



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

RAÍ RIGONATTO BATISTA

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO
DA PALHADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Londrina
2017

RAÍ RIGONATTO BATISTA

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO
DA PALHADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA FINS
ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada para obtenção ao título de mestre na Universidade Estadual de Londrina, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, como Área de Concentração: Impactos ambientais e socioeconômicos.

Orientador: Profa. Dra. Cristiane de Conti Medina

Londrina
2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Batista, Raí Rigonatto.

Análise técnico-econômica do aproveitamento da palhada de cana-de-açúcar para fins energéticos / Raí Rigonatto Batista. - Londrina, 2017.
75 f. : il.

Orientador: Cristiane de Conti Medina.

Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Exatas, Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, 2017.

Inclui bibliografia.

1. Recursos energéticos - Tese. 2. Biomassa - Tese. 3. Energia elétrica - Produção - Tese. I. Medina, Cristiane de Conti. II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação em Bioenergia. III. Título.

RAÍ RIGONATTO BATISTA

**ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA DO APROVEITAMENTO DA
PALHADA DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA FINS ENERGÉTICOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Bioenergia. Área de concentração: Impactos ambientais e socioeconômicos

BANCA EXAMINADORA

Orientador: Profa. Dra. Cristiane de Conti
Medina
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Profa. Dra. Carmen Luísa Barbosa Guedes
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Profa. Dra. Gisele Silva de Aquino
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Londrina, 23 de fevereiro de 2017.

“À Deus, por me proteger e amar em todos momentos da minha vida.”

“À minha família, pelo apoio e amor incondicional.”

AGRADECIMENTOS

À Deus por me amparar nos momentos difíceis, me dar força interior para superar as dificuldades, mostrar os caminho nas horas incertas e me suprir em todas as minhas necessidades.

À toda minha família, principalmente aos meus pais Vandira e Adalberto, sábios na arte de educar e amar, aos meus irmãos Rogério e Renan, minha cunhada Nayara e meus avós Anna Thereza, Olindino, Nilce e Antônio (*In memorian*), pelo total apoio durante todo esse período complicado e longe de casa. Meu muito obrigado!

À Profa. Dra. Cristiane de Conti Medina, pela orientação, colaboração, revisões, por sempre acreditar em mim, pela amizade, e por ter possibilitado meu desenvolvimento acadêmico e pessoal.

À Profa Dra. Carmen Luísa Barbosa Guedes, coordenadora do curso, pela confiança e total apoio durante o curso.

Aos professores do mestrado em Bioenergia, pelos conhecimentos transmitidos no decorrer das disciplinas.

Ao meu grande amigo Thiago Zorzenoni, que merece um agradecimento em especial, pela ajuda, pelos conselhos e ensinamentos durante todas as etapas da dissertação.

À Profa Dra. Gisele Silva de Aquino e companheiros do projeto palhada da cana-de-açúcar, principalmente, os amigos Lucas Moraes e Jéssica Barbieri.

Agradecer ao meu amigo/irmão Danilo Herculano, do mestrado em Bioenergia, pela amizade, companheirismo e ajuda ao longo de todo esse período.

Aos amigos do mestrado: Cintia, Ivo, Guilherme, Carol, Francino, Luana (UEM) e em especial à Simone, por sempre me acalmar nos momentos mais difíceis.

BATISTA, Raí Rigonatto. **Análise técnico-econômica do aproveitamento da palhada de cana-de-açúcar para fins energéticos**. 2017. 75 f. Dissertação (Mestrado em Bionergia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

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, por meio 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. 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. A capacidade de exportação calculada foi 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⁻¹, custo da energia-elétrica de R\$125,55 MWh⁻¹ e preço mínimo de comercialização da energia a R\$316,64 MWh⁻¹. A energia elétrica exportada pode atender uma população de 87.946 pessoas, o que corresponde à 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. Saccharum spp. Biomassa. Enfardamento.

BATISTA, Raí Rigonatto. **Techno-economic evaluation of sugarcane straw for energy purposes**. 2017. 75 p. Dissertação (Mestrado em Bionergia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2017.

ABSTRACT

The straw represents one-third of the sugar cane's primary energy and but exploitation still incipient, therefore having a huge potential for its utilization. This research aimed to evaluate the potential of generating energy with use of sugar cane 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, in a North of Parana's typical sugarcane mill. There were estimated all the investments required 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. There were also estimated the residential consumers amount and the cities that could be supplied by this energy. Investments of R\$20,528,000.00 are required in the agricultural division and R\$211,100,000.00 in the industrial sector for the use of 50% of the straw added to the bagasse of sugarcane. The estimated export capacity was 111,912 kW per ton of cane, the straw in the plant's stockyards R\$68,08 t⁻¹, electrical energy cost R\$125,55 MWh⁻¹ and the energy selling minimum price R\$316,64 MWh⁻¹. The exported energy attends a 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. The project provides for the creation of 96 new direct jobs.

Keywords: Cogeneration. Electricity. Bioenergy. Saccharum spp. Biomass. Baling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– Fontes de biomassa, processo de conversão e energéticos.....	19
Figura 2	– Latitudes adequadas para a produção de cana-de-açúcar no mundo	22
Figura 3	– Limpeza do canavial com emprego do fogo.....	24
Figura 4	– Eliminação da queima da cana-de-açúcar em São Paulo.....	25
Figura 5	– Modelo usual de colheita da cana-de-açúcar.....	28
Figura 6	– Divisão da cana-de-açúcar.....	29
Figura 7	– Projeção da produção de cana-de-açúcar e disponibilidade de palha no Brasil	31
Figura 8	– Esquema de uma colhedora de cana-de-açúcar.....	33
Figura 9	– Aleirador de dedos em operação no canavial	36
Figura 10	– Enfardadora da palhada da cana-de-açúcar em operação	37
Figura 11	– Operação de recolhimento dos fardos	39
Figura 12	– Operação de carregamento dos fardos.....	40
Figura 13	– Transportes dos fardos do campo para a indústria sucroenergética.....	41
Figura 14	– Descarregamento dos fardos de palhada em pátio aberto.....	42
Figura 15	– Exemplo de desenfardador de fardos de palhada de cana-de-açúcar	43
Figura 16	– Representação esquemática do processo de cogeração com a utilização combinada dos combustíveis bagaço e palhada.....	52
Figura 17	– Custos agrícolas e de transporte da palhada em R\$ t ⁻¹	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Comparação entre os custos da palha no sistema de recuperação de colheita integral (US\$ t ⁻¹).....	34
Tabela 2	–	Dimensões máximas permitidas para veículos e combinações de veículos de cargas.	40
Tabela 3	–	Características da usina referência utilizada no estudo e sua disponibilidade de biomassa.	45
Tabela 4	–	Preço de aquisição e características operacionais dos equipamentos que compõem a frota para o recolhimento da palhada	46
Tabela 5	–	Características dos fardos.....	47
Tabela 6	–	Indicadores gerenciais para cálculo do tempo disponível (TD) para realizar cada operação e ritmo operacional (RO).	47
Tabela 7	–	Parâmetros assumidos para cálculo da capacidade de campo efetiva (CCE) e capacidade de campo operacional (CCO) das operações de aleiramento, enfardamento e desaleiramento	48
Tabela 8	–	Parâmetros assumidos para cálculo de capacidade teórica para as operações cíclicas de recolhimento dos fardos, carregamento e descarregamento.	50
Tabela 9	–	Informações para o cálculo do tempo útil disponível, número de viagens e carga transportada para as operações de transporte dos fardos	51
Tabela 10	–	Dados para determinar o custo horário das operações	53
Tabela 11	–	Dados para composição do custo do transporte dos fardos	55
Tabela 12	–	Capacidades e número de conjuntos para as operações de recolhimento da palhada.....	59
Tabela 13	–	Descrição da frota e o investimento agrícola (em R\$) para recolhimento da palhada.....	61
Tabela 14	–	Custos horários para as operações de recolhimento e desenfardamento da palhada (R\$ h ⁻¹), considerando depreciação (D); alojamentos e seguros (AS); juros (J); reparo e manutenções (RM); combustível (C); lubrificantes (L); fios para a operação de enfarmento (F) e salário do tratorista (ST).	62

Tabela 15 – Custo de geração da energia-elétrica	64
Tabela 16 – Municípios que podem ser atendidos com energia elétrica gerada pelo projeto de aproveitamento da palhada	65
Tabela 17 – Empregos diretos gerados pelo projeto de aproveitamento da palhada	66

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	– Tempo disponível para realização da operação	48
Equação 2	– Ritmo operacional	48
Equação 3	– Capacidade de campo efetiva.....	48
Equação 4	– Eficiência de campo	48
Equação 5	– Capacidade de campo operacional.....	49
Equação 6	– Número de conjuntos para as operações de aleiramento, enfardamento e desaleiramento	49
Equação 7	– Capacidade teórica	49
Equação 8	– Capacidade operacional	49
Equação 9	– Número de conjuntos para as operações agrícolas cíclicas	49
Equação 10	– Depreciação.....	53
Equação 11	– Alojamentos e seguros.....	54
Equação 12	– Juros	54
Equação 13	– Potência do motor.....	54
Equação 14	– Combustível.....	54
Equação 15	– Salário do tratorista.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1	BIOMASSA: A ENERGIA DA FOTOSSÍNTESE	17
3.1.1	Fontes de Biomassa.....	18
3.2	CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	20
3.2.1	Colheita da Cana-de-Açúcar	23
3.2.1.1	Cana queimada	23
3.2.1.2	Cana crua.....	27
3.3	PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR.....	29
3.3.1	Recolhimento da Palhada	32
3.3.2	Sistema de Limpeza Parcial.....	32
3.3.3	Enfardamento da Palhada.....	35
3.3.3.1	Aleiramento	36
3.3.3.2	Enfardamento.....	37
3.3.3.3	Recolhimento dos fardos.....	38
3.3.3.4	Carregamento dos fardos.....	39
3.3.3.5	Transportes dos fardos	40
3.3.3.6	Processamento industrial.....	41
4	MATERIAL E MÉTODOS	44
4.1	APROVEITAMENTO DA PALHADA EM CONJUNTO COM O BAGAÇO	44
4.2	AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	53
4.2.1	Avaliação do Custo de Recolhimento da Palhada	53
4.2.2	Geração de Energia Elétrica com o Uso da Palhada e do Bagaço	56
4.3	DETERMINAÇÃO DA POPULAÇÃO ATENDIDA PELO PROJETO.....	56
4.4	CÁLCULO DOS EMPREGOS DIRETOS PROPORCIONADOS PELO RECOLHIMENTO DA PALHADA.....	57

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1	AVALIAÇÃO TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DA PALHADA	58
5.2	ANÁLISE DOS CUSTOS.....	60
5.3	POPULAÇÃO A SER ATENDIDA COM O APROVEITAMENTO DA PALHADA	65
5.4	GERAÇÃO DE EMPREGOS DIRETOS PROPORCIONADOS PELO RECOLHIMENTO DA PALHADA.....	66
6	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS	68

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de etanol de cana-de-açúcar. A área cultivada com cana-de-açúcar, que deverá ser colhida e destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2016/17, é de 8,9 milhões de hectares; aumento de 3,7%, se comparada com a safra 2015/16, distribuída em todos os estados produtores. São Paulo permanece como maior produtor, com 52,3% da área plantada, seguido por Goiás, Minas Gerais, Paraná, Mato Grosso do Sul, Alagoas e Pernambuco, Estes estados são responsáveis por, aproximadamente, 93% da área de produção nacional (CONAB, 2016). Ainda de acordo com o levantamento da safra de 2016/2017 pela CONAB (2016), o Estado do Paraná tem cerca de 623 mil hectares plantados, sendo esperada uma produção total de 45,818 milhões de toneladas de cana-de-açúcar. A produção estimada de cana-de-açúcar destinada à indústria para a safra 2016/17, no Brasil, será de 684,8 milhões de toneladas.

O sistema de colheita no Brasil está passando por mudanças; o Estado de São Paulo estabeleceu, juntamente com a Única (União da Indústria de Cana-de-açúcar), o Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, que visa a antecipação do cronograma de eliminação das queimadas, anteriormente descrito o cronograma pela Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002 (SÃO PAULO, 2002), sendo o novo prazo para 2014 em áreas mecanizáveis (terreno com inclinação menor que 12%) e para 2017 para áreas não mecanizáveis (UNICA, 2007).

Nas colheitas mecanizadas ou semimecanizadas (cana crua), as folhas secas, os ponteiros e as folhas verdes são cortados e lançados na superfície do solo, originando uma cobertura morta, que é denominada de palhada. Consequentemente, grande volume de palhada é fornecido ao solo sem a despalha a fogo; estima-se que, para cada tonelada de cana, tem-se, aproximadamente, 140 kg somente de palha, permanecendo no campo de 10 a 30 t ha⁻¹ de matéria seca da palhada, oscilando em virtude da variedade e da idade do canavial (OLIVEIRA et al., 2011; MELLO IVO et al., 2006).

