

COGERAÇÃO DE ENERGIA E RECOLHIMENTO DO PALHIÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR: PROCESSOS E VIABILIDADE**COGENERATION ENERGY AND GATHERING OF CANE SUGAR STRAW: PROCESSES AND VIABILITY****Carlos Roberto Souza Carmo**

Mestre em Contabilidade pela Pontifícia Universidade Católica de São Paulo
Doutor em Agronomia pela UNESP (campus Botucatu)
Prof. da Fac. de Ciências Contábeis da Univ. Federal de Uberlândia (FACIC-UFU)
carlosjj2004@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3806-9228>

José Antonio Rabi

Pós-doutor em Fenômenos de Transp. em Meios Porosos pela Univers. de Calgary - Canadá
Prof. do Depart. de Eng. de Biosistemas da USP (campus Pirassununga),
jrabi@usp.br
<https://orcid.org/0000-0001-5041-4680>

Fernando de Lima Caneppele

Pós-doutorado em Agronegócio e Desenvol. pela Fac. de Ciências e Engenharia da UNESP
Prof. do Depart. de Eng. de Biosistemas, USP (campus Pirassununga),
caneppele@usp.br
<https://orcid.org/0000-0003-4498-8682>

Resumo:

Este estudo teve por objetivo discutir e apresentar alguns dos processos de aproveitamento do palhiço de cana-de-açúcar na cogeração energética e, ainda, avaliar se o preço pago pela energia gerada a partir dessa biomassa apresenta diferenças significativas, em relação aos preços pagos pela energia gerada a partir de outros tipos de combustíveis, inclusive o próprio bagaço da cana, segundo os leilões de energia elétrica realizados no ambiente de contratação regulada da ANEEL. Para análise dos dados foram utilizadas estatísticas descritivas, médias, desvio padrão e coeficiente de variação e o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney. Ao final, foi possível perceber que o processo de cogeração a base do palhiço de cana-de-açúcar possui características que o tornam viável tecnicamente. Contudo, quando analisada sob a perspectiva econômica, a utilização desse tipo de biomassa quase deixa de ser atrativo, principalmente, quando se tomam por referência as variáveis preço e investimento demandado para o seu aproveitamento.

Palavras-chave: Biomassa. Indústria de açúcar e álcool. Energia renovável.**Abstract:**

This study aimed to discuss and present some of the processes for using sugarcane straw in energy cogeneration and, also, to evaluate whether the price paid for energy generated from this biomass presents significant differences, in relation to the prices paid by energy generated from other types of fuels, including sugarcane bagasse, according to the electricity auctions held in

- a) Submissão em: 11/03/2020.
- b) Envio para avaliação em: 19/03/2020.
- c) Término da avaliação em: 17/05/2020.
- d) Correções solicitadas em: 18/05/2020.
- e) Recebimento da versão ajustada em: 25/05/2020.
- f) Correções complementares solicitadas em: 25/05/2020.
- g) Aprovação final em: 27/05/2020.

the regulated contracting environment of ANEEL. For data analysis, descriptive statistics, means, standard deviation and coefficient of variation were used and the Wilcoxon-Mann-Whitney non-parametric test. In the end, it was possible to notice that the cogeneration process based on sugarcane straw has characteristics that make it technically feasible. However, when analyzed from an economic perspective, the use of this type of biomass is almost no longer attractive, especially when taking into account the variables price and investment required for its use.

Keywords: Biomass. Sugar-alcohol industry. Renewable energy.

1 Introdução

A possibilidade de se comercializar a energia elétrica gerada por empreendimentos denominados autoprodutores, a partir de fontes alternativas de combustível, surgiu no Brasil com a Lei nº 1872 de 21 de maio de 1981 (BRASIL, 1981), mediante a qual foi permitida aquisição da energia elétrica excedente gerada a partir fontes energéticas que não empregassem combustível derivado de petróleo.

Essa legislação permaneceu inalterada até 1998, quando a Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998 (BRASIL, 1998) alterou o artigo 26 da Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996 (BRASIL, 1996), que instituiu a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e revogou a antiga Lei nº 1872.

A Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998 (BRASIL, 1998), delegou à ANEEL a regulação da comercialização da energia elétrica excedente produzida pelos autoprodutores. Cabendo observar que o texto do inciso IV do artigo 26 da Lei nº 9.427, alterado pela a Lei nº 9.648 de 27 de maio de 1998, estabelece que a ANEEL é o órgão responsável pela “[...] comercialização, eventual e temporária, pelos autoprodutores, de seus excedentes de energia elétrica” (BRASIL, 1998, p. 1).

Ou seja, apesar do Brasil procurar estruturar o seu setor energético de forma estratégica desde meados da década de 90 (GUERRA; SILVA, 2017), a legislação em questão não vislumbrou a possibilidade da constituição de empreendimentos energéticos voltados para a cogeração de forma permanente e constante, como acontece com as termoelétricas que funcionam com base em combustíveis fósseis.

No caso do setor sucroenergético, essa preocupação da legislação com o caráter eventual e temporário pode ser explicada pela sazonalidade da participação da biomassa de cana-de-açúcar na geração de energia elétrica, que tem um caráter de complementariedade em relação à energia gerada a partir de recursos hídricos (EPE, 2017).

Com o advento da Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004 (BRASIL, 2004), que foi o marco regulatório do novo modelo do setor elétrico nacional, a legislação do setor foi atualizada e passou a contemplar ações voltadas para a ampliação, ou melhor, a diversificação da matriz elétrico-energética nacional (GUERRA, 2017).

E nesse sentido, atualmente, a participação de empreendimentos sucroenergéticos voltados para produção de energia elétrica mediante o processo de cogeração representa, 13,46% de um total de 3009 empreendimentos termoelétricos, conforme dados levantados a partir de consultas realizadas no Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL (2018).

Admitindo o caráter de complementariedade da energia elétrica gerada pelo setor sucroenergético nacional, e, ainda, levando-se em conta que essa energia elétrica tem como matéria prima básica o bagaço da cana-de-açúcar e, em menor proporção, o palhiço da cana, o presente estudo teve por objetivo discutir e apresentar alguns dos processos referentes ao

aproveitamento do palhiço na cogeração energética e, após isso, avaliar se o preço pago pela energia gerada a partir dessa biomassa (R\$/MW) apresenta diferenças significativas, em relação aos preços pagos pela energia gerada a partir de outros tipos de combustíveis, inclusive o próprio bagaço da cana, mediante a análise dos dados referentes a todos os leilões de energia elétrica realizados no ambiente de contratação regulada (ACR) da ANEEL, do ano 2005 até 2017 (ANEEL, 2018).

Nesse sentido, foi realizada uma pesquisa bibliográfica visando discutir e apresentar alguns dos processos de coleta do palhiço mais utilizados para o seu aproveitamento na cogeração energética, conforme apresentado na seção 2 deste artigo.

