



Avaliação termodinâmica na cogeração de energia nas indústrias sucroalcooleiras

Thermodynamic evaluation of energy cogeneration in the sugar and alcohol industries

Danielle Braga Tavares Vasconcelos da Silva¹, José Jeferson da Silva Nascimento², Arnaldo Bezerra Lopes de Almeida³, José Nunes de Oliveira Neto⁴, Fagno Dallino Rolim⁴, Marcio José Vasconcelos da Silva⁵ e Antônio Nunes de Oliveira⁶

¹Universidade Federal de Campina Grande, danibragatavares@gmail.com;

²Universidade Federal de Campina Grande, jefferson.nascimento@ufcg.edu.br e dallino@hotmail.com;

³Universidade Federal de Campina Grande, lopes.aa1976@gmail.com;

⁴Universidade Federal de Campina Grande-PPGEP, professornunesneto@gmail.com;dallino@hotmail.com;

⁵Instituto Federal de Pernambuco, marcio.vasconcelos@vitoria.ifpe.edu.br;

⁶Instituto Federal do Ceará, nunes.vieira@ifce.edu.br.

Resumo-A cogeração de energia proveniente dos resíduos do processamento da cana-de-açúcar nas indústrias sucroalcooleiras, como a queima e gaseificação da palha e do bagaço é uma alternativa significativa no aumento de competitividade para o setor sucroenergético, uma vez que, possibilita vender excedente de energia gerado. Este periódico contextualiza, a partir de revisão bibliográfica, o conceito da cogeração a partir da biomassa (palha e bagaço da cana-de-açúcar), além da aplicabilidade no setor sucroalcooleiro. É também contextualizado como as usinas utilizam o resíduo do processo de moagem da cana para geração de energia térmica, mecânica e elétrica, diversificando seus produtos visando um aumento na lucratividade e aproveitamento de matéria-prima de baixo custo.

Palavras-chaves: Cogeração; Resíduos; Energia Elétrica; Industrias Sucroalcooleiras.

Abstract: The energy cogeneration from sugarcane processing residues in the sugar and alcohol industries, such as the burning and gasification of bagasse, is a significant alternative in the increase of competitiveness for the sugar-energy sector, since it makes it possible to sell surplus energy generated. This paper contextualizes, from a bibliographical review, the concept of cogeneration from biomass (straw and sugar cane bagasse), besides the applicability in the sugar-alcohol sector. It is also contextualized as the mills use the residue from the cane milling process for thermal, mechanical and electrical energy generation, diversifying their products aiming at an increase in profitability and use of low cost raw material.

Key words: Cogeneration; Waste; Electricity; Sucroalcooleiras Industries.

INTRODUÇÃO

O uso de combustíveis fósseis, iniciada há décadas, tem gerado juntamente com as queimadas e desmatamentos, o acúmulo na atmosfera de gases poluentes, particularmente de CO₂, responsável pelas mudanças climáticas, esse quadro tem exigido modificações consciente embasadas no protocolo de Kyoto de forma a diminuir a emissão destes gases, utilizando como alternativa energia renovável (PEREIRA Jr. et al., 2008). Nesse contexto a União Europeia firmou acordo em Paris em 2014, marcando uma mudança histórica que prevê orientar o mundo no processo de transição global para energia limpa, em que haverá estímulos aos investimentos e inovações na otimização e eficiência no uso das energias renováveis, com planejamento para diminuição em 40 % das emissões de gases com efeito estufa até 2030 (COR, 2015).

O Brasil utiliza há décadas, apenas álcool como combustível ou sob a forma de uma mistura contendo de 22% a 27% de álcool na gasolina, atingindo uma posição extremamente favorável em nível internacional, produzindo bilhões de etanol por ano a partir da cana-de-açúcar (MAPA, 2015). Segundo a CONAB (2018) a produção nacional de cana-de-açúcar na safra 2018/19 foi de 620,4 milhões de toneladas, sendo deste total 44,4 milhões de toneladas produzida na região nordeste, e o beneficiamento total em etanol alcançou 33,14 bilhões de litros, um aumento de 21,7% ou de 5,9 bilhões de litros quando comparada a safra anterior.