Este material, deixado no campo, contribui para melhorias nas qualidades químicas, físicas e biológicas do solo.

A palhada sobre a superfície do solo aumenta a infiltração de água, diminui a erosão e a evaporação, melhora a estrutura do solo, aumenta a sua CTC

(capacidade de troca de cátions) e é fonte de nutrientes para a macro e a microfauna do solo e para a própria cultura da cana-de-açúcar (OLIVEIRA et al., 1999). Entretanto, de acordo com Vasconcelos e colaboradores (2003), esse volume de palhada sobre a soqueira pode causar dificuldade para a emergência da cana-de-açúcar, resultando, assim, em falha na rebrota.

A palhada de cana-de-açúcar apresenta-se também como matéria-prima com enorme potencial para geração de calor, eletricidade ou produção de etanol celulósico, devido ser excelente fonte lignocelulósica renovável (DAWSON; BOOPATHY, 2007).

A palhada pode ser utilizada na cogeração de energia, uma vez que possui o dobro da eficiência energética do bagaço. Ambos poderão produzir o equivalente a 15% da energia gerada no Brasil, até 2020. Além disso, pode ser empregada como matéria prima para a produção do bioetanol ou etanol celulósico. Estima-se que sua utilização, juntamente com o bagaço, produziria aumento na produção de etanol da ordem de 40% (LIMA e NATALENSE, 2010). Considerando a geração de energia elétrica a partir da palhada da cana-de-açúcar em $0,88 \text{ MWh t}^{-1}$ em base seca, podem ser abastecidas o equivalente a 20 casas (COOPERCITRUS, 2015). Uma tonelada de palhada seca produz cerca 287 litros de etanol 2ª geração (SANTOS et al., 2012).

Segundo Ripoli e colaboradores (2000), uma tonelada de palha equivale, aproximadamente, de 1,2 a 2,8 EBP (barris equivalentes de petróleo). Portanto, deixar de utilizar essa biomassa resultaria em grande desperdício energético, tornando-se, assim, importante produto para agregação de valor ao setor sucroenergético.

De acordo com Aquino (2012), é possível deixar na cobertura do solo 50% da palhada, não caracterizando prejuízo à cultura, garantindo a sua sustentabilidade. Desta maneira, a palhada excedente pode ser retirada do campo para produção de energia na forma de bioeletricidade, como também pode ser convertida em etanol, otimizando a geração de energia oriunda da palhada, com produção de maiores volumes de etanol por área cultivada. Estas possibilidades trazem melhores perspectivas para o setor sucroenergético, obtendo-se ganhos ambientais e financeiros para o país, que enfrenta forte concorrência com outros países, como a Índia e os Estados Unidos.

Porém, para o aproveitamento da palhada para fins energéticos, é fundamental o estudo de viabilidade econômica do processo, que passa pelo desenvolvimento de um sistema de transporte e recolhimento dessa biomassa até as usinas (PIEROSSI; FAGUNDES, 2016).

Diante dessa situação, trabalhos foram realizados com o intuito de abordar as possíveis formas de recolhimento da biomassa. Hassuani e colaboradores (2005) e Michelazzo e Braunbeck (2008) encontraram dificuldades na época, devido aos elevados custos dos equipamentos, aliados às baixas capacidades operacionais dos mesmos, pois eram equipamentos adaptados da colheita de forragem.

Atualmente, com a demanda de equipamentos para recolhimento de biomassa visando à produção de etanol de segunda geração e energia elétrica, houve o desenvolvimento de equipamentos com maior capacidade, os quais reduziram o custo de recolhimento da palhada e, conseqüentemente, o custo da energia elétrica produzida a partir dessa fonte. Entretanto, poucos estudos relatam os resultados obtidos até o momento.

Para suprir esta lacuna, este trabalho tem como finalidade realizar uma análise técnico-econômica do aproveitamento da palhada da cana-de-açúcar para fins energéticos, tendo por base uma usina do Norte do Estado do Paraná.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como finalidade realizar uma análise técnico-econômica do aproveitamento da palhada da cana-de-açúcar para fins energéticos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Dimensionar a frota de caminhões, de máquinas e de implementos necessária para o aproveitamento da palhada de cana-de-açúcar;

Estimar os investimentos para uma nova planta de cogeração;

Avaliar se a introdução da palhada na produção de energia elétrica é viável nas condições do Norte do Paraná;

Estimar a população e os municípios atendidos com a energia elétrica produzida por meio do uso combinado da palhada e do bagaço;

Estimar a quantidade de novos empregos diretos gerados com o aproveitamento do bagaço e da palhada.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 BIOMASSA: A ENERGIA DA FOTOSSÍNTESE

Ainda hoje, os combustíveis fósseis, como o carvão, o petróleo e o gás natural, consistem nas principais fontes de energia no mundo (SAIDUR et al., 2011). Entretanto, o conhecimento das interações negativas entre esses combustíveis com o meio ambiente, como a emissão de grandes quantidades de poluentes à atmosfera, acarretando no agravamento do aquecimento global, chuvas ácidas e poluição urbana. O fato desses combustíveis não renováveis (a curtos períodos de tempo) terem reservas médias para findar-se nos próximos 40-50 anos, levaram a maioria dos países a promover ações para diversificar suas matrizes energéticas, com o objetivo de terem maior participação de fontes renováveis, menos nocivas ao ambiente, como solar, eólica e biomassa (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008; KOH; HOI, 2003; SASAKI et al., 2009).

De acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as emissões gasosas oriundas de combustíveis fósseis irão acarretar em um aumento gradual de até 5,8°C na temperatura da terra até 2100, afetando diretamente o equilíbrio do planeta (IPCC, 2000 citado por MAHMOUD; SHUHAIMI; ABDEL, 2009). Isto está, principalmente, relacionado ao domínio por décadas do uso massivo de derivados de combustíveis fósseis para geração de energia. Entretanto, um relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) divulgado em 2011, cita que a biomassa, a energia solar e a energia eólica deverão ser as tecnologias alternativas renováveis com maiores crescimentos até 2050, podendo reduzir os prejuízos ambientais e climáticos causados por fontes não renováveis (RODRIGUES, 2013).

Devido a isso, a necessidade de buscar-se um maior desenvolvimento sustentável passa pela diminuição do uso de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, uma maior demanda por fontes renováveis. Neste caso, a biomassa é uma opção viável e abundante.

Biomassa é o termo concedido a qualquer matéria orgânica que é derivada de plantas. A energia solar, quando interceptada pelas plantas e convertida pelo processo de fotossíntese em energia química, é fixado ou armazenado na

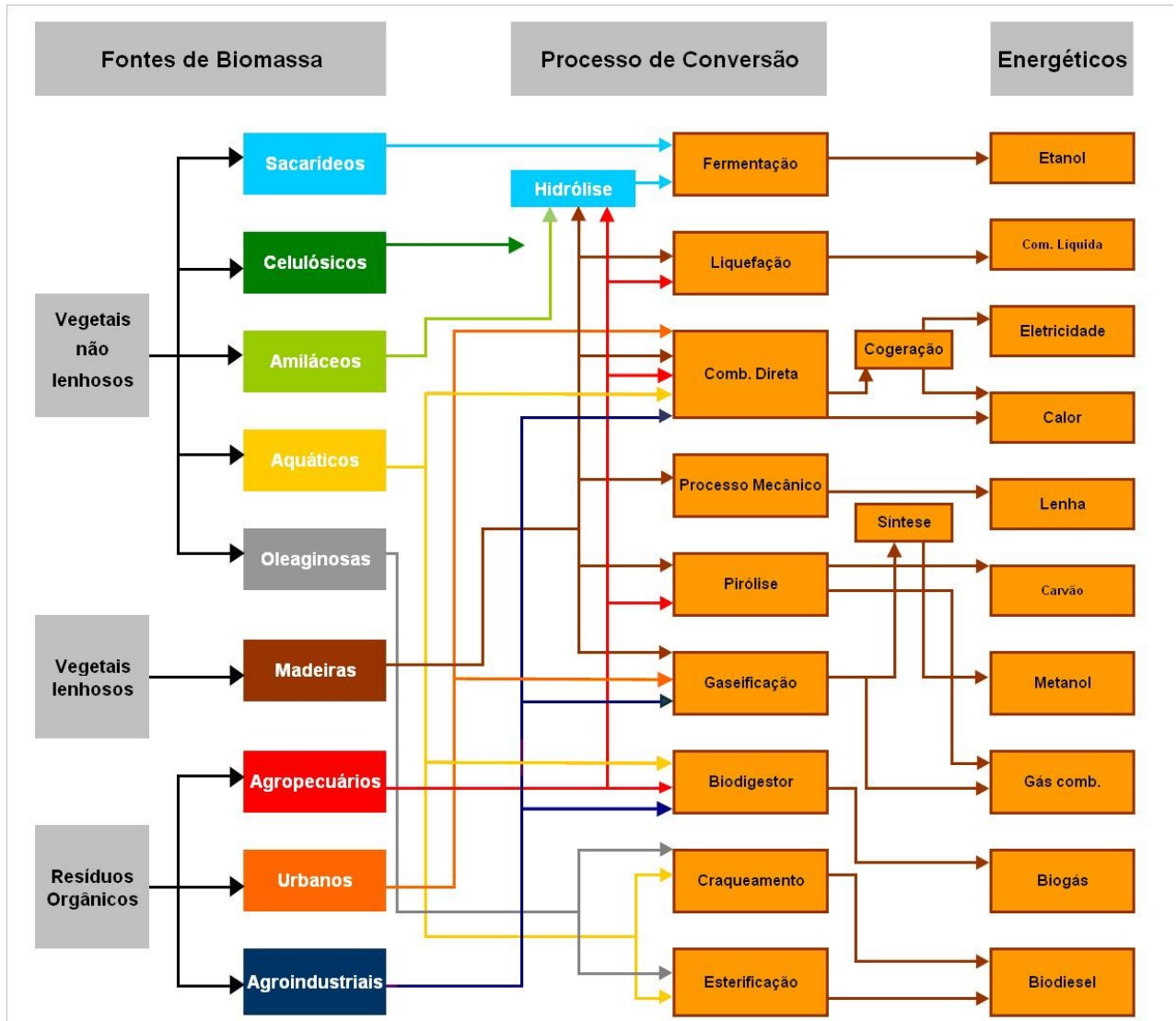
forma de vegetação terrestre ou aquática por longos períodos de tempo, sem que ocorra a perda desta. Essa vegetação quando utilizada como alimento (pastagem ou silagem) pelos animais, é convertida em biomassa animal através do excremento, sendo uma boa fonte de energia, juntamente com outras fontes de biomassa (SAIDUR et al., 2011).

A biomassa é uma fonte renovável para geração de energia complementar, a bioenergia, que pode ser derivada de diversos tipos e diferentes processos para transformação em energia limpa. Quando voltada para fins energéticos pode ser de origem de resíduos sólidos urbanos – animais, vegetais e florestais (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008). Portanto, essa energia contida em diferentes matérias orgânicas pode ser convertida em combustíveis menos poluentes e sustentáveis, através de tecnologias já conhecidas para geração de eletricidade, calor ou biocombustíveis, sejam eles líquidos sólidos ou gasosos (AMARAL; TAVARES, 2013); porém, as diferentes tecnologias para geração de energia através da biomassa esbarram, principalmente, em problemas de ordem financeiras (CORTEZ; LORA; AYARZA, 2008).

3.1.1 Fontes de Biomassa

De acordo com Cortez, Lora e Ayarza (2008), a biomassa pode ser obtida de vegetais não-lenhosos, de vegetais lenhosos, como é o caso de madeiras para reflorestamento, e de florestas energéticas, bem como seus resíduos; pode ainda ser obtida de resíduos orgânicos, que se enquadram como os resíduos agrícolas (que é o caso da palha e do bagaço de cana-de-açúcar), resíduos urbanos e agroindustriais. A figura 1 esquematiza as fontes de biomassas, o processo de conversão e os energéticos produzidos.

Figura 1 – Fontes de biomassa, processo de conversão e energéticos



Fonte: CENBIO (2016)

Uma das principais fontes de biomassa é a cana-de-açúcar, sendo esta a principal cultura brasileira para produção de energia. De acordo com o Balanço Energético Nacional – BEN, a biomassa da cana-de-açúcar lidera as fontes renováveis brasileiras, representando 16,9% da matriz energética (BRASIL, 2016).

3.2 CULTURA DA CANA-DE-AÇÚCAR

A cana-de-açúcar é pertencente à família das poáceas, gênero *Saccharum* spp. É uma planta alógama considerada de ciclo semi-perene. Adaptada em diversos países do planeta, é originária de regiões quentes e tropicais da Ásia, mais precisamente da Indonésia e Nova Guiné, onde se apresentava como planta silvestre ou ornamental (DANIELS; ROACH, 1987).

