



# ANÁLISE TÉCNICO ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DA PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO NORTE DO PARANÁ

Thiago Ometto Zorzenoni<sup>1</sup>, Raí Rigonatto Batista<sup>2</sup>, Cristiane de Conti Medina<sup>3</sup> & João Tavares Filho<sup>4</sup>

**RESUMO:** A palhada representa um terço da energia primária da cana-de-açúcar, mas a sua utilização ainda é incipiente, apesar da grande potencialidade para o seu aproveitamento. O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de geração de energia elétrica da palhada de cana-de-açúcar em conjunto com o bagaço, através de uma análise técnico-econômica. Realizou-se o dimensionamento de uma frota dedicada ao recolhimento da palhada e de uma nova planta de cogeração, com substituição das caldeiras e turbinas existentes, inclusive as turbinas de acionamento dos equipamentos de preparação e extração, em uma usina típica do norte do Paraná. Foram estimados os investimentos necessários para a aquisição dessa frota e da modernização proposta para a área industrial. Os custos do recolhimento da palhada e da geração de energia elétrica foram calculados, bem como o preço mínimo de venda da energia. Também foram calculados a quantidade de consumidores residenciais e os municípios que poderiam ser abastecidos por essa energia. A capacidade de exportação é de 111,912 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, com custo da palhada no pátio de bagaço da usina a R\$68,08 t<sup>-1</sup>, custo da energia-elétrica de R\$125,55 MWh e preço mínimo de comercialização da energia a R\$316,64 MWh. A energia elétrica exportada pode atender uma população de 87.946 pessoas, o que corresponde a energia consumida pela cidade onde estaria localizado o projeto e de mais seis municípios canavieiros do Norte do Paraná. O projeto proporciona a criação de 96 novos empregos diretos.

**PALAVRAS-CHAVES:** Cogeração, eletricidade, bioenergia, biomassa, enfardamento.

## TECHNIC-ECONOMIC EVALUATION OF SUGARCANE STRAW FOR POWER GENERATION IN PARANA STATE

**ABSTRACT:** The straw represents one-third of the sugarcane's primary energy, but its exploitation is still incipient, despite having a huge potential for its utilization. This research aimed to evaluate the potential energy generation of sugarcane residues together with the bagasse, through a technical and economic analysis. The fleet sizing dedicated to straw harvesting and a new combined heat and power plant, replacing the existing boilers and turbines, inclusive the turbines of preparation and extraction, was made in a north of Parana's typical sugarcane mill. All the investments required were estimated in order to purchase this new fleet and proposals for the modernization of the industrial area. The straw harvesting and electrical power generation expenses were determined, as well as the energy's minimum selling price. The residential consumers were also estimated and as well as the cities that could be supplied with this energy. The export capability is 111.912 kW per ton of cane, the straw in the plant's stockyards R\$68.08 t<sup>-1</sup>, electrical energy cost R\$125.55 MWh and the energy selling minimum price, R\$316.64 MWh. The exported energy attends an 87,946 population, what corresponds to the power consumption of the city where the project takes place and over 6 sugar cane producer cities in the North of Parana. This project provides 96 new direct employment creation.

**KEYWORDS:** Cogeneration, electricity, bioenergy, biomass, baling.

## 1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) é uma importante cultura a nível mundial, não só pela produção de açúcar, mas também como uma cultura energética, devido à sua grande produtividade de matéria seca (SUREDRAN et al., 2016).

A energia primária da cana-de-açúcar é de, aproximadamente, 7400 MJ por tonelada de colmos, distribuídos em um terço nos açúcares e dois terços nas fibras do bagaço e das folhas (LEAL et al., 2013).

Na colheita mecanizada, as folhas e os ponteiros da cana-de-açúcar são separados dos colmos, sendo deixados no campo, quando passam a ser denominados de palhada. Sobre o solo, são deixados cerca de 140 kg de palhada (matéria seca) por tonelada de colmos (PAES; OLIVEIRA, 2005).

1, 2, 3, 4 e 5 Universidade Estadual de Londrina. Emails: [thiagozorzenoni@gmail.com](mailto:thiagozorzenoni@gmail.com) ; [rairigonattobatista@hotmail.com](mailto:rairigonattobatista@hotmail.com) ; [rairigonattobatista@hotmail.com](mailto:rairigonattobatista@hotmail.com) ; [medina@uel.br](mailto:medina@uel.br) ; [tavares@uel.br](mailto:tavares@uel.br)

Dessa forma, cerca de um terço da energia potencial fica subutilizada, mas uma conveniente fração dessa biomassa poderia ser recolhida para o aproveitamento na indústria, visto que segundo o trabalho de AQUINO et al. (2016), a retirada de 50% desse material não causa redução na produtividade da cultura nas condições do norte do Paraná.

Esse aproveitamento poderia se dar pela queima da palhada em caldeiras, como uma fonte de combustível adicional ao bagaço para a geração de energia (DESHMUKH, 2013).

Importantes trabalhos foram desenvolvidos por HASSUANI, LEAL e MACEDO (2005); MICHELAZZO; BRAUNBECK, (2008) abordando as possíveis formas de recolhimento da palhada no campo e, segundo os últimos autores, as dificuldades encontradas na época eram que os equipamentos possuíam baixa capacidade operacional e custos elevados, por serem equipamentos adaptados, originalmente projetados para colheita de forragem.

Atualmente, com a demanda de equipamentos para recolhimento de biomassa visando à produção de etanol de segunda geração e de energia elétrica, houve o desenvolvimento de equipamentos com maior capacidade, os quais poderiam reduzir o custo de recolhimento da palhada e, conseqüentemente, a redução do custo da energia elétrica produzida a partir dessa fonte.