Segundo (CRUZ, 2008) para cada tonelada de cana-de-açúcar, são gradados 280 kg de bagaço e 260 kg de palha, resíduos estes que são utilizados para cogeração de energia.

A cogeração de energia elétrica a partir da biomassa da cana-de-açúcar é um tema que há muito

tempo está presente nos estudos sobre energia no Brasil. Devido a grande preocupação no país de alternativas para solucionar o problema da energia elétrica, tendo no setor sucroalcooleiro, já que sua matéria prima provém de uma fonte limpa e renovável.

Segundo SEIFERT (2011), conceitualmente a cogeração pode ser definida como o processo de transformação de uma forma de energia em mais de uma forma de energia útil. A oferta de eletricidade por cogeração a partir do resíduo de cana apresenta vantagens ambientais pela redução da emissão de CO₂. Isto pode reduzir os impactos ambientais decorrentes do aumento da geração termoelétrica a partir de combustíveis fósseis.

Cenário da energia renovável no Brasil

A capacidade instalada total de geração de energia elétrica do Brasil atingiu em 2018 um total de 160.381 megawatts (MW), considerando também as informações referentes à geração distribuída, quando a fonte de energia elétrica é conectada diretamente à rede de distribuição ou situada no próprio consumidor. Estando a matriz hidráulica como a maior fonte geradora de energia, respondendo por 63,7% de toda a energia produzida, em seguida, com 9,1%, vem a energia produzida por usinas de biomassa, que utilizam como combustível material orgânico como bagaço de cana, casca de arroz, resíduos de madeira, entre outros para produzir eletricidade. A fonte segue em constante crescimento e hoje já conta com 561 usinas, e a eólica com 8,0%, MME (2018).

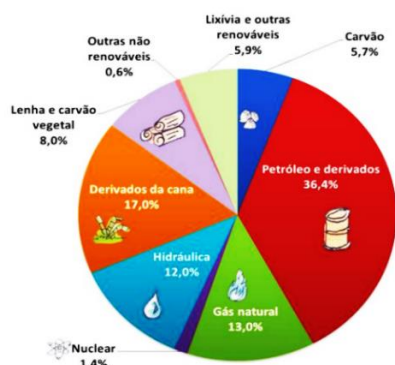
A energia fotovoltaica segundo Ministério de Minas e Energia terá em 2019 acréscimo de 44% em instalação e uso de usinas solares MME (2019).

Biomassa

Resíduo abundante a biomassa se apresenta como sendo a mais expressiva de todas as fontes renováveis de energia existentes, correspondendo a 15,7% da produção de energia renovável brasileira, no total de 39,4% (BEN, 2015). Toda matéria orgânica proveniente de florestas, esgotos domésticos e resíduos agroindustriais é considerada biomassa.

Pelas facilidades de armazenamento, transporte e alto poder energético, a biomassa se destaca dentre outras fontes de energia renováveis. Visto que o baixo custo na produção de energia elétrica e redução da geração de poluentes comparada a fontes não renováveis como petróleo e o carvão, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira



Fonte: BEN, 2018

Cogeração de energia

O termo “cogeração” é empregado para designar os processos de produção combinada de energia térmica e potência, mecânica ou elétrica, com o uso da energia liberada por uma mesma fonte primária de combustível, qualquer que seja o ciclo termodinâmico.

A cogeração é a fonte responsável pelo suprimento de energia térmica e eletromecânica em usinas de cana-de-açúcar, onde deriva de um processo no qual uma fonte de energia primária alimenta uma máquina ou aparelho térmico que, por combustão, irá transformar a energia química em mecânica (trabalho de eixo). Esta, por consequência, será a seguir convertida em energia elétrica por meio da ação de geradores, Dantas (2010).

Segundo Moran e Shapiro (2008), o método que produz sequencialmente potência (energia elétrica e/ou mecânica) além de transferir calor (energia térmica, ou vapor do processo) para certo uso é chamado de sistema de cogeração.