A produção inicial visava à utilização do xarope, obtendo-se registros da utilização do açúcar em seu estado sólido e na forma cristalizada, como é comercializada atualmente, apenas no período de domínio Persa, no ano 500 (DELGADO; CESAR, 1977).

A partir do século VIII, em virtude das conquistas árabes no Ocidente, a cultura da cana-de-açúcar pode ser melhor difundida pelo mar Mediterrâneo. Com isso, a propagação da cultura não foi limitada apenas ao norte da África e sul europeu, o que havia ocorrido no período das invasões, conquistando assim, a partir do século VIII, novas regiões para seu cultivo (MOZAMBANI et al., 2006).

Com a possibilidade de navegação pelo mar Mediterrâneo, países como Portugal e Espanha, utilizando-se dessa via, introduziram a cana-de-açúcar em algumas regiões por elas colonizadas, como nas Ilhas do Cabo Verde, São Tomé e na África Ocidental. No Brasil, com as mudas trazidas por portugueses, iniciou-se a instalação de engenhos, impulsionado, assim, o desenvolvimento da cultura no território brasileiro (LANDELL et al., 2006; MOZAMBANI et al., 2006).

Segundo Landell e colaboradores (2006), no ano de 1532, Martim Afonso de Souza introduziu as primeiras mudas de cana-de-açúcar vindas da Ilha da Madeira no Brasil, estimulando as primeiras instalações de engenhos no território brasileiro. Esses engenhos foram fundamentais pra o desenvolvimento da produção, do comércio e da cultura canavieira no Nordeste do Brasil, região que recebeu o primeiro centro açucareiro do país. Os estados de Pernambuco e Bahia eram os principais produtores brasileiros no final do século XVI e líderes na produção mundial de açúcar, sendo a produção exportada para o continente Europeu. No século XVII, intensificou a disseminação no Sudeste, principalmente no Planalto Paulista, obtendo grande destaque, principalmente na região de Itu, sendo está até o

início do século XIX o maior centro açucareiro do Estado de São Paulo (MOZAMBANI et al., 2006). A cultura da cana-de-açúcar expandiu no Sudeste, paralelamente com a decadência da lavoura cafeeira (SZMRECSÁNYI, 1979).

A atividade sucroalcooleira brasileira possui altos e baixos na sua história, sendo historicamente alavancada com a criação do Instituto do Açúcar e do Alcool, em 1933, e do Programa Nacional do Alcool (Pró-álcool), em 1975, que foi um programa incentivado pelo governo brasileiro, com intuito de substituição dos combustíveis fósseis na frota veicular pelo etanol brasileiro, devido aos altos preços desses combustíveis em função da crise do petróleo (ROSILLO-CALLE; CORTEZ, 1998).

A produção de cana-de-açúcar necessita de uma estação quente e úmida, que beneficia a germinação, o brotamento e o desenvolvimento da planta; e de uma estação predominantemente mais seca e fria, que favorece ao acúmulo de sacarose e a maturação dos colmos. Sendo assim, algumas regiões possuem condições adequadas à sua produção em grande escala, como é o caso do cenário brasileiro (MATOS; PESSÔA, 2011). Outras regiões, no entanto, falharam na tentativa de inserção da cana-de-açúcar, como na Grécia, Itália e em algumas partes da França, devido às condições climáticas desfavoráveis (MOZAMBANI et al., 2006).

O cultivo de cana-de-açúcar estende-se para regiões localizadas entre a latitude 36,7° norte e 31,0° sul da linha do Equador, compreendendo à regiões tropicais e subtropicais do globo terrestre. A figura abaixo (Figura 2), demonstra o mapa mundial, com destaque para as regiões adequadas ao plantio da cana-de-açúcar (SUGARCANECROPS, 2016).

Figura 2 – Latitudes adequadas para a produção de cana-de-açúcar no mundo



Fonte: Sugarcane crops (2016)

No Brasil, pode-se encontrar dois períodos distintos de safra, sendo no Norte e Nordeste no período de setembro a março, e no Centro-Sul, de abril a novembro, devido às variações climáticas existentes ao longo do território brasileiro (NOVACANA, 2016).

Há plantações de cana-de-açúcar em todo território, ocupando um pouco mais de 9% de todas as áreas disponíveis para agricultura, ficando atrás da soja e do milho, as principais culturas em termos de área de produção e importância para o país (CARVALHO, 2007). O Estado de São Paulo é o maior produtor com, aproximadamente, 60% de toda a produção do país. As regiões Centro-Oeste, Sudeste e Sul representam juntas 85% da produção, sendo essas regiões de extrema importância para o setor (NOGUEIRA, 2008).

Dentre todos os 121 países produtores de cana-de-açúcar, o Brasil encontra-se desde 2003 como o país com maior área de produção, segundo dados da Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas – FAO (2003), citados por Sugarcane crops (2016).

De acordo com o levantamento da NOVACANA (2016b), a indústria canavieira no Brasil possui 371 usinas em atividades, sendo o Estado de São Paulo o maior produtor, com 157 usinas ativas. Já o Paraná conta com 30 usinas em operação, atrás apenas de São Paulo, Minas Gerais e Goiás.

O ciclo da produção de cana-de-açúcar, desde tratamentos culturais até a colheita, é variável. Alguns fatores como o clima, a variedade e as práticas utilizadas no cultivo afetam sua produção. Estes ciclos, frequentemente, são de seis anos no

Brasil, sucedendo cinco cortes, quatro tratos de soqueiras (cana cortada) e a reforma ocorrendo no último período (NOGUEIRA, 2008).

3.2.1 Colheita da Cana-de-Açúcar

No contexto atual, as emissões de gases poluentes que contribuem para o agravamento do efeito estufa estão nas pautas de todo os governantes do planeta. Buscam-se medidas para diminuir consideravelmente os prejuízos já causados pela ação antrópica no meio ambiente. Uma medida adota no setor sucroenergético é por um fim na prática de despalha à base de fogo nos canaviais, visando adequar-se às restrições ambientais e aumentar a eficiência da colheita.

De acordo com Furlani Neto (1997), os sistemas empregados para a colheita da cana-de-açúcar, são: o de cana queimada, ou seja, limpeza prévia do canavial com despalha a fogo; e colheita mecanizada ou cana crua. Os sistemas afetam a produtividade, a longevidade e as características físico-químicas e biológicas dos solos.

3.2.1.1 Cana queimada

O sistema de cana queimada é empregado no território brasileiro há mais de 500 anos, desde o início da colonização. Nesse sistema, o canavial passa por uma limpeza rápida, que se caracteriza por queima parcial ou total das folhas e ponteiros, permanecendo na lavoura os colmos (BRAUNBECK; MAGALHÃES; GARCIA, 2008).

Figura 3 – Limpeza do canavial com emprego do fogo



Fonte: FOLHA DA REGIÃO (2009)

Esse processo é eficiente e econômico para a limpeza dos canaviais, pois, além de beneficiar o desempenho dos trabalhadores rurais, reduzindo o esforço físico empregado por eles no corte da cana-de-açúcar, aumentando sua capacidade e eficiência de trabalho, reduz a incidência de animais peçonhentos e, conseqüentemente, acidentes de trabalhos (RIPOLI; MIALHE; BRITO, 1990).

Entretanto, essa prática de limpeza dos canaviais contrapõe-se com a necessidade de maior preocupação com o meio ambiente e com a saúde da população. As queimadas, além de poluírem o ar atmosférico pela fuligem e fumaça, liberam para a atmosfera grandes quantidades de gases, que contribuem para o agravamento do efeito estufa, principalmente de gás carbônico (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e a formação do ozônio (O_3) (ANTUNES, 2015).

Assis e Zucarelli (2007) constataram que a colheita de cana queimada aumenta a temperatura do solo, ocasionando redução de bactérias no solo, assim como perdas de nitrogênio, prejudicando a microbiota e a diversidade do solo. Organismos maiores, como animais que se abrigam nos talhões, são expulsos dos locais pelas chamas, ou são atingidos e levados à morte.

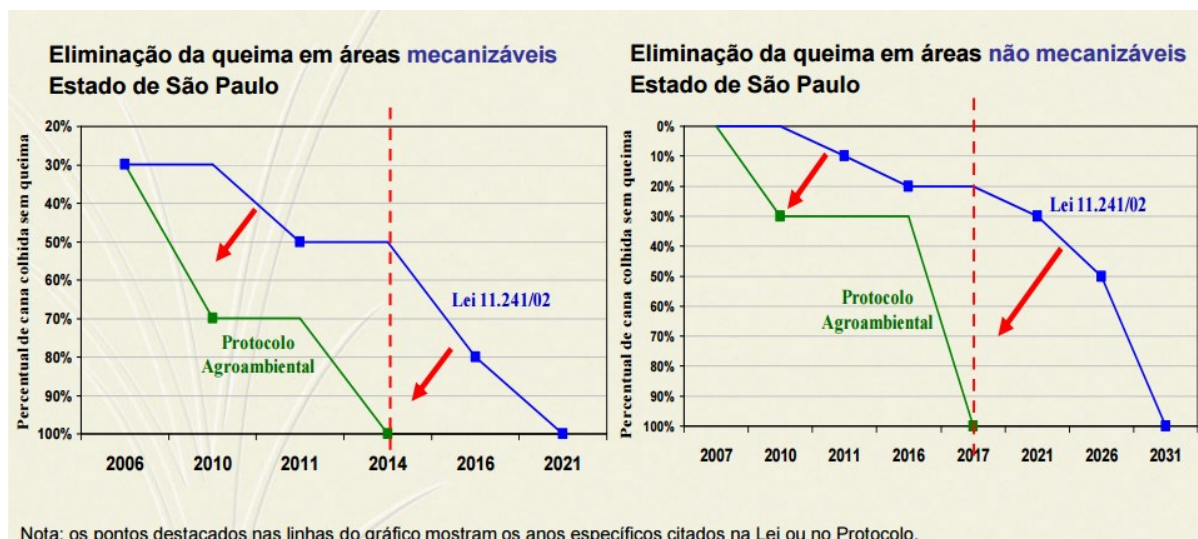
Em relação às normas que orientam sobre o fim das queimadas, podem ser encontradas em âmbito federal, estadual e municipal. Em âmbito federal,

o Decreto nº 2.661, de 8 de julho de 1998, estabelece a eliminação gradativa das queimadas em lavouras de cana-de-açúcar (BRASIL, 1998).

O Estado de São Paulo foi o primeiro a estabelecer metas para o fim dessas queimadas nos canaviais, por meio da Lei nº 11.241, de 2002, que estabelecia que essa prática tivesse seu fim até o ano de 2021, em áreas propícias à mecanização, onde a declividade não ultrapassasse 12%, e até 2031, para áreas que não atendessem essa topografia (SÃO PAULO, 2002).

No entanto, em conjunto com a União das Indústrias de Cana-de-açúcar (UNICA), no ano de 2007, firmou um acordo chamado Protocolo Agroambiental do Setor Sucroenergético, no qual anteciparam o calendário do fim das queimadas. Os novos prazos são: até o ano de 2014 para as áreas mecanizáveis e até 2017 para as demais áreas, como verificado na Figura 4 (UNICA, 2016).

Figura 4 – Eliminação da queima da cana-de-açúcar em São Paulo



Fonte: ÚNICA (2016)

Seguindo o modelo adotado por São Paulo, outros estados produtores da cultura estabeleceram leis e normas, que regem a eliminação do emprego de fogo nas lavouras.

No Estado do Mato Grosso do Sul, a Lei de nº 3.357, de 9 de janeiro de 2007, dispõe sobre a redução gradual da queima da palha; e a Lei nº 3.404 de 30 de julho de 2007, no seu artigo 3º, estabelece que, em áreas em que a topografia permitir a colheita mecanizada, a queima da palha da cana-de-açúcar será

totalmente eliminada, no prazo máximo de seis anos, a partir de 2010, à razão de 16,75% ao ano. Ainda segundo essa lei, está proibida a queima em áreas situadas a menos de cinco quilômetros do perímetro urbano (MATO GROSSO DO SUL, 2007).

Em Goiás, a Lei nº 15.384, de 23 de novembro de 2006, dispõe sobre a redução gradativa da queima da palha de cana-de-açúcar em áreas mecanizáveis, dando 20 anos para o fim dessa prática; porém, o governo de Goiás considerou os dois primeiros anos (2006 e 2007) como período de carência, estendendo, assim, o prazo final para 2028 (GOIAS, 2006).

Já em Minas Gerais, o Decreto nº 39.792 de 1998, regulamenta a Lei Estadual nº 10.312 de 1998, que dispõe da liberação da queima controlada da palha da cana-de-açúcar, com prévia autorização do órgão competente (MINAS GERAIS, 1998).