Assim, o foco do trabalho foi o estudo do potencial de produção de energia elétrica da palhada, através de análise técnico econômica. Para isso, os objetivos foram (a) dimensionar a frota e uma nova planta de cogeração para o aproveitamento da palhada e estimar os investimentos necessários para tal; (b) avaliar se a introdução da palhada na produção de energia elétrica em conjunto com o bagaço é técnica e economicamente viável nas condições do norte do Paraná; (c) estimar a população e os municípios atendidos com a energia elétrica produzida por meio do uso combinado da palhada com o bagaço e (d) estimar a quantidade de novos empregos diretos proporcionados pelo projeto.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 O RECOLHIMENTO DA PALHADA

Para o entendimento dos cálculos apresentados no dimensionamento dos recursos necessários para o aproveitamento da palhada da cana-de-açúcar, são relatados neste tópico, a forma que essa matéria-prima está disponível no campo, bem como as etapas de seu recolhimento.

A palhada da cana-de-açúcar é liberada pelas colhedoras, formando uma camada de espessura não uniforme (MICHELAZZO; BRAUNBECK, 2008) de baixa densidade, sendo o enfardamento uma alternativa para o seu recolhimento, o que aumenta a densidade e

transforma a biomassa em unidades uniformes (fardos) (SARTO; HASSUANI, 2005).

Para o seu recolhimento, é necessário ocorrer a secagem da palhada no campo, cujo tempo necessário é de 4 a 7 dias após a colheita (SARTO; HASSUANI, 2005). Após esse período, tem-se a seguinte sequência: aleiramento, enfardamento, recolhimento dos fardos, carregamento e transporte (PIEROSI; FAGUNDES, 2016).

Como no processo de aleiramento praticamente toda a palhada é concentrada em uma leira e apenas é desejável o recolhimento de 50% dessa quantidade, é necessário adicionar a operação de desaleiramento, pois caso não realizada essa operação, haverá problemas com a brotação das touceiras que estão abaixo da leira.

Na chegada à indústria, ocorrem os processos de descarregamento dos fardos e o desenfardamento, para reduzir o tamanho de partículas de forma similar ao bagaço, para possibilitar a queima na caldeira.

### 2.2 APROVEITAMENTO DA PALHADA EM CONJUNTO COM O BAGAÇO

Para os cálculos de aproveitamento da palhada, teve-se como base uma típica usina de açúcar e álcool no norte do Estado do Paraná (Tabela 1), com capacidade de moagem de dois milhões de toneladas de colmos de cana-de-açúcar por ano.

Para tanto, foi considerada a aquisição de uma frota dedicada ao recolhimento da palhada, sendo, para o seu dimensionamento, considerados os implementos, os tratores e os equipamentos listados na Tabela 2. De acordo com o sistema de enfardamento escolhido, os fardos produzidos terão as características listadas na Tabela 3.

A partir dessas informações, com os indicadores gerenciais (Tabela 4) e parâmetros assumidos (Tabela 5), foram calculados para as operações de aleiramento, enfardamento e desaleiramento, o tempo disponível Eq. (1), o ritmo operacional Eq. (2), a capacidade de campo efetiva Eq. (3), a eficiência de campo Eq. (4) e a capacidade de campo operacional Eq. (5) para estimar o número de conjuntos, isto é, número necessário de tratores e implementos Eq. (6).

A seguir são descritos os cálculos:

$$TD = \{[NT - (NDF + NDUI)] \times (JT \times EG)\} \quad (1)$$

Onde TD é tempo disponível, em horas (h), para realizar cada operação; NT é o número de dias total no período previsto para a realização da operação; NDF é o número de domingos e feriados previstos para ocorrer no período; NDUI é número de dias úteis impróprios ao trabalho das máquinas; JT é a jornada de trabalho adotado em horas (h); EG é a eficiência gerencial ou administrativa, em decimal.

$$RO = Ar/TD \quad (2)$$

Onde RO é o ritmo operacional em ha h<sup>-1</sup>; Ar é área a ser trabalhada por operação, em ha; TD é o tempo disponível, em horas (h).

$$CCE = (LE \times VE)/10 \quad (3)$$

Onde CCE é a capacidade de campo efetiva em ha h<sup>-1</sup>, LE é a largura de trabalho efetiva, em m; VE é a velocidade de trabalho efetiva em km h<sup>-1</sup>.

**Tabela 1** - Características da usina referência utilizada no estudo e sua disponibilidade de palhada e bagaço.

Variável	Valor	Unidade
Capacidade de moagem por safra	2.000.000	t cana-de-açúcar
Duração da safra	210	dias
Tempo aproveitável de moagem	85	%
Tempo útil	179	dias
Produtividade de cana-de-açúcar	85	t ha <sup>-1</sup>
Número de cortes	5	-
Área colhida	23.529	ha
Teor de fibra da cana	12,5	%
Umidade do bagaço	50	%
Rendimento de bagaço	250	kg tc <sup>-1</sup>
Total de bagaço processado safra	500.000	t
Produtividade de palhada <sup>a</sup> (base seca)	140	kg tc <sup>-1</sup>
Umidade da palhada	15,00	%
Produtividade palhada (base úmida)	164,71	kg tc <sup>-1</sup>
Percentual de recolhimento <sup>b</sup>	50	%
Quantidade de palhada recolhida	7,00	t ha <sup>-1</sup>
Total de palhada recolhida safra	164.706	t
Raio médio do canavial	20	km

<sup>a</sup> PAES; OLIVEIRA, 2005.

<sup>b</sup> AQUINO et al. 2016.

$$Efc = TOE/TTC \quad (4)$$

Onde, Efc é a eficiência de campo, em decimal, TOE é tempo operacional efetivo, em horas (h), TTC é tempo total de campo, em horas (h)

$$CCO = CCE \times Efc \quad (5)$$

Onde CCO é a capacidade de campo operacional em ha h<sup>-1</sup>, CCE é capacidade de campo efetiva, ha h<sup>-1</sup>; Efc é a eficiência de campo, em decimal.

$$NC = RO/CCO \quad (6)$$

Onde NC é o número de conjuntos, RO é o ritmo operacional em ha h<sup>-1</sup>; CCO é a capacidade de campo operacional em ha h<sup>-1</sup>.