Na sequência, foram levantados os dados referentes aos preços contratados em relação à energia elétrica gerada pelo setor sucroenergético (R\$/MW) e negociada em todos os leilões de energia realizados no ambiente de contratação regulada (ACR) da ANEEL, do ano 2005 até 2017 (ANEEL, 2018); e, ainda, foi pesquisada e analisada a metodologia suficiente para permitir avaliar se tal preço apresenta diferenças significativas tanto em relação aos preços pagos pela energia gerada a partir de outros tipos de combustíveis, quanto em relação ao preço pago pela energia gerada a partir da utilização do bagaço da cana-de-açúcar, conforme descrito na seção 3 deste relato científico.

A partir da plataforma teórica constituída para suportar esta pesquisa, bem como, utilizando a metodologia escolhida para sua realização, procedeu-se o processo de análise dos dados e apresentação de resultados, dando origem à seção 4 deste artigo.

Finalmente, na seção 5, são apresentadas as considerações finais acerca de todo esse processo de investigação científica, e, ainda, são destacadas suas principais limitações e realizadas sugestões para sua continuidade a partir da realização de futuros estudos.

2 Referencial Teórico

Conforme foi dito introdutoriamente, a energia elétrica produzida pelo setor sucroenergético brasileiro apresenta um caráter de complementariedade em relação à energia hidrelétrica (EPE, 2017).

Isso pode ser percebido mediante a análise do Gráfico 1, em que, “nota-se a complementariedade com a fonte hídrica, uma vez que o aumento da geração da bioeletricidade ocorre durante a safra, período concomitante ao da estiagem” (EPE, 2017, p. 31).

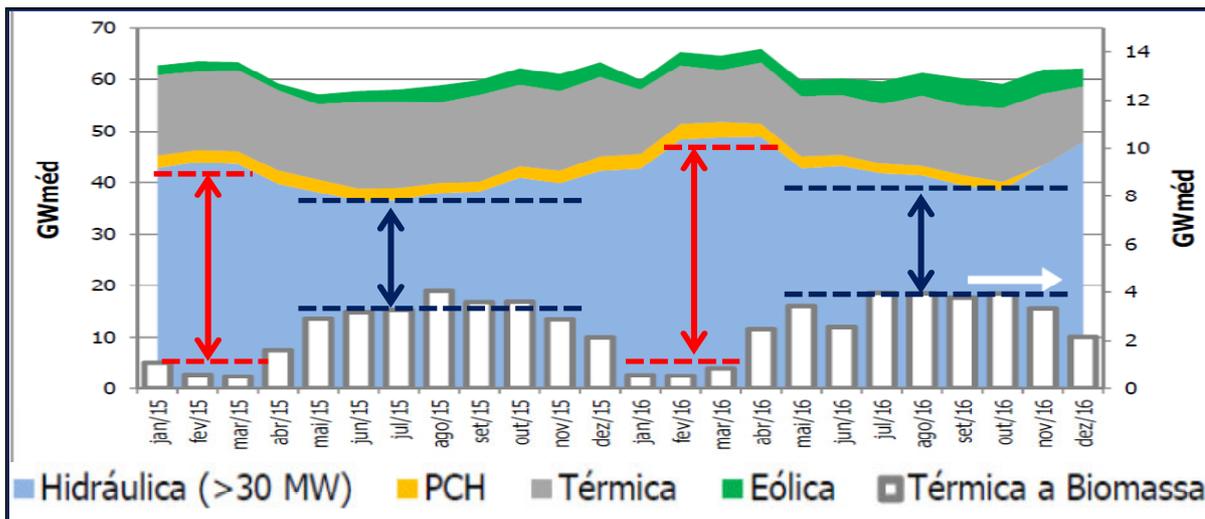
Nesse contexto, de uma capacidade total outorgada de 43.188.671 Kilowatts (kW), o setor sucroenergético brasileiro detém capacidade outorgada de 11.356.470,2 kW, perfazendo uma capacidade média outorgada de 28.040,67 kW/empreendimento, obedecendo aquela distribuição territorial descrita na Tabela 1.

O processo de cogeração energética consiste na produção combinada e sequencial de energia térmica e elétrica a partir da queima de um mesmo combustível, caracterizando-se pelo elevado desempenho e pela baixa produção de resíduos (LORA; TEIXEIRA, 2006; MORAN; SHAPIRO, 2013).

No Brasil, a biomassa de cana-de-açúcar, composta pelo bagaço e pelo palhiço, é um dos recursos renováveis mais abundantes que podem ser utilizados como biocombustível no processo de cogeração energética (INNOCENTE, 2011).

O bagaço surge com o esmagamento da cana-de-açúcar para a utilização do caldo, e o palhiço surge em decorrência da colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sendo composto por um material orgânico a base de palha, folhas e ponteiros e partes de cana fracionada (INNOCENTE, 2011).

Gráfico 1 - Participação da biomassa na geração elétrica total



Fonte: adaptado pelos autores, a partir de EPE (2017, p. 31).

Segundo Baccarin e Castilho (2002), a cogeração em indústrias sucroalcooleiras ocorre a partir da queima da biomassa, normalmente o bagaço da cana-de-açúcar, em uma fornalha que gera calor para uma caldeira em que é produzido o vapor que aciona uma turbina e, por sua vez, movimentada o eixo de um gerador de energia elétrica.

Tabela 1- Distribuição da capacidade outorgada (kW) aos empreendimentos sucroenergéticos para produção de energia elétrica a partir do processo de cogeração