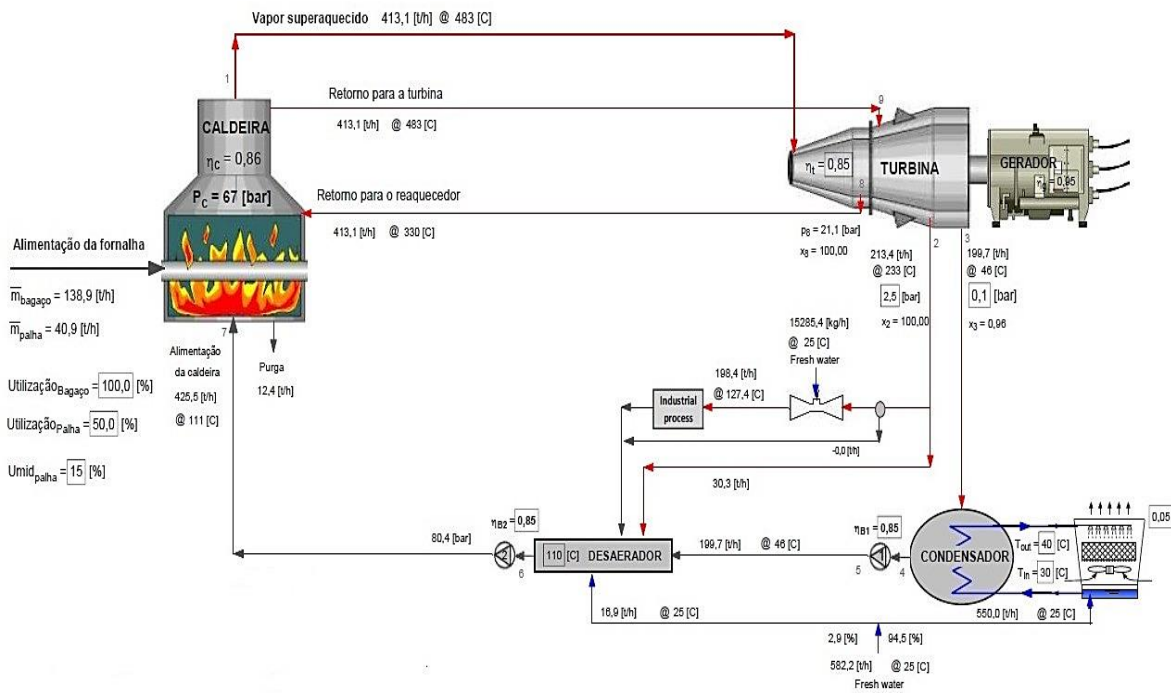
A possibilidade da comercialização do excedente energético produzido, impulsiona a busca por melhores sistemas eficiências das unidades de cogeração, potência com ciclo a vapor, cujo fluido de trabalho, a água (H₂O), escoar em estado estacionário, com auxílio de bombas, através da caldeira, turbina e condensador. Observe-se que nesse arranjo, não há contato entre o fluido de trabalho e a fonte de calor, (PELLEGRINI et al., 2010). Os processos termodinâmicos, responsáveis pela cogeração de energia térmica, mecânica e elétrica, são constituídos por: caldeira, turbina, condensador, bombas, desaerador, dessuperaquecedor e purgador. A forma como cada elemento da planta de cogeração se integra aos demais está descrita de maneira esquemática na Figura 2.

As unidades geradoras de potência instaladas nas destilarias de etanol operam segundo o ciclo Rankine. A produção de energia a partir desse arranjo considera por transformações termodinâmicas os estágios de aquecimento isobárico, expansão adiabática, condensação e produção de líquido subresfriado, (ANTON, 2017).

O uso de ciclos que empregam turbinas a vapor ou que utilizam turbinas a gás ou ciclos combinados são: os Ciclos Rankine e os Ciclos Brayton.

Os produtos de valores distintos (energia térmica e potencial) utilizando uma mesma fonte de energia (biomassa), tendo como sistemas de cogeração tornam-se atrativos por apresentarem eficiências de primeira lei da termodinâmica, maiores do que aquelas encontradas quando ambas as formas de energia são produzidas em processos independentes. Estas eficiências podem ser da ordem de 75 a 90 % (WALTER, 1994).