Para as operações agrícolas de natureza cíclica como as de recolhimento, carregamento e descarregamento dos fardos, os números dos conjuntos foram calculados utilizando as equações 7, 8, 9 e os dados da Tabela 6.

$$CT = 3600 \times Massa/Ciclo \times 1000 \quad (7)$$

Onde CT capacidade teórica em t h<sup>-1</sup>, Massa é a quantidade de fardos em kg, ciclo é o tempo gasto da operação em segundos.

A partir da capacidade teórica, determinou-se a capacidade operacional, em t h<sup>-1</sup>:

$$CO = CT \times Ef \quad (8)$$

O número de conjuntos foi determinado:

$$NC = CN/CO \quad (9)$$

CN capacidade necessária ( $t h^{-1}$ ), determinada através da razão do total de palhada recolhido no dia pela enfardadora, pelo turno de 24 horas.

Para o transporte dos fardos do campo até o pátio de bagaço da usina foram utilizados caminhões plataforma com dois reboques canavieiros, conhecidos como treminhões. A definição do número de veículos foi baseada na disponibilidade de palhada e no raio médio do canalial da usina (Tabela 1), nas características dos fardos (Tabela 3), no tempo disponível por viagem e na capacidade de carga unitária dos caminhões considerados (Tabela 7).

Para a operação de desenfundamento, foi considerado um triturador portátil a diesel com capacidade de  $85 t h^{-1}$ , alocado no pátio de bagaço da usina.

Para o cálculo da quantidade de vapor gerado pela queima de combustível, a quantidade de palhada foi convertida em bagaço através da relação entre o poder calorífico inferior (PCI) da palhada e do bagaço. Considerou-se o bagaço com umidade de 52%, impureza mineral de 15% e PCI de  $6,78 MJ kg^{-1}$ . Para a palhada, foi considerada umidade de 15% e PCI de  $12,96 MJ kg^{-1}$ .

Devido às usinas não serem dimensionadas para utilizar a energia contida na palhada em seus processos, o estudo considerou a instalação de uma nova planta de cogeração, substituindo as caldeiras e as turbinas existentes, e a troca dos acionamentos dos equipamentos de preparação e extração feito por turbinas por motores elétricos, permitindo melhora na eficiência energética da usina e maximizando seu potencial de exportação de energia elétrica.

**Tabela 2** - Preço de aquisição e características operacionais dos equipamentos que compõem a frota para o recolhimento da palhada.

Operação	Conjunto	Marca/modelo	Preço aquisição (R\$)	Potência <sup>a</sup> (cv)	Largura operacional <sup>b</sup> (m)	Velocidade ( $km h^{-1}$ )	Ciclo (s)
Aleiramento/ Desaleiramento	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	100	9,2 <sup>d</sup>	9	n.a. <sup>c</sup>
	Implemento	Aleirador New Holland AL1290	160.000,00	65			
Enfardamento	Trator	Valtra BT 210	350.000,00	210	e	6,2	n.a.
	Implemento	Enfardadora New Holland BB1290	450.000,00	170			
Recolhimento dos fardos	Trator	Valtra BM 180	240.000,00	180	n.a.	n.a.	540 <sup>f</sup>
	Implemento	Carreta recolhadora New Holland AC 1290	360.000,00	150			
Carregamento/ Descarregamento	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	100	n.a.	n.a.	60
	Implemento	Plaina frontal Valtra VL 1200 + empilhador	39.000,00	60			
Desenfardamento	Equipamento autopropeleido	Triturador CBI 5400	3.330.000,00	765	n.a.	n.a.	n.a.

a. A potência para os implementos refere-se à potência mínima necessária do trator obtida nos catálogos dos fabricantes.

b. Informação obtida nos catálogos dos fabricantes.

c. n.a.: não se aplica.

d. Largura operacional considerada no presente estudo é de 7,5 m, devido ao espaçamento da cana-de-açúcar.

e. Largura operacional da enfardadora é a mesma do aleirador, que no caso do presente estudo é 7,5 m.

f. Capacidade de carga de 12 fardos por ciclo, porém considerado 8 fardos por ciclo devido a dificuldade em formar pilhas maiores.

**Tabela 3** - Características dos fardos de palhada de cana-de-açúcar utilizados para o aproveitamento na indústria.

Item	Valor	Unidade
Umidade	15	%
Densidade dos fardos	180	$kg m^{-3}$
Largura	0,9	m
Comprimento	1,2	m
Altura	2,5	m
Volume	2,7	$m^3$
Massa fardo	486	kg

**Tabela 4** - Indicadores gerenciais para cálculo do tempo disponível (TD) para realizar cada operação e ritmo operacional (RO).

Variável	Valor	Unidade
Nº de dias total (NT)	210	dias
Nº de domingos e feriados (NDF)	0	dias
Nº de dias úteis impróprios ao trabalho das máquinas (NDUI)	30	dias
Jornada de trabalho (JT)	10	h
Eficiência gerencial (EG)	60	%
Área	23.529	ha

**Tabela 5** - Valores assumidos para cálculo da capacidade de campo efetiva (CCE) e capacidade de campo operacional (CCO) das operações de aleiramento, enfardamento e desaleiramento.

Variável	Aleiramento	Enfardamento	Desaleiramento	Unidade
Tempos perdidos	4	4	4	h
Tempo operacional efetivo	6	6	6	h
Tempo total de campo	10	10	10	h
Eficiência de campo	0,6	0,6	0,6	%
Velocidade de trabalho	9	6,2	9	km h <sup>-1</sup>
Largura de trabalho	7,5	7,5	7,5	m

**Tabela 6** - Valores assumidos para cálculo de capacidade teórica das operações cíclicas de recolhimento dos fardos, carregamento e descarregamento.