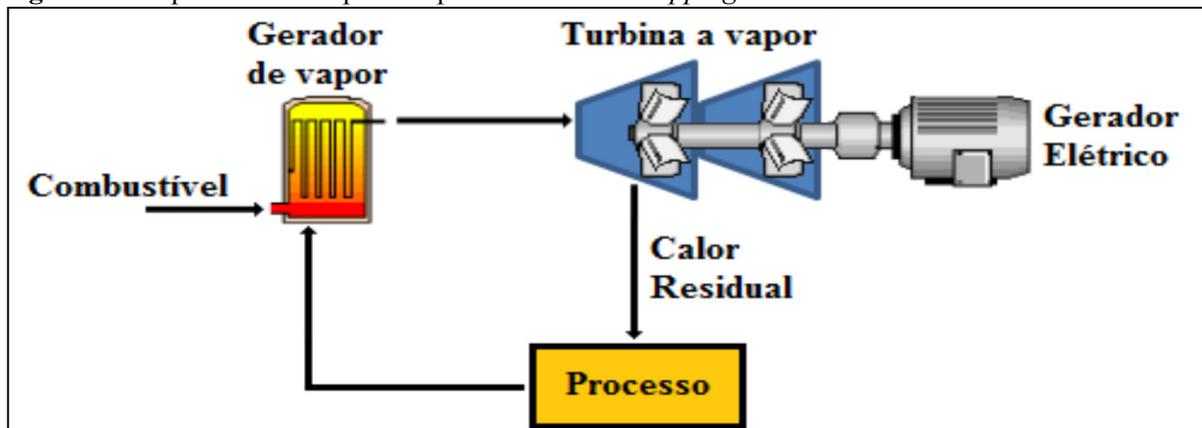
| Unidade | Qtd. | Mínimo | Média | Mediana | Máximo | Soma | Desvio Padrão | Coef. de Variação |
|---------------|------------|------------|---------------|---------------|----------------|-------------------|---------------|-------------------|
| SP | 203 | 302 | 28.465 | 16.200 | 136.000 | 5.778.485 | 28.705 | 101% |
| MG | 44 | 1.200 | 29.635 | 24.500 | 101.875 | 1.303.920 | 24.407 | 82% |
| GO | 32 | 4.200 | 43.780 | 29.000 | 160.000 | 1.400.968 | 39.982 | 91% |
| PR | 27 | 2.400 | 18.075 | 13.000 | 50.500 | 488.020 | 15.570 | 86% |
| MS | 24 | 2.000 | 45.320 | 25.000 | 141.019 | 1.087.687 | 45.306 | 100% |
| AL | 21 | 2.400 | 15.470 | 9.900 | 62.500 | 324.862 | 16.375 | 106% |
| PE | 19 | 3.000 | 15.577 | 11.200 | 47.000 | 295.970 | 12.377 | 79% |
| MT | 8 | 2.800 | 23.616 | 18.448 | 72.700 | 188.928 | 23.943 | 101% |
| PB | 5 | 8.400 | 19.540 | 19.200 | 30.000 | 97.700 | 9.840 | 50% |
| SE | 5 | 1.200 | 11.940 | 8.000 | 25.000 | 59.700 | 9.326 | 78% |
| ES | 3 | 3.200 | 25.770 | 33.000 | 41.110 | 77.310 | 19.962 | 77% |
| SC | 3 | 3.000 | 3.690 | 3.200 | 4.870 | 11.070 | 1.027 | 28% |
| MA | 2 | 4.400 | 4.700 | 4.700 | 5.000 | 9.400 | 424 | 9% |
| PA | 2 | 1.250 | 6.225 | 6.225 | 11.200 | 12.450 | 7.036 | 113% |
| RN | 2 | 17.000 | 28.500 | 28.500 | 40.000 | 57.000 | 16.263 | 57% |
| AM | 1 | 5.000 | 5.000 | 5.000 | 5.000 | 5.000 | - | - |
| BA | 1 | 16.000 | 16.000 | 16.000 | 16.000 | 16.000 | - | - |
| PI | 1 | 18.000 | 18.000 | 18.000 | 18.000 | 18.000 | - | - |
| RJ | 1 | 44.000 | 44.000 | 44.000 | 44.000 | 44.000 | - | - |
| TO | 1 | 80.000 | 80.000 | 80.000 | 80.000 | 80.000 | - | - |
| Brasil | 405 | 302 | 28.041 | 16.500 | 160.000 | 11.356.470 | 29.124 | 104% |

Fonte: elaborado pelos autores, a partir de consultas realizadas no Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL (2018)

Santos (2017) afirma que, além do vapor utilizado para movimentação das turbinas responsáveis pela geração de energia elétrica, ocorre a utilização desse vapor para movimentação do maquinário utilizado no processo produtivo da usina e, ainda, pode ocorrer

sua utilização como fonte de calor pra uso no processo industrial propriamente dito, conforme esquema resumido pela Figura 1. Sendo que, ainda segundo Santos (2017), esse seria o ciclo mais utilizado pelas empresas do setor sucroenergético, que é conhecido como ciclo *topping*.

Figura 1 - Esquema de uma planta operando em ciclo *topping*



Fonte: Cremonez (2013, apud SANTOS, 2017).

A produção de energia elétrica baseada em combustíveis fósseis apresenta uma eficiência de até 60%, portanto, com perdas de até 40%, e, a cogeração energética tem por característica uma eficiência de até 90%, portanto, com perdas bem menores (SANTOS, 2017).

Especificamente acerca da utilização do palhicho como combustível no processo de cogeração energética, Cherubin (2017) explica que o interesse por esse tipo de biomassa surgiu em meados dos anos 90.

Cherubin (2017) ainda destaca que, a despeito da crise econômica que instalou no setor na última década e fez com que as empresas sucroenergéticas buscassem tecnologias mais eficientes de produção e aproveitamento de resíduos como o bagaço e a vinhaça, o uso do palhicho para cogeração recebeu bem menos adeptos.

A falta de um planejamento adequado é apontada por Cherubin (2017) como um dos fatores que fez com que as unidades sucroenergéticas não investissem mais no aproveitamento do palhicho para a cogeração energética.

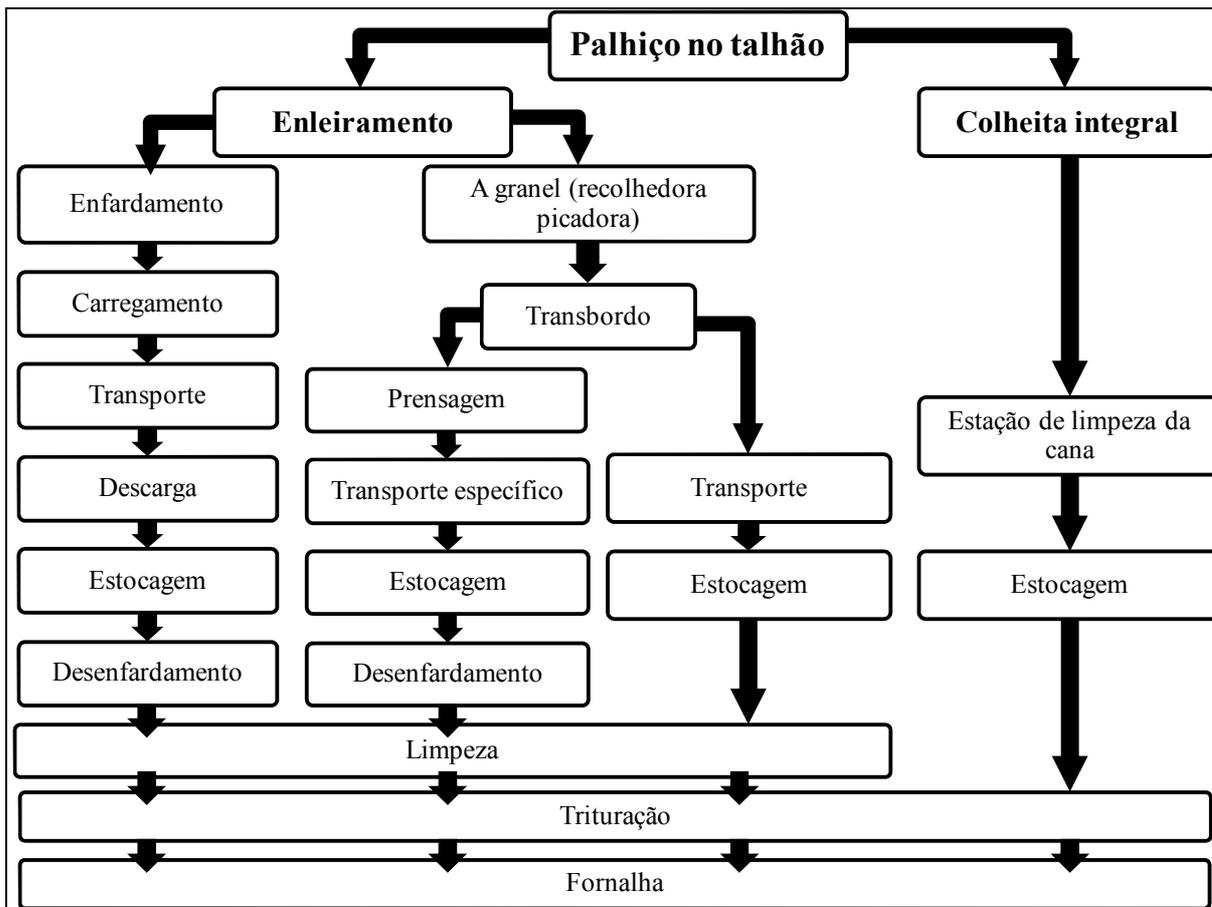
Ou seja, devido à suas características, o aproveitamento do palhicho demanda um planejamento próprio, com especial atenção a estudos relacionados à disponibilidade dessa biomassa e a forma escolhida para seu recolhimento, e, ainda, em relação ao seu transporte do campo até a indústria (LACERDA, 2015).