No Estado do Paraná, o Decreto nº 10.068 de 6 de fevereiro de 2014, estabelece critérios e prazos para adequação ambiental das usinas do setor sucroenergético e em um dos seus artigos é sobre a eliminação gradativa da despalha da cana-de-açúcar através da queima controlada. Assim, ficam dispostos os prazos:

- I - até 31 de dezembro de 2015 – 20% (vinte por cento) do total da área mecanizável de plantio da cana-de-açúcar;
- II - até 31 de dezembro de 2020 – 60% (sessenta por cento) do total da área mecanizável de plantio da cana-de-açúcar;
- III - até 31 de dezembro de 2025 – 100% (cem por cento) do total da área mecanizável de plantio da cana-de-açúcar.

Ainda de acordo com o Decreto nº 10.068, de 2014, no Paraná, em áreas não mecanizáveis (terrenos acima de 12% de declividade), o prazo para adequação e proibição da despalha do canavial com fogo vai até 31 de dezembro de 2030 (PARANÁ, 2014).

Apesar de alguns benefícios, principalmente para o trabalhador rural, as queimadas têm grande impacto sobre a saúde e o meio ambiente. Assim, com as legislações e outras questões que remetem à parte agronômica, colabora-se para a

diminuição dessa prática e, conseqüentemente, o crescimento gradual da colheita de cana crua (RIPOLI; MIALHE; BRITO, 1990).

3.2.1.2 Cana crua

A colheita mecanizada da cana-de-açúcar foi impulsionada a partir da década de 1980, com o intuito de substituir parcialmente a colheita manual com queima do canavial. Mas, devido às leis de eliminação da queima da palha, a colheita de cana crua passou a ser um caminho sem volta (BENEDINI; DONZELLI, 2007).

O início da mecanização se deu com a inserção do carregamento mecânico dos colmos inteiros, visto que, historicamente, o processo de colheita da cana-de-açúcar era completamente manual, desde o corte até o carregamento, realizado por trabalhadores rurais. Já na década de 1950, a Austrália começou a desenvolver o que hoje é o modelo mais utilizado no Brasil: a combinação da colheita com o carregamento dos colmos, através de uma máquina que corta uma linha por vez e, paralelamente a ela, utiliza-se um veículo para coletar a matéria-prima (BRAUNBECK; MAGALHÃES; GARCIA, 2008).

Ainda segundo os mesmos autores, ao longo dos anos, vários projetos de colheita mecanizada foram testados, como colheita de colmos inteiros, colmos picados e até a destruição da soqueira (*push-rake*). Porém, a colheita de cana picada (Figura 5) estabeleceu-se como o sistema mais utilizado devido à versatilidade em termos de capacidade para o corte de canas e sua produtividade.

Figura 5 – Modelo usual de colheita da cana-de-açúcar



Fonte: CASE IH (2016)

A colheita mecanizada da cultura é usualmente empregada em áreas onde a topografia permite o bom desenvolvimento das máquinas ou em áreas onde há problemas relacionados à mão de obra (BRAUNBECK; MAGALHÃES, 2010).

Segundo Costa Neto (2006), a introdução da mecanização da colheita da cultura é irrevogável, pois uma colhedora faz o trabalho equivalente ao de 100 cortadores de cana, sendo capaz de chegar a 15 a 20 t h⁻¹ de rendimento, comparada a 5 ou 6 t dia⁻¹ por pessoa.

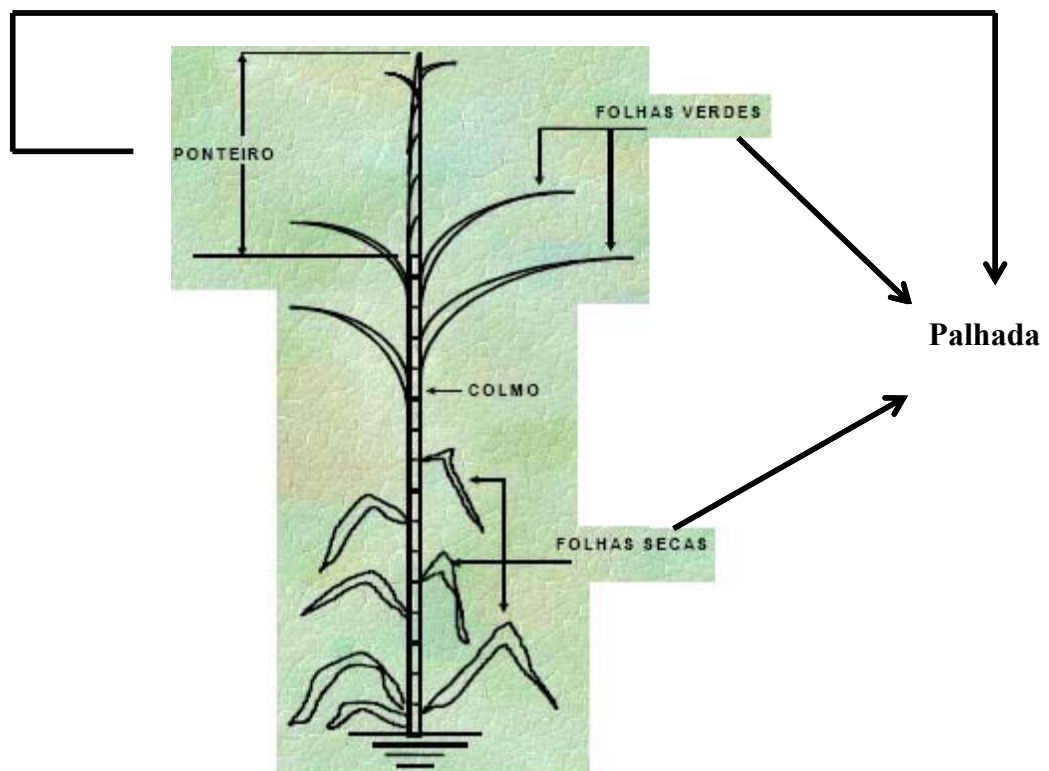
De acordo com o relatório da safra 2015-2016 do Protocolo Agroambiental do Estado de São Paulo (2016), dos 3,79 milhões de hectares cultivados em São Paulo, a colheita mecanizada respondeu por 91,3 % das áreas, ou seja, 3,46 milhões de hectares de cana foram colhidos sem o emprego de fogo. No Paraná, apenas 30% dos 620 mil hectares de cana-de-açúcar foram de colheitas mecanizadas e sem a queima da palha (FOCO RURAL, 2016).

Leal e colaboradores (2013) afirmam que 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 contidas no bagaço e nas folhas. A introdução desse sistema de cana crua permite que um terço dessa energia da cana-de-açúcar, anteriormente perdida, possa ser recuperada.

3.3 PALHADA DA CANA-DE-AÇÚCAR

Na colheita mecanizada, as folhas e os ponteiros da cana-de-açúcar são separados dos colmos, sendo deixados no campo, conforme Figura 6, quando passam a ser denominados de palhada. Sobre o solo, são deixados cerca de 140 kg de palhada (matéria seca) por tonelada de cana (PAES; OLIVEIRA, 2005).

Figura 6 – Divisão da cana-de-açúcar



Fonte: adaptado de PAES; OLIVEIRA (2005)

Dessa forma, uma boa parte da energia fica subutilizada se deixada no campo, sendo possível uma parte dessa biomassa ser recolhida para o aproveitamento na indústria, visto que, segundo o trabalho de Aquino e colaboradores (2016), a retirada de 50% desse material não causa redução na produtividade da cultura, nas condições do norte do Paraná.

A palha deverá ser melhor estudada nos próximos anos, devido ao seu alto potencial bioenergético. Dessa maneira, tem-se possibilidade de recuperar boa parte desse material que era perdido nas queimadas e agora é desperdiçada sendo deixada no campo. Uma tonelada de cana-de-açúcar equivale de 1,2 a 2,8

EBP (equivalente a barris de petróleo) e, como a palhada representa um terço dessa energia, o seu não aproveitamento pode ser considerado um desperdício energético e econômico (RIPOLI et al., 2000).

Dentre as inúmeras possibilidades, destaca-se a sua utilização na cogeração de energia (DESHMUKH et al., 2013), pois apresenta o dobro da eficiência energética do bagaço. Como as caldeiras de hoje foram dimensionadas para trabalhar com o bagaço, o uso combinado dessas biomassas, até 2020, poderão produzir 15% da energia gerada no Brasil (CEISE, 2013).

Outra possibilidade seria utilizar a palhada para produção complementar de etanol, o etanol celulósico, conhecido também como o de segunda geração. Segundo Santos e colaboradores (2012), é possível a produção de 287 L de etanol por tonelada de palhada.

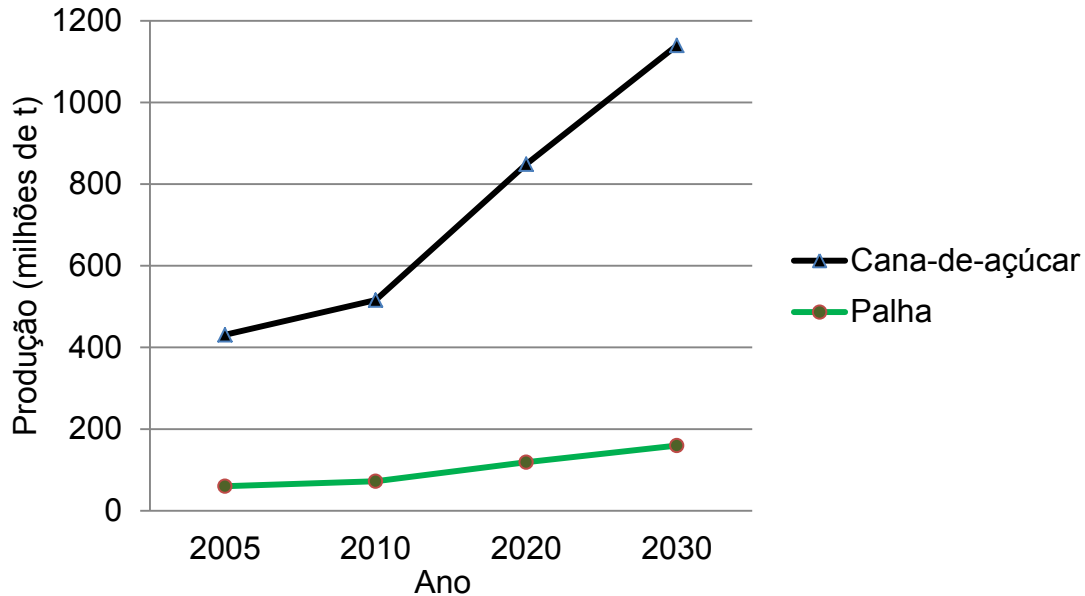
Outra finalidade da palhada da cana-de-açúcar é atuar como protetora do solo. De acordo com Rossetto e colaboradores (2010), a manutenção da palhada nos canaviais minimiza a degradação do solo. Ainda de acordo com os autores, essa degradação pode ser química, física e biológica e a manutenção do colchão de palha, formado após a colheita da cultura, afeta diretamente esses processos.

Essa cobertura vegetal favorece a redução da erosão (remoção das partículas finas do solo por agentes transformadores do solo, como a ação da chuva e do vento), a manutenção da umidade e o aumento de matéria orgânica no solo, a reposição de nutrientes, o controle de plantas daninhas e a redução da necessidade do produtor aplicar herbicidas, além da diminuição das emissões de gás carbônico à atmosfera (ROSSETTO et al., 2010; VASCONCELOS, 2003).

Grandes quantidades de palhada são depositadas anualmente no campo. Estima-se que, na safra de 2016/2017, segundo a Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2016), a produção de cana-de-açúcar seja de 684,77 milhões de toneladas. Assim, teoricamente, tem-se a adição de, aproximadamente, 95,9 milhões de palha no campo.

Estima-se que a quantidade de palhada disponível em 2030 seja de, aproximadamente, 160 milhões de toneladas (Figura 7), considerando a evolução da produção de cana-de-açúcar no Brasil (EPE, 2007).

Figura 7 – Projeção da produção de cana-de-açúcar e disponibilidade de palha no Brasil até 2030.



Fonte: adaptado de EPE (2007)

Apesar dos benefícios da presença da palhada da cana-de-açúcar sobre o solo, esse colchão de biomassa formado ao longo dos anos poderá acarretar danos à própria cultura (FURLANI NETO et al., 1997). De acordo com Vasconcelos e colaboradores (2003), esse volume de palhada sobre a soqueira pode causar dificuldade para sua emergência, resultando, assim, em falha na rebrota. Orlando Filho, Macedo e Tokeshi (1994) encontraram redução de 52% da produtividade final, estudando a variedade SP71-6163.

Para melhor aproveitamento energético e agrônômico da palhada da cana-de-açúcar, estudos foram realizados para determinação da quantidade de biomassa ideal para se deixar no campo e, conseqüentemente, do restante a ser designado para sua recuperação. De acordo com resultados obtidos por Aquino e Medina (2014), é possível deixar 50% da palha no campo sem afetar o desenvolvimento da cultura.