Figura 2 – Representação de um ciclo Rankine com reaquecimento

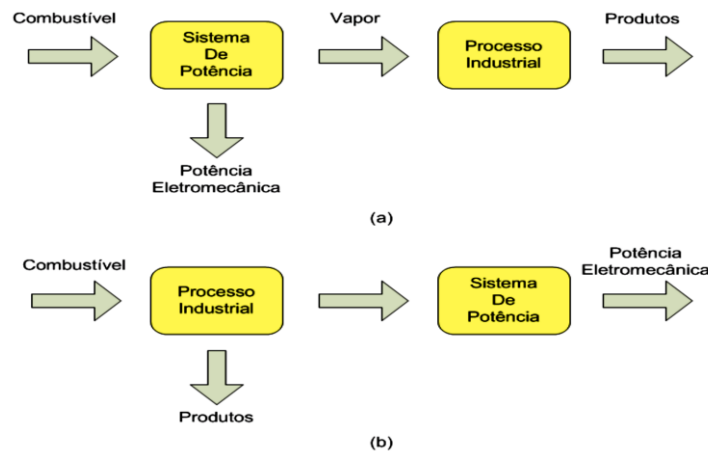


Fonte: Adaptado de Guerra (2014)

O processo em sequência para geração de eletricidade e consumo de energia térmica útil aceita duas possibilidades de acordo com a ordem de produção das formas de energia. O ciclo *topping* é o mais frequentemente encontrado na prática, especialmente no setor sucroalcooleiro. Neste ciclo, o vapor é utilizado em turbinas para produzir primeiramente potência elétrica, sendo que a energia térmica resultante é recuperada e

depois utilizada no processo produtivo. Nos chamados ciclos *bottoming*, a energia térmica residual associada aos processos industriais que precisam de alta temperatura é empregada para a produção de energia elétrica, situação mais comum em indústrias químicas (SÁNCHEZ PRIETO, 2003). A Figura 3, ilustra os ciclos *topping* e *bottoming*.

Figura 3. Ciclos *topping* (a) e *bottoming* (b).



Fonte: SÁNCHEZ PRIETO (2003).

A eletricidade obtida a partir da queima da palha e do bagaço é uma alternativa para suprir, ao menos em parte, as necessidades da população em épocas nas quais as usinas hidrelétricas sejam forçadas a reduzir sua capacidade de produção, uma vez que a

colheita da cana-de-açúcar ocorre em período de verão, com baixo índice pluviométrico (entre março a novembro), quando os reservatórios costumam atingir seus níveis críticos. Dessa forma, o aproveitamento de energia contida na biomassa, evitaria uma

descontinuidade no fornecimento de energia elétrica (SOUSA e MACEDO, 2010).

Os sistemas de cogeração, operam a pressão e temperaturas de: 105 bar e 525°C com potencial para produzir 158 kWh/t_c de energia excedente, minimizando a demanda de vapor para 280 kg /t_c e utilizando, além da totalidade do bagaço disponível, também de 50% da palha produzidano campo (ou seja, 140 kg/t_c). A produção potencial de bioeletricidade em cada planta irá depender do tipo, e da configuração de operação (temperatura e pressão) nos sistemas de cogeração (KHATIWADA et al., 2012).

O sistema de cogeração é da ordem de 460 kWh/t_c, sendo responsável por 65% da exergia total destruída na usina, Segundo Pellegrini (2011), a caldeira a principal fonte responsável por esse efeito, com uma contribuição de 97%. Guerra et al., (2014) determinam que as turbinas mais modernas usadas nas usinas brasileiras podem atingir 88% de eficiência isentrópica, quando o vapor que sai da caldeira encontra-se a temperatura próximo a 520°C e pressão a 120 bar. Para Pellegrini (2011), excesso de palha indiscriminadamente utilizada em geral nesses casos impõe grandes perdas exergéticas após etapas de moagem.