Item	Recolhimento dos fardos	Carregamento	Descarregamento	Unidade
Tempos perdidos <sup>a</sup>	6	6	6	h
Tempo operacional efetivo	18	18	18	h
Tempo total de campo	24	24	24	h
Eficiência	0,75	0,75	0,75	%
Ciclo	67,5 <sup>b</sup>	60	60	s

a. Tempo para os três turnos

b. Ciclo dividido por 8 fardos

**Tabela 7** - Informações para o cálculo do tempo útil disponível, número de viagens e carga transportada para as operações de transporte dos fardos.

Item	Valor	Unidade
Quantidade de turnos	3	-
Duração dos turnos	8	h
Parada total de almoço	180	min
Abastecimento – 1 vez ao dia	30	min
Troca de turno – 15 min por turno	45	min
Velocidade média carregado e vazio	40	km h <sup>-1</sup>
Carregamento e Descarregamento	100	min
Capacidade volumétrica de carga	156,6	m <sup>3</sup>
Volume unitário dos fardos	2,7	m <sup>3</sup>
Quantidade de fardos transportados	58	-
Massa unitária dos fardos	486	kg
Carga transportada	29,28	t

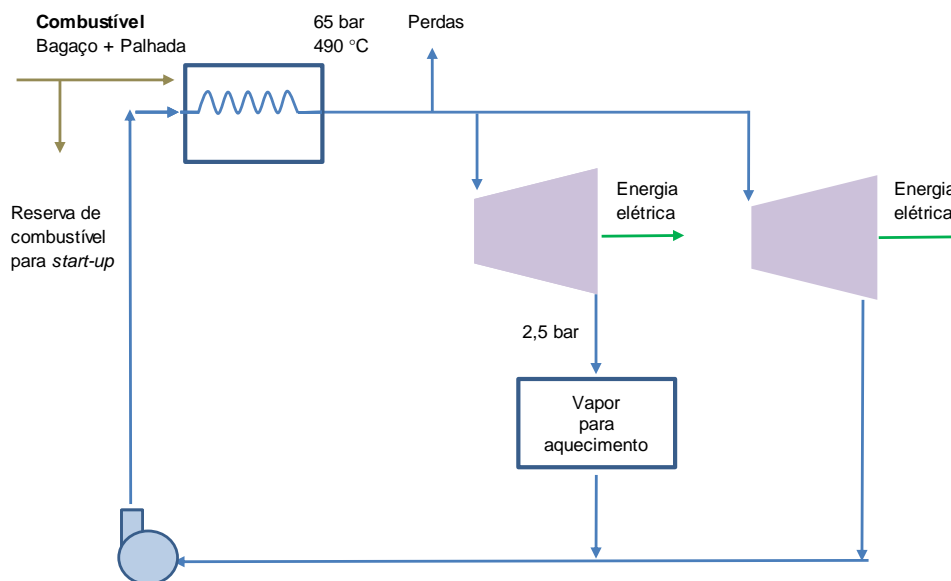
O sistema proposto (Fig. 1) é composto por duas caldeiras com capacidade unitária de 200 toneladas de vapor por hora, com pressão 65 bar e temperatura de 490 °C. O vapor produzido alimentará uma turbina de contrapressão de 30 MW e uma de condensação de 40 MW. O vapor extraído na turbina de contrapressão possui pressão de 2,5 bar e é utilizado para o

aquecimento na usina. O restante do vapor de alta pressão alimenta a turbina de condensação.

Do total de bagaço e palhada disponível para queima, foi considerado o armazenamento de 7% do volume total para o *start-up* da caldeira.

**Tabela 8** - Valores para determinar o custo horário das operações.

Item	Valor	Unidade
Vida útil	10.000	h
Depreciação	1000	h
Valor de sucata	10	%
Custo do combustível	2,891	R\$ L <sup>-1</sup>
Tratorista	12,80	R\$ h <sup>-1</sup>
Taxa de juros	14,00	% ao ano

**Figura 1** - Representação esquemática do processo de cogeração com a utilização combinada dos combustíveis bagaço e palhada.

Com essa configuração, a taxa de conversão é de 2,00 kg de vapor por kg de bagaço. Sobre o total de vapor gerado, foi considerada uma perda de 5% atribuída à irradiação do calor pelo isolamento térmico das tubulações de vapor. Os consumos das turbinas foram de 6,1 kg de vapor por kWh para a de extração e 4,0 kg por kWh para a de condensação.

Com a modernização proposta, o consumo de vapor estimado foi de 400 kg por tonelada de cana-de-açúcar e o de energia elétrica de 33 kWh por tonelada de cana-de-açúcar.

A energia elétrica total disponível para venda foi a subtração da energia total produzida pela energia consumida.

As premissas consideradas foram a duração da safra de 210 dias, período útil de moagem de 85%, 4284 horas de operação e vida útil da planta de cogeração de 20 anos.

## 2.3 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

### 2.3.1 AVALIAÇÃO DO CUSTO DE RECOLHIMENTO DA PALHADA

A partir dos conjuntos selecionados, foram realizadas as cotações dos equipamentos como os tratores, implementos e máquinas (Tabela 2), obtidos com os concessionários das empresas Valtra, New Holland, Terex/CBI realizados no ano de 2016.

Os custos operacionais das máquinas agrícolas foram baseados na metodologia adaptada de Pacheco, 2000. Estes custos incluem a depreciação, alojamento e seguros, juros, manutenção, combustível e lubrificantes. Para a etapa de enfardamento, há o custo adicional dos fios utilizados para a amarração dos fardos (F). Os dados para os cálculos das equações abaixo estão nas Tabelas 2 e 8.

A depreciação foi calculada pela Eq. (10).

$$D = P - S/V \quad (10)$$

Onde D é a depreciação em R\$ h<sup>-1</sup>, P é o preço de aquisição em R\$, S é o valor de sucata, a qual corresponde o valor de 10% do preço de aquisição e V é a vida útil em horas (h).