O planejamento em questão também deve levar conta uma série de outros fatores como: o tamanho da usina (moagem total e horária); a área de cana-de-açúcar própria; a disponibilidade da unidade para gerar e exportar energia elétrica excedente; e, as características das suas caldeiras (CHERUBIN, 2017).

Lacerda (2015) afirma que o estudo das alternativas referentes aos processos de recolhimento do palhicho tende a se intensificar cada vez mais, de forma a viabilizar sua utilização na cogeração energética.

Nesse sentido, o ponto de partida das análises das variáveis críticas acerca do aproveitamento do palhicho está relacionado, inicialmente, à decisão sobre qual método de coleta utilizar, ou seja, enleiramento ou colheita integral, conforme pode ser visto pelo resumo descrito na Figura 2.

Figura 2 – Processos de coleta do palhicho para o seu aproveitamento na cogeração energética



Fonte: elaborado pelos autores, a partir de adaptações do estudo de Lacerda (2015) e, ainda, com base em Perea, Biaggioni e Seraphim (2012).

Pelo método da colheita integral, a coleta e o transporte do palhiço acontecem junto com a cana colhida e picada, sendo que, antes da utilização da cana no processo industrial ocorre a sua separação do palhiço mediante um processo de limpeza a seco (PEREA; BIAGGIONI; SERAPHIM, 2012; LACERDA, 2015; CHERUBIN, 2017).

Pelo método do enleiramento, o palhiço é deixado no campo no momento da colheita da cana, sendo recolhido depois, após o seu enleiramento mecânico (LACERDA, 2015; CHERUBIN, 2017).

Em ambos os métodos são observadas vantagens e desvantagens, quando comparadas entre si, conforme pode ser visto no Quadro 1.

Perea, Biaggioni e Seraphim (2012) destacam que, independentemente, do sistema de coleta, o palhiço precisa ser peneirado para a retirada de impurezas minerais prejudiciais ao processo industrial das usinas.

Adicionalmente, Perea, Biaggioni e Seraphim (2012) afirmam que, para a utilização do palhiço como combustível no setor sucroenergético de forma viável, econômica e tecnicamente, devem ser tomados alguns cuidados em relação ao seu processamento, ou seja, ele deve ser misturado ao bagaço, em proporções constantes, para ser queimado, e, para tanto, precisa ser picado ou desfibrado.

Quer seja em relação ao processo de coleta, quer seja em relação ao seu tratamento para o processo de queima, o fato é que a busca por soluções relacionadas à utilização do palhiço no processo de cogeração energética tornou uma tendência no setor sucroenergético (LACERDA, 2015).

Quadro 1 – Gargalos no processo de utilização do palhicho como combustível na cogeração

| Fatores | Palhicho trazido via colhedora de cana | Palhicho trazido via enfardadora |
|--------------------------------------|--|--|
| Umidade | 40% a 60% (menor potencial calorífico). | 10% a 20% (maior potencial calorífico). |
| Níveis de corrosão | Altos teores de cloro com maiores níveis de corrosão. (alto) | Baixos teores cloro e menores níveis de corrosão. (menores, mas, ainda significativos) |
| Preparação e consumo energético | Depois do palhicho ter sido separado, ele deve ser triturado para ficar na mesma condição física do bagaço e, assim, poder ser utilizado nas caldeiras, pois, elas foram projetadas para bagaço de cana. (a potência consumida [kW] no processo de preparação é muito alta) | Necessidade de transportar, desfardar, picar, e alimentar a caldeira na mesma condição física do bagaço. (além de consumir uma quantidade expressiva de energia [kW], ainda demanda uma maior quantidade de operações) |
| Processamento industrial e cogeração | Interfere negativamente nos processos de extração, tratamento do caldo, cozimento, fermentação, cor do açúcar e outros (eleva os índices de impureza vegetal). | Uma vez que os alimentadores da caldeira não são preparados para o palhicho, gera-se sobrecarga nos transportadores de bagaço. (reduzem a eficiência da caldeira que foi projetada para a operação baseada no bagaço da cana) |
| Inventário e planejamento do uso | Difícil. | Fácil. |

Fonte: elaborado pelos autores, com base em Cherubin (2017).

Nesse contexto, especificamente acerca do processo de recolhimento do palhicho, Perea, Biaggioni e Seraphim (2012) realizaram um estudo a fim de avaliar três sistemas de manejo do palhicho no campo e na indústria.

Perea, Biaggioni e Seraphim (2012) observaram que o processo de colheita integral da cana-de-açúcar com separação do palhicho na indústria (limpeza a seco) apresenta o menor custo para o seu aproveitamento, conforme pode ser visto na Tabela 2, entretanto, ele pode apresentar um menor rendimento na sua queima, caso não seja submetido a um processo de secagem.

Tabela 2 – Comparativo de qualidade do palhicho e custo

| Modalidade | Produtividade do recolhimento (t/ha) | Impureza mineral (%) | Umidade (%) | Custo do palhicho posto na usina (US\$/t) |
|---|--------------------------------------|----------------------|-------------|---|
| Recolhimento do palhicho com colhedora para forrageira | 4,95 | 7,54 | 10,70 | 19,78 |
| Recolhimento do palhicho seco com colhedora sem aleiramento | 4,83 | 3,41 | 13,92 | 32,15 |
| Recolhimento do palhicho verde com colhedora sem aleiramento | 10,29 | 6,149 | 40,82 | 35,15 |
| Recolhimento do palhicho com máquina colhedora e enfardadora | 6,89 | 8,00 | 16,00 | 37,95 |
| Colheita integral com separação do palhicho na indústria (limpeza a seco) | * | ** | 38,99 | 30,75 |

(*)Perda da capacidade de carga de até 30%, com percentual de palhicho colhido junto com a cana entre 7,00% e 13,00%.