Partindo dessas informações, devem ser estudadas as formas e o custo das operações para a recuperação dessa importante fonte de energia da cana-de-açúcar, sendo esta matéria-prima direcionada para a produção de bioenergia e biocombustíveis.

3.3.1 Recolhimento da Palhada

O aproveitamento da palhada, em larga escala, passa pelo desenvolvimento de um sistema que possibilite o transporte da biomassa do campo para a usina, sendo fundamental o estudo de viabilidade econômica do processo (PIEROSI; FAGUNDES, 2016)

Importantes trabalhos foram desenvolvidos por Hassuani et al. (2005); Michelazzo e Braunbeck (2008), abordando as possíveis formas de recolhimento da palhada no campo. Segundo os últimos autores, as dificuldades encontradas na época eram os equipamentos, que possuíam baixa capacidade operacional e custos elevados, por serem equipamentos adaptados, mas, originalmente, projetados para colheita de forragem.

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, reduzindo o custo de recolhimento da palhada e, conseqüentemente, o custo da energia elétrica produzida a partir dessa fonte.

As diferentes rotas de recolhimento, de acordo com os autores Hassuani et al. (2005) e Michelazzo; Braunbeck (2008), podem ser classificados: Picado a granel; Enfardamento; Compactação (briquetagem e peletização) e Colheita Integral (com limpeza parcial ou total).

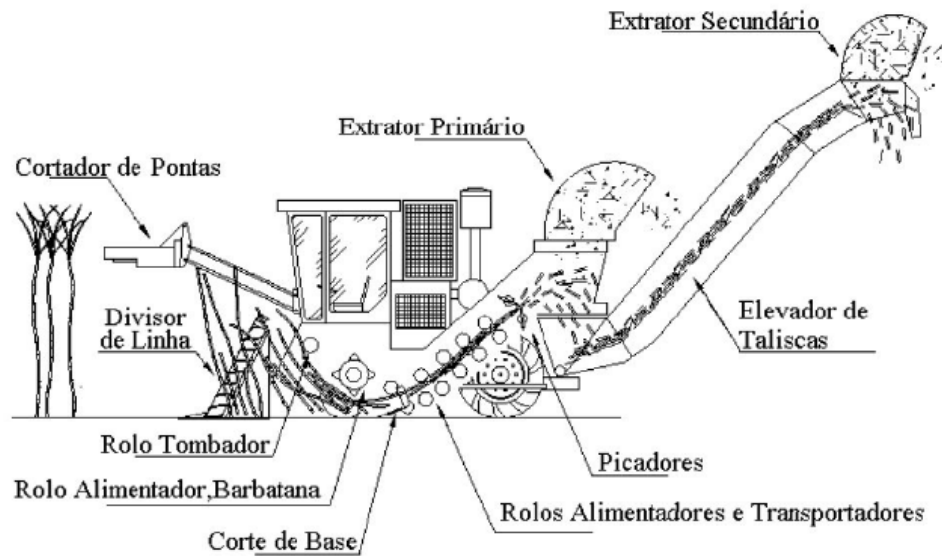
No entanto, somente duas rotas de recolhimento da palhada se destacam atualmente: a rota que transporta simultaneamente a palha da cana junto com a cana picada, em sistemas denominados Sistemas de Limpeza Parcial, com separação da palha e dos colmos na própria usina, em unidades de limpeza a seco; e a rota de enfardamento (PIEROSI; FAGUNDES, 2016).

3.3.2 Sistema de Limpeza Parcial

Segundo Marchi e colaboradores (2005), a rota de limpeza parcial baseia-se na redução da limpeza da cana, no processo da colheita, para transportar maiores quantidades de palha junto com a cana, deixando parte da palha no solo. Isso é possível por intermédio da redução da velocidade de rotação do extrator primário ou eliminação do uso do extrator secundário. Os extratores são

responsáveis pela remoção das impurezas vegetais e integram o sistema de limpeza da colhedora, como são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Esquema de uma colhedora de cana-de-açúcar



Fonte: Neves et al. (2003)

Nesses sistemas de limpeza parcial, a eficiência de limpeza das unidades a seco é fundamental para a separação da palha e cana picada através da ventilação, para posteriormente, a palha ter condições de ser misturada ao bagaço para queima nas caldeiras, por exemplo.

Copersucar (1999) e Michelazzo (2005) estudaram diversas rotas para o recolhimento da palha da cana e, entre essas rotas, pesquisaram o custo da colheita conjunta da cana com a palha, chamada colheita integral, onde há a necessidade de separação das biomassas nas unidades industriais. Seguem na tabela 1 os resultados obtidos pelos estudos:

Tabela 1 – Comparação entre os custos da palha no sistema de recuperação de colheita integral (US\$ t⁻¹)

Sistema de recuperação	Custos	Autor
Colheita Integral*	6.87	Michelazzo (2005)
Colheita Integral parcial*	7.57	Copersucar (1999)
Colheita Integral**	26.87	Copersucar (1999)

*uma fração da palha é coletada, sendo o restante devolvido ao solo.

**Colheita e transporte de 100% dos colmos juntamente com a palha.

As diferenças encontradas entre os autores devem-se ao fato que o custo total do transporte encontrado por Michelazzo (2005), foi dividido de acordo com a carga, sendo assim, foram atribuídos apenas 20% do custo do transporte à palha, sendo o restante, 80%, atribuídos ao transporte dos colmos; diferente do encontrado por Copersucar (1999), que atribuiu o valor total ao custo de transporte (palha e colmos).

A colheita integral parcial apresenta bons indicadores, o que possibilitará o uso desse sistema de colheita e recuperação da palha no futuro. De acordo com Braunbeck e Albrecht Neto (2010), há necessidade de desenvolvimento de tecnologias e processos para alavancar essa prática, como a criação de novos conceitos de colhedoras, de aumento da eficiência do processo de limpeza a seco, além de estudo dos custos referentes a outras operações no processo de recuperação da biomassa, como os custos da unidade de limpeza, estocagem e adequação da palhada para os processos industriais.

Entretanto, a adoção dessa prática muda o conceito de colheita, transporte e, principalmente, de recepção de cana-de-açúcar até a usina, conhecida desde 1950, onde se iniciou o desenvolvimento dessa tecnologia, sendo aperfeiçoada durante os anos. O que facilita, no primeiro momento, a recuperação da palha da cana através da rota de enfardamento, onde não há necessidade da adequação da planta industrial, pois, colmos e palhas chegam separados até a usina (BRAUNBECK; MAGALHÃES; GARCIA, 2008).

3.3.3 Enfardamento da Palhada

A palhada é liberada pelas colhedoras de cana-de-açúcar, formando uma camada de espessura não uniforme (MICHELAZZO; BRAUNBECK, 2008), de baixa densidade, sendo o enfardamento uma grande alternativa para o seu recolhimento, o que aumenta a densidade e transforma a biomassa em unidades uniformes, os fardos (SARTO; HASSUANI, 2005).

Para o seu recolhimento, é necessário ocorrer a secagem, cujo tempo necessário é de quatro a sete dias após a colheita. Vale ressaltar que não é o período de exposição ao sol que é o mais relevante nesse processo, e sim a umidade do material. A palhada após a colheita da cana-de-açúcar tem em média 40% de teor de umidade, sendo ideal o transporte da biomassa com teores próximos de 10 a 15% (SARTO; HASSUANI, 2005).

Pierossi e Fagundes (2016) relatam que a umidade do material é essencial para a redução dos custos da operação de enfardamento, visto que é uma forma de garantir maior adensamento energético (carregar mais matéria-prima e menor teor de água para usina), além de evitar problemas operacionais, como interrupções por embuchamentos.

Após esse período, tem-se as seguintes sequências operacionais (PIEROSI; FAGUNDES, 2016): aleiramento, enfardamento, recolhimento dos fardos, carregamento dos fardos e transporte.

Como no processo de aleiramento, praticamente, toda a palhada é concentrada em uma leira e apenas é desejável o recolhimento de 50% dessa quantidade (AQUINO et al., 2014), é necessário adicionar a operação de desaleiramento, pois, caso não realizada, haverá problemas com a brotação das touceiras que estão sob a leira (VASCONCELOS et al., 2003).

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, possibilitando a queima na caldeira.

3.3.3.1 Aleiramento

O aleiramento é a primeira operação do processo de recolhimento da palha da cana-de-açúcar. Tem como objetivo a formação das leiras, acumulando-se a biomassa, de modo que garanta o fluxo de alimentação da enfardadora (COPERSUCAR, 1999).

Ressalta-se que a operação de aleiramento é a principal responsável pela contaminação da palhada com impurezas minerais (BRAUNBECK; MAGALHÃES; GARCIA, 2008).

A largura de trabalho do implemento é de suma importância na operação, tendo no mercado modelos que trabalham em faixas de 3 a 15 metros, o que afeta diretamente o desempenho e o custo da operação (PIEROSI; FAGUNDES, 2016). O modelo mais usual de aleiramento da palhada no campo é o aleirador de dedos (Figura 9).

Figura 9 – Aleirador de dedos em operação no canavial



Fonte: o próprio autor

3.3.3.2 Enfardamento

Posteriormente ao processo de formação das leiras, é efetuado o processo de enfardamento da palhada no campo. As enfardadoras recolhem a palhada e efetuam compressão mecânica, visando o adensamento do material (MICHELAZZO; BRAUNBECK, 2008).

Na confecção dos fardos, a palhada compactada é amarrada com fios de polipropileno de alto desempenho. Os fardos são automaticamente ejetados da enfardadora para o campo à medida que são produzidos (Figura 10), permanecendo sobre o solo até serem recolhidos e transportados para local específico (BRAUNBECK; MAGALHÃES; GARCIA, 2008).

Figura 10 – Enfardadora da palhada da cana-de-açúcar em operação



Fonte: o próprio autor

Os modelos de enfardadoras de palhada de cana-de-açúcar foram desenvolvidos, inicialmente, para o enfardamento de feno para a alimentação animal. Eram máquinas de baixa capacidade operacional e elevado custo, sofrendo melhoramentos no decorrer dos anos (MICHELAZZO; BRAUNBECK, 2008).

São encontrados no mercado diversos tipos de enfardadoras, diferenciando-as devido à forma e tamanho dos fardos produzidos, como as enfardadoras de fardos cilíndricos e enfardadoras de fardos retangulares, pequenos ou grandes. Já no caso do tamanho dos fardos, podem ser encontrados vários modelos, com dimensões que variam de 0,45 x 0,35m até 1,20 x 0,90 m, com comprimento máximo de 2,5 m para fardos retangulares, e fardos cilíndricos com diâmetro variável de 0,9 a 1,8m, e largura máxima de 1,6m (PIEROSSI; FAGUNDES, 2016).

Para o enfardamento da palhada da cana-de-açúcar, Sarto e Hassuani (2005) recomendam a utilização de enfardadora de fardos retangulares grandes, pois possui maior capacidade operacional, maior preenchimento do espaço disponível nos veículos de transporte pelos fardos e maior facilidade de operação com restos de colmos e com a própria palhada.

O enfardamento é a etapa mais importante e de maior custo no ciclo de recolhimento da palhada, devido ao elevado preço de aquisição da enfardadora (LEMOS et al., 2014).

3.3.3.3 Recolhimento dos fardos

Nessa fase da operação, os fardos depositados no campo pela enfardadora devem ser recolhidos e acumulados, onde serão empilhados em áreas pré-determinadas, para, posteriormente, serem carregados pelos equipamentos de transporte para a usina. Essa operação visa à minimização da compactação dos canaviais, evitando, principalmente, o pisoteio da soqueira da cana-de-açúcar (PIEROSSI; FAGUNDES, 2016).

Existem diversos equipamentos que podem realizar o recolhimento dos fardos. Um exemplo desse equipamento está na figura 11: uma pinça mecânica recolhe os fardos e os dispõe sobre a carreta acumuladora.

Figura 11 – Operação de recolhimento dos fardos



Fonte: o próprio autor

3.3.3.4 Carregamento dos fardos

O carregamento dos fardos é feito a partir das pilhas montadas nas áreas pré-determinadas. Com o auxílio de manipuladores ou de tratores, os fardos são transferidos para os veículos, que farão o transporte até a usina. O equipamento visa facilitar a colocação dos fardos nas laterais do conjunto de transporte, reduzindo os custos do mesmo, escolhendo um implemento adequado à sua capacidade efetiva, aumentando a produtividade da operação (PIEROSI; FAGUNDES, 2016).

Figura 12 – Operação de carregamento dos fardos



Fonte: Implanor (2016)

3.3.3.5 Transportes dos fardos

O transporte dos fardos (Figura 13) pode ser efetuado por diversos tipos de composições rodoviárias, dos mais simples, como caminhão com carrocerias, a veículos de cargas, desde que respeitem as dimensões máximas definidas pela legislação brasileira para veículos e combinações de veículos de cargas, que estão descritas nas Resoluções nº 210/06 e 211/06 do Contran (Conselho Nacional de Trânsito), conforme Tabela 2:

Tabela 2 – Dimensões máximas permitidas para veículos e combinações de veículos de cargas

Composições rodoviárias	Altura	Largura	Comprimento
Simplex (caminhão)	4,40 m	2,60 m	14,00 m
Articulado (cavalo mecânico e semirreboque)	4,40 m	2,60 m	18,15 m
Com reboque (Romeu-e-Julietta)	4,40 m	2,60 m	19,80 m
CVC* (rodotrem e bitrem)	4,40 m	2,60 m	30,00 m

* Combinações de Veículos de Carga.