Metodologia

Os objetivos a que se propôs este estudo foi estruturado na forma das seguintes ações operacionais: revisão de bibliográfica: esta etapa compreende levantamento junto à literatura técnico-científica de dados e informações capazes de subsidiar a avaliação do desempenho ambiental de unidades de cogeração operando com biomassa. Definição de cenários: com base nos levantamentos efetuados na etapa de Revisão Bibliográfica foram selecionados parâmetros essenciais para o funcionamento do ciclo Rankine com reaquecimento em uma destilaria autônoma. Análise Energética, considerando desprezíveis as variações de energia cinética e potencial, a primeira lei da termodinâmica pode ser escrita na seguinte forma (BEJAN, 1988):

$$\dot{Q}_{V.C} - \dot{W}_{V.C} + \sum \dot{m}_s h_s = 0 \quad (1)$$

Onde: Q_{v.c.}: taxa de transferência de calor no volume de controle (kW); W_{v.c.}: potência no volume de controle (kW); h_e: entalpia específica na entrada do volume de controle (kJ/kg); entalpia Específica na saída do volume de controle (kJ/kg);: vazão mássica entrando no volume de controle (kg/s);: vazão mássica saindo do volume de controle (kg/s).

A Segunda Lei da Termodinâmica para um volume de controle, considerando o processo em regime permanente, pode ser representada pela seguinte equação:

$$\dot{S}_{ger,V.C} + \sum \left(\frac{\dot{Q}_{V.C,i}}{T_i} \right) + \sum \dot{m}_e S_e - \sum \dot{m}_s S_s = 0 \quad (2)$$

Onde: S_e: entropia específica na entrada do volume de controle (kJ/kgK); entropia específica na saída do volume de controle (kJ/kgK); temperatura superficial do volume de controle (K); taxa de geração de entropia no volume de controle (kW/K).

a) Análise Energética

A análise energética (primeira lei da termodinâmica) ou balanço de energia, não contabiliza a qualidade da energia que se está perdendo e nem onde ocorrem as irreversibilidades dos processos ocorridos, ou seja, não identifica onde e porque elas aparecem. Diversos autores como SZARGUT *et al.* (1988), KOTAS (1985) propõem uma relação para o cálculo termodinâmicos da exergia que leva em conta os fenômenos físico-químicos de uma mistura:

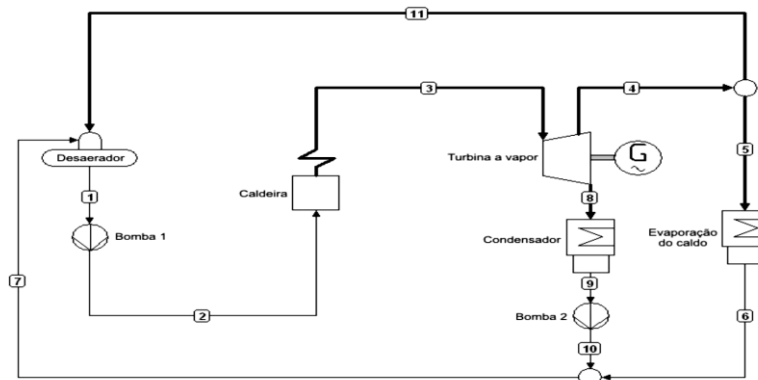
$$b_t = (h - h_0) - T_0(s - s_0) + \sum (\mu_i - \mu_{0,i}) X_i \quad (3)$$

Sendo: i,0μ: potencial químico de referência do elemento (T₀, P₀); iμ: potencial químico do elemento na mistura (T₀, P₀); X_i: fração do componente na mistura. ix .

b) Descrição da Planta

A planta, mostrada na Figura 4, é resultante do projeto de expansão do sistema de cogeração de energia de uma Destilaria e consiste basicamente de uma caldeira que produz 140 toneladas de vapor por hora a alta pressão e temperatura (6,6 MPa e 530 °C, respectivamente); de uma turbina de extração-condensação que aciona um gerador de eletricidade que produz 32 MW e com os acionamentos das moendas sendo feitos por motores elétricos, além dos outros acessórios.

Figura 4. Planta resultante do processo de expansão do sistema de cogeração.