(**)Não foi informado o percentual de impureza mineral; contudo, após duas aplicações do processo de limpeza a seco (sopragens), ainda foram observados 1,85% a 2,30% de impureza vegetal na cana (palhiço)

Fonte: elaborado pelos autores a partir dos resultados do estudo de Perea, Biaggioni e Seraphim (2012).

A despeito das questões técnicas, Cherubin (2017) pondera que o palhiço é uma boa alternativa para incrementar a produção de energia elétrica por meio da cogeração, contudo, uma variável especialmente crítica é o preço da energia elétrica que depende de maior estabilidade, o que inviabiliza a previsibilidade para realização de investimentos.

Ao identificar e aplicar uma modelagem baseada na análise de decisão multicritério para avaliação das alternativas de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar para a cogeração de energia, Lemos (2018) explica que são muitos os fatores a serem ponderados em relação às metodologias de recolhimento e uso do palhiço.

A partir de simulações dos possíveis preços de liquidação da energia elétrica fornecida a partir do processo de cogeração, tomando por base os preços máximo e mínimo já praticados e a geração de números aleatórios, Lemos (2018) relacionou 7 faixas de preços e três alternativas referentes ao processo coleta do palhiço para sua de utilização na cogeração energética, conforme descrito pela Tabela 3.

Tabela 3 – Faixa de preço e alternativa de colheita sugerida para utilização do palhiço

| Faixa de preços (R\$) | Alternativa sugerida |
|-----------------------|--------------------------------------|
| ≤ 162,00 | Colheita parcial |
| 163,00 a 183,00 | Colheita parcial e Colheita integral |
| 184,00 a 301,00 | Colheita integral |
| 302,00 a 452,00 | Enfardamento e Colheita integral |
| 453,00 a 821,00 | Colheita integral |
| 822,00 a 838,00 | Colheita integral e Colheita parcial |
| ≥ 839,00 | Colheita parcial |

Fonte: Lemos (2018).

Lemos (2018) ainda destacou que, para as 200 observações de preços simulados, seu estudo sinalizou que em 41% delas a alternativa indicada seria a colheita integral do palhiço junto com a cana; em 30% das simulações, foi indicada a colheita parcial; em 21,5% das simulações, foi indicado o recolhimento a partir de enfardamento; e, em 7,5% das simulações as alternativas de colheita integral e parcial foram indicadas simultaneamente. Lemos (2018) salientou que a solução sugerida (41%) não é ótima em termos de custos, mas, é aquela melhor se adéqua à hierarquia de objetivos estabelecidos em suas simulações.

A partir de um levantamento de dados sobre a safra 2013/2014 em 77 usinas, Trombreta e Caixeta Filho (2017) realizaram um estudo que visou identificar o potencial e a disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar para uso energético na região Centro-Sul, entre outros fatores.

Além de constatarem a crescente participação da biomassa da cana-de-açúcar na produção e comercialização de energia elétrica, Trombreta e Caixeta Filho (2017) destacam que, até 2014, o setor sucroenergético promoveu a negociação de aproximadamente 212 mil GWh, formalizando 2.197 contratos que contaram com a participação de aproximadamente 70 usinas sucroenergética, a um preço médio de R\$ 180,00/MW.

Segundo Trombreta e Caixeta Filho (2017), os dados acerca da participação das empresas do setor sucroenergético no Ambiente de Contratação Livre (ACL) são desconhecidos, uma vez que tais informações não são públicas.

No ACL ocorre a livre negociação entre os agentes vendedores e compradores, e os preços são definidos a partir da livre negociação (GUERRA; SILVA, 2017). Por outro lado, no

Ambiente de Contratação Regulada (ACR), a contratação para fornecimento de energia elétrica ocorre a partir de leilões promovidos pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), com regulação contratual realizada pela ANEEL (GUERRA; SILVA, 2017), sendo que, nesse caso as informações acerca dos resultados desses leilões são públicas (ANEEL, 2018).

Ao final de sua pesquisa, Trombreta e Caixeta Filho (2017) obseveram que, na região Centro-Sul do Brasil, uma usina sucroenergética de porte médio exporta cerca de 140.000 MW/safra, e, ainda, que há uma predominância da comercialização dessa energia a partir dos leilões de energia, em ACR, com preços médios praticados em torno de R\$ 191,49/MW.

Diante desse quadro geral, conclui-se que, pelas características próprias desse tipo de biomassa, a utilização do palhiço no processo de cogeração energética demanda um conjunto de decisões referentes ao seu processo de coleta e utilização nas fornalhas das empresas sucroenergéticas, conforme observaram Perea, Biaggioni e Seraphim (2012), Lacerda (2015) e Cherubin (2017).

Tais decisões devem ser previamente planejadas, uma vez que elas direcionaram toda uma série de investimentos em maquinários e, ainda, a geração de gastos das mais variadas naturezas, que vão desde custos com mão de obra e combustível até a compra de bens de natureza durável como máquinas e equipamentos.

Aliado a tudo isso, encontra-se a variável preço que está sujeita a flutuações causadas pelas oferta e demanda energética e, ainda, por fatores conjunturais (CHERUBIN, 2017; LEMOS, 2018; TROMBRETA; CAIXETA FILHO, 2017).

Dessa forma, o estudo e a compreensão do comportamento dos preços inerentes à energia gerada a partir da queima do palhiço torna-se crítica e, portanto, necessária. Posto que, essa é uma variável que foge ao controle dos empreendimentos sucroenergéticos geradores de energia elétrica.

3 Metodologia de Estudo

No intuito de avaliar se o preço pago pela energia gerada a partir do palhiço da cana-de-açúcar apresenta diferenças significativas, em relação aos preços pagos pela energia gerada a partir de outros tipos de combustíveis, inclusive o bagaço da cana, foram levantados os dados referentes a todos os leilões de energia elétrica realizados no ambiente de contratação regulada (ACR) da ANEEL, do ano 2005 até 2017 (ANEEL, 2018).

A partir da identificação daquele conjunto de informações, foram analisadas comparativamente as variáveis relacionadas ao preço médio contratado por megawatt (MW) de energia elétrica comercializada, os montantes de investimentos realizados por esse tipo de empreendimento e, ainda, o intervalo de tempo compreendido entre a realização do leilão e o início do fornecimento da energia elétrica.

Considerando que as variáveis monetárias analisadas neste estudo estão expressas em moeda de poder aquisitivo diferente ao longo do intervalo de tempo analisado (2005 até 2017), todos os valores monetários (preço e investimento) foram ajustados para moeda de poder aquisitivo de um mesmo período, no caso, o ano de 2017.

Nesse sentido, foi utilizada a taxa média anual de câmbio (R\$/US\$) referente aos valores de compra do Dólar Comercial americano, divulgada pelo Banco Central do Brasil (IPEADATA, 2018), e aplicados os fatores de conversão descritos no Quadro 2.

