., 2007. Cogeneration potential in the Columbian palm oil industry: Three case studies. *Biomass and Bioenergy*, 31(7), pp.503–511.
- Bergmann, J.C. et al., 2013. Biodiesel production in Brazil and alternative biomass feedstocks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, pp.411–420.
- BNDE e CGEE, 2008. *Bioetanol de Cana-de-açúcar Energia para o Desenvolvimento Sustentável* 1st ed., Rio de Janeiro.
- BRAR, SATINDER KAUR; SARMA, SAURABH JYOTI ; PAKSHIRAJAN, K., 2016. *Platform Chemical*, Camargo, C.A. de & Ushima, A.H., 1990. *Conservação de energia na indústria do açúcar e do álcool: manual de recomendações*. 1st ed., São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas,.
- CGEE, 2009. *Bioetanol combustível: uma oportunidade para o Brasil* 1st ed. Unicamp, ed., Brasília, DF.
- Cherubini, F., 2010. The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), pp.1412–1421. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890410000373>.
- Coelho, F. et al., 2016. Balanço Energético Nacional 2016: Ano base 2015. , p.291.
- DEDINI, 2017. Caldeiras para Sistemas de Cogeração a Bagaço-de-Cana para Usinas de Açúcar e Etanol.
- Dias, M.O.S. et al., 2013. Biorefineries for the production of first and second generation ethanol and electricity from sugarcane. *Applied Energy*, 109, pp.72–78. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.081>.
- Fatih Demirbas, M., 2009. Biorefineries for biofuel upgrading: A critical review. *Applied Energy*, 86(SUPPL. 1), pp.S151–S161. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.04.043>.
- Ghatak, H.R., 2011. Biorefineries from the perspective of sustainability: Feedstocks, products, and processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), pp.4042–4052. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.034>.
- Goldemberg, J., Coelho, S.T. & Guardabassi, P., 2008. The sustainability of ethanol production from sugarcane. *Energy Policy*, 36(6), pp.2086–2097. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421508001080>.
- Ho, D.P., Ngo, H.H. & Guo, W., 2014. A mini review on renewable sources for biofuel. *Bioresource Technology*, 169, pp.742–749. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2014.07.022>.
- Husain, Z., Zainal, Z.A. & Abdullah, M.Z., 2002. Analysis of biomass-residue-based cogeneration system in palm oil mills. *Biomass and Bioenergy*, 24(2), pp.117–124.
- Kami Delivand, M. & Gnansounou, E., 2013. Life cycle environmental impacts of a prospective palm-based biorefinery in Pará State-Brazil. *Bioresource Technology*, 150, pp.438–446. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.07.100>.
- Lai, O.-M., Tan, C.-P. & Akoh, C.C., 2012. *Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses* 1st ed. AOCS, ed., New York: Elsevier.
- Leal, M.R.L. V, Horta Nogueira, L.A. & Cortez, L.A.B., 2013. Land demand for ethanol production. *Applied Energy*, 102, pp.266–271. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.037>.
- Manochio, C. et al., 2017. Ethanol from biomass: A comparative overview. , 80(November 2016), pp.743–755.
- Modesto, M. et al., 2016. Assessment of the Potential to Increase Electricity Generation from Sugarcane Straw in Brazilian Sugarcane Cogeneration Plants. *Chemical Engineering Transactions*, 50(2011), pp.193–198.
- Nasution, M.A., Herawan, T. & Rivani, M., 2014. Analysis of palm biomass as electricity from palm oil mills in north