Figura 13 – Transportes dos fardos do campo para a indústria sucroenergéticas



Fonte: o próprio autor

3.3.3.6 Processamento industrial

Ao chegar à usina, os fardos passam por algumas operações que visa à adequação da biomassa para fins energéticos. O descarregamento e o desenfundamento são operações comuns para o aproveitamento da energia da palhada.

O descarregamento dos fardos é a operação em que os fardos são transferidos dos veículos de transportes para a usina. Comumente são empilhados nos pátios, quando não serão utilizados imediatamente, conforme Figura 14. Utiliza-se o mesmo princípio e tipos de maquinários da operação de carregamento dos fardos (PIEROSSI, FAGUNDES, 2016).

No caso de armazenamento da palhada em campo aberto, há a necessidade de se fazer a cobertura com algum tipo de manta na biomassa, com o intuito de diminuir as chances de incêndios acidentais, devido aos baixos níveis de umidade da palhada (LINERO, 2012).

Figura 14 – Descarregamento dos fardos de palhada em pátio aberto.



Fonte: SINDEPAC (2016)

Após o descarregamento dos fardos, pode ser empregada logo em seguida a operação de desenfundamento do material. Esse processo pode ser realizado por um triturador (Figura 15), permitindo ao mesmo tempo, desagregar e separar essa palhada, além de deixá-la em dimensões semelhantes às do bagaço, necessário para ser empregada nas caldeiras em sistemas de cogeração (LINERO, 2012).

Ao lado do triturador/desenfundador, os materiais depois do processo passam por uma esteira de arraste de impurezas até cair na esteira de retorno, que os levam até a esteira de alimentação das caldeiras ou, simplesmente, podem ser armazenados junto com o bagaço no pátio da usina.

Figura 15 – Exemplo de desenfundador de fardos de palhada de cana-de-açúcar



Fonte: o próprio autor

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 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 3), com capacidade de moagem de dois milhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano. As características da usina estão listadas na tabela 3.

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 4.

Tabela 3 – Parâmetros agrônômicos da usina de referência utilizada no estudo e sua disponibilidade de biomassa (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 ⁻¹
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 ⁻¹
Total de bagaço processado safra	500.000	T
Produtividade de palhada* (base seca)	140	kg tc ⁻¹
Umidade da palhada	15,00	%
Produtividade palhada (base umida)	164,71	kg tc ⁻¹
Percentual de recolhimento **	50	%
Quantidade de palhada recolhida	7,00	t ha ⁻¹
Total de palhada recolhida safra	164.706	t
Raio médio do canavial	20	km

* Ref. Paes; Oliveira, 2005

** Ref. Aquino et al., 2016

Tabela 4 – 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* (cv)	Largura operacional** (m)	Velocidade (km h ⁻¹)	Ciclo (s)
Aleiramento/ Desaleiramento	Trator	Valtra BM 100	162.000,00	100	9,2 [▲]	9	n.a. ^{***}
	Implemento	Aleirador New Holland AL1290	160.000,00	65			
Enfardamento	Trator	Valtra BT 210	350.000,00	210	▲▲	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 [•]
	Implemento	Carreta recolhedora 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 autopropelido	Triturador CBI 5400	3.330.000,00	765	n.a.	n.a.	n.a.

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

** Informação obtida nos catálogos dos fabricantes.

*** n.a.: não se aplica.

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

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

• Capacidade de carga de 12 fardos por ciclo; porém, considerados 8 fardos por ciclo devido à dificuldade em formar pilhas maiores.

De acordo com o sistema de enfardamento escolhido, os fardos produzidos terão as características listadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características físicas dos fardos de palhada de cana-de-açúcar

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

A partir dessas informações, com os indicadores gerenciais (Tabela 6) e parâmetros assumidos (Tabela 7), 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). As tabelas e as equações estão listadas abaixo:

Tabela 6 – Indicadores gerenciais para cálculo do tempo disponível (TD) para realização de cada operação e ritmo operacional (RO)

Variável	Valor	Unidade
N° de dias total (NT)	210	dias
N° de domingos e feriados (NDF)	0*	dias
N° de dias úteis impróprios ao trabalho das máquinas (NDUI)	30	dias
Jornada de trabalho (JT)	10	h
Eficiência gerencial (EG)	0,6	
Área	23529	ha

*Não há paradas aos domingos e feriados

Tabela 7 – Parâmetros 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
Tempo perdido	4	4	4	h
Tempo operacional efetivo	6	6	6	h
Tempo total de campo	10	10	10	h
Eficiência de campo	60	60	60	%
Velocidade de trabalho	9	6,2	9	km h ⁻¹
Largura de trabalho	7,5	7,5	7,5	m

Equação 1 – Tempo disponível para realização da operação

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

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.

Equação 2 – Ritmo operacional

$$RO = Ar/TD$$

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

Equação 3 – Capacidade de campo efetiva

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

Onde CCE é a capacidade de campo efetiva, em ha h⁻¹; LE é a largura de trabalho efetiva, em m; VE é a velocidade de trabalho efetiva, em km h⁻¹.

Equação 4 – Eficiência de campo.

$$Efc = TOE/TTC$$

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)

Equação 5 – Capacidade de campo operacional.

$$CCO = CCE \times Efc$$

Onde CCO é a capacidade de campo operacional, em ha h⁻¹; CCE é capacidade de campo efetiva, ha h⁻¹; Efc é a eficiência de campo, em decimal.

Equação 6: Número de conjuntos para as operações de aleiramento, enfardamento e desaleiramento.

$$NC = RO/CCO$$

Onde NC é o número de conjuntos; RO é o ritmo operacional, em ha h⁻¹; CCO é a capacidade de campo operacional, em ha h⁻¹.

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 8, listados abaixo:

Equação 7 – Capacidade teórica.

$$CT = 3600 \times Massa/Ciclo \times 1000$$

Onde CT é a capacidade teórica, em t h⁻¹; Massa é a quantidade de fardos, em kg; Ciclo é o tempo gasto da operação, em segundos (s).

A partir da capacidade teórica, determinou-se a capacidade operacional, em t h⁻¹:

Equação 8 – Capacidade operacional

$$CO = CT \times Ef$$

O número de conjuntos foi determinado:

Equação 9 – Número de conjuntos para as operações agrícolas cíclicas

$$NC = CN/CO$$

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

Tabela 8 – Valores para cálculo de capacidade teórica das operações cíclicas de campo

Parâmetros	Recolhimento dos fardos	Carregamento	Descarregamento	Unidade
Tempo perdido*	6	6	6	h
Tempo operacional efetivo	18	18	18	h
Tempo total de campo	24	24	24	h
Eficiência	75%	75%	75%	%
Ciclo	67,5**	60	60	s

*Tempo para os três turnos

**Ciclo dividido por 8 fardos

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 canavial da usina (Tabela 3), nas características dos fardos (Tabela 5), no tempo disponível por viagem e na capacidade de carga unitária dos caminhões considerados (Tabela 9).

Tabela 9 – 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	horas
Parada total de almoço	180	minutos
Abastecimento – 1 vez ao dia	30	minutos
Troca de turno – 15 min por turno	45	minutos
Velocidade média carregado e vazio	40	km h ⁻¹
Carregamento e Descarregamento	100	minutos
Capacidade volumétrica de carga	156,6	m ³
Volume unitário dos fardos	2,7	m ³
Quantidade de fardos transportados	58	-
Massa unitária dos fardos	486	kg
Carga transportada	29,28	t

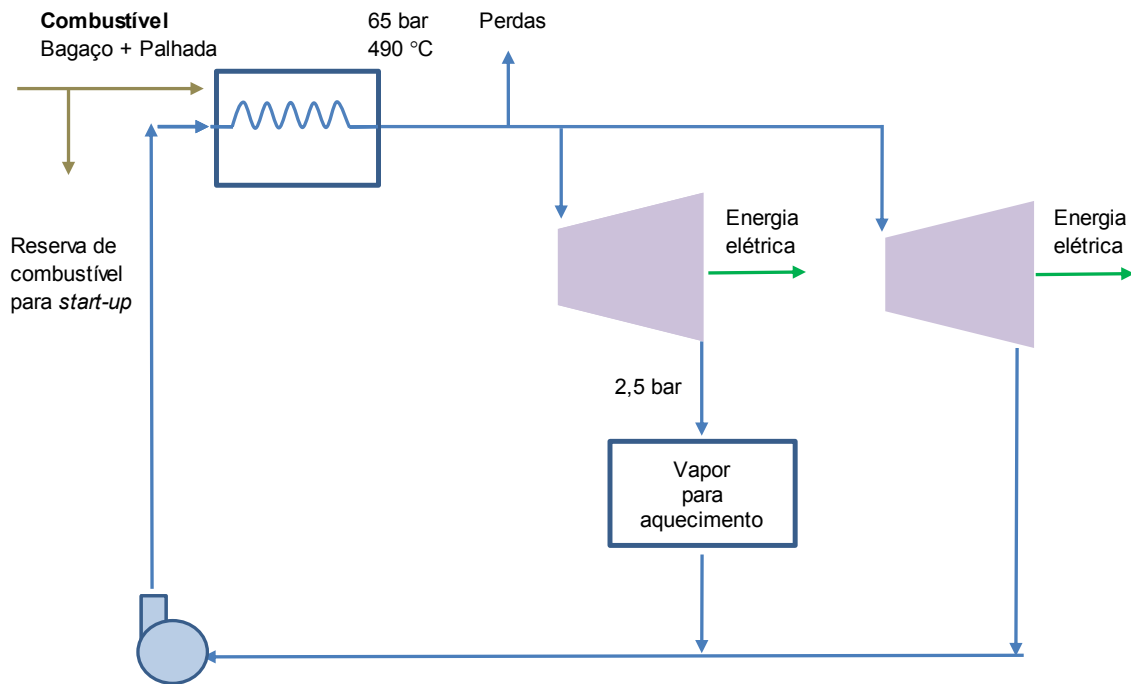
Para a operação de desenfundamento, foi considerado um triturador portátil a diesel com capacidade de 85 t h⁻¹, alocado no pátio de bagaço da usina.

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 à usina não ser dimensionada 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.

O sistema proposto (Figura 16) 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 alimenta 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.

Figura 16 – Representação esquemática do processo de cogeração com a utilização combinada dos combustíveis bagaço e palhada



Fonte: o próprio autor

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

Com essa configuração, a taxa de conversão é de 2 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 kW para a de extração e 4,0 kg por kW para a de condensação (PENCES, comunicação pessoal)¹.

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

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

¹ Comunicação pessoal com o funcionário da Dedini S/A Industrias de Base, Adilson Pences em 20/08/2016.

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.

4.2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

4.2.1 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 4), 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 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 4, já apresentada, e na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros para determinação do custo horário das operações.

Parâmetro	Valor	Unidade
Vida útil	10.000	h
Depreciação	1000	h
Valor de sucata	10	%
Custo do combustível	2,891	R\$ L ⁻¹
Tratorista	12,80*	R\$ h ⁻¹
Taxa de juros	14,00	% ao ano

*Dado obtido mediante a comunicação com trabalhadores da área

A depreciação foi calculada pela Eq. (10).

Equação 10 – Depreciação

$$D = P - S/V$$

Onde D é a depreciação, em R\$ h⁻¹; 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).

Equação 11 – Alojamento e seguros

$$AS = 0,02 P/t$$

Onde AS é alojamento e seguro, em R\$ h⁻¹; P é o preço de aquisição, em R\$; e t é o tempo de uso, h ano⁻¹.

Os juros foram calculados pela Eq. (12).

Equação 12 – Juros

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

Onde J é juros, em R\$ h⁻¹; P é preço de aquisição, em R\$; i é o juros ao ano (decimal); e t é o tempo de uso por ano, em h ano⁻¹.

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).

Equação 13 – Potência do motor

$$PotMotor = PotBT / 0,5$$

Equação 14 - Combustível

$$C = 0,25 x PotBT x Pcomb$$

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⁻¹.

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).

Equação 15 – Salário do tratorista

$$ST = (salario\ mensal\ x\ 13)/horas\ de\ uso\ por\ ano$$

Para a determinação dos custos de transporte, foi levantado o custo de aquisição (ano base de 2016) de um caminhão plataforma e de dois reboques canavieiros (Tabela 11). Os cálculos foram realizados por km t^{-1} , baseados no raio médio entre a usina e as áreas agrícolas.