Quadro 2 – Descrição dos fatores utilizados para atualização monetária das variáveis expressas em moeda (R\$)

| Ano | Taxa de câmbio - R\$ / US\$ comercial compra - média anual ^(a) (R\$) ^(b) | Fator de atualização ^(c) |
|------|--|-------------------------------------|
| 2005 | 2.4344 | 1.3109597 |

| | | |
|------|--------|-----------|
| 2006 | 2.1753 | 1.4670863 |
| 2007 | 1.9471 | 1.6390826 |
| 2008 | 1.8338 | 1.7403465 |
| 2009 | 1.9968 | 1.5982786 |
| 2010 | 1.7594 | 1.8139006 |
| 2011 | 1.6742 | 1.9062328 |
| 2012 | 1.9540 | 1.6332695 |
| 2013 | 2.1570 | 1.4795281 |
| 2014 | 2.3529 | 1.3563371 |
| 2015 | 3.3309 | 0.9581132 |
| 2016 | 3.4895 | 0.9145747 |
| 2017 | 3.1914 | 1.0000000 |

Observações:

- (a) Foi utilizada a taxa média anual devido ao fato das operações realizadas no ACR da ANEEL ocorrerem ao longo de meses diversos em cada ano.
- (b) Os valores médios anuais estão expressos em Reais (R\$) na relação 1/1, ou seja, uma unidade de real (R\$1,00) para uma unidade de Dólar americano (US\$1,00) cotado aos valores de compra no mercado financeiro nacional.
- (c) Qualquer fator de correção pode ser obtido a partir divisão da cotação média em Reais (R\$) de 2017 pela cotação média em Reais (R\$) do Dólar Americano em valores de compra em cada ano.

Fonte: elaborado pelos autores a partir dos dados do IPEA (IPEADATA, 2018).

A análise comparativa das variáveis identificadas para este estudo (preço, investimento e prazo para início da geração de energia elétrica) levou em conta todas as 1083 operações de comercialização de energia elétrica realizadas nos leilões do ACR da ANEEL, as 97 operações de comercialização de energia elétrica produzida a partir de biomassa de cana-de-açúcar que, num segundo momento, foram desdobradas em duas outras categorias de operações, ou seja, aquelas que utilizaram o bagaço da cana (95) e as operações que informaram utilizar o palhiço da cana como combustível no processo de cogeração (2).

Para análise dos dados foram utilizadas estatísticas descritivas, cálculos de média, desvio padrão e coeficiente de variação. Para análises comparativas dos preços médios foi utilizado o do teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney.

4 Análise dos Dados e Apresentação dos Resultados

Conforme pode ser visto na Tabela 4, dentre as 1083 operações de compra e venda de energia elétrica realizadas desde a ocorrência do primeiro leilão de energia elétrica em ACR até o ano 2017 (ANEEL, 2018), um total 97 operações (8,96% daquele total de 1083 operações) se referem à energia elétrica produzida a partir de biomassa de cana-de-açúcar.

Tabela 4 – Descrição das operações realizadas em leilões de ACR por tipo de fonte de geração de energia elétrica

| Tipo de operação analisada | Todas as operações | Operações que utilizaram biomassa^a | Operações que utilizaram bagaço^a | Operações que utilizaram palhiço^a |
|---|---------------------------|--|--|---|
| Variáveis | | | | |
| Quantidade de operações | 1.083 | 97 | 95 | 2 |
| Preço médio (R\$/MW) | 211,87 | 194,07 | 195,96 | 104,35 |
| Desvio padrão do preço médio (R\$/MW) | 47,79 | 69,80 | 69,29 | 0,15 |
| Coefic. de variação do preço médio (%) | 22,56 | 35,97 | 35,00 | 0,14 |
| Intervalo médio entre o leilão e o início do fornecimento da energia (anos) | 3,72 | 3,54 | 3,57 | 2,00 |
| Investimento médio total (R\$) | 294.871.481,86 | 177.174.351,78 | 174.675.729,52 | 295.858.909,28 |
| Investimento médio /ano (R\$/ano) | 75.732.711,83 | 64.725.770,50 | 62.974.113,99 | 147.929.454,64 |

(a) biomassa de cana-açúcar / bagaço de cana-de-açúcar / palhiço de cana-de-açúcar

CARMO, C. R. S.; RABI, J. A.; CANEPPELE, F. de L.. Cogeração de energia e recolhimento do palhiço de cana-de-açúcar: processos e viabilidade. *CONTABILOMETRIA - Brazilian Journal of Quantitative Methods Applied to Accounting*, Monte Carmelo, v. 7, n. 2, p. 107-122, jul.-dez./2020.

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa em ANEEL (2018).

Das 97 operações de compra de venda de energia elétrica produzida a partir da biomassa da cana-de-açúcar, apenas 2 informaram a utilização do palhiço, ou seja, 2,062% (2/97) das operações com biomassa de cana-de-açúcar, e apenas 0,0185% (2/1083) do total das operações realizadas em ACR.

Essas duas operações apresentaram um preço médio pago por MW de energia elétrica comercializado na ordem R\$ 104,35/MW, enquanto as demais 95 operações, que produziram energia elétrica a partir do bagaço de cana-de-açúcar apresentaram um preço médio na ordem de R\$195,96/MW. Portanto, o preço médio da energia elétrica que utilizou o palhiço como combustível foi cerca de 47% menor que o preço médio da energia produzida a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

É claro que não se pode atribuir tal diferença exclusivamente ao fato daquelas duas operações utilizarem o palhiço no processo de cogeração, pois, são muitas as variáveis que influenciam esse tipo de leilão.

Contudo, ao considerar que todas as operações envolvendo energia elétrica produzida a partir da biomassa de cana-de-açúcar foram realizadas em um mesmo ambiente, ainda que em condições econômicas oriundas de períodos anuais distintos, destaca-se o fato de que o preço médio por MW das operações que informaram utilizar palhiço apresentou um desvio padrão na ordem de R\$0,15 ou 0,14% em relação à média (coeficiente de variação); por outro lado, o preço médio pago pela energia elétrica gerada a partir do bagaço da cana apresentou um desvio padrão de R\$69,29, ou seja, um coeficiente de variação de 35%.

É fato que essa diferença de médias e dos respectivos desvios se deve, em grande parte, à quantidade de operações envolvendo o uso do bagaço da cana-de-açúcar. Contudo, pode-se afirmar que existe, também, a possibilidade de que a matéria-prima utilizada é um dos fatores que fez com que a precificação do MW médio fosse tão distinta.

Poder-se-ia questionar se aquela diferença entre preços médios negociados por MW se deve ao fato dos respectivos montantes de investimentos médios previstos apresentarem montantes também distintos.

Entretanto, diferentemente do que acontece com o fator preço médio por MW, o investimento médio realizado pelas usinas que utilizaram palhiço (R\$ 295.858.909,28) foi cerca de 69% maior que os montantes de investimentos médios previstos pelos empreendimentos que informaram produzir energia elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar (R\$174.675.729,52).

Aliás, aqueles dois empreendimentos sucroenergéticos que utilizaram o palhiço como combustível do seu processo de cogeração informaram um investimento individual previsto na ordem de R\$ 245.388.860,05 e R\$ 346.328.958,51, respectivamente; portanto, ambos os valores de investimento foram muito superiores ao investimento médio informado pelos empreendimentos que utilizaram somente bagaço de cana-de-açúcar (R\$174.675.729,52).