- sumatera. *Energy Procedia*, 47, pp.166–172. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.210>.
- O'Hara, I.M. & Mundree, S.G., 2016. *Sugarcane-based biofuels and bioproducts* 1st ed. Wiley Blackwell, ed., New Jersey.
- Queiroz, A.G., França, L. & Ponte, M.X., 2012. The life cycle assessment of biodiesel from palm oil (“dendê”) in the Amazon. *Biomass and Bioenergy*, 36, pp.50–59.
- Renó, M.L.G. et al., 2014. Sugarcane biorefineries: Case studies applied to the Brazilian sugar–alcohol industry. *Energy Conversion and Management*, 86, pp.981–991. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890414005561>.
- SCHEGLIÁIEV, A.V., 1978. *Turbinas de Vapor - Parte 1 - La Teoría del Proceso Térmico y las Construcciones de Turbinas* 1st ed. MIR, ed., Moscú, Unión Soviética.
- Seabra, J.E.A. et al., 2011. Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products: GHG emissions and energy use. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 5(5), pp.519–532.
- Souza, S.P., de Ávila, M.T. & Pacca, S., 2012. Life cycle assessment of sugarcane ethanol and palm oil biodiesel joint production. *Biomass and Bioenergy*, 44, pp.70–79.
- Stichnothe, H. & Schuchardt, F., 2011. Life cycle assessment of two palm oil production systems. *Biomass and Bioenergy*, 35(9), pp.3976–3984. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.001>.
- U.S. Energy Information Administration, 2016. *International Energy Outlook 2016*, Available at: [www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2016\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2016).pdf).
- Vlysidis, A. et al., 2011. A techno-economic analysis of biodiesel biorefineries: Assessment of integrated designs for the co-production of fuels and chemicals. *Energy*, 36(8), pp.4671–4683. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2011.04.046>.
- Walter, A. & Ensinas, A. V., 2010. Combined production of second-generation biofuels and electricity from sugarcane residues. *Energy*, 35(2), pp.874–879. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2009.07.032>.
- Wiloso, E.I., Heijungs, R. & De Snoo, G.R., 2012. LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), pp.5295–5308. Available at: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.035>.
- Yanez Angarita, E.E. et al., 2009. The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia. *Renewable Energy*, 34(12), pp.2905–2913.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

THERMODYNAMIC EVALUATION OF ENERGY INTEGRATION OF THE 1G / 2G SUGAR CANE-DE-SUGAR BIOETHANOL PRODUCTION PROCESS WITH A PALM OIL BIODIESEL USING THE BRAZILIAN CASE

Eric A. Ocampo Batlle, ericocampo1989@gmail.com^{1,2}

Jose Escobar Palácio, joescobar@gmail.com^{1,2}

Electo Silva Lora, silva.electo52@gmail.com^{1,2}

¹Federal University of Itajubá - UNIFEI, Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG,

²Excellence Group in Thermal Power and Distributed Generation - NEST, Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG

Abstract. The use of biomass is becoming an increasingly attractive alternative, to give a partial solution to the lack of energy, with an ecofriendly approach, with solid reference to the sugarcane plant; which receive the new and valuable concept of biorefineries, these can be summarized as production facilities that achieve the highest overall yield of raw materials, with the least environmental impact, with minimal input of energy and giving the maximum output value of energy. On the other hand, it has been pointed out the high consumption of diesel in the agricultural stages and transportation of sugarcane, which compromises the environmental profile that it possesses. Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) and palm oil (*Elaeis guineensis* Jacq.) are among the crops with the highest productivity, 6 to 7.5 thousand liters of ethanol per hectare and 4 to 6 tons of oil / ha, respectively. The integrated production of biofuels derived from these crops is a compelling alternative to improve the life cycle by reducing the consumption of fossil fuels and the energy performance indicators (based on thermodynamic laws). In this context, the present work presents a study of three different configurations of biorefinery. Each case study was based on the joint production of a sugar and alcohol mill with a palm oil biodiesel plant. Scenario I consider the following products: 1G ethanol, sugar, biodiesel, glycerine and electricity. Scenario II maintains the products, but this one considers the incorporation of an annexed plant of lignocellulosic ethanol (2nd generation) with the processed bagasse as its raw material.

Keywords: Energy, Biomass, sugarcane, palm oil, cogeneration, bio-refinery