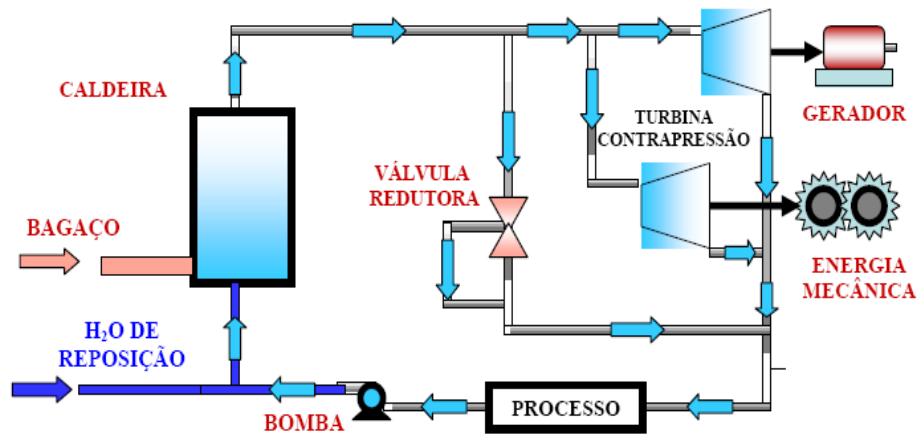
Fonte: Fiomiri et al., (2010).

O terceiro produto do setor sucroalcooleiro é a energia produzida nas usinas de beneficiamento da cana-de-açúcar, que atualmente, apenas 10% destas em funcionamento geram a bioeletricidade, mas esse número vem crescendo com instalação de novas e modernas unidades (ÚNICA 2015), e essa modernização vem

aumentando o reconhecimento e a importância do aproveitamento da potência da biomassa.

A cogeração se tornou uma prática essencial para as usinas de açúcar e álcool, pois além de atender sua necessidade de energia térmica e mecânica, usa o resíduo (bagaço) que sobra da moagem da cana como combustível, conforme mostra a figura 05.

Figura 05 - Diagrama padrão de cogeração da usina de açúcar e álcool.



Fonte: Pessine (2008, apud, DANTAS, 2008, p.50)

Para ser processada, cada tonelada de cana-de-açúcar requer 12 MWh de energia. Este total é facilmente gerado nos sistemas de cogeração instalados nas usinas e destilarias. O aumento do preço da energia comercializada pelas agências públicas, que conduziu as usinas à autossuficiência e à valorização do bagaço tanto para venda, como para outros fins, foi o agente motivador das indústrias para explorar de maneira mais intensa a comercialização de excedentes de energia gerada. Tal constatação foi feita por Dantas (2010), e permanece válida atualmente.

Considerações finais

Em constante crescimento, o setor sucroalcooleiro no Brasil com a sua substância essencial, a cana-de-açúcar, atua na produção do álcool e açúcar, e com isso colabora economicamente com o país. A indústria alcooleira vem atuando também com algumas práticas sustentáveis de reaproveitamento do bagaço da cana, usando essa matéria prima como base na produção de energia elétrica, bicombustíveis, e outras inovações, beneficiando a empresa além de economicamente, pelo baixo custo de aquisição do bagaço, essas práticas colaboram com a preservação ambiental, pois o bagaço passa a não ser mais descartado em campos abertos, e sim reutilizado.

Verifica-se que com o uso de tecnologias mais eficientes é possível a geração de um excedente de energia da ordem de 20 MW, com a consequente redução do custo unitário de geração.

REFERÊNCIAS

ANTON, L. Análise de desempenho ambiental da cogeração de energia elétrica a partir de adições sucessivas de biomassa em destilaria autônoma.

Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2017.

BEN. Balanço energético nacional. 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%3adntese%20do%20Relat%3b3rio%20Final_2015_Web.pdf> Acesso em: junho de 2019.

BEN. Balanço energético nacional. 2018. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/S%3adntese%20do%20Relat%3b3rio%20Final_2015_Web.pdf> Acesso em: junho de 2019.

BEJAN, A.; TSATSARONIS, G.; MORAN, M. **Thermal design & optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1996. 542 p.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. – v. 1 safra 2018/2019* – Brasília: CONAB, 2018. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>. Acesso em: 02 junho 2019.