Poder-se-ia ser questionado também se o prazo compreendido entre o ano de realização do leilão em ACR e o início do fornecimento de energia teria influenciado aquela diferença de preços médios pagos por MW energia elétrica.

O que se pôde constatar foi que o prazo médio para início do fornecimento da energia elétrica daqueles dois estabelecimentos produtores de energia que informaram utilizar o palhiço foi 2 anos; ao passo que, o prazo médio contratado para início do fornecimento da energia elétrica pelos estabelecimentos geradores de energia elétrica a partir do bagaço foi de 3.57 anos (3 anos e 7 meses). Ou seja, foi exigido um prazo para início das atividades de geração muito menor para aqueles empreendimentos sucroenergéticos que informaram utilizar o palhiço como

combustível, sendo que, até mesmo para empreendimentos que informaram utilizar o bagaço da cana como combustível, o prazo médio em questão foi superior, ou seja, 3,57 anos..

Por outro lado, a despeito de todas as particularidades operacionais demandas para a utilização do palhiço como combustível no processo de cogeração, conforme observado por Perea, Biaggioni e Seraphim (2012), Lacerda (2015) e Cherubin (2017), a estruturação para produção de energia elétrica com base nesse tipo de biomassa parece ser mais ágil (1 ano e sete meses), sendo que, tal agilidade fica mais evidente ainda se considerada toda a capacidade instalada e toda tecnologia já desenvolvida acerca do aproveitamento do bagaço para a produção de energia elétrica.

De forma complementar, se forem levados em conta os efeitos combinados dos montantes médios de investimentos previstos e os respectivos prazos médios programados para início da operação de geração, os empreendimentos produtores de energia elétrica a base do palhiço de cana-de-açúcar apresentaram um investimento médio anual (R\$147.929.454,64/ano) cerca de 135% maior que o investimento média anual realizado pelos empreendimentos sucroenergéticos que utilizaram exclusivamente o bagaço de cana (R\$62.974.113,99/ano). Ou seja, em termos econômicos anuais, a utilização do palhiço no processo de cogeração energética também gerou muito mais recursos que os empreendimentos sucroenergéticos geradores de energia elétrica a base de bagaço de cana-de-açúcar.

Finalmente, poder-se-ia questionar se aquelas diferenças de preços médios, descritas anteriormente na Tabela 4, seriam estatisticamente iguais, uma vez que a quantidade de observações (operações analisadas) é relativamente diferente, ou seja: no cálculo do preço médio (R\$/MW) das demais operações, inclusive aquelas envolvendo biomassa residual de cana-de-açúcar, foram consideradas 1083 observações; no cálculo do preço médio (R\$/MW) das operações que utilizaram biomassa residual de cana-de-açúcar e consideraram inclusive as duas operações que utilizaram palhiço, foram utilizadas 97 observações; e, ainda, no cálculo do preço médio (R\$/MW) das operações que utilizaram biomassa residual de cana-de-açúcar, exceto aquelas duas operações que utilizaram palhiço, foram utilizadas 95 observações.

Tabela 5 – Descrição dos parâmetros encontrados a partir da aplicação do teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney

| Informações ^a | Preço médio (R\$/MW) das demais operações ^b | Preço médio (R\$/MW) de operações que utilizaram biomassa ^b | Preço médio (R\$/MW) de operações que utilizaram bagaço ^b |
|--------------------------|--|--|--|
| Estatística | 2,0 | 22,5 | 20,5 |
| P-valor | 0,0073 | 0,0327 | 0,0300 |

(a) além da hipótese de igualdade prevista como hipótese principal em todos os casos, o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney foi aplicado considerando como hipótese alternativa, a possibilidade de todos os preços médios serem maiores que o preço médio daquelas duas operações que contaram com o palhiço como combustível;

(b) teste comparativo entre o preço médio (R\$/MW) daquelas duas operações que utilizaram palhiço no processo de cogeração e os demais preços médios (R\$/MW)

Fonte: elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa em ANEEL (2018).

Contudo, conforme demonstrado na Tabela 5, o teste não paramétrico de Wilcoxon-Mann-Whitney indicou que o preço médio (R\$/MW) negociado nas operações de compra e venda de energia elétrica gerada a partir da cogeração envolvendo o palhiço é significativamente diferente dos preços médios das demais operações analisadas neste estudo.

Enfim, a diferença de preços médios é tão significativa que, mesmo considerando a inclusão daquelas duas observações referentes às operações que utilizaram palhiço nas amostras

comparadas pelo teste de Wilcoxon-Mann-Whitney, não foi constatada a hipótese de igualdade, uma vez que em todos os casos o teste sinalizou uma diferença estatisticamente significativa ($P\text{-valor} < 0,05$).

Considerações Finais

Dos pontos de vista energético e ambiental, o processo de cogeração a base do palhicho de cana-de-açúcar possui características que o tornam viável, dependendo o tipo de coleta adotado. Contudo, quando analisada sob a perspectiva econômica, a utilização desse tipo de biomassa quase deixa de ser atrativo, principalmente, quando se tomam por referência as variáveis preço e investimento demandado.

Conforme já dito, independentemente dos esforços realizados para que o Brasil pudesse estruturar estrategicamente o seu setor energético mediante a diversificação da sua matriz elétrico-energética, ao observar os valores apurados neste estudo (veja a Tabela 4), ficou evidente que, em média, nos leilões de ACR da ANEEL, o valor negociado por MW gerado de energia elétrica em geral (R\$211,87) é superior ao valor negociado para a energia gerada a partir da biomassa de cana-de-açúcar (194,07). Sendo que, especificamente no caso do palhicho (104,35), essa diferença é bem mais expressiva.

Especificamente em relação aos fatores envolvendo a cogeração energética com utilização do palhicho de cana-de-açúcar, além das diferenças de preços, devem ser levados em conta os montantes previstos de investimento a serem realizados por empreendimentos sucroenergético dessa natureza.

Pois, conforme demonstrado neste estudo, os montantes de investimento médios realizados por empreendimentos que utilizam o palhicho no processo de cogeração energética são significativamente mais expressivos; chegando ao ponto de superarem tanto o montante de investimento médio total (R\$ 294.871.481,86 < R\$ 295.858.909,28), quanto o investimento médio anual (R\$ 75.732.711,83 < R\$ 147.929.454,64) realizado por estabelecimentos geradores de energia elétrica.

Adicionada a todas essas evidências financeiras, destaca-se a influencia de fatores conjunturais. Por exemplo, em abril de 2018 foi realizado um leilão para a compra de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração; esse leilão em ACR contou com a participação tanto de empreendimentos hidrelétricos quanto de empreendimentos voltados para a geração a partir das fontes alternativas (biomassa, eólica e solar fotovoltaica); e, mesmo com a participação de 28 empreendimentos sucroenergéticos, a energia elétrica a ser gerada a partir da biomassa de cana-de-açúcar iniciou o pregão com um valor de R\$ 329/MW, e terminou com um preço de R\$ 198,94/MW, perfazendo um deságio de 39,5% (CHERUBIN, 2018).