O alojamento e seguros foram calculados pela Eq. (11).

$$AS = 0,02 P/t \quad (11)$$

Onde AS é alojamento e seguro, em R\$ h<sup>-1</sup>, P é o preço de aquisição, em R\$ e t é o tempo de uso, h ano<sup>-1</sup>.

Os juros foram calculados pela Eq. (12).

$$J = [(P + 0,1P)/2]i/t$$

Onde J são juros em R\$ h<sup>-1</sup>, P é preço de aquisição em R\$, i são os juros ao ano (decimal) e t é o tempo de uso por ano em h ano<sup>-1</sup>.

Para o custo de reparos e manutenção (RM) foram considerados 100% do preço de aquisição.

Os consumos médios de combustíveis pelos tratores foram calculados pelas Eq. (13) e Eq. (14).

$$Pot_{Motor} = Pot_{BT} / 0,5 \quad (13)$$

$$C = 0,25 \times Pot_{BT} \times P_{comb} \quad (14)$$

Onde,  $Pot_{motor}$  é a potência do motor, em cv;  $Pot_{BT}$  a potência da barra de tração, em cv; e  $P_{comb}$ , o preço do combustível em R\$ L<sup>-1</sup>.

Os custos com lubrificantes (L) para os tratores foram calculados sobre 15% dos custos, de acordo com PAINTER, (2011).

O salário do tratorista foi calculado pela Eq. (15).

$$ST = (\text{salário mensal} \times 13) / \text{horas de uso por ano} \quad (15)$$

Para a determinação dos custos de transporte, foi levantado o custo de aquisição (ano base 2016) de um caminhão plataforma e de dois reboques canavieiros (Tabela 9). Os cálculos foram realizados por km t<sup>-1</sup>, baseados no raio médio entre a usina e as áreas agrícolas.

Os custos operacionais calculados foram relacionados com as produtividades das respectivas operações e o total de biomassa recolhida por área, para estimar o custo total por tonelada de recolhimento da palhada.

### 2.3.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM O USO DA PALHADA E DO BAGAÇO

O investimento na planta de cogeração e a substituição dos acionamentos mecânicos a vapor por motores elétricos, foram estimados pela Dedini S/A Indústrias de Base. Para determinar os custos de geração de energia elétrica, foram considerados os custos de manutenção, calculados como 3% do valor do investimento, depreciação, sendo 5% do valor de investimento e combustível, considerado o custo de recolhimento da palhada.

Não foram contabilizados o custo do bagaço e a mão de obra de operação da caldeira, pois para o primeiro item, o custo foi assumido como zero, já que de acordo com

SEABRA et al., (2010), trata-se de um subproduto disponível na indústria, e para o segundo, não haverá necessidade de mão de obra adicional para operar as novas caldeiras, requerendo os mesmos profissionais que realizavam a operação das caldeiras antigas.

Através do custo de geração de energia elétrica, foi calculado o preço mínimo da venda de energia elétrica (sem impostos), obtido quando o valor presente líquido (VPL) do fluxo de caixa incremental for zero, para um período de 20 anos e taxa de desconto de 14% ao ano.

### 2.3.3 AVALIAÇÃO DOS EMPREGOS DIRETOS PROPORCIONADOS PELO RECOLHIMENTO DA PALHADA

Através do cálculo do número de conjuntos e veículos necessários para o recolhimento da palhada, foram considerados os operadores e motoristas necessários para cada etapa, incluindo os colaboradores extras que atuam durante o descanso remunerado.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 AVALIAÇÃO TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA PALHADA

Para as operações de aleiramento, desaleiramento e enfardamento, o tempo disponível calculado foi de 1080 h e o ritmo operacional, de 21,79 ha h<sup>-1</sup>.

Conforme as capacidades determinadas, os números de conjuntos (Tabela 10) descrevem a frota necessária de tratores e implementos para as operações, composta de seis conjuntos para o aleiramento, oito para enfardamento, seis para desaleiramento, quatro para recolhimento, três para carregamento e três para descarregamento de fardos.

Na área industrial, o processamento de uma tonelada de colmos de cana-de-açúcar produz 250 kg de bagaço e 82,35 kg de palhada. Como a relação palhada/bagaço é de 1,91, a quantidade de palhada corresponde a 157,38 kg de bagaço.

**Tabela 9** - Valores para composição do custo de transporte dos fardos de palhada de cana-de-açúcar.

Item	Valor	Unidade
Preço aquisição caminhão <sup>a</sup>	416.000,00	R\$
Depreciação	10	% <sup>b</sup>
Vida útil	500.000	km
Seguros e manutenção	8	% <sup>b</sup>
Juros	14	% ao ano
Diversos	4	% <sup>b</sup>
Consumo de combustível	1,2	L km <sup>-1</sup>
Preço do óleo diesel	2,891	R\$ L <sup>-1</sup>
Lubrificantes	15	% <sup>c</sup>
Salário do motorista com encargos	11,64	R\$ h <sup>-1</sup>
Fator de correção por turno de trabalho	1,33	-

<sup>a</sup> Modelo Mercedes Benz Atron 2729 com 2 reboques canavieiros.

<sup>b</sup> % em relação ao preço de aquisição.

<sup>c</sup> % em relação ao custo do combustível.