COR – Conselho Europeu, **Rumo a um acordo mundial sobre o clima em Paris**, 114.ª reunião plenária de 12, 13 e 14 de outubro de 2015. Disponível no Portal dos Membros: <http://cor.europa.eu/members>. Acesso: Julho de 2019.

Cruz, S. H. Bagaço e palha de cana de açúcar fontes de celulose para gerar álcool, *Visão Agrícola* Ed.08, pag. 13, 2008.

- DANTAS, G. de A. **O Impacto dos Créditos de Carbono na Rentabilidade da Cogeração Sucroalcooleira Brasileira**. Dissertação de Mestrado. ISEG/Universidade Técnica de Lisboa, 2008.
- DANTAS, D.N. Uso da Biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroetanoléiras do interior paulista. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos/SP, 2010.
- Fiomari, M.C., “Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do oeste paulista com sistema de cogeração de energia em expansão”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Ilha Solteira, 129 p., 2010.
- GUERRA, J. P.; COLETA Jr., J.; ARRUDA, L.; SILVA, G.; KULAY, L. Comparative analysis of electricity cogeneration scenarios in sugarcane production by LCA. *Int J Life Cycle Assess*, 19, p. 814–825, 2014.
- KHATIWADA, D.; SEABRA, J.; SILVEIRA, S.; WALTER, A. Power generation from sugarcane biomass - a complementary option to hydroelectricity in Nepal and Brazil. *Energy*, 28, p. 241-254, 2012.
- KOTAS, T.J.; **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**; Ed. Krieger Publishing Co; 328p.; Florida, USA; 1995.
- MAPA – Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento. *Cana-de-açúcar*. Brasília, 2015. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/cana-de-acucar>> Acesso em 19 junho 2019.
- MME – Ministério de Minas e Energia. (2018) *Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural – n. 106. Dezembro 2018*. Secretária de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. Brasília. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>.
- MME – Ministério de Minas e Energia. (2019) *Boletim Mensal de Acompanhamento da Indústria de Gás Natural – n. 106. Dezembro 2019*. Secretária de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. Brasília. Disponível em: <http://www.mme.gov.br>.
- MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N. *Princípios de Termodinâmica para Engenharia*. 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC Editora. 2008.
- PELLEGRINI, L. F.; OLIVEIRA, J. S; BURBANO, J. C. Supercritical steam cycles and biomass integrated gasification combined cycles for sugarcane mills. *Energy*, 35 (2), p. 1172-1180, 2010.
- PELLEGRINI, I.F.; OLIVEIRA JR, S. Combined production of sugar, ethanol and electricity: Thermoeconomic and environmental analysis and optimization. *Energy*, 36, p. 3704 – 3715, 2011.
- PEREIRA JR, N.; COUTO, M. A. P. G.; SANTA ANNA, L. M. M. Biomass of lignocellulosic composition for fuel ethanol production and the context of biorefinery. **Series on Biotechnology**. Biblioteca Nacional: Rio de Janeiro, v. 2, 2008.
- SÁNCHEZ PRIETO, M. G. S. **Alternativas de cogeração na indústria sucro-alcooleira, estudo de caso**. 2003. 255 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- SEIFERT, Mari Elizabete Bernardini. **Gestão Ambiental: instrumentos, esferas de ação e educação ambiental**. São Paulo: Atlas, 2011.
- SOUSA, E.L.L.; MACEDO, I.C (Org.). *Etanol e bioeletricidade: a cana-de-açúcar no futuro da matriz energética*. São Paulo: Luc Projetos de Comunicação, 2010. 315p.
- SZARGUT J., MORRIS, D.R., STEWARD, F.R.; **Exergy Analysis of Thermal, Chemical and Metallurgical Process**; Hemisphere Publishing Corporation; 332 p.; New York; 1988.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR – UNICA. **Protocolo agroambiental do setor sucroalcooleiro**. São Paulo: [s.n.], 2015. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode={BE E106FF-D0D5-4264-B1B3-7E0C7D4031D6}>>. Acesso em: Julho de 2019.
- WALTER, A. C. **Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termelétrica junto ao setor sucroalcooleiro**. 1994. 283 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.