Tabela 11 – Valores para composição do custo de transporte dos fardos de palhada de cana-de-açúcar

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

* Modelo Mercedes Benz Atron 2729 com 2 reboques canavieiros.

** % em relação ao preço de aquisição.

*** % em relação ao custo do combustível.

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.

4.2.2 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 (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%.

4.3 DETERMINAÇÃO DA POPULAÇÃO ATENDIDA PELO PROJETO

Com o total de energia exportada e com o consumo médio per capita nacional, foi determinada a população que poderá ser atendida pelo projeto. Relacionando esse total de habitantes com o Censo Populacional de 2010 (IBGE, 2010), foram considerados os municípios canavieiros e vizinhos à provável usina base do projeto no Norte do Paraná que poderão ser abastecidos.

4.4 CÁLCULO DOS EMPREGOS DIRETOS PROPORCIONADOS PELO RECOLHIMENTO DA PALHADA

Pelo 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.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 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⁻¹.

Conforme as capacidades determinadas, os números de conjuntos (Tabela 12) descrevem a frota necessária de tratores e implementos para as operações, composta por seis conjuntos para o aleiramento, oito para o enfardamento, seis para o desaleiramento, quatro para o recolhimento dos fardos, três para o carregamento e três para o descarregamento dos 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 (valor já calculado através do ajuste do teor de umidade em 15% e com a proporção de 50% do volume de palhada que será recolhido). Como a relação palhada/bagaço é de 1,91, a quantidade de palhada corresponde a 157,38 kg de bagaço. Dessa forma, tem-se o total de 407,38 kg de biomassa, 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 kW 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.

Tabela 12 – Capacidades e número de conjuntos para as operações de recolhimento da palhada

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

5.2 ANÁLISE DOS CUSTOS

O investimento necessário para a aquisição da frota agrícola é de R\$ 20.528.000,00, conforme consta na Tabela 13. 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 14), observa-se que o maior custo é para a atividade de enfardamento, o que também foi verificado por Delivand et al. (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).

Tabela 13 – Descrição da frota e o investimento na área 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 autopropelido	Triturador CBI-5400	3.330.000,00	1	3.330.000,00
Transporte da palhada	Veículo	Caminhão MB Atron 2729 – Treminhão	416.000,00	8	3.328.000,00
TOTAL					20.528.000,00

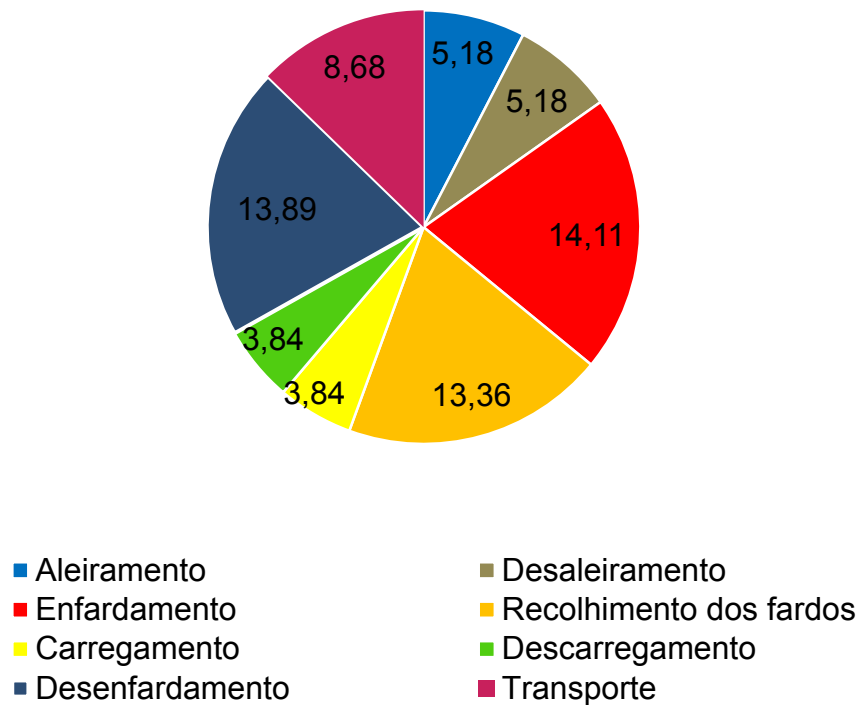
Tabela 14 – Custos horários para as operações de recolhimento e desfardamento da palhada (R\$ h⁻¹), considerando depreciação (D); alojamentos e seguros (AS); juros (J); reparos e manutenções (RM); combustível (C); lubrificantes (L); fios para a operação de enfarmento (F) e salário do tratorista (ST)

Operações	Item	D	AS	J	RM	C	L	F	ST	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	299,7	66,60	256,41	333,00	184,30	27,65	-	12,80	1180,46	1180,46

O custo do enfardamento obtido foi de R\$ 14,11, cerca de US\$ 4,41 (1 US\$ = R\$ 3,20), estando 8,4% abaixo do valor encontrado por Lemos e colaboradores (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 et al. (2014) e Nguyen et al. (2016) obtiveram valores de US\$ 11,25 e US\$ 12,00, respectivamente. As diferenças dos custos entre os tipos de biomassa podem ser explicadas pela 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 17. Os custos das operações agrícolas somam R\$ 59,40 por tonelada e o transporte R\$ 8,68 por tonelada, totalizando R\$ 68,08. Hassuani e colaboradores (2005) obtiveram o custo de US\$ 18,49 base matéria seca, em que, ajustando-se para o teor de umidade de 15%, se tem US\$ 21,75. Considerando o cambio de 1US\$ = 3,20, tem-se o valor de R\$ 69,60, cerca de 2,18% maior que o valor encontrado.

Figura 17 – Custos agrícolas e de transporte da palhada em R\$ t⁻¹



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 de reais, totalizando o investimento na área industrial de R\$ 211,1 milhões de reais.

O montante do investimento dividido pela potência instalada (70 MW) resulta em R\$ 3.016,00 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 15, onde se observa que o combustível (palhada) é responsável por 40% do custo de geração da energia.

Tabela 15 – Custo de geração da energia-elétrica a partir da palhada de cana-de-açúcar

Item	Quantidade	Preço	Custo anual (R\$)	Custo (R\$ kWh ⁻¹)
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
Matéria prima (palhada)	164.706 t	R\$ 68.08 t ⁻¹	11.213.343,59	50,10
Total			28.101.343,59	125,55

O preço de venda mínimo da energia elétrica foi calculado em R\$316,64 MWh. Esse valor está 62,5% maior do que o preço médio comercializado no leilão de energia A5 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 Empresa de Pesquisa Energética - 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 (EPE, 2016).

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.

5.3 POPULAÇÃO A SER ATENDIDA COM O APROVEITAMENTO DA PALHADA

O consumo residencial de energia elétrica per capita no Brasil é, segundo a EPE (2013), de 2.545 kWh ano⁻¹. Com a energia produzida pelo projeto, 223.824 MWh, consegue-se atender a 87.946 habitantes durante um ano, o que corresponde à população do local proposto para receber o projeto e de mais 6 municípios canavieiros e vizinhos (Tabela 16).

Tabela 16 – Municípios que podem ser atendidos com energia elétrica gerada pelo projeto de aproveitamento da palhada²

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 de habitantes	86.282

² Municípios em torno da usina (raio médio de 20 km).

5.4 GERAÇÃO DE EMPREGOS DIRETOS PROPORCIONADOS PELO RECOLHIMENTO DA PALHADA

Com o recolhimento da palhada, será necessária a criação de 96 novos empregos diretos (Tabela 17), vagas que poderiam ser ocupadas pelos cortadores de cana-de-açúcar, capacitados para essas operações, reduzindo o problema social ocasionado pela mecanização da colheita.

Tabela 17 – 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 de novos empregos					96

6 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.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resultados dos Leilões de Geração. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/resultados-de-leiloes>. > Acesso em: 22 nov. 2016.

AMARAL, F.C.S; TAVARES, S.R.L. Diferença do teor de fibra da cana-de-açúcar para fins energéticos motivada pelo bioma. Dados eletrônicos. — Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 25 p. - (Documentos, 159).

ANTUNES, J.F.G; Impactos ambientais das queimadas de cana-de-açúcar. **Cultivar**. 2015.

AQUINO, G. S. D. **Desenvolvimento e produção de cana-de-açúcar em sistema sob palhada**. 2012. 84 Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia). Universidade Estadual de Londrina

AQUINO, G.S.; MEDINA, C. C. Produtividade e índices biométricos e fisiológicos de cana-de-açúcar cultivada sob diferentes quantidades de palhada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 49, p. 173-180, 2014.

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 Agriculture Research**, v. 11, n. 7, p. 563-571, 2016.

ASSIS, W.F.T.; ZUCARELLI, M.C. Despoluindo Incertezas - Impactos Territoriais da Expansão de Agrocombustíveis e Perspectivas para uma Produção Sustentável. **O Lutador**. Belo Horizonte, 72 p., 2007.

BENEDINI, M.S.; DONZELLI, J.L. Colheita mecanizada de cana crua: caminho sem volta. **Revista Coplana**. Guariba – SP, p. 22-25, 2007.

BRASIL. Decreto nº 2.661 de 8 de julho de 1998. Regulamenta o parágrafo único do art. 27 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965 (código florestal), mediante o estabelecimento de normas de precaução relativas ao emprego do fogo em práticas agropastoris e florestais, e dá outras providências.. **Diário Oficial da União**, Brasília, 8 jul. 1998. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2661.htm>. Acesso em: 07 out. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço energético nacional - BEN. Brasília: MME, 2016

BRAUNBECK, O. A.; ALBRECHT NETO, E. Logística do transporte de matéria-prima e resíduos da cana-de-açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para a Produtividade e Sustentabilidade. Blucher, São Paulo, p. 487-504.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G. Avaliação Tecnológica da Mecanização da Cana-de-Açúcar. In: CORTEZ, L. A. B. (Ed.). **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade**. 1. São Paulo: Blucher, 2010. cap. 12, p.411-424.

BRAUNBECK, O. A.; MAGALHÃES, P. S. G.; GARCIA, M. O. Colheita e recuperação da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMES, E. O. (Coord.). Biomassa para energia. Campinas, SP: Unicamp, 2008. p. 63-91.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA – CCEE. Preços Médios. 2016, Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/precos_medios?_afLoop=252226409147802#%40%3F_afLoop%3D252226409147802%26_adf.ctrl-state%3D1bdq1dawb9_44> Acesso em: 21 nov. 2016.

CARVALHO, E. **Perspectivas da agroenergia**. São Paulo: ÚNICA, 2007.

CENTRO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS DO SETOR SUCROENERGÉTICO E BIOCOMBUSTÍVEIS - CEISE. **Usinas podem produzir novos 1.000 MW/ano de bioeletricidade**. Disponível em: <<http://www.ceisebr.com/site/index.php/conteudo/visualizar/usinas-podem-produzir-novos-1.000-mwano-de-bioeletricidade>>. Acesso em: 18 de Setembro de 2016.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA – CENBIO. Fontes de biomassa. Disponível em: < <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/fontes-de-biomassa>>. Acesso em: 18 dez. 2016

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar, V. 3 – Safra 2016/17, N.2 – Segundo Levantamento, Brasília, 72p, ago. 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_08_18_12_03_30_boletim_cana_portugues_-_2o_lev_-_16-17.pdf . > Acesso em: 3 nov. 2016.

COOPERATIVA DE PRODUTORES DE CANA, AÇÚCAR E ÁLCOOL DO ESTADO DE SÃO PAULO. Projeto BRA/96/G31 – Enfardamento da palha. In: Projeto BRA/96/G31: Geração de energia por biomassa, bagaço da cana-de-açúcar e resíduos. **STAB**, Piracicaba, v. 17, n. 1, p. 66-,68, jan./fev. 1999.

COOPERCITRUS. A versatilidade da palha na cultura da cana-de-açúcar. 2015. Disponível em: < <http://www.coopercitrus.com.br/?pag=revista&p=materia&codigo=6624> >. Acesso em: 8 ago. 2015.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S; AYARZA, J.A.C. (Org). Biomassa no Brasil e no Mundo. In:_____. Biomassa Para Energia. Campinas-SP: Editora Unicamp, 2008.

COSTA NETO, J.D. A cana em tempo bom. **Revista CREA-PR**, Curitiba, n. 41, p.16-19 de out. 2006.

DANIELS, J.; ROACH, B. T. Chapter 2 - Taxonomy and Evolution. In: DON, J. H. (Ed.). **Developments in Crop Science**: Elsevier, v. Volume 11, 1987. p.7-84.

DAWSON, L.; BOOPATHY, R. Use of post-harvest sugarcane residue for ethanol production. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 9, p. 1695-1699, 2007.