**Tabela 10 - Capacidades e número de conjuntos para as operações de recolhimento da palhada.**

Item	Aleiramento	Enfardamento	Desaleiramento	Recolhimento dos fardos	Carregamento	Descarregamento	Unidade
Capacidade de campo efetiva	6,75	4,65	6,75	-	-	-	ha h <sup>-1</sup>
Capacidade de campo operacional	4,05	2,79	4,05	-	-	-	ha h <sup>-1</sup>
Capacidade campo operacional	28,35	19,53	28,35	-	-	-	t h <sup>-1</sup>
Capacidade teórica	-	-	-	19,44	21,87	21,87	t h <sup>-1</sup>
Capacidade necessária	-	-	-	65,10	65,10	65,10	t h <sup>-1</sup>
Número de conjuntos	6	8	6	4	3	3	-

**Tabela 11 - Descrição da frota e o investimento agrícola (em R\$) para recolhimento da palhada.**

Operações	Item	Descrição	Preço Unitário (R\$)	Qtd	Preço Total (R\$)
Aleiramento	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	6	972.000,00
	Implemento	Aleirador New Holland AL 1290	160.000,00	6	960.000,00
Enfardamento	Trator	Valtra BT 210	350.000,00	8	2.800.000,00
	Implemento	Enfardadora New Holland BB1290	450.000,00	8	3.600.000,00
Recolhimento dos fardos	Trator	Valtra BH 180	240.000,00	4	960.000,00
	Implemento	Carreta Recolhedora New Holland AC 1290	360.000,00	4	1.440.000,00
Carregamento dos fardos	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	3	486.000,00
	Implemento	Plaina Frontal Valtra 1200 com empilhador	39.000,00	3	117.000,00
Descarregamento dos fardos	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	3	486.000,00
	Implemento	Plaina Frontal Valtra 1200 com empilhador	39.000,00	3	117.000,00
Desaleiramento	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	6	972.000,00
	Implemento	Aleirador New Holland AL 1290	160.000,00	6	960.000,00
Desenfardamento	Equipamento	Triturador CBI-5400	3.330.000,00	1	3.330.000,00
	Veículo	Caminhão MB Atron 2729 - Treminhão	416.000,00	8	3.328.000,00
<b>TOTAL</b>					<b>20.528.000,00</b>

Dessa forma, tem-se o total de 407,38 kg de biomassa por tonelada de cana-de-açúcar, sendo que 7% desse montante são separados para o *start-up* da caldeira, restando 378,86 kg que irão resultar na produção de 111,912 kWh por tonelada de cana-de-açúcar de energia elétrica disponível para comercialização. Nas condições do trabalho, a capacidade de geração é de 67,65 MWh, das quais 15,41 MWh serão utilizadas para abastecimento da indústria, obtendo-se 52,24 MWh para exportação. Ao final da safra, a quantidade total exportada será de 223.824 MWh.

### 3.2 ANÁLISE DOS CUSTOS

O investimento necessário para a aquisição da frota agrícola é de R\$20.528.000,00 (Tabela 11). A operação de enfardamento representa o maior investimento da frota, com 31% do valor total, seguida pelas operações de desenfardamento e transporte da palhada, as quais, individualmente, representam 16% do investimento.

Em relação ao custo horário (Tabela 12), observamos que o maior custo é para a atividade de enfardamento, o que também foi verificado por Delivand, Barz e



Gheewala (2011) para o recolhimento da palhada de arroz na Tailândia, também para fins energéticos. O elevado custo do enfardamento é atribuído ao preço de aquisição da enfardadora e de seu trator, trazendo implicações no custo fixo da máquina (LEMOS et al., 2014).

O custo do enfardamento obtido foi de R\$14,11 t<sup>-1</sup>, cerca de US\$4,41 t<sup>-1</sup> (1US\$ = R\$3,20), estando 8,4% abaixo do valor encontrado por LEMOS et al. (2014) para a colheita de palhada de cana-de-açúcar em Lençóis Paulista, São Paulo, Brasil. Para enfardamento da palhada de arroz no Vietnã e na Tailândia, Delivand, Barz e Gheewala (2011) e Nguyen et al., (2016) obtiveram valores de US\$11,25 t<sup>-1</sup> e US\$12,00 t<sup>-1</sup>, respectivamente. As diferenças dos custos entre os tipos de biomassa podem ser explicadas pela maior quantidade de palhada produzida e pela densidade das diferentes culturas.

Os custos totais para levar a palhada ao pátio de bagaço da usina estão na Figura 2. Os custos das operações agrícolas somam R\$59,40 t<sup>-1</sup> e o transporte R\$8,68, totalizando R\$68,08. Hassuani, Leal e Macedo (2005) obtiveram o custo de US\$18,49 base matéria seca, em que, ajustando-se para o teor de umidade de 15%, tem-se US\$21,75. Considerando o câmbio de 1US\$ = 3,20, tem-se o valor de R\$69,60, cerca de 2,18% maior do que o valor encontrado.

Os investimentos na planta de cogeração foram estimados em 185 milhões de reais e a substituição das turbinas de acionamentos dos equipamentos de preparação e extração por motores elétricos em R\$26 milhões, totalizando o investimento na área industrial de R\$211,1 milhões.

O montante do investimento dividido pela potência instalada (70 MW) resulta em R\$ 3016,00 kW, o equivalente a US\$942,50 kW. O valor está no intervalo de US\$337 e US\$2002 kW, levantado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2016), do governo brasileiro, para investimentos em empreendimentos termelétricos na indústria sucroalcooleira, considerando os custos mínimos e máximos. As amplitudes dos valores se devem à diversidade tecnológica e operacional do parque sucroalcooleiro brasileiro.

Os custos de operação e manutenção da planta de cogeração estão na Tabela 13, onde observa-se que o combustível (palhada) é responsável por 40% do custo de geração da energia.

O preço de venda mínimo da energia elétrica, a qual o Valor Presente Líquido do fluxo de caixa do projeto é nulo, em um período de 20 anos com uma taxa de juros de 14% ao ano, foi de R\$316,64 MWh. Esse valor está 62,5% maior do que preço médio comercializado no leilão de energia A5, que foi de R\$194,85 MWh, ocorrido em 2016, para o suprimento de energia em

janeiro de 2021 (CCEE, 2016). Nesse leilão, dos 29 projetos vencedores, quatro eram termelétricas, que serão operadas com o bagaço de cana.