Como principal limitação deste estudo, destaca-se o fato de se realizarem análises baseadas nas operações efetivadas no ACR da ANEEL, e, ainda, o fato dessas operações contarem com apenas duas transações envolvendo o uso de palhicho.

Contudo, independentemente dessa limitação, destaca-se a atualidade do tema em questão, bem como, o rigor metodológico empregado no processo de análise dos dados referentes às operações ocorridas no ACR. Posto que o valor de fechamento destacado por Cherubin (2018), em abril de 2018 (R\$ 198,94/MW) é apenas 2,45% do preço médio (R\$/MW) apurado no presente estudo (R\$194,07/MW).

Para continuidade desta pesquisa, sugere-se a realização de uma investigação semelhante àquela aqui apresentada, porém, analisando exclusivamente, os valores médios referentes aos investimentos a serem realizados por aqueles empreendimentos geradores da energia elétrica a ser comercializada no ACR da ANEEL.

Dessa forma, espera-se que os resultados da presente investigação possam ser somados aos resultados de outros estudos de natureza correlata e, assim, se consiga contribuir para o debate relacionado à utilização de fontes alternativas no processo de geração de energia elétrica.

Referências

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resultado de Leilões**. Brasília: Secretaria Executiva de Leilões (SEL) - publicado: 01/03/2016 - 09:37, última modificação: 03/01/2018 - 17:05. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>>. Acesso em: 24 abr. 2018.
- BACCARIN, J. G.; CASTILHO, R. de C.. A geração de energia como opção de diversificação produtiva da agroindústria canavieira.. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais eletrônicos...** Campinas: Centro Nacional de Referência em Energia do Hidrogênio (CENEH), 2002. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000002200200100004&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 25 maio 2018.
- BRASIL. Decreto-lei nº 1.872, de 21 de maio de 1981. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 22 maio 1981. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto-lei/1965-1988/Del1872.htm>. Acesso em 25 maio 2018.
- BRASIL. Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 27 dez. 1996, p. 28653. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9427cons.htm#art26%C2%A73>. Acesso em 25 maio 2018.
- BRASIL. Lei nº 9.648, de 27 de maio de 1998. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 28 maio 1998. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9648cons.htm#art20>. Acesso em 25 maio 2018.
- BRASIL. Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Poder Executivo, Brasília, DF, de 16 mar. 2004. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/110.848.htm>>. Acesso em 25 maio 2018.
- CHERUBIN, N.. Os segredos do uso da palha na cogeração de energia. **RPA News - cana & indústria**, Ribeirão Preto, ano 16, n. 187, p. 30-33, fev. 2017. Disponível em: <<http://revistarpanews.com.br/ed/72-edicao2015/edicao-187/1567-os-segredos-do-uso-da-palha-na-cogerao-de-energia>>. Acesso em: 20 maio 2018.
- CHERUBIN, N.. Conjuntura: biomassa da cana sofre com desvalorização no leilão A-4. **RPA News - cana & indústria**, Ribeirão Preto, ano 17, n. 198, p. 36-38, maio 2018. Disponível em: <<http://revistarpanews.com.br/index.php/ed/153-edicao2015/edicao-198/5854-conjuntura-biomassa-da-cana-sofre-com-desvalorizacao-no-leilao-a-4>>. Acesso em: 22 maio 2018.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. **Análise de conjuntura dos biocombustíveis**: ano 2016. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-167/Analise_de_Conjuntura_Ano_2016_r2.pdf#search=An%C3%A1lise%20de%20conjuntura%20dos%20biocombust%C3%ADveis>. Acesso em: 28 maio 2018.

GUERRA, L. C. B. ; SILVA, S. C. A.. Análise do processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro. **EmpíricaBR - Revista Brasileira de Gestão, Negócio e Tecnologia da Informação**, Natal, v. 1, n. 1 p. 39-55, 2017. Disponível em: <http://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/EmpiricaBR/article/view/5270/pdf_1>. Acesso em: 02 abr. 2018.

INNOCENTE, A. F.. **Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar**: estudo de caso. 2011. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia)– Faculdade de Ciências Agrônomicas da Universidade do Estado de São Paulo, Botucatu, 2011. Disponível em: <<http://www.pg.fca.unesp.br/Teses/PDFs/Arq0592.pdf>>. Acesso em: 15 maio 2018.

IPEADATA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Dados macroenômicos**: Bacen, Boletim, BP. Copyright ©, Rio de Janeiro, 7 de Dezembro de 2006. Disponível em: <<http://www.ipeadata.gov.br/Default.aspx>>. Acesso em: 27 mar. 2018.

LACERDA, K. A.. **Remodelagem de uma usina sucroalcooleira para incremento da cogeração de energia com aproveitamento do palhiço**. Ilha Solteira, 2015. 161 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/132092>>. Acesso em: 12 maio 2018.

LEMOS, P. H.. **Análise de decisão multicritério para avaliação das alternativas de recolhimento de palhiço de cana-de-açúcar para a cogeração de energia**. 2018. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/9834?show=full>>. Acesso em: 30 maio 2018.

LORA, E. E. S.; TEIXEIRA, F. N.. Energia e meio ambiente. In: MARQUES, M. C. S.; HADDAD, J.; MARTINS, A. R. S. (Coord.). **Conservação de energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3. ed. Itajubá: Eletrobrás / PROCEL / Universidade Federal de Itajubá / FUPAI, 2006. Disponível em: <http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/Livro_Conservacao_de_Energiaed3.pdf>. Acesso em: 12 maio 2018.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N.. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OLIVEIRA, J. G. de. **Perspectivas para a cogeração com bagaço de cana-de-açúcar**: potencial do mercado de carbono para o setor sucroalcooleiro paulista. 2007. 159 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-03052007-160128/pt-br.php>>.
Acesso em: 06 maio 2018.

PEREA, L. A.; BIAGGIONI, M. A. M.; SERAPHIM, O. J.. Avaliação de sistemas de manejo do palhicho de cana-de-açúcar no campo e na indústria. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 27, n. 1, p. 89-102, 2012. Disponível em:
<<http://revistas.fca.unesp.br/index.php/energia/article/view/423/220>>. Acesso em: 20 maio 2018.

SANTOS, P. S. B. dos. **Potencialização da cogeração de energia em uma usina sucroenergética por meio do aproveitamento do palhicho da cana-de-açúcar, eletrificação de acionamentos e redução da umidade do bagaço**. 2017. 429 f. Tese (Doutorado em Ciências Térmicas)- Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2017. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152683> >. Acesso em: 30 abr. 2018.

TROMBETA, N. de C.; CAIXETA FILHO, J. V.. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Rev. Econ. Sociol. Rural**, Brasília, v. 55, n. 3, p. 479-496, jul./set. 2017. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/resr/v55n3/1806-9479-resr-55-03-479.pdf>>. Acesso em 02 jun. 2018.