DELGADO, A. A.; CESAR, M. A. A. **Elementos de tecnologia e engenharia do açúcar de cana**. 1977. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=rdYlkgEACAAJ> > Acesso em: 24 nov. 2015

DELIVAND, M. K.; BARZ, M.; GHEEWALA, S. H. Logistic cost analysis of rice straw for biomass power generation in Thailand. **Energy**, 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**, Oxford, v. 55, p.163-174, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE . Plano Nacional de Energia 2030. Rio de Janeiro: **EPE**, 2007. 408p. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20080111_1.pdf> Acesso em : 18 nov 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Anuário estatístico de energia elétrica 2013. 2013. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/20130909_1.pdf> Acesso em: 22 nov. 2016.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica. 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Documents/Energia%20Renov%C3%A1vel%20-%20Online%2016maio2016.pdf>. > Acesso em: 19 nov. 2016.

FILHO, J. O.; MACEDO, N.; TOKESHI, H. Seja o doutor do seu canavial. **Informações Agrônomicas**, v. 67, p. 1-16, 1994.

FOCO RURAL. Colheita mecanizada sem queima da palha da cana-de-açúcar. 2016. Disponível em: <http://www.focorural.com/detalhes/n/n/7864/Colheita_mecanizada_sem_queima_da_palha_da_canadeacucar.html> Acesso em: 3 nov 2016.

FOLHA DA REGIÃO. Estado limita queima da palha da cana. Disponível em: <<http://www.folhadaregiao.com.br/Materia.php?id=120512>> Acesso em: 1 nov 2016.

FURLANI NETO. et. al. Biomassa de cana-de-açúcar: energia contida no palhico remanescente de colheita mecânica. **Stab – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, v.15, p.24-27, 1997.

GOIÁS (Estado). Lei nº 15.834 de 23 de novembro de 2006. Dispõe sobre redução gradativa da queima da palha de cana-de-açúcar em áreas mecanizáveis e dá outras providências. Diário Oficial do Estado, Goiânia, 23 nov. 2006. Disponível em: < http://www.gabinetecivil.goias.gov.br/leis_ordinarias/2006/lei_15834.htm> Acesso em: 07 out. 2016.

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

IMPLANOR. Disponível em: <http://www.implanor.com.br/produtos2.php?cod=24> > Acesso em: 20 nov 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Censo 2010**. 2010 Disponível em: <http://www.censo2010.ibge.gov.br/apps/mapa/> > Acesso em: 24 out. 2016.

KOH, M.P.; HOI, W.K. Sustainable biomass production for energy in Malaysia. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, v.25, p. 517-529, nov. 2003.

LANDELL, M. G. A.; XAVIER, M. A.; ANJOS, I. A.; VASCONCELOS, A. C. M.; PINTO, L. R.; CRESTE, S. Potencialidade de novas variedades de cana-de-açúcar. In: MARQUES, M. O.; MUTTON, M. A.; AZANIA, A. A. P. M.; TASSO JUNIOR, L. C.; NOGUEIRA, G. A.; VALE, D. W. (Ed.). **Tópicos em Tecnologia Sucroalcooleira**. Jaboticabal: Gráfica Multipress Ltda., 2006. p. 17-30.

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

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

LIMA, M. A. P.; NATALENSE, A. P. P. Necessidade de pesquisa básica para cana e etanol. In: CORTEZ, L. A. B. (Ed.). **Bioetanol de Cana-de-Açúcar: P&D para Produtividade e Sustentabilidade**. 1. São Paulo: Blucher, 2010. cap. 16, p.150-170.

LINERO, F. A. B. Biomassa adicional para aumento da geração de eletricidade. Ribeirão Preto: 2012. (SINATUB – Curso de Caldeiras, Vapor e Geração de Energias Renováveis).

MAHMOUD, A., SHUHAIMI, M., ABDEL SAMED, M. A combined process integration and fuel switching strategy for emissions reduction in chemical process plants. **Energy**, v.34, p. 190-195, 2009.

MARCHI, A. S.; PIZZINATO, A. A. S.; ROCHA, D. E.; SILVA, J. E. A .R. Unberned cane harvesting with trash recovery routes. In: HASSUANI, S. J. et al. **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**. Piracicaba: PNUD-CTC, 2005.

MATO GROSSO DO SUL (Estado). Lei nº 3.357 de 9 de janeiro de 2007. Estabelece normas para a redução gradual da queima da palha da cana-de-açúcar, sem prejuízo da atividade agroindustrial canavieira e dá outras providências. Diário Oficial do Estado, Campo Grande, 9 jan. 2007. Disponível em: <http://www.udop.com.br/download/legislacao/meio/queima_palha_cana_acucar/lei_3357_queima_ms.pdf> Acesso em: 07 out. 2016.

MATOS, P. F.; PESSÔA, V. L. S. A modernização da agricultura no Brasil e os novos usos do território. Geo UERJ, Rio de Janeiro, v. 2, n. 22, 2011, p. 290 – 322. Disponível em: <http://www.epublicacoes.uerj.br/index.php/geouerj>. Acesso em: 08 abr. 2016.

MELLO IVO, W.M.P, SANTOS, J.R.; SANTIAGO, A.D.; PEREIRA, R.S.; SILVA, W.C. Produção de palhada da cana-de-açúcar, em áreas de colheita de cana crua e queimada nos tabuleiros costeiros de Alagoas. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E ÁGUA, 16. Aracaju, SE. **Anais**. Aracaju, SE: SBCS, 2006. CD-ROM.

MICHELAZZO, M. B. Análise de sensibilidade de seis sistemas de recolhimento de palhico de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) 2005. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, FEAGRI, Unicamp, Campinas, 2005.

MICHELAZZO, M. B.; BRAUNBECK, A. Análise de seis sistemas de recolhimento do palhico na colheita mecânica da cana-de-açúcar, **R. Bras. Eng. Agric. Ambiental**, v.12, n. 5, p. 546-552, 2008.

MINAS GERAIS (Estado). Decreto nº 39.792 de 5 de Agosto de 1998. Regulamenta a Lei de nº 10.312, de 12 de novembro de 1990, que dispõe sobre a prevenção e combate a incêndio florestal e dá outras providências. Diário Oficial do Estado, Belo Horizonte, 5 ago. 1998. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=687>> Acesso em: 07 out. 2016.

MOZAMBANI, A. E.; PINTO, A. S.; SEGATO, S. V.; MATTIUZ, C. F. M. História e Morfologia da cana-de-açúcar. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2006. 415p.

NEVES, J.L.M.; MAGALHÃES, P.S.G.; MORAES, E.E.; ARAUJO, F. Avaliação de perdas invisíveis de cana-de-açúcar nos sistemas da colhedora de cana picada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p.539-46, 2003.

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**, v. 198, p. 16-22, 2016.

NOGUEIRA, L. A. H.(Org.). **Bioetanol de cana-de-açúcar**: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES, 2008. 316p.

NOVACANA. Disponível em: <https://www.novacana.com/cana/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo/> > Acesso em: 07 mar 2016a.

NOVACANA. As usinas de açúcar e etanol no Brasil. 2016. Disponível em: <https://www.novacana.com/usinas-brasil/>>. Acesso em: 21 out. 2016b.

OLIVEIRA M. W.; TRIVELIN P. C. O.; GAVA G.J.C., PENATTI C.P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. *Scientia Agricola*, vol.56 n.4 Piracicaba Oct./Dec. 1999.

OLIVEIRA, M.W.; BARBOSA, M.H.P.; MENDES,L.C.; DAMASCENO , C.M.; Matéria seca e nutrientes da palhada em dez variedades de cana-de-açúcar. **STAB**, Açúcar, Álcool e subprodutos, Piracicaba, vol.21, nº3. 30-31, 2011.

PACHECO, E. P. Seleção e Custo Operacional de Máquinas Agrícolas. **Embrapa Acre**, Rio Branco-AC, 2000.

PAES, L. A. D.; OLIVEIRA, M. A. 2005. **Potential trash biomass of the sugar cane plant**. p. 19-23. In: HASSUANI, S. J.; LEAL, M. R. L. V.; MACEDO, I. C., eds. Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash. Centro de Tecnologia Canavieira, Piracicaba, SP, Brazil. 216 p., 2005.

PAINTER, K. Costs of owning and operating farm machinery in the Pacific Northwest. 2011. Disponível em: <http://www.cals.uidaho.edu/edcomm/pdf/pnw/pnw03436.pdf>. > Acesso em: 18 set. 2016.

PARANÁ (Estado). Decreto nº 10.068 de 6 de Fevereiro de 2014. Estabelece critérios, prazos e procedimentos para adequação ambiental das Usinas de Beneficiamento de cana-de-açúcar para produção de Etanol, Açúcar e Energia Elétrica e dá outras providências.. Diário Oficial do Estado, Curitiba, 6 fev. 2014. Disponível em: <http://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/pesquisarAto.do?action=exibir&codAto=113500&indice=1&totalRegistros=1>> Acesso em: 07 out. 2016.

PIERROSSI, M.A.; FAGUNDES, S.A. **Enfardamento da palha**. In: SANTOS, F.; BORÉM, A. (Eds.). Cana-de-açúcar: do plantio à colheita. Viçosa: UFV, 2016. p.255-276.

RÍPOLI, T. C. C.; WALTER FRANCISCO, M. J.; RÍPOLI, M. L. C. Energy potential of sugar cane biomass in Brazil Potencial da energia de biomassa da cana-de-açúcar no Brasil. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 4, p. 677-681, 2000.

RIPOLI, T. C.C.; MIALHE, L. G.; BRITO, J. O. Queima de canavial ; o desperdicio nao mais admissivel. **Álcool e açúcar**, São Paulo, v. 10, n. 54, p. 18-23, 1990.

RODRIGUES, A. P. Prefácio. In:SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. Bioenergia e Biorrefinaria: Cana-de-açúcar e Espécies Florestais. Viçosa-MG:Os Editores,2013.

ROSILLO-CALLE, F; CORTEZ, L.A.B. Towards ProAlcool II - A review of the Brazilian bioethanol programme. **Biomass & Bioenergy**. Pergamon-elsevier Science Ltd, v. 14, n. 2, n. 115, n. 124, 1998.

ROSSETTO, R.; DIAS, F. L. F.; VITTI, A. C.; CANTARELLA, H. Manutenção da Fertilidade e Recuperação dos Solos na Cultura da Cana-de-Açúcar. In: Cortez, L. A. B. (ed.). **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para a Produtividade e Sustentabilidade**. São Paulo: Blucher, 2010. p.381-404.

SAIDUR, R.; ABDELAZIZ, E.A; DEMIRBAS, A.; HOSSAIN, M.S; MEKHILEF, S. A review on biomass as a fuel for boilers. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2262-2289, 2011.

SANTOS, F. A.; DE QUEIRÓZ, J. H.; COLODETTE, J. L.; FERNANDES, S. A.; GUIMARAES, V. M.; REZENDE, S. T. Potencial da palha de cana-de-açúcar para produção de etanol. **Potential of sugarcane straw for ethanol production**, v. 35, n. 5, p. 1004-1010, 2012.

SÃO PAULO (Estado). Lei n. 11.241, de 19 de setembro 2002. Dispõe sobre eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. Diário Oficial [do] Estado de São Paulo, São Paulo, SP, 20 set. 2002. Disponível em: <<http://www.al.sp.gov.br/norma?id=217>>. Acesso em: 22 jan. 2016.

SARTO, C. A.; HASSUANI, S. J. Trash recovery: baling machines. In: HASSUANI, S. J.; LEAL M. R. L. V.; MACEDO I. C. (Eds.), **Biomass power generation: sugar cane bagasse and trash**, Piracicaba: PNUD-CTC, 2005, p. 217.

SASAKI, N., KNORR, W., FOSTER, D.R., ETOH, H., NINOMIYA, H., CHAY, S., KIM, S., SUN, S. Woody biomass and bioenergy potentials in Southeast Asia between 1990 and 2020. **Appl Energy**, v. 86, p. 140-150, 2009.

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**, Oxford, v. 34, p. 1065-1078, 2010.

SINDEPAC. Disponível em: <<http://sindepac.com.br/?p=9176>> Acesso em: 21 nov 2016.

SUGARCANECROPS. Distribuição Global de Cana-de-açúcar. 2016. Disponível em: <<http://www.sugarcanecrops.com/p/introduction/>> Acesso em: 05 mar 2016.

SZMRECSÁNYI, T. **O Planejamento da agroindústria canavieira do Brasil (1930 - 1975)**. São Paulo: Hucitec, 1979.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR-UNICA -ÚNICA. **Relatório Sustentabilidade. 2016**. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/sustentabilidade>>. Acesso em: 15 out. 2016

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR-UNICA. Protocolo Agroambiental. São Paulo, 2007. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/protocolo-agroambiental/> >. Acesso em: 18 jun. 2015.

VASCONCELOS, A. C. M.; CASAGRANDE, A. A.; PERECIN, D.; JORGE, L. A. C.; LANDELL, M. G. A. Avaliação do sistema radicular da cana-de-açúcar por diferentes métodos Evaluation of the sugarcane root system with different methods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 5, p. 849-858, 2003.