A geração de energia elétrica a partir do bagaço é mais competitiva que sua utilização combinada com a palhada, pois não há o custo adicional de recolhimento. Segundo a EPE (2016), os custos da aquisição da cana-de-açúcar estão contabilizados no açúcar e álcool produzido. Nas usinas modernizadas, cerca de 30% a 50% do bagaço conseguem ser empregados para a exportação de energia elétrica.

Com a sobra de bagaço, o projeto da palhada irá enfrentar a concorrência nos leilões de energia com o próprio bagaço, que possui custo zero. Esse quadro pode ser revertido, caso haja uma melhora nos preços de venda de energia, como ocorreu em 2014 no mercado livre (ANEEL, 2016), com valor médio comercializado de R\$661,63 MW, chegando ao teto de R\$822,83 MW.

### 3.3 CÁLCULO DA POPULAÇÃO A SER ATENDIDA PELO PROJETO

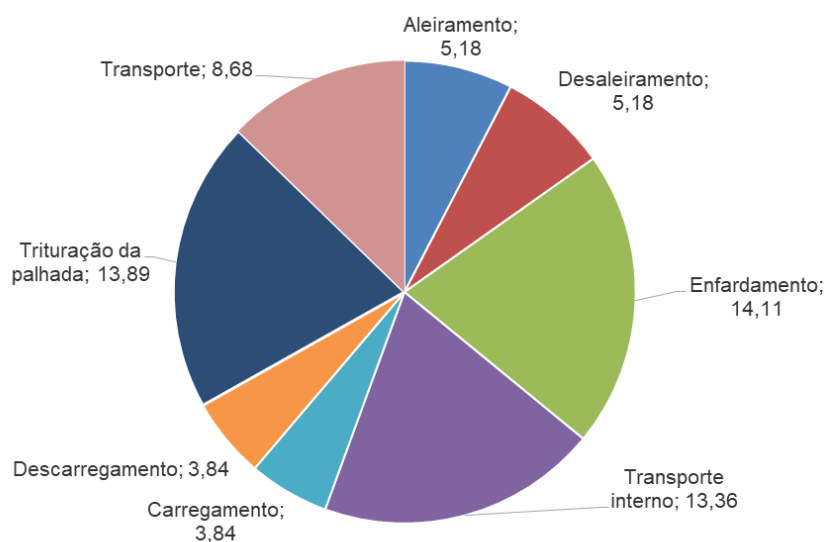
O consumo residencial de energia elétrica per capita no Brasil é, segundo a EPE, (2013), de 2545 kWh ano<sup>-1</sup>. Com a energia produzida pelo projeto, 223.824 MWh, consegue-se atender a 87.946 habitantes, o que corresponde à população do local proposta para receber o projeto e de mais 6 municípios canavieiros (Tabela 14).

### 3.4 AVALIAÇÃO DOS EMPREGOS DIRETOS PROPORCIONADOS PELO RECOLHIMENTO DA PALHADA

Com o recolhimento da palhada serão necessários a criação de 96 novos empregos diretos (Tabela 15), essas vagas poderiam ser ocupadas pelos cortadores de cana-de-açúcar, capacitados para essas operações, reduzindo o problema social ocasionado pela mecanização da colheita. A quantidade de postos de trabalho estimados estão de acordo com OECD (2004), a qual estabelece que em projetos de biomassa são necessárias cerca de 42 pessoas a cada 100.000 MWh ano<sup>-1</sup>.

**Tabela 12** - Custos horários para as operações de recolhimento e desfardamento da palhada (R\$ h<sup>-1</sup>)

Operações	Item	Depreciação	Alojamento e Seguros	Juros	Reparos e manutenção	Combustível	Lubrificantes	Fios	Salário Tratorista	Subtotal operação	Total operação
Aleiramento	Trator	14,58	3,24	12,47	16,20	36,14	5,42	-	12,80	100,86	146,78
	Implemento	14,40	3,20	12,32	16,00	-	-	-	-	45,92	
Enfardamento	Trator	31,50	7,00	26,95	35,00	75,89	11,38	-	12,80	200,53	459,34
	Implemento	40,50	9,00	34,65	45,00	-	-	129,97	-	258,82	
Recolhimento dos fardos	Trator	21,60	4,80	18,48	24,00	65,05	9,76	-	12,80	156,49	259,81
	Implemento	32,40	7,20	27,72	36,00	-	-	-	-	103,32	
Carregamento dos fardos	Trator	14,58	3,24	12,47	16,20	36,14	5,42	-	12,80	100,86	112,05
	Implemento	3,51	0,78	3,00	3,90	-	-	-	-	11,19	
Descarregamento dos fardos	Trator	14,58	3,24	12,47	16,20	36,14	5,42	-	12,80	100,86	112,05
	Implemento	3,51	0,78	3,00	3,90	-	-	-	-	11,19	
Desaleiramento	Trator	14,58	3,24	12,47	16,20	36,14	5,42	-	12,80	100,86	146,78
	Implemento	14,40	3,20	12,32	16,00	-	-	-	-	45,92	
Desenfardamento	Equipamento autopropelido	299,70	66,60	256,41	333,00	184,30	27,65	-	12,80	1180,46	1180,46

**Figura 2** - Custos agrícolas e de transporte da palhada (em R\$ t<sup>-1</sup>).**Tabela 13** - Custo de geração da energia-elétrica à partir da palhada de cana-de-açúcar.

Item	Quantidade	Preço	Custo anual (R\$)	Custo (R\$ MWh <sup>-1</sup> )
Manutenção	3% capital	211.100.000,00	6.333.000,00	28,29
Depreciação	5% capital	211.100.000,00	10.555.000,00	47,16
Subtotal			16.888.000,00	75,45
Combustível palhada	164.706 t	R\$ 68,08 t <sup>-1</sup>	11.213.343,59	50,10
Total			28.101.343,59	125,55

**Tabela 14** - Municípios que podem ser atendidos com energia elétrica gerada pelo projeto de aproveitamento da palhada.

Município	População
Bandeirantes	32.184
Itambaracá	6.759
Santa Mariana	12.345
Santa Amélia	3.803
Andirá	20.610
Abatiá	7.764
Barra do Jacaré	2.727
Total	86.282

**Tabela 15** - Total de novos empregos diretos gerados pelo projeto de aproveitamento da palhada.

Operação	Colaboradores por turno	Número de turnos por dia	Total de colaboradores por dia	Colaboradores revezantes	Total de colaboradores
Aleiramento	6	1	6	2	8
Enfardamento	8	1	8	2	10
Desaleiramento	6	1	6	2	8
Recolhimento	4	3	12	3	15
Carregamento	3	3	9	2	11
Descarregamento	3	3	9	2	11
Desenfardamento	1	3	3	1	4
Transporte	8	3	24	5	29
Total					96

## 4 CONCLUSÃO

Para as condições de ensaio do aproveitamento da palhada com o bagaço para fins energéticos, conclui-se:

- são necessários investimentos de R\$ 20.528.000,00 na divisão agrícola e de R\$ 211.100.000,00 na industrial para o aproveitamento de 50% da palhada somada ao bagaço de cana-de-açúcar;

- o potencial de exportação de energia elétrica é de 111.912kWh por tonelada de cana-de-açúcar;

- a redução no custo do recolhimento da palhada é imprescindível para a viabilização do seu aproveitamento;

- com o aproveitamento da palhada, pode-se fornecer energia elétrica para 86.282 habitantes dos municípios do entorno da usina estudada;

- há possibilidade de geração de 96 empregos diretos, que poderiam ser ocupados por cortadores de cana, a serem qualificados.

## 5 REFERÊNCIAS

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. **Resultados dos leilões de geração**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

AQUINO, G. S.; MEDINA, C. C.; TRONCHINI, E. R.; PASINI, A.; MENEZES JUNIOR, A. O.; HOSHINO, A. T.; OLIVEIRA, E. L.; BRITO, O. R. Root system and yield of sugarcane cultivated under different amounts of straw in southern Brazil. **African Journal of Agricultural Research**, Ebène, v. 11, n. 7, p. 563-571, 2016.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA – CCEE. **Preços Médios**. São Paulo, 2016. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/precos\\_medios?\\_afzLoop=252226409147802#%40%3F\\_afzLoop%3D252226409147802%26\\_adf.ctrl-state%3D1bdq1dawb9\\_44](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afzLoop=252226409147802#%40%3F_afzLoop%3D252226409147802%26_adf.ctrl-state%3D1bdq1dawb9_44)>. Acesso em: 15 nov. 2016.

DELIVAND, M. K.; BARZ, M.; GHEEWALA, S. H. Logistic cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. **Energy**, Amsterdam, v. 36, p. 1435-1411, 2011.

DESHMUKH, R.; JACOBSON, A.; CHAMBERLIN, C.; KAMMEN, D. Thermal gasification or direct combustion? Comparison of advanced systems in the sugarcane industry. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 55, p. 163-174, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, **Anuário estatístico de energia elétrica 2013**. Rio de Janeiro: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2013. Disponível em:

<[http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909\\_1.pdf](http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf)>. Acesso em: 13 nov. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** Rio de Janeiro: EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2016.

HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. **Biomass power generation:** sugarcane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. 217 p.

IBGE. **Censo 2010.** Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/apps/mapa/>>. Acesso em: 11 abr. 2016.

LEAL, M. R. L. V.; GALDOS, V. M.; SCARPARE, F. V.; SEABRA, J. E. A.; WALTER, A.; OLIVEIRA, C. O. F. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 53, p. 11-19, 2013.

LEMO, S. V.; DENADAI, M. S.; GUERRA, S. P. S.; ESPERANCINI, M. S. T.; BUENO, O. C.; TAKITANE, I. C. Economic efficiency of two baling systems for sugarcane straw. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v. 55, p. 97-101, 2014.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, O. A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhico na colheita mecânica da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 546-552, 2008.

NGUYEN, H. V.; TRAN, T. V.; HAU, H. D.; NGUYEN, N. T.; GUMMERT, M. Energy efficiency, greenhouse gas emissions, and cost of rice straw collection in the Mekong river delta of Vietnam. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 198, p. 16-22, 2016.

OECD. **Biomass and agriculture:** sustainability, markets and policies. Paris: OCDE, 2004. 565 p.

PACHECO, E. P., **Seleção e custo operacional de máquinas agrícolas.** Rio Branco: Embrapa Acre, 2000. 21 p.

PAES, L. A.; OLIVEIRA, M. A. Potential trash biomass of the sugar cane plant. In: HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. (Ed.), **Biomass power generation:** sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. p. 19-23.

PAINTER, K. **Costs of owning and operating farm machinery in the Pacific Northwest.** Moscow: Pacific Northwest Extension, 2011. Disponível em: <<http://www.cals.uidaho.edu/edcomm/pdf/pnw/pnw03436.pdf>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

PIEROSSI, M. A.; FAGUNDES, S. A. Enfardamento de Palha. In: SANTOS, F; BORÈM, A. (Ed.). **Cana-de-açúcar:** do plantio à colheita. Viçosa: Ed. UFV, 2016. p. 255-276.

SARTO, C. A.; HASSUANI, S. J. Trash recovery: Baling machines. In: HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C. (Ed.). **Biomass power generation:** sugar cane bagasse and trash. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005. p. 57-60.

SEABRA, J. E. A.; TAO, L.; CHUM, H. L. MACEDO, I. C. A techno-economic evaluation of the effects of centralized cellulosic ethanol and co-products refinery options with sugarcane mill clustering. **Biomass and Bioenergy**, Amsterdam, v. 34, p. 1065-1078, 2010.

SUREDAN, U.; V. RAMESH, V.; JAYAKUMAR, M.; MARIMUTHU, S.; SRIDEVI, G. Improved sugarcane productivity with tillage and trash management practices in semi arid tropical agro ecosystem in India. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 158, p. 10-21, 2016.